



**Universidade Federal  
de Campina Grande**

**Estratigrafia mecânica e análise estrutural aplicadas ao estudo de  
bandas de deformação na Bacia Rio do Peixe, NE Brasil**

**Autora:**

**Lorena Sávilla Brito Oliveira**

**Orientador:**

**Prof. Dr. Francisco César Costa Nogueira**

**Campina Grande – Paraíba**

**Março de 2019**

LORENNÁ SÁVILLA BRITO OLIVEIRA

ESTRATIGRAFIA MECÂNICA E ANÁLISE ESTRUTURAL APLICADAS AO ESTUDO  
DE BANDAS DE DEFORMAÇÃO NA BACIA RIO DO PEIXE, NE BRASIL

Dissertação de mestrado apresentada à  
Universidade Federal de Campina Grande  
como requisito do Programa de Pós-Graduação  
em Exploração Petrolífera e Mineral para  
obtenção do grau de Mestre em Exploração  
Petrolífera e Mineral.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Cezar Costa  
Nogueira

Campina Grande - Paraíba  
2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EXPLORAÇÃO PETROLÍFERA E**  
**MINERAL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Estratigrafia mecânica e análise estrutural aplicadas ao estudo de**  
**bandas de deformação na Bacia Rio do Peixe, NE Brasil**

**Autora:**

**Lorena Sávilla Brito Oliveira**

Dissertação de mestrado - apresentação em 19/03/2019 à Universidade Federal de Campina Grande como requisito do Programa de Pós-graduação em Exploração Petrolífera e Mineral para obtenção do grau de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

Comissão examinadora:

Dr. Francisco Cezar Costa Nogueira (UAEPetro/PPGEPM - Orientador)

---

Dr. David Lino Vasconcelos (UFRN - Membro externo)

---

Dr. Yoe Alain Reyes Pérez (UFRN – Membro externo)

---

**Campina Grande – Paraíba**

**Março de 2019**

O48e

Oliveira, Lorena Sávilla Brito.

Estratigrafia mecânica e análise estrutural em arenitos afetados por bandas de deformação na Bacia Rio do Peixe, NE Brasil / Lorena Sávilla Brito Oliveira. – Campina Grande, 2019.

57 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Francisco Cezar Costa Nogueira".

Referências.

1. Bandas de Deformação. 2. Bacia do Rio do Peixe. 3. Estratigrafia Mecânica. 4. Modelagem Geológica-estrutural. I. Nogueira, Francisco Cezar Costa. II. Título.

CDU 552.08(812/813)(043)

## ABSTRACT

The deformation bands change physics properties and mechanical of the rocks, influencing the flow on the porous rocks. These structures are principally in porous sandstones and usually are associated with a distensive setting. Moreover, deformation bands are research targets related to quantification and transformation of petrophysics properties and rheologic of the rocks from a reservoir. In this context, this study seeks to analyze the deformation bands and their influence in porous sandstones at the Rio do Peixe basin. This study addresses the following issues: (i) what is the deformation bands behavior in different layers of sandstones; (II) what is the mechanical resistance of the sedimentary units shows in the propagation of brittle deformation. To that, the structural data, mechanical stratigraphic and geomechanics were taken in the field with the aim to realize a digital geologic model. During the mechanic structural characterization in a scanline, uniaxial mechanical analyzes were realized using Schmidt hammer at the areas with and without deformation. The results indicate that stratigraphic units with higher granulometry allow smaller deformation bands inflection as higher thickness of these. Similarly, the stratigraphic units with smaller granulometry allow higher frequency of the deformation bands. Besides that, deformed areas showed higher values of uniaxial compressive strength when compared to units with smaller granulometry that have smaller uniaxial compressive strength. The mechanic stratigraphic control has the thickness of the layer as a differential parameter when affected by deformation, where layers with higher thickness have higher resistance from the deformation concerning to frequency and inflexion. The 3D geologic model provides the cave shape visualization, stratigraphic units and their limits, besides penetrability, spacing and geometry of the structures. The adaptation of the mechanical stratigraphic technique for deformation bands used the petrophysical parameters, UCS and frequency of these structures to define the mechanical unit. Although of being the same lithostratigraphic unit, the granulometric differences and of structure provided different mechanic resistances to the layers, precluding the propagation of deformation bands for these distinctions.

Keywords: Rio do Peixe Basin, deformation bands, mechanical stratigraphic, structural geologic modeling.

## RESUMO

As bandas de deformação alteram propriedades da rocha que as hospedam, influenciando o escoamento de fluidos nos meios porosos. Essas estruturas ocorrem em arenitos porosos e são resultados da deformação causada pela atuação de um regime tectônico distensivo, em sua maioria. Apesar dessas constatações, as bandas de deformação ainda são alvo de pesquisas relacionadas à quantificação e transformação das propriedades petrofísicas e reológicas de rochas reservatório. Dentro desse contexto, esse trabalho busca analisar as bandas de deformação e sua influência em arenitos porosos da Bacia Rio do Peixe. O presente estudo objetiva compreender o comportamento dessas estruturas em diferentes arenitos empilhados estratigraficamente, e qual a resistência mecânica que as unidades sedimentares apresentam na propagação dessa deformação rúptil. Para isso, ocorreram levantamentos geológicos em campo para a coleta de dados que embasam as análises estruturais, mecânico estratigráficos, geomecânicos, modelagem geológica digital e amostragem. As amostras coletadas objetivaram representar o afloramento e seus parâmetros petrofísicos e petrográficos. Na análise estrutural foram realizados *scanlines* para caracterizar as bandas de deformação e coletar as espessuras que também são parâmetro para o modelo digital. Durante a caracterização mecânico-estrutural realizada em perfis de varredura na exposição da parede, também foram realizados ensaios geomecânicos de análise uniaxial com o esclerômetro, a fim de comparar a resistência à compressão uniaxial das rochas em áreas deformadas e não deformadas. Durante a etapa de integração dos dados foi construído um modelo geológico tridimensional representando o afloramento ora estudado, modelando as bandas de deformação, camadas sedimentares e a caverna. Resultados indicam que as unidades estratigráficas de maior granulometria permitem menor inflexão das bandas de deformação e maior espessura dessas. As unidades estratigráficas de menor granulometria possuem a maior distribuição de direções e mergulho das bandas de deformação. Além disso, as áreas deformadas apresentam valores de resistência à compressão uniaxial maiores, quando comparadas às unidades com granulometria mais fina, apresentando menor resistência à compressão uniaxial. O modelo geológico tridimensional proporciona a visualização da forma da caverna, unidades estratigráficas e seus limites, além da penetrabilidade, espaçamento e geometrias das estruturas. A análise petrofísica fornece valores das propriedades da rocha importantes na interpretação mecânico-estratigráfica, sendo parâmetros utilizados na definição de unidade mecânica e de controle estratigráfico no desenvolvimento de bandas de deformação.

Palavras chave: Bacia do Rio do Peixe, bandas de deformação, estratigrafia mecânica, modelagem.

## SUMÁRIO:

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos:	4
2	ASPECTOS GEOLÓGICOS	5
3	ESTADO DA ARTE	10
3.1	Bandas de deformação	10
3.2	Estratigrafia Mecânica	12
3.3	Modelagem	14
4	METODOLOGIA	16
4.1	Revisão Bibliográfica	16
4.2	Levantamento Geológico	17
4.2.1	Mapeamento e Análise Estrutural	17
4.2.2	Ensaio Geomecânico	21
4.2.3	Caracterização Mecânico-Estratigráfica	23
4.2.4	Amostragem	25
4.2.5	Caracterização Litoestrutural para Modelagem	26
4.3	Integração de Dados	27
4.3.1	Construção do Modelo Digital Tridimensional	27
6	MANUSCRITO: IMPACTO MECÂNICO-ESTRATIGRÁFICO NA FORMAÇÃO E NO DESENVOLVIMENTO DE BANDAS DE DEFORMAÇÃO	30
6.1	Introdução	30
6.2	Contextualização geológica	32
6.3	Metodologia	33
6.4	Resultados:	36
6.4.1	Descrição faciológica e bandas de deformação	36
6.4.2	Parâmetros petrofísicos e resistência à compressão uniaxial ( <i>Uniaxial Compressive Strength-UCS</i> )	40
6.4.3	Estratigrafia mecânica	44
6.5	Discussões	46
6.6	Conclusões	49
7	INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> – LOCALIZAÇÃO DA BACIA RIO DO PEIXE NO CONTEXTO DAS BACIAS INTERIORES DO NORDESTE E DO TREND CARIRI-POTIGUAR (PONTES, 2017).	5
<b>FIGURA 2</b> - MODELO DE EVOLUÇÃO BACIA RIO DO PEIXE: (A) FALHA SIN-RIFTE SIMILAR AO PROPOSTO POR FRANÇOLIN ET AL. (1994); (B) PÓS-RIFT I COM SOERGUMENTO DA BACIA; (C) PÓS-RIFT II, ESTÁGIO ATUAL DA EVOLUÇÃO DA BACIA COM EROÇÃO DAS CAMADAS SOERGUIDAS NA BACIA. (NOGUEIRA ET AL. 2015).	7
<b>FIGURA 3</b> - CARTA ESTRATIGRÁFICA RETIRADA DE NOGUEIRA ET AL. (2015) MODIFICADA DE CÓRDOBA ET AL. (2008).	8
<b>FIGURA 4</b> - CLASSIFICAÇÃO DAS BANDAS DE DEFORMAÇÃO DE ACORDO COM SUA CINEMÁTICA. (FOSSEN ET AL, 2007)	11
<b>FIGURA 5</b> - REPRESENTAÇÃO DE UMA SEQUÊNCIA MECANICAMENTE ESTRATIFICADA COM O COMPORTAMENTO DE UMA FALHA AO PASSAR POR CAMADAS COM DIFERENTES COMPETÊNCIAS (FERRIL & MORRIS, 2003).	13
<b>FIGURA 6</b> - ILUSTRAÇÃO APRESENTANDO DIFERENTES REOLOGIAS COM PERMISSÃO E IMPEDIMENTO DA PROPAGAÇÃO DE FRATURAS. MODIFICADO DE COOKE ET AL. 2006.	13
<b>FIGURA 7</b> - EXEMPLIFICAÇÃO DA CONSTRUÇÃO DE UM MODELO TRIDIMENSIONAL E SUAS VARIADAS ETAPAS.	14
<b>FIGURA 8</b> - MODELO GEOLÓGICO REPRESENTANDO BLOCOS DE ROCHAS COM FALHAS EM DIFERENTES DIMENSÕES ( ANTUNES ET AL. 2004).	15
<b>FIGURA 9</b> - ORGANOGRAMA DAS ETAPAS E ATIVIDADES REALIZADAS PARA ELABORAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.	16
<b>FIGURA 10</b> - MAPA DA BACIA RIO DO PEIXE COM A LOCALIZAÇÃO DO AFLORAMENTO EM ESTUDO.	17
<b>FIGURA 11</b> - ÁREAS MAPEADAS DURANTE O LEVANTAMENTO GEOLÓGICO. DELIMITA-SE O QUADRADO EM VERMELHO A ÁREA TOTAL MAPEADA (A). EM MAIOR DETALHE, IDENTIFICAM-SE OS PAVIMENTOS E A EXPOSIÇÃO DO AFLORAMENTO, MAPEADOS ESTRUTURALMENTE (B).	18
<b>FIGURA 12</b> - LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS DAS LINHAS DE VARREDURA TRAÇADAS. PSC - PERFIL DE SCANLINE DA CAVERNA 1 E 2.	20
<b>FIGURA 13</b> - TÉCNICA DE AQUISIÇÃO DOS DADOS DE SCANLINE, UTILIZANDO A FITA MÉTRICA.	21
<b>FIGURA 14</b> - UTILIZAÇÃO DO ESCLERÔMETRO NAS ÁREAS DEFORMADAS E NÃO DEFORMADAS.	22
<b>FIGURA 15</b> - ÁBACO DE MILLER. UTILIZADO PARA CONVERTER OS VALORES DE REBOTE DO ESCLERÔMETRO EM VALORES CORRESPONDENTES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL.	23
<b>FIGURA 16</b> - EXPOSIÇÃO DA PAREDE COM LIMITES ESTRATIGRÁFICOS TRAÇADOS. TRACEJADO EM PRETO TEM-SE A BANDA DE DEFORMAÇÃO PRINCIPAL.	24

<b>FIGURA 17 - MÉTODO DA COLETA DE DADOS MECÂNICO-ESTRATIGRÁFICOS. DESTACADO EM ROXO TEM-SE O PERFIL 2, SENDO PROJETADO SEU COMPRIMENTO EM IMAGEM ABAIXO MAIS APROXIMADA.</b>	24
<b>FIGURA 18 - EXPOSIÇÃO DA PAREDE COM PERFIS DE COLETA DE DADOS MECÂNICO-ESTRATIGRÁFICOS. OS PERFIS ESTÃO NUMERADOS POR ORDEM DE COLETA, DA DIREITA PARA A ESQUERDA, SENDO 1, 2 E 3, RESPECTIVAMENTE, AZUL, ROXO E VERMELHO.</b>	25
<b>FIGURA 19 - LOCALIZAÇÃO DOS PLUGUES COLETADOS NA ETAPA DE AMOSTRAGEM.</b>	26
<b>FIGURA 20 - MAPEAMENTO DAS BANDAS DE DEFORMAÇÃO MAIS EXPRESSIVAS COM CONTINUIDADE NO PAVIMENTO SUPERIOR.</b>	27
<b>FIGURA 21 - VISUALIZAÇÃO DOS PLANOS E DEFINIÇÃO DAS BASES NO SOFTWARE SOLIDWORKS.</b>	28
<b>FIGURA 22 – CRIAÇÃO DOS LIMITES ESTRATIGRÁFICOS DEFININDO AS UNIDADES COMO SÓLIDOS EXTRUDIDOS. EM EXEMPLO, A UNIDADE ESTRATIGRÁFICA 2.</b>	28
<b>FIGURA 23 - VISUALIZAÇÃO DA BANDA DE DEFORMAÇÃO CRUZANDO O PLANO BASE DO PAVIMENTO SUPERIOR.</b>	29
<b>FIGURA 24 - INDIVIDUALIZAÇÃO DA BANDA DE DEFORMAÇÃO EM CORTE INDIVIDUAL.</b>	29
<b>FIGURA 25 - (A) LOCALIZAÇÃO REGIONAL DA BACIA RIO DO PEIXE. (B) MAPA GEOLÓGICO DA BACIA RIO DO PEIXE COM LOCALIZAÇÃO DO AFLORAMENTO EM ESTUDO.</b>	32
<b>FIGURA 26 - ÁREAS MAPEADAS DURANTE LEVANTAMENTO GEOLÓGICO. (A) DELIMITA-SE EM VERMELHO A ÁREA TOTAL MAPEADA. (B) EM MAIOR DETALHE, IDENTIFICAM-SE OS PAVIMENTOS E A EXPOSIÇÃO DO AFLORAMENTO, MAPEADOS ESTRUTURALMENTE.</b>	34
<b>FIGURA 27 - EXPOSIÇÃO DA PAREDE COM LIMITES ESTRATIGRÁFICOS TRAÇADOS. TRACEJADO EM PRETO A BANDA DE DEFORMAÇÃO PRINCIPAL.</b>	35
<b>FIGURA 28 - PERFIS DE DESCRIÇÃO E COLETA DE DADOS MECÂNICO-ESTRATIGRÁFICOS.</b>	36
<b>FIGURA 29 - UNIDADE ESTRATIGRÁFICAS 1,2,3 E 4 EM MACRO ESCALA, RESPECTIVAMENTE, EM (A),(B),(C) E (D). FOTOMICROGRAFIAS DAS UNIDADES 1,2,3 E 4 RESPECTIVAMENTE (E), (F), (G) E (H). (E) EMPACOTAMENTO MAIS APERTADO DELIMITADO NA LATERAL SUPERIOR DIREITA. (F) CIMENTO CARBONÁTICO CIRCUNDADO POR GRÃOS DE FELDSPATO(FP). (G) PRESENÇA DE MINERAL MICÁCEO (COLORIDO) DOBRADO. (H) POROSIDADE MÓLDICA.</b>	38
<b>FIGURA 30 - MAPA ESTRUTURAL DO AFLORAMENTO CAVERNA UTILIZANDO DA IMAGEM DE DRONE. ROSETAS APRESENTANDO ORIENTAÇÕES DAS BANDAS EM CADA UNIDADE, COM SUA FREQUÊNCIA ACIMA.</b>	39
<b>FIGURA 31 - VALORES DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO UNIAXIAL (UCS) ENCONTRADOS EM CADA UNIDADE ESTRATIGRÁFICA, REBATIDOS EM CIMA DAS BDS E EM PORÇÕES NÃO DEFORMADAS. AINDA SÃO APRESENTADOS VALORES COMPARADO OS RESULTADOS OBTIDOS NO TETO E PISO DA BANDA DE DEFORMAÇÃO PRINCIPAL.</b>	42

<b>FIGURA 32</b> - VALORES MÉDIOS DOS RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS DE POROSIDADE, PERMEABILIDADE, MÓDULO DE YOUNG E DE POISSON PARA CADA UNIDADE ESTRATIGRÁFICA. _____	43
<b>FIGURA 33</b> - UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS (4) X UNIDADES MECÂNICAS (3). OS GRÁFICOS APRESENTAM AS ORIENTAÇÕES DE MERGULHO DAS BANDAS DE DEFORMAÇÃO EM CADA UNIDADE. ABAIXO UM RECORTE EVIDENCIANDO O AFINAMENTO DA UNIDADE ESTRATIGRÁFICA 3. _____	46
<b>FIGURA 34</b> - MODELO ESQUEMÁTICO DO AFLORAMENTO EM ESTUDO. DE BAIXO PRA CIMA ESTÃO REPRESENTADAS AS UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS 1 (AMARELO), 2 (VEMELHO), 3(VERDE) E 4( AZUL). A CAVERNA (CINZA) ENCONTRA-SE EM SUA MAIOR ÁREA NA UNIDADE 3, COM SEU PISO NA UNIDADE 2. _____	51

# 1 INTRODUÇÃO

## **Apresentação**

Esta dissertação de mestrado apresenta resultados de métodos aplicados no estudo de bandas de deformação, sua formação e desenvolvimento em arenitos com seus diferentes comportamentos mecânico-estratigráficos. Os arenitos em estudo encontram-se empilhados em camadas afetadas pelas bandas de deformação, sendo esses pertencentes à Formação Antenor Navarro na Bacia Rio do Peixe. Essa bacia sedimentar localiza-se na porção oeste do Estado da Paraíba. O referido trabalho foi construído no Programa de Pós Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral da Universidade Federal de Campina Grande.

O presente trabalho apresenta-se nesta introdução, seguida dos objetivos e os aspectos geológicos do estudo, estado da arte focado em bandas de deformação, stratigráfica mecânica e modelagem, assim como na metodologia utilizada para obter os dados e resultados. Também consiste no presente trabalho o manuscrito de um artigo intitulado de “Impacto mecânico-estratigráfico na formação e no desenvolvimento de bandas de deformação”, em que estão explicitados os resultados do mapeamento e análise estrutural das bandas de deformação, ensaio geomecânico, caracterização mecânico-estratigráfica, parâmetros petrofísicos e modelagem. O manuscrito do artigo está em anexo a seguir neste mesmo documento.

## **Justificativa**

Aydin (1978) definiu o termo bandas de deformação como estruturas planares que ocorrem comumente em arenitos porosos. Segundo Fossen *et al.* (2011), em rochas sedimentares com porosidade igual ou superior a 15%, a deformação rúptil é expressa por estruturas deformacionais diferentes que são denominadas de bandas de deformação. Comumente associadas à redução de porosidade e permeabilidade em relação à rocha hospedeira (Antonellini & Aydin, 1994; Alikarami *et al.*, 2013). As bandas de deformação introduzem anisotropia e heterogeneidade dando origem a padrões de fluxo complexos, os quais influenciam no comportamento do reservatório (Dongfang Qu and Jan Tveranger, 2016).

Tem sido cada vez mais estimulado o desenvolvimento de pesquisas acerca das propriedades petrofísicas de rochas reservatório em zonas de falhas, buscando prever e

compreender o provável controle que as estruturas exercem sobre os padrões de fluxo de fluido em um reservatório. Tal fato se dá pelo reconhecimento de que essas estruturas podem atuar como condutos e/ou como barreiras ao fluxo de fluidos, (e.g. Seeburger *et al.* 1991; Gibson 1998; Knipe *et al.* 1998; Faulkner *et al.* 2010). A banda de deformação é o principal componente estrutural nas zonas de danos em rochas porosas (Fachri *et al.*, 2011, 2013a, b), sendo assim o seu conhecimento fundamental para a exploração de reservatórios de petróleo atingidos por essa deformação.

Além do conhecimento acerca das propriedades petrofísicas das bandas de deformação, para compreender a influência dessas estruturas na rocha hospedeira, também requer o conhecimento de uma série de fatores como seu complexo padrão de distribuição e parâmetros de geometria, que diferem da análise convencional de falhas. Como afirma Schultz *et al.* (2010) a distribuição espacial de bandas de deformação afeta em parte a produtividade de petróleo e água subterrânea em reservatórios. Exibindo arranjos uniformemente distribuídos, ou assumindo padrões mais complexos de bandas de deformação do tipo conjugada, quadrimodal ou polimodal, a descrição do arranjo espacial de bandas de deformação em unidades sedimentares de alta porosidade é complexa e variada (e.g. Aydin 1978; Underhill & Woodcock 1987; Healy *et al.* 2006; Healy *et al.* 2015), sendo essa, portanto, uma área da pesquisa científica importante de ser explorada.

Compreendendo a importância do entendimento dessas estruturas rúpteis e sua complexidade, ver-se ainda a necessidade de conhecer as relações entre as bandas de deformação e as unidades estratigráficas afetadas. Tal correlação entre falhas e estratigrafia é denominada de estratigrafia mecânica, a qual se demonstra pela relação entre a intensidade de fraturamento e a espessura e reologia das camadas (e.g., McQuillan, 1973). A estratigrafia mecânica pode exercer influência no ângulo de mergulho das falhas (Ferril & Morris, 2003; Oliveira & Silva, 2015), de modo a influenciar a propagação ou acúmulo de fluido nas regiões deformadas controladas pela geometria dessas estruturas (Souza, 2015). O presente trabalho traz a perspectiva da aplicação dessa técnica utilizada na análise de falha para o comportamento das bandas de deformação ocorrendo em diferentes unidades mecânicas.

Nos últimos anos, a necessidade de uma ferramenta utilizada para compreender a propagação das falhas tem sido discutida por diversos pesquisadores (Flodin *et al.*, 2001; Rivenæs e Dart, 2002; Tveranger *et al.* 2005, Manzocchi *et al.*, 2008). Buscando

isso, várias técnicas foram idealizadas e outras que foram adaptadas na indústria do petróleo. A técnica de modelagem de falhas foi concebida como uma maneira de permitir a visualização tridimensional de estruturas rúpteis a serem incluídas em modelos de reservatórios industriais (Tveranger *et al.*, 2005; Braathen *et al.*, 2009). Recentes desenvolvimentos das técnicas de modelagem de falhas são direcionados para melhorias na geração de modelos geométrico dessas estruturas, a fim de reproduzir medidas estatísticas de escada de afloramento de zona de falhas, tendo como enfoque também o *upscaling* de geomodelos estruturais (Fachri *et al.*, 2011).

A técnica de modelagem proporciona a visualização das estruturas e assim facilita o entendimento acerca da geometria, interceptação de planos e o desenvolvimento de falhas secundárias. A modelagem analógica tem sido utilizada na geologia para melhorar o conhecimento sobre a nucleação de estruturas geológicas, como elas crescem e quais são os principais pontos importantes em tais processos (Oliveira & Silva, 2015). Além disso, modelos geológicos baseados em escala de afloramento proporcionam a visualização mais detalhada de estruturas rúpteis, como bandas de deformação, que não podem ser analisadas em sua plenitude através dos métodos geralmente aplicados na exploração petrolífera, tais quais a sísmica e dados de poços.

A Bacia Rio do Peixe possui excelentes exposições com estruturas deformacionais evidentes em seus afloramentos, proporcionando o estudo das bandas de deformação e suas rochas hospedeiras com relação às suas propriedades petrofísicas e complexidade estrutural. Confirmada por Fontes (2007), essa bacia contém um sistema petrolífero, além de ter grande parte de sua evolução em um regime de deformação rúptil, encontrando nela condições para compreendê-la como reservatório análogo a outras bacias que sofreram deformação semelhante.

Neste trabalho serão realizados mapeamento e análise estrutural das bandas de deformações e seus parâmetros de geometria e cinemática, além de suas relações com as unidades estratigráficas presentes, compreendendo, ainda, os comportamentos mecânicos das fácies sedimentares, assim como os efeitos da deformação no parâmetro de resistência à compressão uniaxial. Análises petrográficas e petrofísicas serão realizadas com o intuito de reconhecer os componentes sedimentares e sua influência no controle reológico da rocha e transmissibilidade de fluidos nas estruturas rúpteis. Ainda nesse trabalho, também serão investigadas propriedades petrofísicas, como porosidade,

e módulo de young. Portanto, o presente estudo objetiva realizar análise estrutural conjuntamente com o entendimento mecânico-estratigráfico das unidades sedimentares para compreender o comportamento e influência das bandas de deformação sobre as propriedades hidráulicas e mecânicas de rochas siliciclásticas, levando em consideração parâmetros petrográficos e petrofísicos.

### **1.1 Objetivos:**

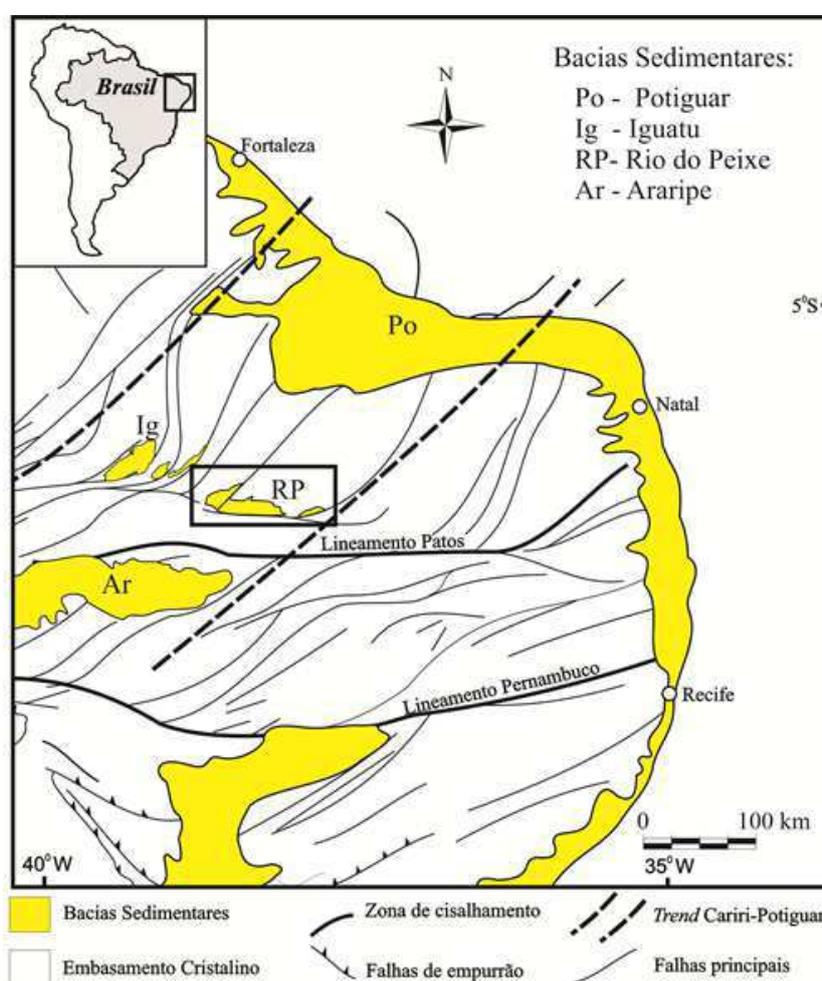
O objetivo geral desta dissertação é analisar a influência das bandas de deformação quanto às propriedades petrofísicas da rocha hospedeira, assim como compreender o comportamento mecânico-estratigráfico das unidades afetadas, mais especificamente em diferentes fácies sedimentares identificadas em afloramento na Bacia Rio do Peixe.

Compondo os objetivos específicos a se alcançar, têm-se os seguintes:

- I- Analisar e determinar a evolução e comportamento de bandas de deformação localizadas no afloramento denominado Caverna, caracterizando essas estruturas acerca da sua cinemática, geometria e temporalidade.
- II- Determinar e compreender as unidades mecânicas, descrevendo o comportamento dessas camadas em relação à sua competência, resistência mecânica, intensidade de deformação, espaçamento entre bandas de deformação, além das mudanças de mergulho e predominância de orientação dessas estruturas que afetam as rochas aflorantes.
- III- Caracterizar o comportamento geomecânico do afloramento em estudo com base na aquisição de parâmetros de resistência à compressão, abordando as áreas deformadas e não deformadas presentes.
- IV- Analisar o efeito das bandas de deformação sobre as propriedades petrofísicas das rochas hospedeiras, através da análise petrográfica de lâminas delgadas das camadas aflorantes, além da extração de parâmetros petrofísicos em rochas deformadas e pouco deformadas.
- V- Criar um modelo geológico tridimensional em escala de detalhe, tendo exatas dimensões medidas em afloramento, sendo essas correspondentes à exposição de uma parede composta por quatro (4) fácies sedimentares, além do respectivo teto, assim como a modelagem das bandas de deformação que afetam as camadas presentes, levando em consideração suas geometrias e espessuras.

## 2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

As Bacias Interiores do Nordeste são compostas por um grupo de bacias remanescentes eocretácio sobrepostas a coberturas sedimentares mais antigas ou ao embasamento pré-cambriano, sendo esse, neste contexto, a Província Borborema, segundo Córdoba *et al* (2008). A Bacia Rio do Peixe se encaixa nesse grupo (Figura 1), ressaltando-se que o surgimento dessas bacias está ligado ao rifteamento eocretácio, o qual moldou a atual margem continental do Nordeste Brasileiro, sendo essa resultante da separação dos continentes Sul-Americano e Africano, gerando com isso depressões preenchidas de acordo com Ponte *et al* (1991).



**Figura 1** – Localização da Bacia Rio do Peixe no contexto das Bacias Interiores do Nordeste e do Trend Cariri-Potiguar (Pontes, 2017).

Em relação ao embasamento dessas bacias, tem-se que esse consiste na Província Borborema, a qual é recortada por zonas de cisalhamento que tiveram sua estruturação no Ciclo Brasileiro e eventos de reativação fanerozóicos (Françolin & Szatimari, 1987). Litologicamente, o embasamento compõe-se de ortognaisses

paleoproterozóicos e granitóides brasileiros. A Bacia Rio do Peixe está inserida dentro do Domínio Rio Grande do Norte, limitada a norte pela Bacia Potiguar, a leste pela Província Costeira, a sul pelo Lineamento Patos e a oeste pela Zona de Cisalhamento Orós/Aiuaba, situando-se, em suma, no extremo oeste do Estado da Paraíba e constituindo uma área total de 1250 Km<sup>2</sup>.

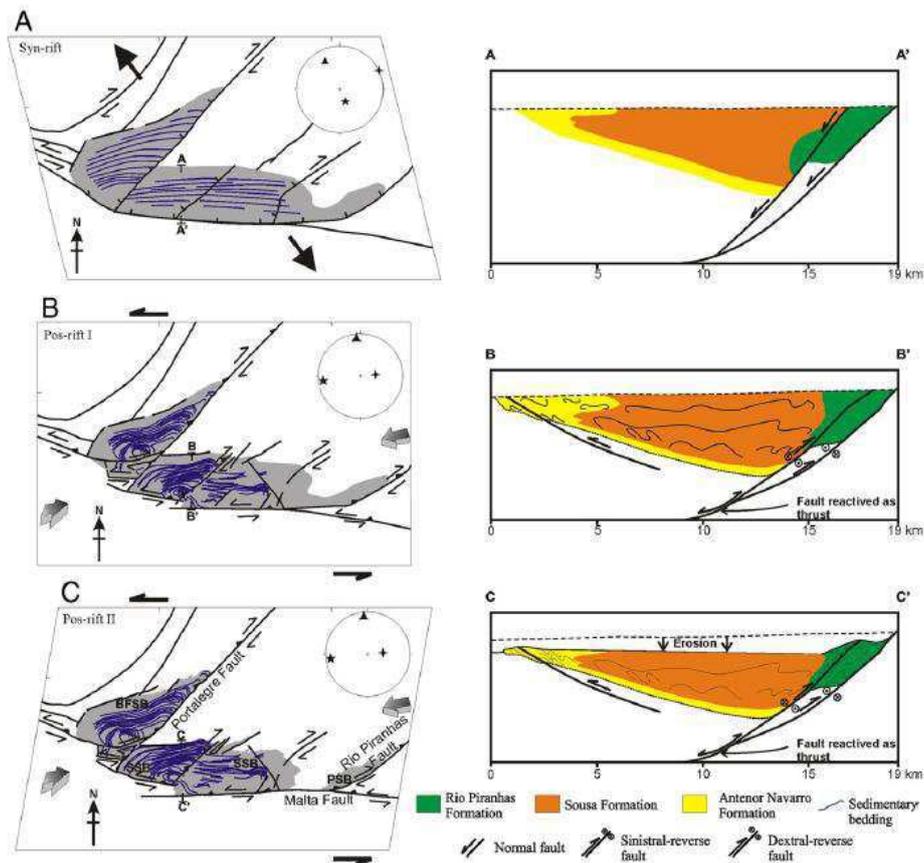
### **Arcabouço Estrutural**

Através do estudo do controle do arcabouço estrutural, compreende-se que a geometria de abertura da Bacia do Rio do Peixe e a cinemática de abertura da bacia foram controladas pela reativação neocomiana de segmentos de zonas de cisalhamento brasileiras, as quais são a Zona de Cisalhamento de Portalegre, com *trend* NE-SW, e a Falha Malta, um dos seguimentos do Lineamento Patos, com *trend* E-W. Tal arranjo de Zonas de Cisalhamento são elementos tectônicos preexistentes no embasamento Pré-Cambriano (Senant & Popoff, 1991; Lima Filho, 1991). A Bacia Rio do Peixe faz parte do *trend* denominado de Cariri-Potiguar, como se expõe na literatura em modelos propostos com enfoque na evolução tectônica das bacias interiores (Françolin & Szatimari, 1987; Sénant & Popoff, 1991; Ponte et al., 1991; Françolin, 1992; Françolin et al., 1994; Ponte & Ponte Filho, 1996; Matos, 2000). A Bacia Rio do Peixe é dividida em três *semi-grabens*, de oeste para leste: Brejo das Freiras, Sousa e Pombal, separados pelos altos do embasamento cristalino. Alguns trabalhos incluem também o *semi-graben* de Icozinho, a oeste do primeiro.

Localizando-se na borda SE, o *semi-graben* Brejo das Freiras apresenta-se alongado na direção NE-SW e controlado pela falha normal homônima, mergulhando para NW. Compondo a Bacia Rio do Peixe há ainda dois *semi-grabens* já citados, sendo o *semi-graben* de Sousa alongado na direção E-W (Castro *et al.*, 2007) e interpretado por Matos (1992, *apud* Costa, 2010) como um *graben* transtraccional que se associa ao Lineamento Patos, ressaltando-se ainda que essa sub-bacia possui 1700 metros de espessura sedimentar. O depocentro desta bacia está localizado na sub-bacia de Brejo das Freiras e possui 1900 metros, os quais são dados de estudos utilizando técnicas geofísicas (Castro & Castelo Branco, 1999; Nogueira *et al.*, 2004). Pontua-se ainda que os pacotes sedimentares mergulham para S-SE, sendo esses pertencentes a descrição da sub-bacia de Sousa. Em relação ao *semi-graben* de Pombal, localiza-se na terminação oriental da Falha Malta, que em outros trabalhos recebem a denominação de Falha de

São Gonçalo (Senánt & Popoff, 1991, *apud* Costa, 2010), conectando-se ao semi-graben de Sousa por meio de um alto estrutural e limitado a SE por uma falha de movimento normal a oblíquo (Françolin *et al.*, 1994).

Corroborando com Nogueira *et al.* (2015) conclui-se que sobre a deformação frágil no Cretáceo a Bacia do Rio do Peixe foi formada em uma tensão NW-SE, deduzida de uma deformação frágil em rochas sedimentares dentro das falhas principais e delimitadoras. Subsequentemente, houve a inversão da bacia (Figura 2), uma vez que a tensão de compressão máxima atuante passou de vertical para horizontal, e foi orientada aproximadamente ENE-WSW. A inversão da bacia é consistente com o campo de tensões impostas pelo impulso da Dorsal Meso-Atlântica (a oeste) e o impulso Andina (para leste), que têm mantido a placa Sul-americana sob compressão horizontal ENE-WSW desde o final Cretáceo.

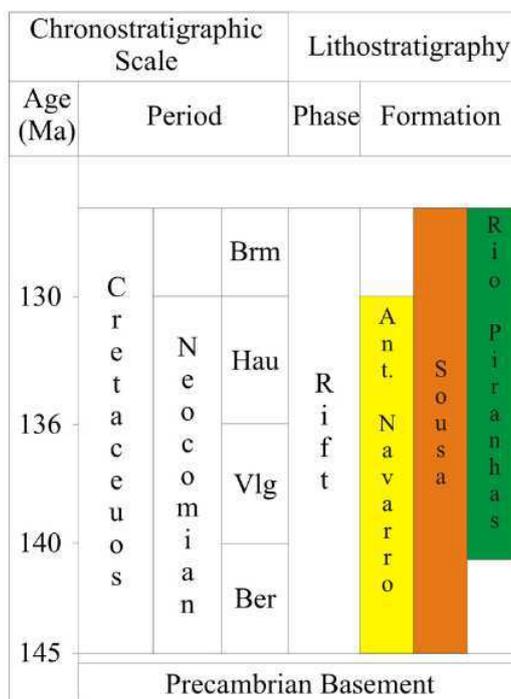


**Figura 2** - Modelo de evolução Bacia Rio do Peixe: (A) Falha sin-rifte similar ao proposto por Françolin *et al.* (1994); (B) Pós-rift I com soerguimento da bacia; (C) Pós-rift II, estágio atual da evolução da bacia com erosão das camadas soerguidas na bacia. (Nogueira *et al.* 2015).

### Arcabouço Estratigráfico

Segundo dados de Braun (1969), a Bacia Rio do Peixe é composta por três formações principais: Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas. A Bacia Rio do Peixe

apresenta uma coluna sedimentar de idade neocomiana, resultante do estágio rifte, conforme dados bioestratigráficos de Ponte *et al.* (1991, *apud* Silva, 2009). Ela é constituída por três formações (Figura 3), que juntas formam o Grupo Rio do Peixe, são elas: Sousa, Antenor Navarro e Rio Piranhas.



**Figura 3** - Carta estratigráfica retirada de Nogueira *et al.* (2015) modificada de Córdoba *et al.* (2008).

### Grupo Rio do Peixe

Como já apresentado acima, o Grupo Rio do Peixe compõe-se por três formações: Formação Antenor Navarro, Formação Sousa e Formação Rio Piranhas. Explicitando-as essas segundo Córdoba *et al.* (2008), a Formação Antenor Navarro constitui-se por conglomerados e arenitos conglomeráticos desorganizados e matriz suportados, majoritariamente arenitos conglomeráticos com estratificações cruzadas acanaladas e tabulares. Essa formação dispõe-se discordantemente sobre o embasamento cristalino, e segundo Mendonça Filho (2006), depositaram-se sedimentos, em um período de intensa atividade tectônica, esses que compõem rochas predominantemente classificadas como conglomerados feldspáticos. Há ainda, nesse contexto, arenitos médios a finos com estratificações plano-paralelas, e intercalações de siltitos e argilitos avermelhados. Segundo Srivastava & Carvalho (2004) a Formação Antenor Navarro se relaciona a um sistema fluvial entrelaçado (*braided*), associado a leques aluviais proximais. Os dados de paleocorrente apontam predominantemente para sul ou sudeste, podendo variar para leste ou oeste-sudoeste, o que caracteriza áreas fontes nas bordas não-falhadas da bacia (Córdoba *et al.*, 2008).

Ainda explicitando as formações do grupo tem-se que a Formação Sousa possui folhelhos e siltitos intercalados a arenitos, com laminações paralelas e cruzadas, marcas onduladas, e apresentando, ainda, calcretes e gretas de contração. Essa formação é unidade de maior exposição areal na BRP. O ambiente deposicional dessa formação caracteriza-se por águas calmas, sendo, portanto, lacustre raso com influência fluvial, segundo Vasconcelos (1980) e Srivastava & Carvalho (2004). Destaca-se ainda a presença de pequenos fragmentos fósseis como conchostráceos, fragmentos de ossos, dentes e escamas de peixe e pegadas de dinossauros (Leonardi & Carvalho, 1992).

O Grupo Rio do Peixe possui ainda a Formação Rio Piranhas, a qual é composta por arenitos finos a grossos com estratificações cruzadas, intercalados a pelitos. Nesse contexto litológico estão presentes também arenitos grossos e conglomerados desorganizados e matriz-suportados, indicando, com isso, ambientes deposicionais de sistemas de leques aluviais de margem falhada com associação a sistemas fluviais entrelaçados. A interpretação acerca das áreas fontes segundo Françolin (1994) e localizam nas ombreiras dos *semi-grabens*, conforme dados de paleocorrente dos arenitos que apontam para N ou NW.

### 3 ESTADO DA ARTE

Este capítulo tem como objetivo apresentar conceitos fundamentais sobre bandas de deformação, bem como acerca da estratigrafia mecânica e também modelagem.

#### 3.1 Bandas de deformação

Alguns processos geológicos formadores de estruturas ocorrem na escala mais rasa da terra. Na crosta rasa as temperaturas e pressões são mais baixas e em regime de deformação dúctil formam-se nas rochas estruturas como fraturas. As fraturas e suas derivações são descontinuidades formadas por fraqueza aos esforços mecânicos impressos no momento ou posteriormente por meio de reativações. Dentro deste contexto, o comportamento de rochas com diferentes reologias à formação dessas estruturas é variado, e em rochas sedimentares porosas há formação de estruturas denominadas de bandas de deformação. Fossen *et al.* (2007) define que essa porosidade condicional é igual ou superior a 15%. A descrição dessas estruturas inicialmente foi feita por Aydin (1978), definindo que bandas de deformação são estruturas planares que ocorrem comumente em arenitos porosos.

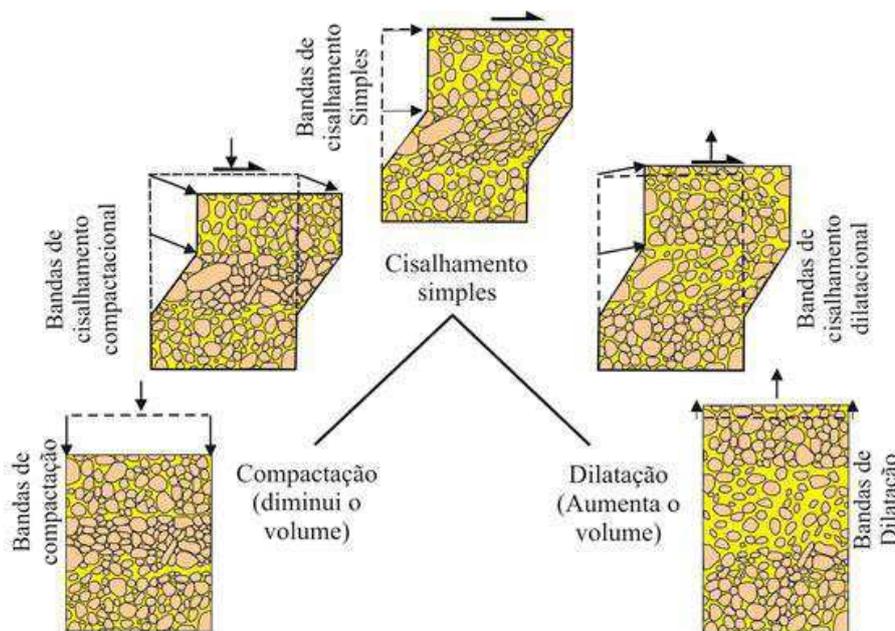
As falhas se distinguem das bandas de deformação em algumas características importantes de serem observadas. Fossen *et al.* (2007) afirmam que as bandas de deformação não são superfície de deslizamento como se espera de uma falha, mas que em um estágio de maior deformação há movimentação nos planos das bandas. Esses autores também fazem observação que a evolução e formação das bandas de deformação ocorrem em rochas ou sedimentos, contanto que haja porosidade, e nesse processo ocorra a rotação, translação e/ou quebra de grãos e seus limites. Não havendo esse espaço de acomodação que a porosidade proporciona, tem-se a formação de estruturas como estilólitos, fraturas ou superfície de deslizamento. Eles também pontuam que as bandas também raramente apresentam *offsets* maiores que alguns centímetros, independente do seu tamanho. Ainda afirmam que falhas e fraturas tendem a diminuir a coesão da rocha, enquanto que bandas de deformação tendem a aumentar essa coesão.

Na geração de bandas de deformação há fatores que condicionam seu aparecimento. O entendimento desses fatores também facilita a compreensão da variação de alguns parâmetros petrofísicos de reservatórios que contém essas estruturas. Fatores como pressão confinante, ambiente tectônico, grau de litificação da rocha

hospedeira, mineralogia da rocha, pressão de fluido dos poros, granulometria e selecionamento dos grãos podem variar e formar bandas de deformação. Torabi & Alikarami (2012) afirmam que a porosidade e a permeabilidade são fatores que influenciam diretamente na produção de petróleo, e podem ser alterados com a presença de bandas de deformação.

As bandas de deformação tiveram diversas classificações ao longo dos anos, sendo a primeira delas introduzida por Aydin & Johnson (1978) que as classificaram por ordem de ocorrência em bandas de deformação individuais, aglomerado de bandas e superfície de deslizamento. Fossen *et al.*(2007) levam em consideração o mecanismo de deformação, e classificam as bandas por fluxo granular (deslizamento e rotação de grãos), fluxo cataclástico (fraturamento e moagem do grão), lubrificação filossilicática e dissolução e cimentação, que são correlacionados respectivamente com bandas de desagregação, bandas cataclásticas, bandas filossilicáticas e bandas de dissolução e cimentação.

A classificação cinemática apresenta que as bandas de deformação podem ser classificadas em bandas de dilatação, bandas de cisalhamento, bandas de compactação ou um híbrido entre dois desses três tipos (Fossen *et al*, 2007) variando de acordo com o componente cinemático principal (Figura 4).



**Figura 4** - Classificação das bandas de deformação de acordo com sua cinemática. (Fossen et al, 2007)

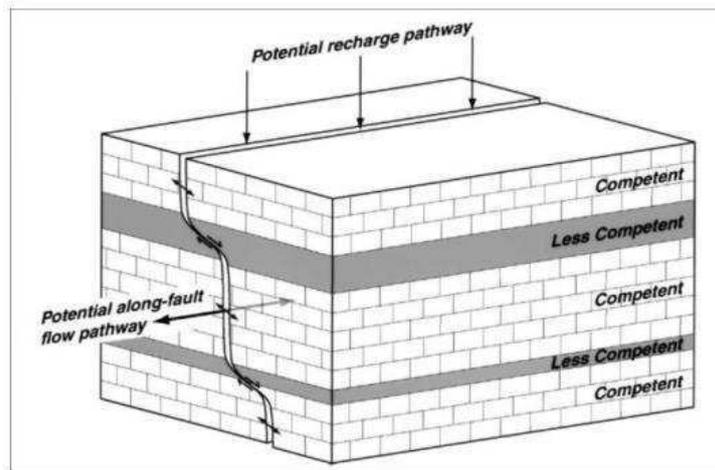
### 3.2 Estratigrafia Mecânica

A presença de estruturas rúpteis como falha e fraturas nas rochas é uma realidade da maioria dos afloramentos. Em maior profundidade essas discontinuidades atuam como condutos e até como armadilhas para o armazenamento de fluidos. A compreensão estrutural atuante nos pacotes rochosos em menor escala nem sempre tem a mesma atenção que as estruturas com grandes dimensões. Ainda, a correlação feita em grande maioria se detém a observação da influência da deformação na estrutura rochosa, e não tendo foco o quanto a reologia e outros parâmetros são controladores de propagação estrutural. Essa correlação entre a intensidade de fraturamento e a espessura das camadas é denominada de Estratigrafia Mecânica (e.g., McQuillan, 1974; Bai e Pollard, 2000; Renshaw et al., 2003; Cooke et al., 2006; Zahm et al., 2009).

A estratigrafia mecânica é definida por Ferril *et al.* (2017) como propriedades mecânicas da rocha, espessura da camada e propriedades de fricção dos limites mecânicos que constituem uma sequência de rocha. Esses mesmos autores pontuam que nessa técnica se observa as propriedades reológicas das rochas, força de compressão e de tração ou módulo de Young, analisa-se a variação ao longo das falhas e suas influências no comportamento primário (deslocamento) e secundário (fluxo, dissolução e mineralização) dessas estruturas.

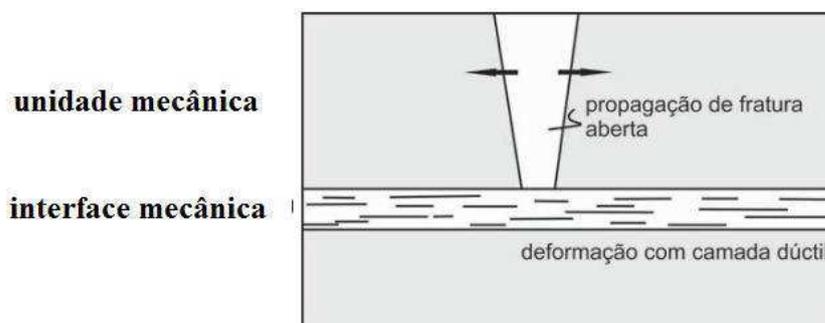
A análise da relação entre fraturas e falhas com os estratos sedimentares permite observar a influência dos processos de zonas de falhas (Jamison, 1979; Young, 1982) e geometria de falhas e características de linkagem ( Ferrill e Morris, 2003, Morris et al., 2009b), crescimento e nucleação de falhas (Ferrill e Morris, 2008; Roche et al.,2013), sendo considerada tal técnica como fundamental para a interpretação correta da geologia estrutural (McGinnis et al., 2016). A influência da estratigrafia mecânica no estilo de deformação é determinada em parte pela orientação de camadas em relação ao campo de estresse imposto, espera-se que falhas nucleiem-se primeiramente em camadas mais competentes (Ferril et al., 2009).

A estratigrafia mecânica também pode exercer influência no ângulo das falhas (Ferril & Morris, 2003). As falhas são “reguladas” pela reologia das camadas, e esse controle determina direções e abertura de planos (Figura 5).



**Figura 5** - Representação de uma sequência mecanicamente estratificada com o comportamento de uma falha ao passar por camadas com diferentes competências (Ferril & Morris, 2003).

Cooke *et al* (2006) analisa que a estratigrafia mecânica consiste de unidades e interfaces mecânicas. Uma interface mecânica são camadas de rochas que impedem a propagação de fraturas ou o mergulho delas, sendo de forma contrária a unidade mecânica permissiva a passagem dessas estruturas rúpteis (Figura 6). Bertotti *et al.* (2007) definem que as unidades mecânicas correspondem a um pacote de camadas nas quais todas as fraturas começam e terminam nos limites da própria unidade. Em outras palavras, nenhuma fratura termina dentro da unidade.

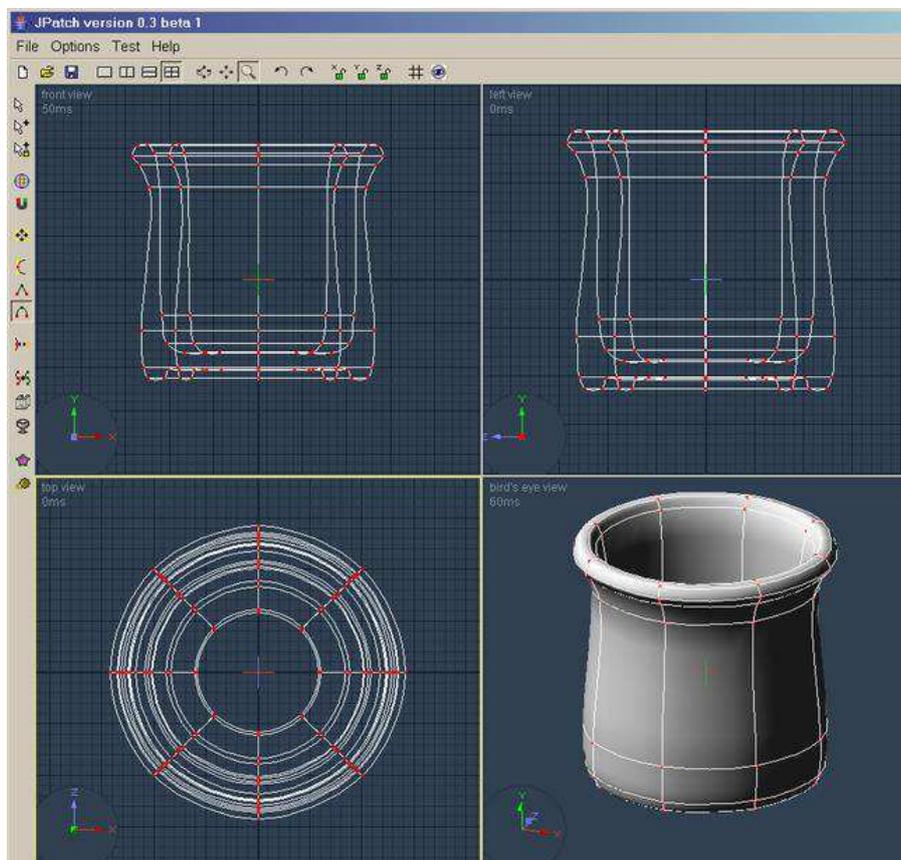


**Figura 6** - Ilustração apresentando diferentes reologias com permissão e impedimento da propagação de fraturas. Modificado de Cooke et al. 2006.

Ferril *et al.* (2017) faz uma revisão acerca dos parâmetros considerados como relevantes dentro das análises mecânico-estratigráficas, e define que por unidade mecânica se determinam: número, intensidade e espaçamento de fraturas, competência e resistência mecânica dos estratos, assim como a mudança de mergulho e predominância de direções.

### 3.3 Modelagem

A representação digital de estruturas geológicas e seus processos tem sido uma ferramenta cada vez mais utilizada como no auxílio do entendimento geológico. Além das técnicas de mapeamento geológico e produtos de imagens digitais processados, há ainda a representação tridimensional com um desafio a ser encarado por pesquisadores. Oliver (2011) traz que a modelagem tridimensional é o processo de desenvolvimento da representação matemática de um objeto em qualquer superfície, sendo essa representação a mais aproximada do real. A criação de formas e o esforço de dar dimensão a elas têm sido explorados por diversas técnicas matemáticas, tais como: técnica por vértices, por bordas e por polígonos (Figura 7).

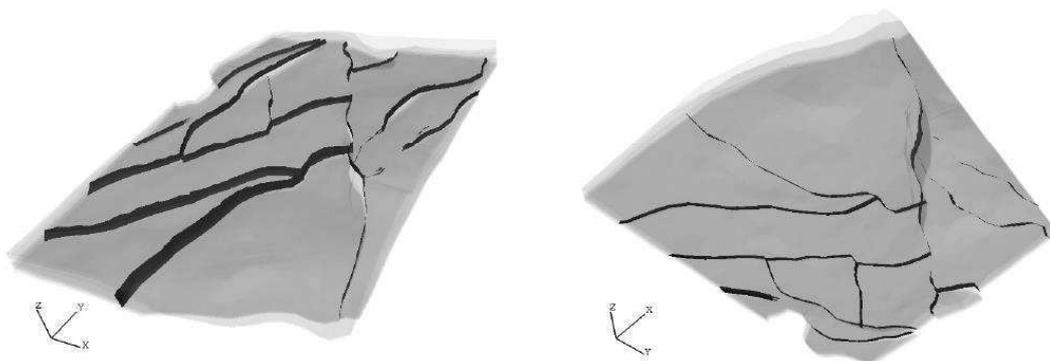


**Figura 7** - Exemplificação da construção de um modelo tridimensional e suas variadas etapas.

Com o avanço tecnológico na indústria petrolífera, tem-se a possibilidade de se prever através da ferramenta da simulação a assertividade dos métodos, análises e predições teorizadas para exploração de reservatórios e suas propriedades, aproximando assim das suas condições reais. A técnica de simular utiliza-se das relações matemáticas ou lógicas, assim como de um modelo que será utilizado pra compreender como o sistema em questão se comporta (Law and Kelton, 1991). Para tanto, constituem-se

representações variadas de fenômenos da natureza na tentativa de se aproximar desses, sendo essa a compreensão de modelagem (Wendland and Pizzarro, 2010). No contexto das simulações numéricas que se baseiam em modelos matemáticos tem-se a, a qual se faz uso no presente trabalho.

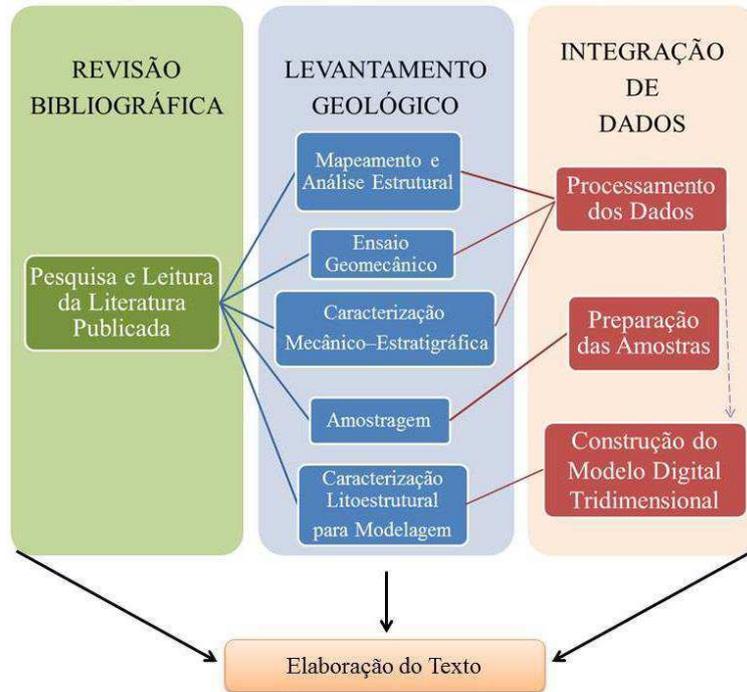
O estudo de fluxos dos fluidos em reservatórios é imprescindível para exploração petrolífera atualmente, para tanto se requer com maior detalhamento a detecção das zonas de alta permeabilidade assim como a variação dessa e de outras propriedades petrofísicas. Através dessa busca por compreender a passagem de fluidos em sub-superfície se oportuniza a busca por softwares que se aproxime de modelos que representem a realidade dos reservatórios. Moraes (1995) traz a importância desse estudo no ramo da indústria de exploração e produção de petróleo, uma vez que os modelos geológicos criados auxiliam no conhecimento da distribuição do campo de tensões atuais numa bacia sedimentar, mesmo com escalas distintas, permitindo melhor compreensão de campos de petróleo e gás no tempo geológico. Porém, os modelos geológicos trazem a complexidade e o desafio de representar a realidade e geometria das estruturas sedimentares e deformacionais (Figura 8). Além disso, como traz Matildes *et al* (2010) tem-se alta complexidade geométrica (falhas, erosões, diápiros, etc), tendo a necessidade da análise e da interpretação lito-cronoestratigráfica, que geralmente necessita de informações nem sempre disponíveis.



**Figura 8** - Modelo geológico representando blocos de rochas com falhas em diferentes dimensões (Antunes et al. 2004).

## 4 METODOLOGIA

Nessa seção serão apresentados os materiais e métodos detalhadamente, compreendendo-os em etapas que foram utilizadas para alcançar os objetivos já citados. A metodologia aplicada foi dividida em três (3) etapas principais, culminando na elaboração do presente texto, como explicitado na Figura 9.



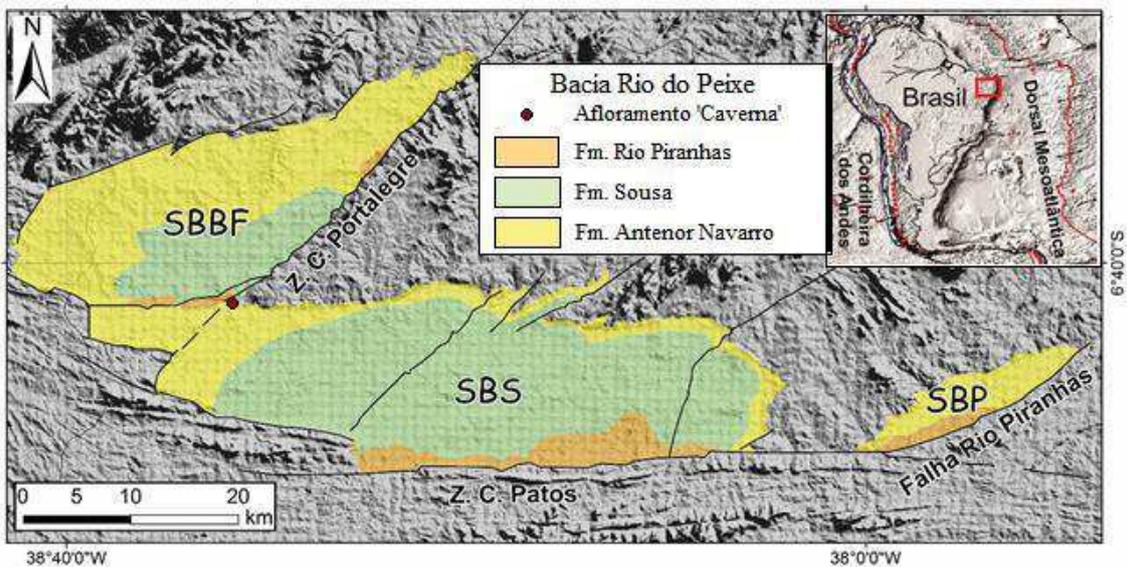
**Figura 9** - Organograma das etapas e atividades realizadas para elaboração da dissertação.

### 4.1 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica compreende a etapa de leitura e pesquisa da literatura publicada, sendo realizada anteriormente a todas as atividades. Nessa fase foram analisados artigos, livros, periódicos, dissertações e monografias que correspondem ao conhecimento científico acerca da Bacia Rio do Peixe, em relação a sua estratigrafia e evolução estrutural, assim como sobre as bandas de deformação, análises petrofísicas, ensaios geomecânicos, estudos de estratigrafia mecânica e modelagem computacional. Foram estudados ainda nessa etapa a aplicação de novas metodologias na análise da deformação rúptil, como a aplicação da técnica de *scanlines*. Objetivou-se, com isso, ter uma fundamentação teórica dos assuntos citados, para assim elaborar o referencial teórico já apresentado, realizar métodos com materiais apropriados, e, também, para a análise dos resultados obtidos.

## 4.2 Levantamento Geológico

O levantamento geológico compreendeu-se em cinco sub-etapas como apresentado na Figura 9. As sub-etapas realizadas consistem em: mapeamento e análise estrutural, ensaio geomecânico, caracterização mecânico-estratigráfica, amostragem e caracterização litoestrutural para modelagem. Dentro da aquisição de dados estruturais, foi realizada primeiramente a escolha da área de estudo (Figura 10), na qual foram delimitadas as porções de maior detalhamento e descrição das bandas de deformação na análise estrutural, assim como a interpretação de imagens de drone adquiridas durante a fase de mapeamento.



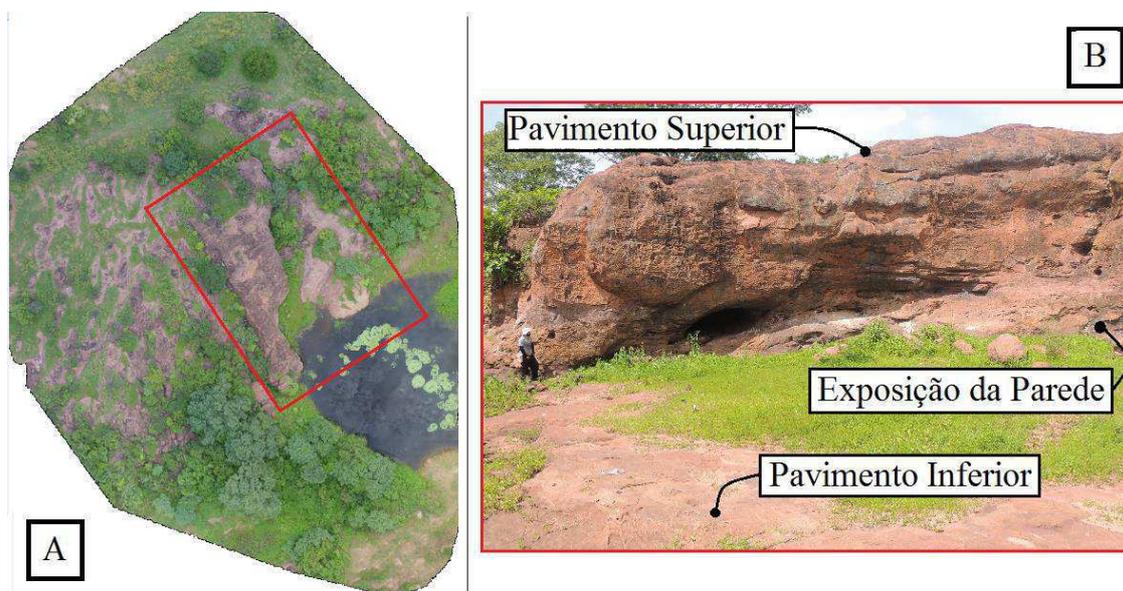
**Figura 10** - Mapa da Bacia Rio do Peixe com a localização do afloramento em estudo.

### 4.2.1 Mapeamento e Análise Estrutural

Para melhor compreensão e distinção das técnicas e materiais utilizados nesta sub-etapa, organiza-se assim em dois (2) sub-tópicos: mapeamento estrutural e análise estrutural, respectivamente. Ainda, dentro da análise estrutural ressalta-se a técnica de *scanline* exposta separadamente, objetivando, com isso, o detalhamento da linha de varredura contínua.

#### 4.2.1.1 Mapeamento Estrutural

Nesta sub-etapa delimitou-se a área de estudo (Figura 11A), como também sub-áreas no afloramento (Figura 11B) para melhor detalhamento e posterior análise estrutural. O afloramento escolhido para o presente trabalho possui uma área topograficamente mais alta que seus arredores, onde nessa há uma parede que apresenta uma pequena caverna na porção central, assim como se tem acesso, também, ao pavimento superior do afloramento, esse mais precisamente sendo a parte externa ao teto da cavidade mencionada, permitindo, portanto, uma visualização tridimensional dos planos estruturais nas unidades litológicas presentes. Ressalta-se, ainda, que é possível observar na parede quatro (4) fácies sedimentares, as quais possuem bandas de deformação distribuídas ao longo de tal exposição, observando a continuidade dessas estruturas também no pavimento superior e inferior (Figura 11).



**Figura 11** - Áreas mapeadas durante o levantamento geológico. Delimita-se o quadrado em vermelho a área total mapeada (A). Em maior detalhe, identificam-se os pavimentos e a exposição do afloramento, mapeados estruturalmente (B).

Durante o mapeamento para a elaboração deste estudo, foram adquiridas imagens de alta resolução, com o objetivo de mapear as estruturas. O mapeamento utilizando esses produtos digitais possibilitou, também, a observação do comportamento das bandas de deformação em relação as suas geometrias e mudanças de orientação. Esses dados serviram também de base para a construção do modelo geológico digital do afloramento Caverna, em que a metodologia utilizada será exposta posteriormente nesta mesma seção.

As imagens de alta resolução foram extraídas através de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), ou drone. Essa aeronave é controlada a distância, através da programação do trajeto em um computador ou por controle remoto. O drone possui uma câmera acoplada abaixo da sua estrutura de motor e de suas quatro (4) hélices de voo, tendo 360° de captação com resolução de 12 megapíxel. Para o trajeto realizado no mapeamento do afloramento, ocorreu a escolha da melhor rota de voo do drone através do *software Google Earth*®, selecionando a área e percurso. O imageamento do afloramento realizou-se com o drone percorrendo 0,5 quilômetros numa altitude de 40 metros, tendo como produto imagens com resolução de dois (2) centímetros por píxel. O voo permitiu gerar imagens tanto da superfície dos pavimentos inferior e superior, quanto as faces da parede da caverna. Esse voo possibilitou a visualização da área de estudo em maior escala. Após a aquisição das imagens referidas, houve o processamento dessas e a construção do mosaico para gerar imagens de alta resolução do afloramento caverna.

A interpretação das imagens adquiridas consiste na identificação e delimitação das principais estruturas do afloramento. Essa análise é realizada com técnicas de criação de linhas e *shapes* por meio do *software ArcGis*® 10.3. Foram aplicadas aproximações para continuidade dos traços criados seguindo as direções das bandas de deformação.

#### **4.2.1.2 Análise Estrutural**

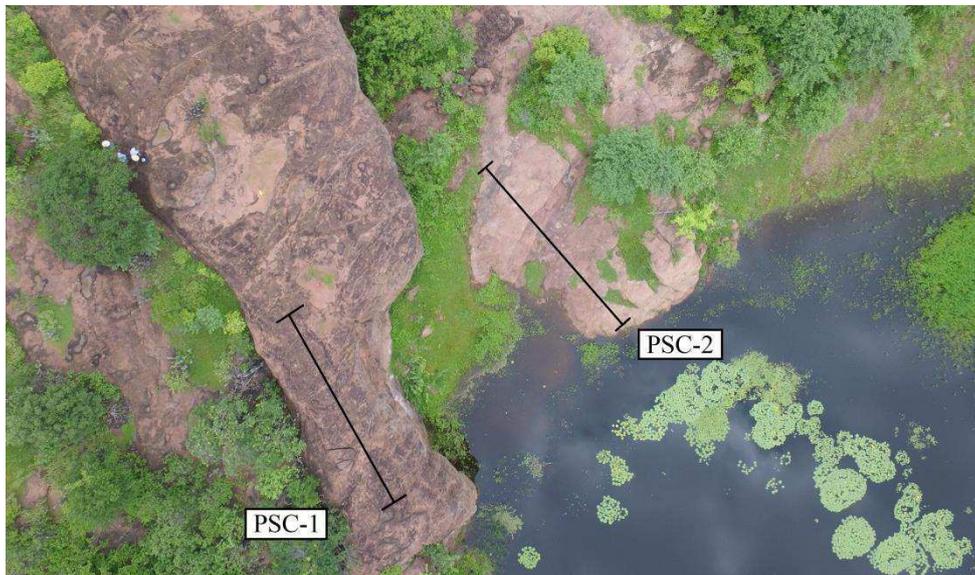
Durante a análise do local de estudo, observou-se a diversidade de direções das bandas de deformação presentes em todo afloramento. Pontua-se que em toda a área aflorante (paredes, pavimentos inferior e superior) há presença das bandas de deformação. Com isso, no afloramento caverna houve um maior enfoque na composição da exposição parede/pavimento superior no quesito geometria das bandas de deformação, uma vez que tal área exposta permite a caracterização dos planos estruturais tridimensionalmente.

Para medição e descrição dos dados estruturais foram utilizadas bússola, máquina fotográfica e escalas geológicas. As estruturas rúpteis foram aferidas em relação as suas direções e mergulhos, sendo também observado se haviam critérios cinemáticos, tais como a presença de estrias e deslocamento de camadas, para poder estabelecer possíveis movimentações de blocos. Além disso, buscou-se analisar o

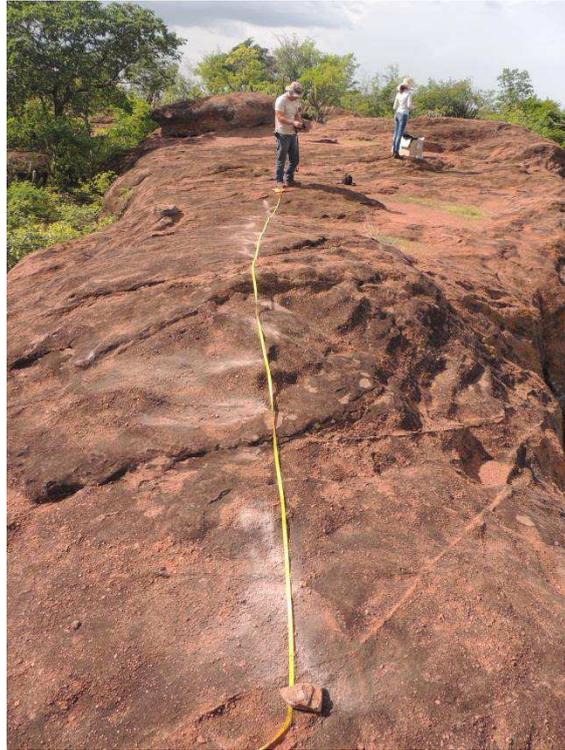
afloramento, mais intensamente na porção do piso que representa a maior exposição de rochas. Compreende-se nessa sub-etapa, portanto, a análise dos aspectos deformacionais nas estruturas presentes.

#### 4.2.1.2.1 *Scanline*

Ainda durante a análise estrutural, foram adquiridas linhas de varredura contínua (*scanlines*). A varredura realizou-se em caminhamentos, nos quais foram adquiridas medidas ao longo de dois (2) perfis com sentidos predefinidos. Os dois perfis foram delimitados nas áreas de piso, tanto no pavimento inferior como no superior (Figura 12). Para a realização das varreduras tem-se a utilização de trenas métricas para que seja possível a identificação de cada centímetro dentro do *scanline*. Com a trena métrica estendida (Figura 13), são feitas descrições macroscópicas em relação ao tipo de banda de deformação (cataclástica, filossilicática, de dissolução e cimentação ou de desagregação). Foram aferidas, através de fita e réguas métricas, medidas de frequência, espessura, distância entre bandas e a direção na qual cada banda cruza a linha de varredura.



**Figura 12** - Localização dos perfis das linhas de varredura traçadas. PSC - Perfil de Scanline da Caverna 1 e 2.



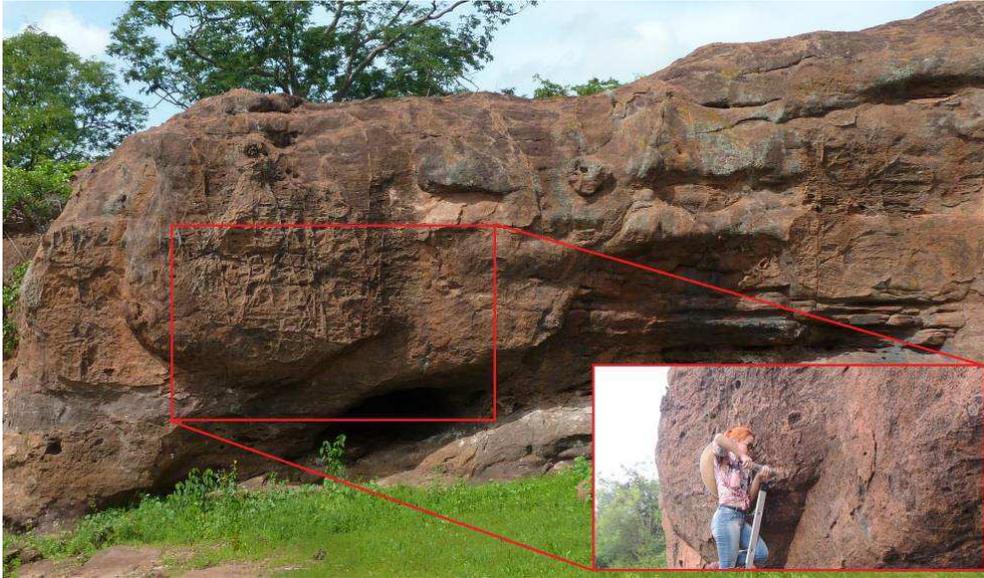
**Figura 13** - Técnica de aquisição dos dados de Scanline, utilizando a fita métrica.

A aquisição dos dados dos *scanlines* realizados também auxilia na sub-etapa de construção do modelo digital tridimensional, o qual necessita dos parâmetros de espessura obtidos através dessa técnica. O processamento e interpretação de dados estruturais foram realizados através de *softwares* de análise geodinâmica, como *Oriente*<sup>®</sup> e *Tectonics FP*<sup>®</sup>, a fim de separar e compreender grupos de falhas, além dos atributos como direção, mergulho e cinemática das BD e planos de falha.

#### **4.2.2 Ensaio Geomecânico**

No processo de levantamento de dados geomecânicos, foram realizados ensaios utilizando o esclerômetro para aferir o parâmetro de resistência à compressão uniaxial. Os ensaios realizados correspondem à elaboração de perfis cruzando zonas de maior e menor deformação, permitindo identificar as variações de valores de resistência.

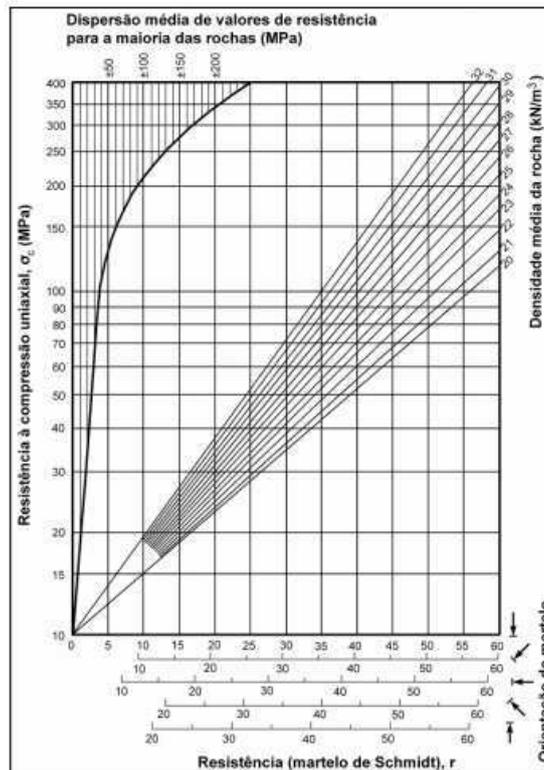
Os valores de rebote do esclerômetro foram extraídos em sua totalidade da exposição da parede, onde o Martelo de *Schmidt* foi utilizado nas quatro (4) fácies sedimentares, assim como medidas foram aferidas em porções contendo bandas de deformação e também em áreas não deformadas (Figura 14).



**Figura 14** - Utilização do esclerômetro nas áreas deformadas e não deformadas.

Na aquisição dos dados, observa-se cada superfície da rocha, buscando identificar possíveis irregularidades nos planos de medidas, para evitar possíveis erros de leitura no equipamento. Nos casos de irregularidades encontradas utilizou-se de uma poletriz para retificar as superfícies e assim poder aferir os rebotes.

Em cada ponto escolhido foram realizadas dez (10) medidas do valor de rebote, seguindo as normas da Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM, 2001). Ao realizar tais medidas, uma média dessas representa o valor de rebote do ponto escolhido. Ainda seguindo as normas citadas, não foram coletados valores de rebote num mesmo ponto, uma vez que a rocha sofre deformação durante o impacto do esclerômetro, alterando assim o real valor da área de interesse. Com o valor da média estabelecida, comparam-se os valores individuais com o obtido pela média para verificar se os valores estão dispersos acima ou abaixo em mais de 7 unidades em relação com a média. Na ocorrência de tal fato, o valor disperso é excluído e se tem uma nova média. Esse processo se repete até que os valores não excedam os limites de dispersão para cima ou para baixo da média, e em seguida, utiliza-se do ábaco de Miller (Figura 15). O ábaco de Miller informa o valor de resistência à compressão uniaxial com base nos valores de rebote do martelo e da densidade média da rocha.



**Figura 15** - Ábaco de Miller. Utilizado para converter os valores de rebote do esclerômetro em valores correspondentes de resistência à compressão uniaxial.

Durante a realização dos ensaios, foram registradas ainda as orientações do esclerômetro no momento da aquisição, uma vez que na conversão do valor de rebote são necessárias todas as orientações aplicadas para utilização do ábaco de Miller. Em relação ao processamento dos dados geomecânicos, os valores de resistência à compressão uniaxial foram correlacionados com suas fácies sedimentares, em áreas com deformação e na sua ausência, gerando gráficos elaborados no *Excel 2010* e *Grapher 7<sup>®</sup>*.

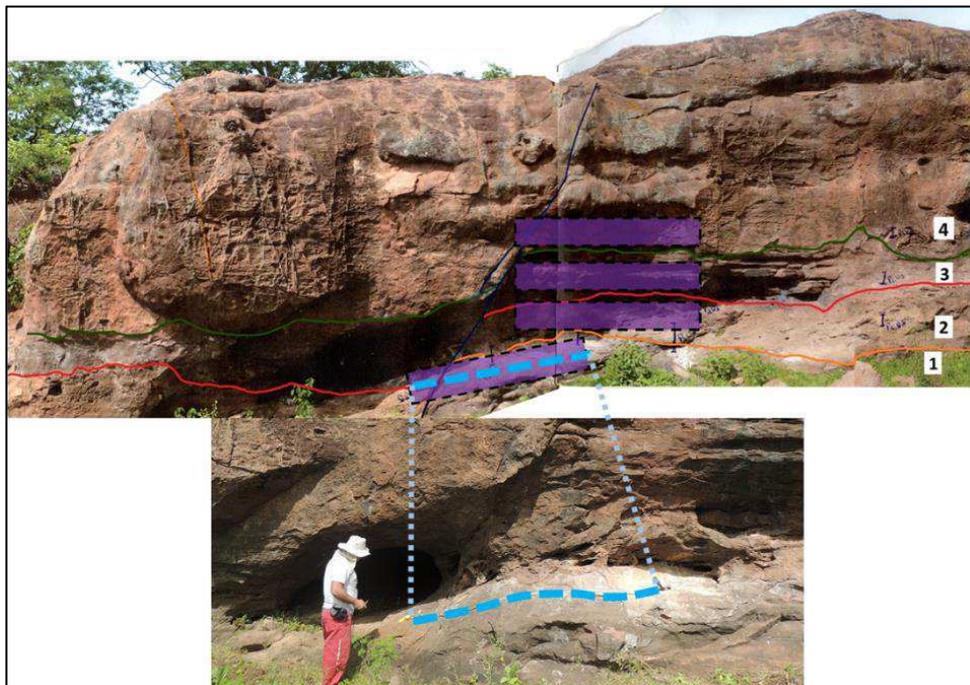
### 4.2.3 Caracterização Mecânico-Estratigráfica

Para a aquisição dos dados de estratigrafia mecânica, ocorreu primeiramente a escolha de áreas de detalhamento estratigráfico no afloramento. A parede do afloramento foi escolhida como área de estudo estratigráfico por essa exposição conter as quatro (4) fácies sedimentares existentes no afloramento. Primeiramente foram reconhecidos e traçados em imagens impressas os limites estratigráficos, sendo esses posteriormente em fase laboratorial, interpretados no *software CorelDraw*, como exposto na Figura 16.



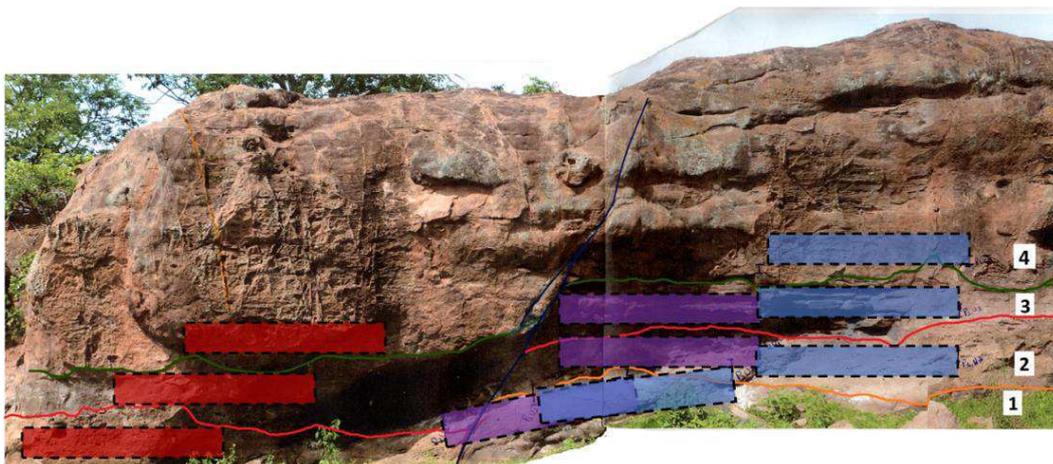
**Figura 16** - Exposição da parede com limites estratigráficos traçados. Tracejado em preto tem-se a banda de deformação principal.

Foram delimitados três (3) perfis na parede utilizando uma trena métrica, onde cada perfil possui três (3) metros de comprimento (Figura 17).



**Figura 17** - Método da coleta de dados mecânico-estratigráficos. Destacado em roxo tem-se o perfil 2, sendo projetado seu comprimento em imagem abaixo mais aproximada.

A varredura através dos perfis objetivou observar o comportamento das bandas de deformação no teto e no piso da falha principal, além de assim ter a representatividade das quatro (4) fácies sedimentares, já que em algumas porções da parede havia ausência de algumas fácies sedimentares por erosão ou movimentação dos blocos devido ao rejeito principal (Figura 18).

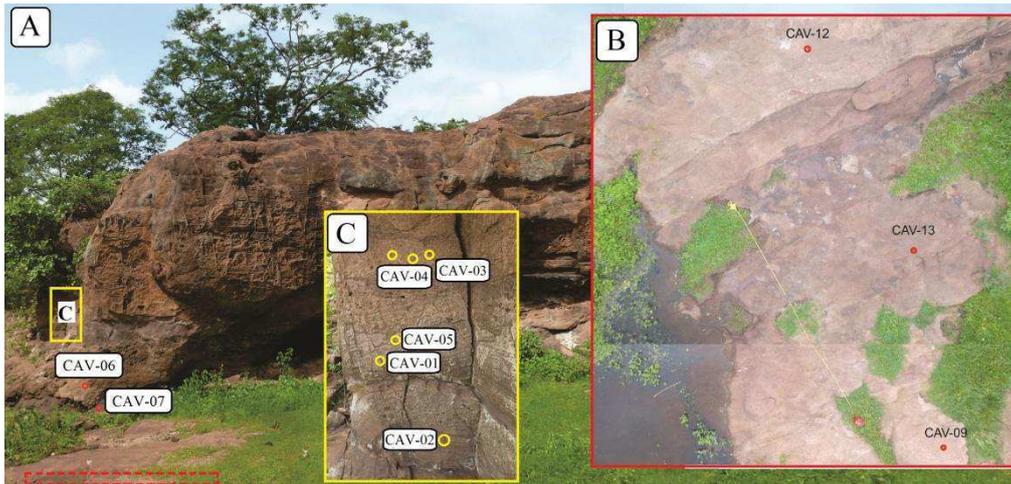


**Figura 18** - Exposição da parede com perfis de coleta de dados mecânico-estratigráficos. Os perfis estão numerados por ordem de coleta, da direita para a esquerda, sendo 1, 2 e 3, respectivamente, azul, roxo e vermelho.

Nos perfis analisados foram descritos as litologias, aferindo atributos estruturais como direção e mergulho das bandas de deformação nas fácies sedimentares. Os dados correspondentes a caracterização mecânico-estratigráfica foram processados e comparados com relação aos perfis de coleta localizados na parede, sendo individualizado para melhor visualização por fácies sedimentar, sendo posteriormente tratados no *CorelDraw*<sup>®</sup>.

#### **4.2.4 Amostragem**

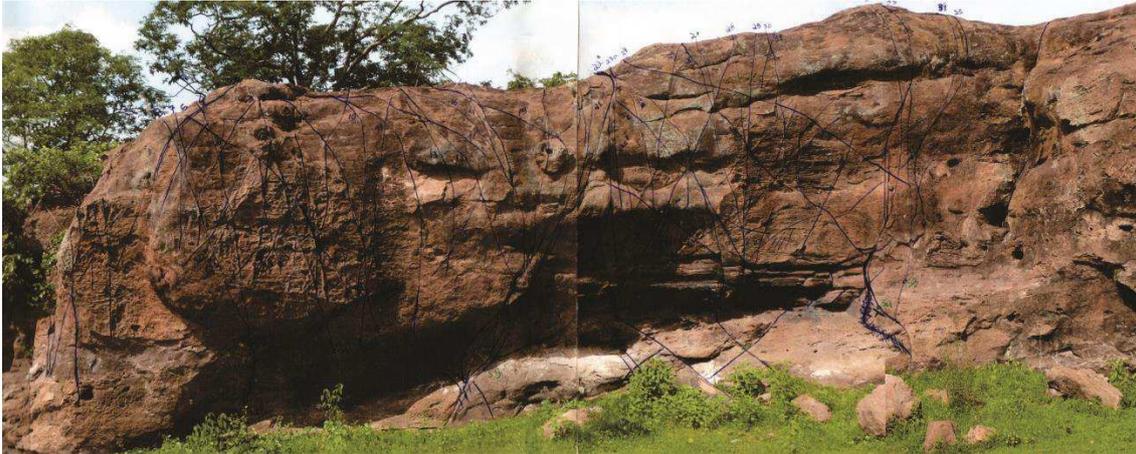
As amostras extraídas do afloramento são compostas por plugues e amostras de mão. Para a coleta em campo dos plugues foi utilizada uma plugadeira manual, os quais passaram por tratamentos posteriores em laboratório. Ressalta-se que durante a extração das amostras procurou-se ter representatividade de todo o afloramento em estudo, uma vez que o resultado dos parâmetros petrofísicos obtidos servirá de base na construção do modelo geológico digital, portanto, foram coletadas amostras das quatro (4) fácies sedimentares, nas quais contém bandas de deformação e amostras coletadas em porções não deformadas (Figura 19).



**Figura 19** - Localização dos plugues coletados na etapa de amostragem.

#### **4.2.5 Caracterização Litoestrutural para Modelagem**

Foram mapeadas as bandas de deformação presentes no afloramento Caverna, onde os planos foram definidos na parede e no pavimento superior da área de estudo. Para tanto, imagens de alta resolução do drone do afloramento extraídas foram impressas em sua melhor resolução, as quais permitiram a visualização e individualização das bandas de deformação na parede, assim como foram impressas as imagens referentes ao pavimento superior do afloramento. Na impressão observou-se que as imagens deveriam ter a mesma escala para que as estruturas pudessem se encaixar no mesmo ponto. Para cada banda de deformação foram interpretadas as estruturas mais expressivas, as quais foram possíveis de serem vistas na imagem impressa, começando na parede e tendo continuidade no pavimento superior (Figura 20). Ao fim de cada banda de deformação interpretada, eram aferidas as orientações nos dois planos perpendiculares para confirmar que se tratava da mesma estrutura. Com isso, foram mapeadas e demarcadas as estruturas mais representativas no afloramento, sendo selecionadas, por fim, 35 bandas de deformação.



**Figura 20** - Mapeamento das bandas de deformação mais expressivas com continuidade no pavimento superior.

### **4.3 Integração de Dados**

Nessa etapa da metodologia ocorre a integração de todos os dados coletados durante o levantamento geológico. Para isso, há a interpretação desses dados e amostras, além do refinamento desses através de procedimentos em laboratório. Essa etapa consiste, portanto, na utilização de *softwares*, elaborando resultados de gráficos e modelo digital tridimensional, assim como há a preparação das amostras coletadas. Divide-se, então, a etapa em: processamento dos dados, preparação de amostras e construção do modelo digital tridimensional, respectivamente, como citado durante desenvolvimento do presente texto. Ressalta que na preparação inicial das amostras coletadas há o corte e a retificação dessas para obter plugues com uma dimensão padronizada.

#### **4.3.1 Construção do Modelo Digital Tridimensional**

Para a construção do modelo geológico digital foi utilizado o *software SolidWorks*<sup>®</sup> versão estudante. Esse *software* é utilizado por projetistas, engenheiros e outros profissionais por possibilitar a criação de sólidos virtuais, tendo visualização do modelo criado tridimensionalmente, permitindo assim que se aproxime das formas mais aproximadas da realidade.

As imagens marcadas na fase de caracterização litoestrutural foram escaneadas e adicionadas ao *software CorelDraw*<sup>®</sup> para edição através de ferramentas de corte, constrate e da criação de linhas e curvas para destacar as estruturas. Ressalta-se que as espessuras utilizadas na criação do modelo (sendo cada BD um sólido tridimensional representado no *software SolidWorks*<sup>®</sup>) foram coletadas utilizando a técnica de *scanline*.

Nas mesmas imagens foram traçados os limites estratigráficos das 4 fácies sedimentares, além da forma apresentada pela entrada da caverna.

Inicialmente, foram definidos os planos bases (Figura 21), sendo delimitado o plano frontal como a parede do afloramento, assim como foi estabelecido perpendicularmente um plano superior referente ao pavimento superior do afloramento. Com isso, foi possível projetar os limites das fácies sedimentares presentes no afloramento, e, através da ferramenta de extrusão do *software*, as quatro (4) fácies foram definidas como sólidos com limites respeitando a sua estratigrafia (Figura 22). Após a criação das fácies sedimentares e da caverna, utilizou-se a ferramenta de recorte para visualização da forma do afloramento na porção superior, apenas para se aproximar o máximo possível da visualização da parede.

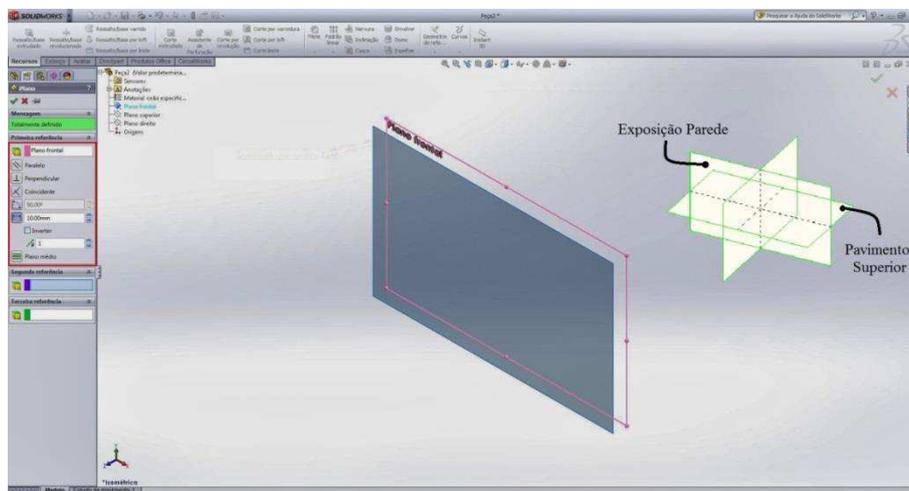


Figura 21 - Visualização dos planos e definição das bases no *software SolidWorks*.

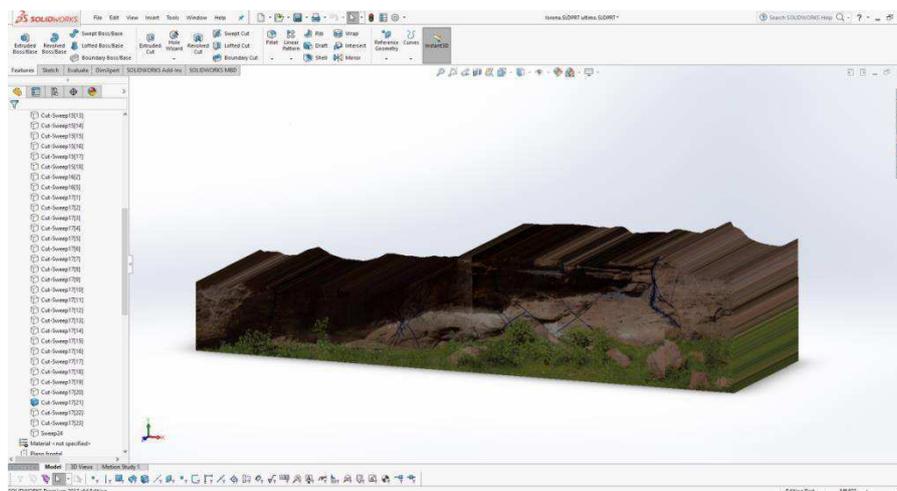


Figura 22 – Criação dos limites estratigráficos definindo as unidades como sólidos extrudidos. Em exemplo, a unidade estratigráfica 2.

Foram traçadas as bandas de deformação individualmente na parede e nomeadas a cada finalização de traço de falha. A finalização é definida quando o traço da estrutura cruza o plano base superior (Figura 23). Ao traço é adicionada a espessura da banda de deformação aferida no *scanline*, e para tanto se utiliza da ferramenta de espessura bidimensional, na qual é inserido o valor de espessura. O mesmo processo ocorre no plano superior e assim utiliza a ferramenta de corte e extrusão, criando o sólido (Figura 24) contido nas fácies sedimentares juntamente a caverna. Essa mesma técnica foi utilizada para a construção de todas as bandas.

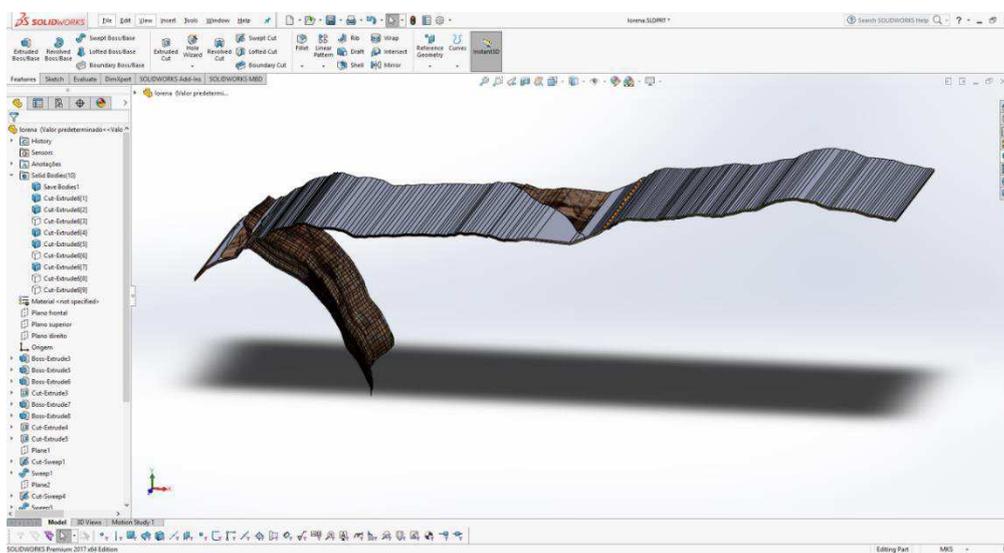


Figura 23 - Visualização da banda de deformação cruzando o plano base do pavimento superior.

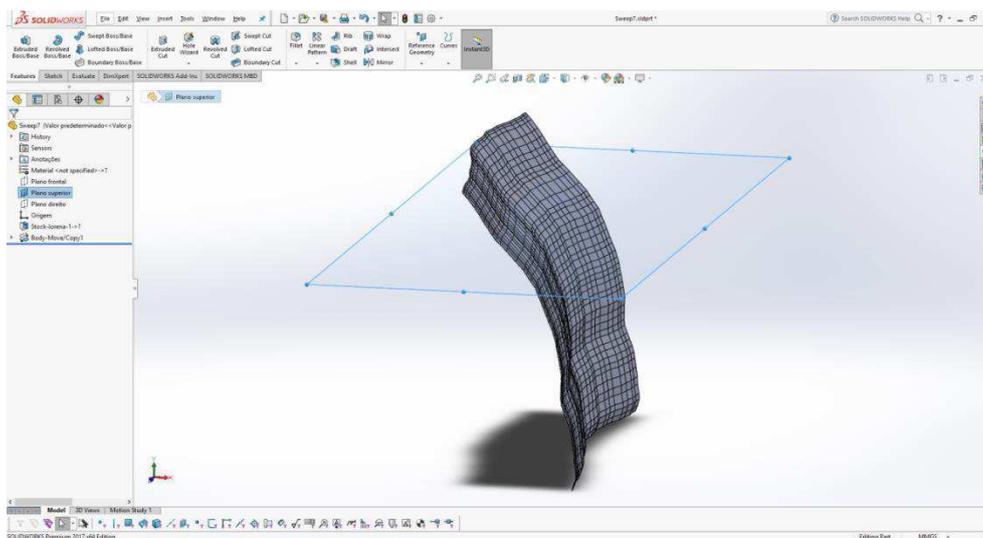


Figura 24 - Individualização da banda de deformação em corte individual.

## **6. MANUSCRITO: IMPACTO MECÂNICO-ESTRATIGRÁFICO NA FORMAÇÃO E NO DESENVOLVIMENTO DE BANDAS DE DEFORMAÇÃO**

### **5.1 Introdução**

O termo bandas de deformação foi definido para estruturas planares que ocorrem comumente em arenitos porosos (Aydin,1978). Segundo Fossen (2011), em rochas sedimentares com porosidade igual ou superior a 15%, a deformação rúptil é expressa por estruturas deformacionais diferentes, sendo essas geralmente associadas à redução de porosidade e permeabilidade em relação à rocha hospedeira (Antonellini & Aydin, 1994; Alikarami *et al.*,2013).

Buscando prever e compreender o provável controle que as estruturas exercem sobre os padrões de fluxo de fluido em um reservatório, tem sido cada vez mais estimulado o desenvolvimento de pesquisas acerca das propriedades petrofísicas de rochas reservatório em zonas de falhas. Tal fato se dá pelo reconhecimento de que essas estruturas podem atuar como condutos e/ou como barreiras ao fluxo de fluidos, (e.g. Seeburger *et al.* 1991; Gibson 1998; Knipe *et al.* 1998; Faulkner *et al.* 2010). As bandas de deformação é o principal componente estrutural nas zonas de danos em rochas porosas (Fachri *et al.*, 2011, 2013a, b), sendo assim o seu conhecimento fundamental para a exploração de reservatórios de petróleo atingidos por essa deformação.

Além do conhecimento acerca das propriedades petrofísicas das bandas de deformação, para compreender a influência dessas estruturas na rocha hospedeira, também requer o conhecimento de uma série de fatores como seu complexo padrão de distribuição e parâmetros de geometria, que diferem da análise convencional de falhas. Como afirma Schultz *et al.*(2010) a distribuição espacial de bandas de deformação afeta em parte a produtividade de petróleo e água subterrânea em reservatórios. Exibindo arranjos uniformemente distribuídos, ou assumindo padrões mais complexos de bandas de deformação do tipo conjugada, quadrimodal ou polimodal, a descrição do arranjo espacial de bandas de deformação em unidades sedimentares de alta porosidade é complexa e variada (e.g. Aydin 1978; Underhill & Woodcock 1987; Healy *et al.* 2006; Healy *et al.* 2015), sendo essa, portanto, uma área da pesquisa científica importante de ser explorada.

Compreendendo a importância do entendimento dessas estruturas rúpteis e sua complexidade, vê-se ainda a necessidade de conhecer as relações entre as bandas de deformação e as unidades estratigráficas afetadas. Tal correlação entre falhas e estratigrafia é denominada de estratigrafia mecânica, a qual se demonstra pela relação entre a intensidade de fraturamento e a espessura e reologia das camadas (e.g., McQuillan, 1973). A estratigrafia mecânica pode exercer influência no ângulo de mergulho das falhas (Ferril & Morris, 2003; Oliveira & Silva, 2015), de modo a influenciar a propagação ou acúmulo de fluido nas regiões deformadas controladas pela geometria dessas estruturas (Souza, 2015). O presente trabalho traz a perspectiva de compreender a influência mecânica estratigráfica das camadas sedimentares no comportamento estrutural das bandas de deformação.

A Bacia Rio do Peixe (Figura 25) possui excelentes exposições com estruturas deformacionais evidentes em seus afloramentos, proporcionando o estudo das bandas de deformação e suas rochas hospedeiras com relação às suas propriedades petrofísicas e complexidade estrutural. Confirmada por Fontes (2007), essa bacia contém um sistema petrolífero, além de ter grande parte de sua evolução em um regime de deformação rúptil, encontrando nela condições para compreendê-la como reservatório análogo a outras bacias que sofreram deformação semelhante.

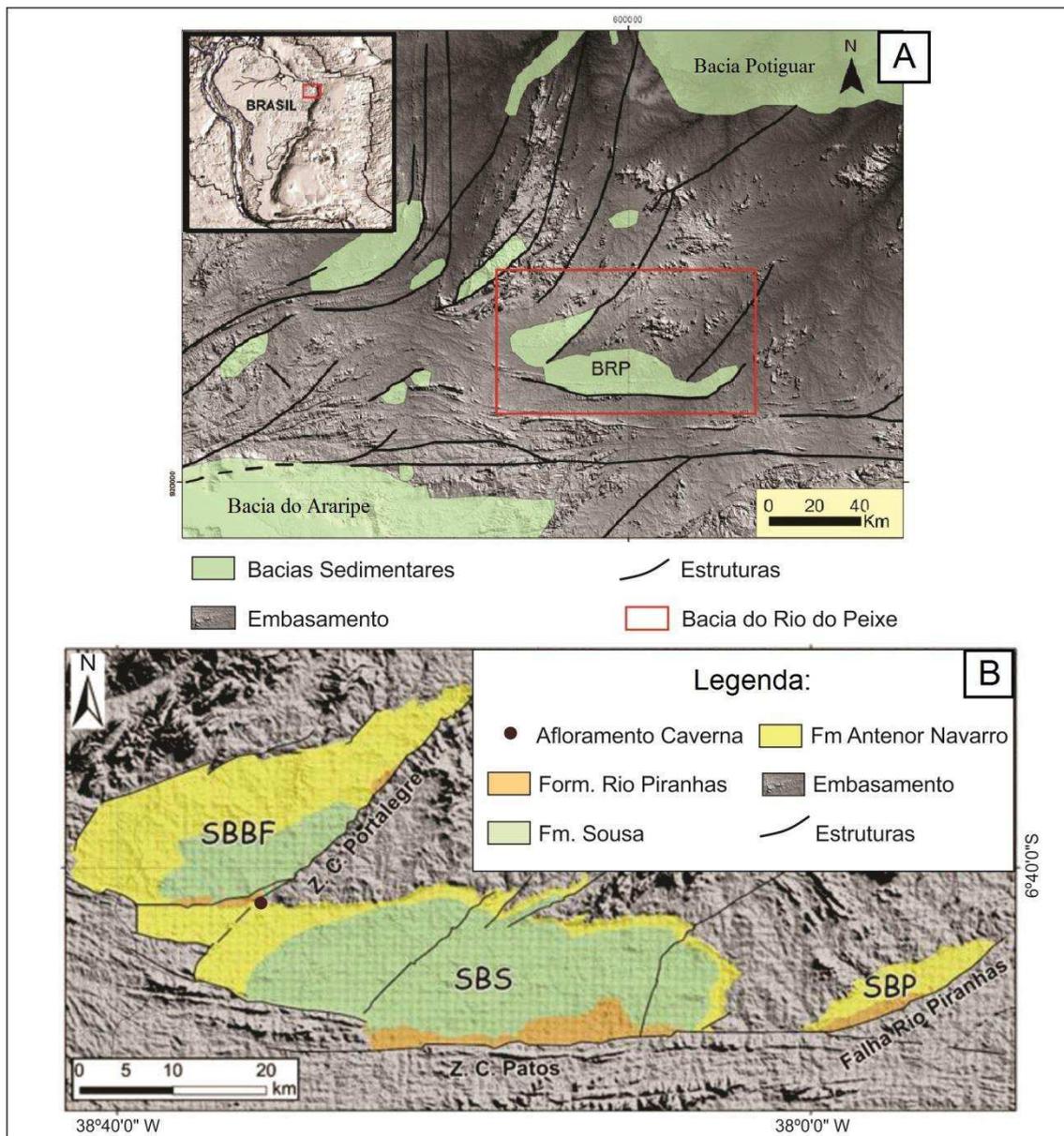


Figura 25 - (A) Localização regional da Bacia Rio do Peixe. (B) Mapa geológico da Bacia Rio do Peixe com localização do afloramento em estudo.

O presente estudo objetiva compreender o controle mecânico-estratigráfico das camadas sedimentares no comportamento das bandas de deformação, através de análises estruturais e sedimentares para entender as propriedades hidráulicas e mecânicas de rochas siliciclásticas, levando em consideração parâmetros petrográficos e petrofísicos.

## 5.2 Contextualização geológica

A Bacia Rio do Peixe (BRP) pertence a um conjunto de bacias sedimentares geradas através do preenchimento de depressões que tiveram origem na separação dos continentes Sul-Americano e Africano, sendo esse grupo denominado de Bacias

Interiores do Nordeste, que derivam do rifteamento eocretácio (Ponte *et al.*, 1991). Dividindo-se em três semi-grabens, a BRP consiste nas sub-bacias Brejo das Freiras, Sousa e Pombal (Françolin *et al.*, 1994), as quais são limitadas pelas falhas Portalegre, Malta e Rio Piranhas, respectivamente (De Castro *et al.*, 2007).

Atribui-se o desenvolvimento das sub-bacias da BRP às zonas de cisalhamento brasileiras reativadas no neocomiano. A geometria de abertura e cinemática desses semi-*grabens* foram controladas por tal arranjo de zonas de cisalhamento, sendo esses elementos tectônicos preexistentes no embasamento Pré-Cambriano (Senant & Popoff, 1991; Lima Filho, 1991).

Segundo dados de Braun (1969), a Bacia Rio do Peixe é composta por três formações: Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas, as quais juntas forma o Grupo Rio do Peixe. Nogueira *et al.*, 2015 descreveu a Formação Antenor Navarro sendo composta de conglomerados e arenitos imaturos na base e arenitos finos no topo que se interdigitam com pelitos, Segundo Srivastava & Carvalho (2004) essa formação se relaciona a um sistema fluvial entrelaçado (*braided*), associado a leques aluviais proximais. Sendo a unidade de maior exposição areal na BRP, a Formação Sousa caracteriza-se pela predominância de folhelhos e siltitos avermelhados depositados por um sistema lacustrino (De Castro *et al.*, 2007), tendo como ambiente deposicional composto de águas calmas, sendo, portanto, lacustre raso com influencia fluvial (Vasconcelos, 1980; Srivastava & Carvalho, 2004). De Castro *et al.*, 2007 descreve a Formação Rio Piranhas como sendo composta por conglomerados e arenitos grossos depositados por um sistema de leques aluviais.

### **5.3 Metodologia**

A metodologia aplicada neste trabalho foi dividida no processo de levantamento geológico em campo e na integração dos dados através das análises laboratoriais. As atividades de campo incluíram o mapeamento e análise estrutural das bandas de deformação e a caracterização mecânico-estratigráfica das unidades sedimentares. Nessas unidades foram realizados ensaios geomecânicos com auxílio do martelo de Schmidt, além da amostragem e coleta de plugues para análise petrofísica e confecção de seções delgadas. Para a integração dos dados e análises em laboratório, foram realizadas medidas de propriedades petrofísicas como porosidade e permeabilidade, além do cálculo dos módulos de Young e Razão de Poisson.

O mapeamento foi realizado em toda a exposição do afloramento em estudo, tendo uma ênfase maior no pavimento superior e na exposição da parede, já que esses dois planos permitem a visualização tridimensional das bandas de deformação (Figura 26). Foram adquiridas imagens de alta resolução através de um drone, e aferidos elementos estruturais como direção e mergulho das bandas. A interpretação e análise dos dados foi realizada no *software* ArcGis® 10.3.

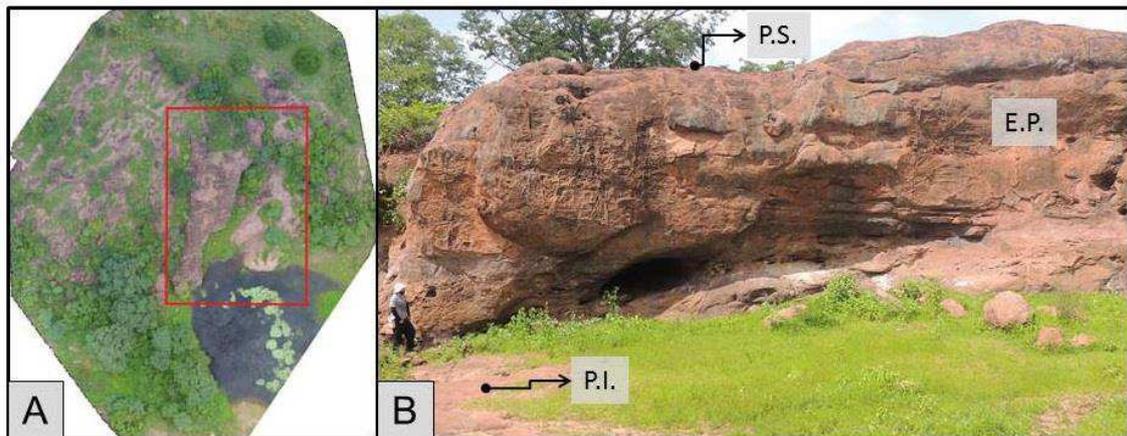


Figura 26 - Áreas mapeadas durante levantamento geológico. (A) Delimita-se em vermelho a área total mapeada. (B) Em maior detalhe, identificam-se os pavimentos e a exposição do afloramento, mapeados estruturalmente.

Dentro da análise estrutural foram adquiridas linhas de varredura contínua (*scanlines*), onde medidas de frequência, espessura, distância entre bandas e direção foram aferidas nos pavimentos superior e inferior do afloramento. Para a aquisição dos dados mecânico-estratigráficos foram reconhecidas as fácies sedimentares presentes na exposição da parede e traçados os limites stratigráficos em imagens impressas ainda em campo, sendo interpretados posteriormente em laboratório (Figura 27).



*Figura 27 - Exposição da parede com limites estratigráficos traçados. Tracejado em preto a banda de deformação principal.*

Foram delimitados três perfis na exposição da parede para a varredura e coleta dos dados mecânicos-estratigráficos, objetivando com isso a representatividade de todas as fácies sedimentares. Nos perfis analisados foram descritas as litologias, aferidos atributos estruturais nas unidades estratigráficas.

Durante a etapa de campo, foram realizados ensaios geomecânicos utilizando o esclerômetro com objetivo de aferir o parâmetro de resistência à compressão uniaxial, em áreas deformadas e não deformadas. Os ensaios foram realizados em todas as fácies sedimentares, no teto, piso e em cima da banda de deformação principal.

Na etapa de amostragem foram coletados plugues utilizando uma plugadeira manual objetivando a análise dos parâmetros petrofísicos, além de amostras em bloco para confecção e análise de seções delgadas. As amostras foram coletadas de todas as unidades estratigráficas, para assim comparar suas propriedades. As seções delgadas confeccionadas foram analisadas em microscópio ótico petrográfico, além disso, foram medidos os parâmetros petrofísicos em laboratório através do equipamento Autolab 500°.

Para a aquisição dos dados de estratigrafia mecânica, ocorreu primeiramente a escolha de áreas de detalhamento estratigráfico no afloramento. A parede do afloramento foi escolhida como área de estudo estratigráfico por essa exposição conter as quatro (4) fácies sedimentares existentes no afloramento. Foram delimitados três (3) perfis na parede utilizando uma trena métrica, onde cada perfil possui três (3) metros de

comprimento. A varredura através dos perfis objetivou observar o comportamento das bandas de deformação no teto e no piso da falha principal, além de assim ter a representatividade das quatro (4) fácies sedimentares, já que em algumas porções da parede havia ausência de algumas fácies sedimentares por erosão ou movimentação relativa de blocos, devido ao rejeito principal (Figura 28).

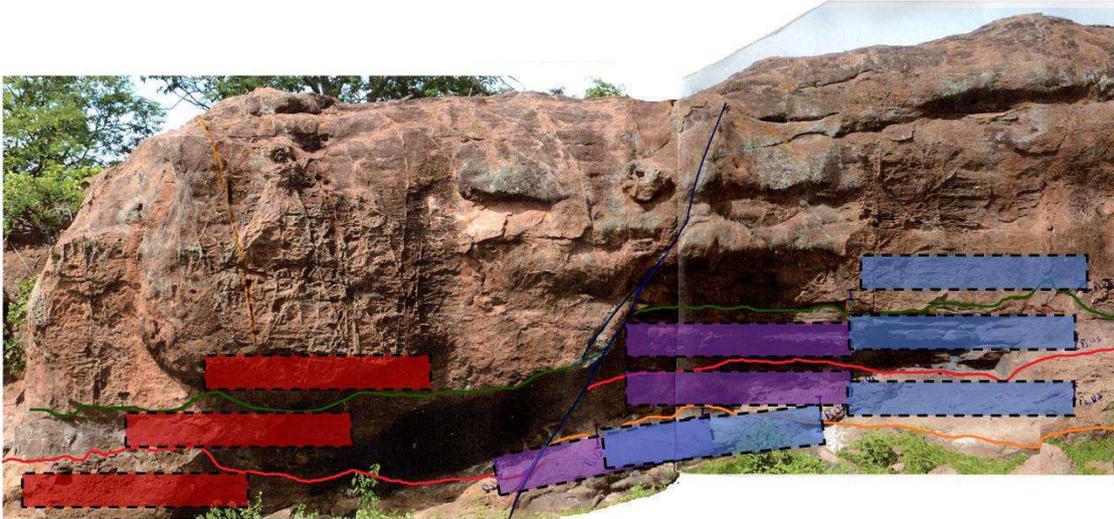


Figura 28 - Perfis de descrição e coleta de dados mecânico-estratigráficos.

Nos perfis analisados foram descritos as litologias, aferindo atributos estruturais como direção e mergulho das bandas de deformação nas fácies sedimentares. Os dados correspondentes a caracterização mecânico-estratigráfica foram processados e comparados com relação aos perfis de coleta localizados na parede, individualizando para melhor visualização por fácies sedimentar.

## 5.4 Resultados:

### 5.4.1 Descrição faciológica e bandas de deformação

#### 5.4.1.1 Mapeamento de fácies

Dentro da descrição sedimentar de cada unidade, constatou-se que todo o afloramento compõe-se de rochas clásticas, sendo arenitos com variações de tamanho de grão e matriz.

A unidade estratigráfica 1 trata-se de um arenito muito coeso e intensamente deformado, além de variar sua granulometria de fina a média, suportado por matriz argilosa (Figura 29A). Encontram-se ainda na unidade 1 níveis estratigráficos mais argilosos, não chegando a compor o pacote inteiro para caracterizar camadas. Composta por grãos de feldspato, quartzo, biotitas e opacos, apresentando boa seleção. Em

algumas seções é possível observar o empacotamento variando com a presença das bandas de deformação, sendo mais fechado na área deformada e mais aberto em outras porções não deformadas (Figura 29E).

A unidade estratigráfica 2 trata-se de um arenito conglomerático maciço, ainda com porções argilosas, tendo uma maior porosidade que na unidade anterior, aparentando o caráter vugular ou de dissolução de seus poros (Figura 29.B). Composta em sua maioria por feldspato, tendo ainda grãos de quartzo e fragmentos de rocha, possui grãos fraturados, muito dissolvidos. A rocha tem uma seleção pobre com contatos pontuais entre os grãos. Apresenta em algumas seções cimentação carbonática entre seus grãos (Figura 29.F).

A unidade estratigráfica 3 é a mais atingida pela deformação rúptil, nela encontra-se a maior quantidade de BDs, sendo esses planos estruturais os mais finos entre as outras camadas (Figura 29.C). Essa unidade caracteriza-se como um arenito com granulometria de fino a muito fino de matriz argilosa, e com estratificação plano paralela em toda a camada. Sua composição mineralógica é de grãos de feldspato e opacos, além de minerais micáceos que, por vezes, apresentam-se dobrados (Figura 29.G). Os grãos apresentam-se muito fraturados e por vezes dissolvidos, tendo um empacotamento fechado gerando contatos retos e curvos. As micas e biotitas não seguem uma direção estrutural como os outros grãos que estão realinhados com as bandas de deformação, podendo essas serem responsáveis pela orientação da estratificação plano paralela.

A unidade estratigráfica 4 compõe-se de um arenito conglomerático matriz suportado, sendo essa composta de areia grossa, atingido pelas bandas de deformação com menor frequência e variação dos mergulhos, apresentando maior espessura dessas estruturas rúpteis, mostrando-se a camada de topo e mais espessa (Figura 29.D). Composta por grãos de feldspatos, sendo esses mal selecionados, com empacotamento fechado e bastante fraturados. Em algumas seções observam-se grãos de feldspato dissolvidos, gerando porosidade móldica (Figura 29.H).

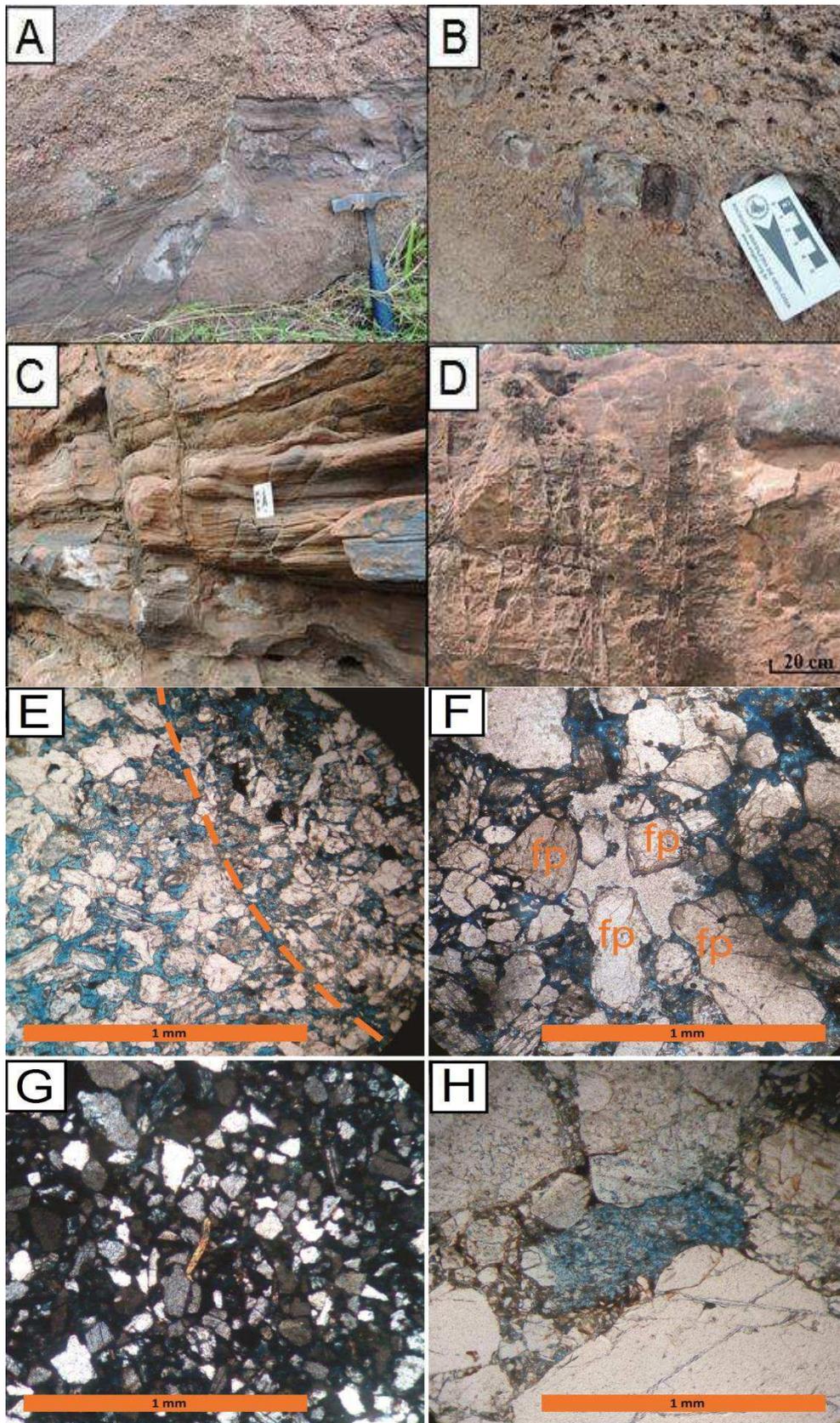


Figura 29 - Unidade estratigráficas 1,2,3 e 4 em macro escala, respectivamente, em (A),(B),(C) e (D). Fotomicrografias das unidades 1,2,3 e 4 respectivamente (E), (F), (G) e (H). (E) Empacotamento mais apertado delimitado na lateral superior direita. (F) Cimento carbonático circundado por grãos de feldspato(fp). (G) Presença de mineral micáceo (colorido) dobrado. (H) Porosidade móldica.

### 5.4.1.2 Mapeamento e dados estruturais

Dentro do mapeamento e análise estrutural, foram mapeadas e interpretadas as bandas de deformação mais expressivas vistas nos produtos digitais processados do drone, sendo possível, com isso, a delimitação dessas estruturas, observando os *trends* preferenciais presentes no afloramento (Figura 30).

As bandas de deformação mapeadas apresentaram-se seguindo três (3) *trends* estruturais, sendo esses de direção: nordeste, leste-oeste e noroeste. O *trend* de direção norte também foi encontrado, porém sempre inflexionando para a direção nordeste ou derivando desta. Essas mesmas direções foram encontradas em todo afloramento, tanto na parede como nos dois pavimentos, sendo possível observá-las por unidade estratigráfica na Figura 30. Como representado nos gráficos de roseta, as unidades estratigráficas mais atingidas pela deformação são respectivamente 3, 1, 2 e 4.

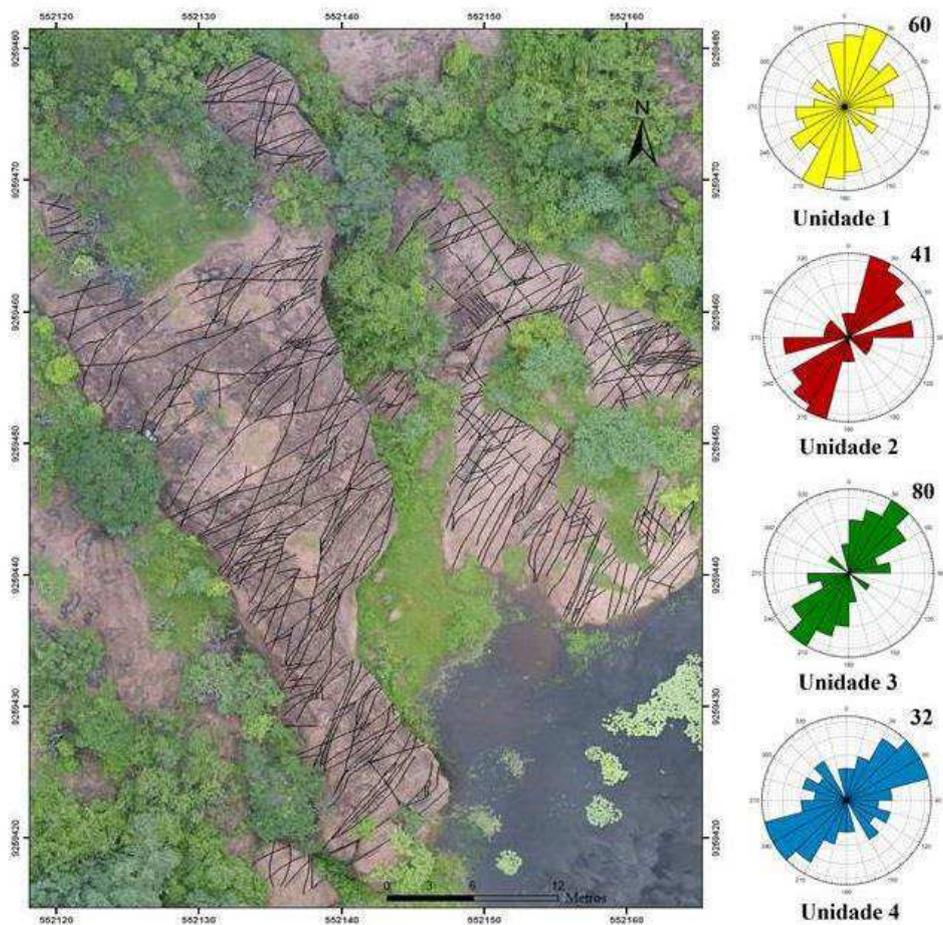


Figura 30 - Mapa estrutural do afloramento caverna. Rosetas apresentando orientações das bandas em cada unidade, com sua frequência acima.

Durante a análise estrutural foram observados alguns critérios cinemáticos em relação às bandas de deformação e as litologias aflorantes. As bandas de deformação foram analisadas na parede e no pavimento inferior com maior detalhamento, a fim de compreender os planos estruturais e seu comportamento tridimensionalmente. As unidades estratigráficas 1, 2 e 3 foram atingidas por bandas de deformação em orientações semelhantes se distinguindo na frequência e mergulho dessas. A unidade estratigráfica 4 não é atingida por bandas de deformação de 216 a 255Az.

Em relação à análise estrutural do pavimento inferior, observaram-se as bandas de deformação em relação a sua geometria e mudança de direção no cruzamento de planos. Em algumas direções é possível observar deslocamento dos planos deformados através do cruzamento com bandas de deformação e fácies sedimentares que se apresentam interrompidas e deslocadas. A interpretação cinemática geral foi compreendida no regime distensivo, sendo observados casos locais com regimes compressivos por acomodação de espaço, tendo, também, a ocorrência de bandas de deformação com deslocamento de blocos caracterizando cisalhamento. A banda de deformação principal que desloca todos os estratos presentes na exposição da parede segue o *trend* de direção nordeste. Através do deslocamento das unidades estratigráficas afirma-se que as bandas de deformação foram formadas e evoluídas dentro de um regime distensional, tendo cinemática de compressão e cisalhamento.

#### **5.4.2 Parâmetros petrofísicos e resistência à compressão uniaxial (*Uniaxial Compressive Strength-UCS*)**

##### **5.4.2.1 UCS**

Em análise dos valores médios de resistência rebatidos em cima das bandas de deformação em cada unidade estratigráfica, ver-se que não há grande variação dos valores entre as unidades (Figura 31). Ressalta-se que os valores médios das unidades 1 e 2 se equivalem, e os valores maiores e menores referem-se às unidades 4 e 1, respectivamente. Comparando os valores de resistência referentes às áreas não deformadas de cada unidade estratigráfica, é possível afirmar que a unidade estratigráfica com menor valor de rebote é a unidade 3, seguindo-se da unidade 1, 4 e 2. Portanto, os menores valores médios gerais de resistência correspondem à unidade 3. A unidade estratigráfica 4 possui valores maiores de resistência a compressão uniaxial e também bandas de deformação mais espessas, além disso possui maior tamanho de grão em relação as outras unidades por se tratar de um arenito conglomerático. Apesar dessas

características sedimentares da unidade 4 indicarem ser mais resistente, tem-se um valor mais alto na unidade 2 nos ensaios realizados nas áreas não deformadas, podendo ser atribuído tal fato a granulometria mais grossa, ou pela sua cimentação ou maior coesão dos grãos devido à acomodação ocasionada pela deformação.

Também foram interpretados os gráficos que comparam os valores de resistência uniaxial no teto e piso da banda de deformação principal, em relação aos ensaios realizados nas unidades 3 e 4 (Figura 31). Percebe-se que os valores apresentados nas unidades 3 e 4 variam pouco, praticamente se equivalendo em termos de resistência. Em relação aos ensaios obtidos das áreas não deformadas, apresentam-se maiores valores no teto para as duas unidades analisadas. Nos resultados obtidos em cima das bandas de deformação ver-se que na unidade 4 há um maior valor de resistência nessas presentes no teto que no piso da banda de deformação principal. O inverso ocorre na unidade 3, porém com menor variação de valores. Em geral os valores de obtidos no bloco do teto são maiores para as áreas deformadas e não deformadas, sendo essa porção mais resistente analisando as unidades 3 e 4.

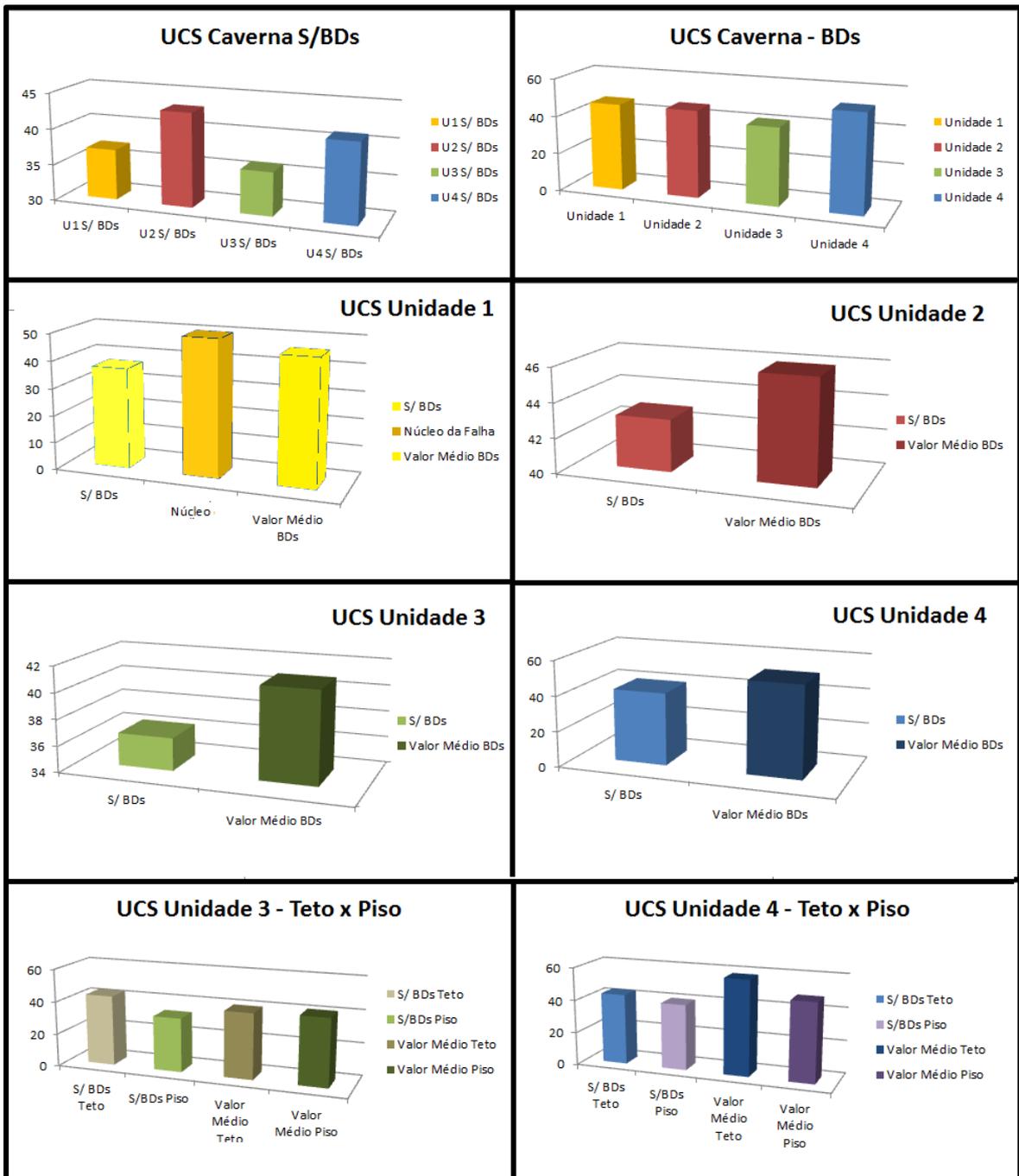


Figura 31 - Valores de resistência a compressão uniaxial (UCS) encontrados em cada unidade estratigráfica, rebatidos em cima das BDs e em porções não deformadas. Ainda são apresentados valores comparado os resultados obtidos no teto e piso da banda de deformação principal.

#### 5.4.2.2 Propriedades Petrofísicas

Os valores de porosidade obtidos (Figura 32) apresentam a unidade 3 como mais porosa, sendo a unidade 4 com menor valor de porosidade. Já em relação a permeabilidade essa relação é inversa, apresentando maiores valores para a unidade 4 e

menores para o unidade 3. Esses dois parâmetros petrofísicos apresentam valores semelhantes para as unidades estratigráficas 1 e 2. A relação semelhança também ocorre ao observar os valores médios do módulo de elasticidade, no qual apresenta menor valor para a unidade 3 e maior para a unidade 4, com valores semelhantes para as unidades 1 e 2. Esse padrão não se repete apenas para o módulo de Poisson, já que nessa propriedade os menores valores encontrados apresentam-se nas unidades 1 e 3, respectivamente, tendo maiores valores para unidade 4 e 2.

<b>Propriedades</b>	<b>Unidade 1</b>	<b>Unidade 2</b>	<b>Unidade 3</b>	<b>Unidade 4</b>
<b>Porosidade</b>	20,166	20,349	23,277	12,819
<b>Permeabilidade</b>	33,291	30,905	23,850	43,733
<b>Módulo de Young</b>	24,657	24,233	17,710	35,035
<b>Módulo de Poisson</b>	0,192	0,203	0,184	0,232

*Figura 32 - Valores médios dos resultados obtidos dos ensaios de porosidade, permeabilidade, módulo de young e de poisson para cada unidade estratigráfica.*

Comparando os valores apresentados pelos parâmetros petrofísicos, observa-se que quanto maior o módulo de elasticidade menor são os valores de porosidade. Conferindo ainda a unidade estratigráfica 3 a menor média de módulo de elasticidade, sendo, portanto, menos resistência a deformação. Essa mesma interpretação também se sustenta pela mesma unidade ser a mais atingida pelas bandas de deformação, possuindo a maior frequência. Com isso, compreende-se essa unidade estratigráfica como a unidade mecânica menos resistente a deformação estrutural.

Os valores do módulo de Poisson corroboram com os obtidos pela resistência uniaxial, nos quais se observa a relação de incompressibilidade dos estratos. As unidades estratigráficas 2 e 4 possuem as maiores médias de resistência uniaxial e da razão de Poisson. Esses valores mais altos podem ser atribuídos a presença do cimento carbonático na unidade estratigráfica 2, conferindo a rocha maior coesão. Assim como, na unidade estratigráfica 4 pode ser atribuída a ter maior granulometria, resistindo mais as deformações. Observa-se que essas unidades possuem as bandas de deformação mais

espessas, e também são os arenitos com maior granulometria. Ressalta-se ainda que essas camadas foram rompidas pelo cisalhamento da banda de deformação principal. Essas camadas circundam a unidade estratigráfica 3 que não se rompe com o mesmo cisalhamento da BD principal, mostrando o contraste de competência.

### **5.4.3 Estratigrafia mecânica**

#### **5.4.3.1 Unidades mecânicas**

As unidades estratigráficas foram descritas e identificadas, sendo possível delimitar seus contatos estratigráficos e seus componentes visíveis macroscopicamente. Com isso, foram definidas quatro (4) unidades estratigráficas, sendo numeradas de baixo para cima, as quais afloram em totalidade no piso da falha principal, e tem continuidade no teto da banda de deformação principal ficando apenas a unidade 1 sem aflorar.

Todas as unidades estratigráficas foram atingidas por bandas de deformação, sendo aferida, assim, a frequência dessas estruturas em cada unidade, essa utilizada também como critério para definição das unidades mecânicas. Analisando as direções e frequência das estruturas atuantes em diferentes unidades, encontra-se na terceira unidade estratigráfica a maior quantidade de bandas de deformação. Portanto, a unidade estratigráfica 3 foi mais intensamente deformada em relação as outras, contrariamente da unidade estratigráfica 4 foi deformada com menor intensidade tendo ausência de bandas de deformação mergulhando dos azimutes entre 216 a 255.

A separação das orientações por intervalo de azimutes, apresentada nos gráficos em barras dos mergulhos das bandas de deformação, permitiu a observação do controle e atuação estrutural em cada unidade estratigráfica (Figura 33). As unidades estratigráficas são atingidas por bandas de deformação com maior frequência certos intervalos azimutais de mergulho, percebendo-se que ambas as unidades comportam-se mecanicamente da mesma maneira, permitindo a propagação dos mergulhos igualmente, ou seja, resistindo menos a propagação da inflexão da estrutura mergulhando no mesmo range azimutal.

Apesar de se comportar mecanicamente semelhante a unidade estratigráfica 2, a unidade estratigráfica 3 permite maior propagação e inflexão das bandas de deformação, sendo a mais atingida pela deformação, com maior frequência e intensidade. Ressalta-se, ainda, que é na unidade mais atingida que se encontra a

caverna, sendo um poro agigantado que tem uma de suas paredes o plano da banda de deformação principal. Apesar da banda de deformação principal atingir todas as unidades, é na unidade estratigráfica 3 que a corrosão e percolação de fluido utilizou desse plano para o processo de formação da caverna. Essa mesma camada possui a maior quantidade de bandas de deformação mergulhando no *trend* E-W e NE.

As unidades estratigráficas 1 e 2 possuem semelhante frequência de bandas de deformação que se distribuem variando em cada estrato. Apesar da distribuição de bandas de deformação mergulhando em ranges distintos, há forte atuação de bandas de deformação mergulhando no *trend* E-W e NE, mas em frequência bem menor que na unidade 3.

A unidade estratigráfica 4 possui bandas de deformação com maior espessura, porém, tem também a menor frequência dessas, além disso, não permite a inflexão das bandas de deformação no intervalo azimutal já citado, sendo assim mais resistente mecanicamente a deformação nesse range direcional.

Diferentemente de como é definido unidade mecânica para fraturas e falhas, e embora essa observação da inflexão da estrutura se repita em todos os estratos, o parâmetro de variação de mergulho dos planos não é fator definidor de unidade mecânica no presente trabalho. Justifica-se tal fato pela observação da continuidade dos planos das bandas de deformação em todas as camadas, sendo necessários outros parâmetros mecânicos (propriedades petrofísicas e de resistência á compressão uniaxial) para essa definição.

A partir dessa análise, e adaptando os critérios de unidade mecânica utilizado para falhas para bandas de deformação, foram definidas as unidades mecânicas 1, 2 e 3, aglutinando as unidades estratigráficas 1 e 2, como unidade mecânica 1, pelos critérios já de frequência, parâmetros petrofísicos e UCS já apresentados, assim como, a unidade estratigráfica 3 como sendo unidade mecânica 2, sucedendo-se da unidade estratigráfica 4 como mecânica (Figura 33).

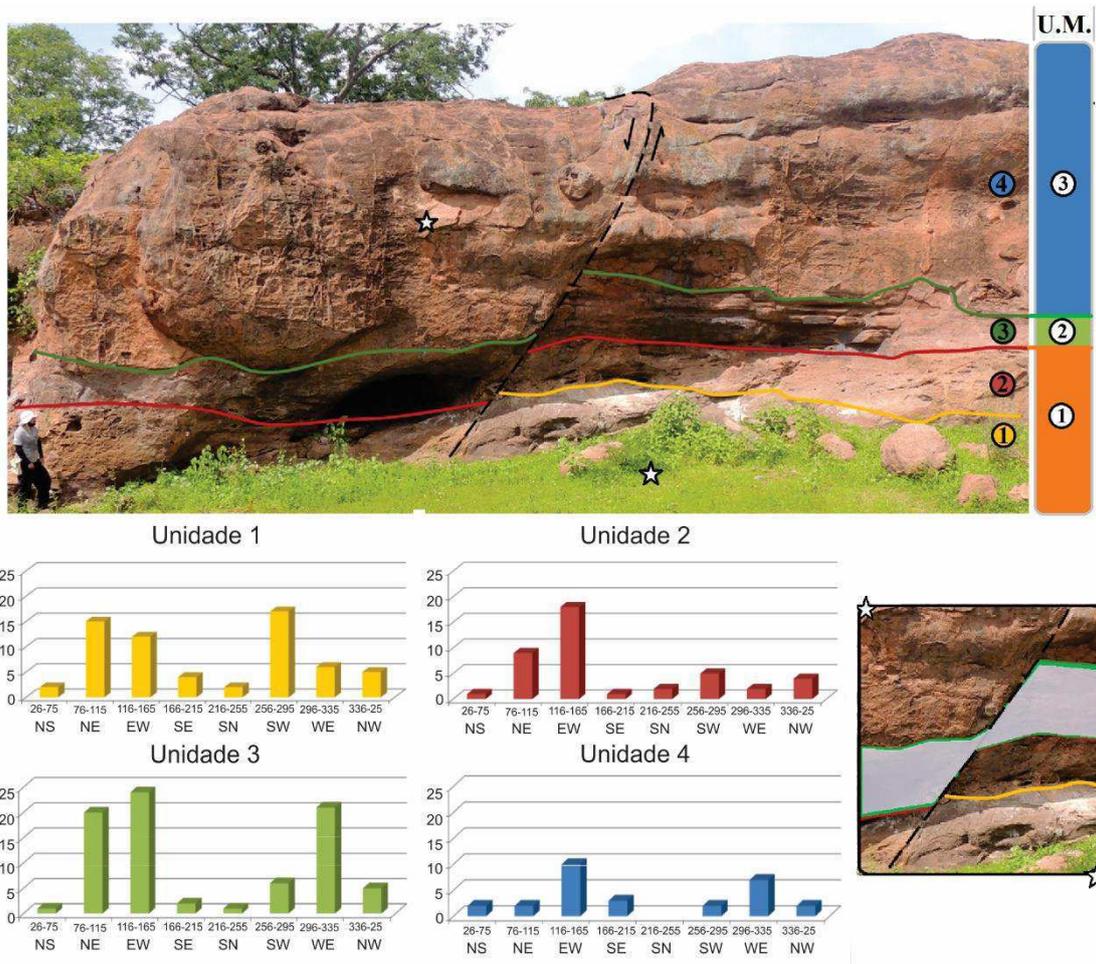


Figura 33 - Unidades estratigráficas (4) x Unidades mecânicas (3). Os gráficos apresentam as orientações de mergulho das bandas de deformação em cada unidade. Abaixo um recorte evidenciando o afinamento da unidade estratigráfica 3.

## 5.5 Discussões

O conceito de unidade mecânica utilizado no presente trabalho teve como parâmetros diferenciais a variação de frequência das bandas de deformação e propriedades petrofísicas como porosidade, permeabilidade, velocidade de propagação e módulo de elasticidade. Bertotti *et al.* (2007) definem que as unidades mecânicas correspondem a um pacote de camadas onde todas as fraturas começam e terminam nos limites da própria unidade. Para delimitar uma unidade mecânica, Ferril *et al.*, (2017) considera as propriedades de materiais variáveis nas camadas rochosas, a espessura das camadas e características e propriedades de fricção dos limites entre camadas. Em ambas as definições trazidas da literatura são aplicados parâmetros para fraturas e falhas, estruturas nas quais se comportam mecanicamente diferente de bandas de deformação. A partir do mapeamento estrutural, pôde-se compreender que as bandas de deformação atingiram as unidades estratigráficas (com exceção da unidade estratigráfica 4) em todas as direções, não podendo utilizar-se dos critérios citados como parâmetros

diferenciais separadamente para delimitar unidade mecânica. Considerando a geometria das bandas de deformação e a acomodação da deformação em cada pacote sedimentar atingido, e corroborando com Ferrill *et al.*, (2017), a frequência das bandas de deformação juntamente às propriedades petrofísicas são utilizadas como parâmetros principais para definir uma unidade mecânica.

Em cada unidade mecânica se observou uma mudança brusca da frequência das bandas de deformação e a inflexão dessas estruturas atravessando cada pacote, inferindo o controle mecânico estratigráfico como principal agente dessas mudanças. Ferrill e Morris (2008) assim como Roche *et al.*, (2013) trazem que o controle mecânico estratigráfico influencia na nucleação e crescimento das falhas. Em toda a exposição do afloramento têm-se um grande grupo de bandas de deformação mesma com direção e mergulho que transpassa todos os pacotes sedimentares, porém em cada unidade mecânica há uma frequência distinta de bandas de deformação e um grupo de bandas de deformação que inflexiona preferencialmente para orientações diferentes, sendo possível observar com isso que por mais que a deformação atinja todos os pacotes sedimentares a atuação em cada um será diferente pelas propriedades mecânicas de cada rocha. Jamison (1979) e Young (1982) mostram que a estratigrafia mecânica influencia os processos de zona de falhas, e dentro desses processos temos, no presente estudo, estruturas como bandas de deformação. Esse comportamento também é observado para falhas por Ferrill & Morris (2003) e Morris *et al.*, (2009b), trazendo que geometria de falhas e características de linkagem sofrem influências de controle das diferentes propriedades das unidades mecânicas. Com isso, observa-se que as propriedades mecânicas de cada unidade controlam, permitindo ou não, a inflexão das bandas de deformação em determinadas direções.

Ferrill *et al.*, (2017) afirma que a variabilidade de orientação ao longo de falhas é, muitas vezes, influência importante no comportamento primário e secundário das falhas (fluxo, dissolução e mineralização). Apesar da unidade mecânica 2 ser mais porosa, observou-se com a análise petrográfica que esses poros não estão conectados, confirmando ainda que nessa camada tem-se o menor valor de permeabilidade dentre as outras. Além disso, observa-se nessa mesma unidade uma menor competência, permitindo a maior frequência e inflexão das bandas de deformação, e se comportando como um *claysmear*, sem romper-se com o deslocamento da banda de deformação principal como as outras unidades. Corroborando com isso, um estudo de Willis (1993)

afirma que estratos incompetentes tendem a deformar-se relativamente mais facilmente, alterar o comprimento e a espessura da camada durante a deformação, e acomodar deformação significativa antes da falha frágil ou alta ductilidade. Com o deslocamento dos sedimentos tem-se a presença da caverna, na qual sua parede corresponde ao plano estrutural da banda de deformação principal que altera sua geometria ao passar e deformar os estratos, inflexionando-se nessa unidade até quase se horizontalizar. Essa maior inflexão é atribuída à estratificação plano paralela, estrutura sedimentar que aparece apenas nesse pacote e que é como mais um plano de fraqueza, comportando-se como um meio anisotrópico, o qual segue o caminho de menor tensão aproveitado pela a propagação da banda de deformação principal.

Segundo Caine e Minor (2009) deformações podem levar ao fortalecimento da rocha através da compactação mecânica, ou seja, perda de porosidade. Os ensaios de compressão uniaxial mostraram maiores valores de resistência em cima das bandas de deformação, conferindo que a presença dessas estruturas compacta mais fortemente a rocha hospedeira. Apesar da unidade mecânica 2 ter a maior frequência de bandas de deformação, foi conferido nela o menor valor de UCS em relação as outras, podendo ser atribuído a esse fato a sua menor granulometria e a presença de micas e biotitas em sua composição sedimentar observadas na análise petrográfica. Os resultados da petrofísica permitiram a comparação dos parâmetros de porosidade e permeabilidade de cada unidade mecânica, compreendendo que há variação dessas propriedades com a presença da deformação. A unidade mecânica 3 possui os menores valores de porosidade apesar de ser o pacote sedimentar com maior granulometria; já os valores de UCS da rocha aumentam com o aumento da granulometria da rocha. Com isso, infere-se que a granulometria relaciona-se inversamente proporcional com a porosidade e frequência de bandas de deformação. Além disso, quanto mais grossa a banda de deformação têm-se maiores valores de resistência uniaxial. Sendo assim, o controle mecânico estratigráfico está relacionado com a granulometria e a porosidade dos pacotes atingidos por bandas de deformação.

A espessura dos pacotes sedimentares também tem controle no desenvolvimento de falhas e fraturas como afirma Ferril *et al.*(2017). A unidade mecânica que mais permite a inflexão das estruturas e deformação no pacote inteiro é a camada menos espessa. O pacote sedimentar mais espesso tem a menor atuação de bandas de deformação, assim como a menor variação de mergulho dos planos. Pontua-

se, portanto que o controle mecânico estratigráfico também tem com parâmetro diferencial a espessura do pacote que está sendo atingido pela deformação. Camadas mais espessas conferem maior resistência à deformação na frequência e inflexão desses planos.

## **5.6 Conclusões**

Este estudo analisou o impacto mecânico estratigráfico na formação e no desenvolvimento das bandas de deformação. Os parâmetros analisados permitiram definir unidades mecânicas, as quais são compostas por camadas que resistem ou impedem a propagação da deformação, controlando assim a passagem da deformação entre esses estratos por apresentarem comportamentos mecânicos diferentes.

As bandas de deformação que afetam o afloramento apresentam-se majoritariamente em quatro direções diferentes, sendo elas NE, E-W, NW e N-S. Essas estruturas afetam as quatro unidades estratigráficas com frequência diferente e variam seus mergulhos ao permear cada uma dessas unidades.

No afloramento em estudo, as bandas de deformação apresentaram-se em regime distensivo, onde localmente também se observou compressão e cisalhamento dos planos, podendo associar a uma acomodação de espaço durante a deformação. A banda de deformação principal apresenta maior cisalhamento em relação às outras, o que ocasiona o rompimento dos estratos de algumas unidades e afinamento desses por acomodação de espaço.

As bandas de deformação apresentam um aumento de coesão em relação às áreas não deformadas que as rodeiam. Os valores de resistência à compressão uniaxial são maiores em todas as unidades estratigráficas quando os ensaios são realizados nas estruturas que em áreas não deformadas. A unidade estratigráfica 3 mostrou-se menos resistente do que as outras unidades, enquanto que a unidade 2 é mais coesa nas áreas não deformadas. Os valores comprovam ainda que o bloco do teto é mais resistente do que o bloco do piso em relação à banda de deformação principal. Essa resistência também se corrobora através dos valores do módulo de Poisson, que seguem a mesma proporcionalidade, apresentando a unidade estratigráfica 2 como mais resistente a deformação.

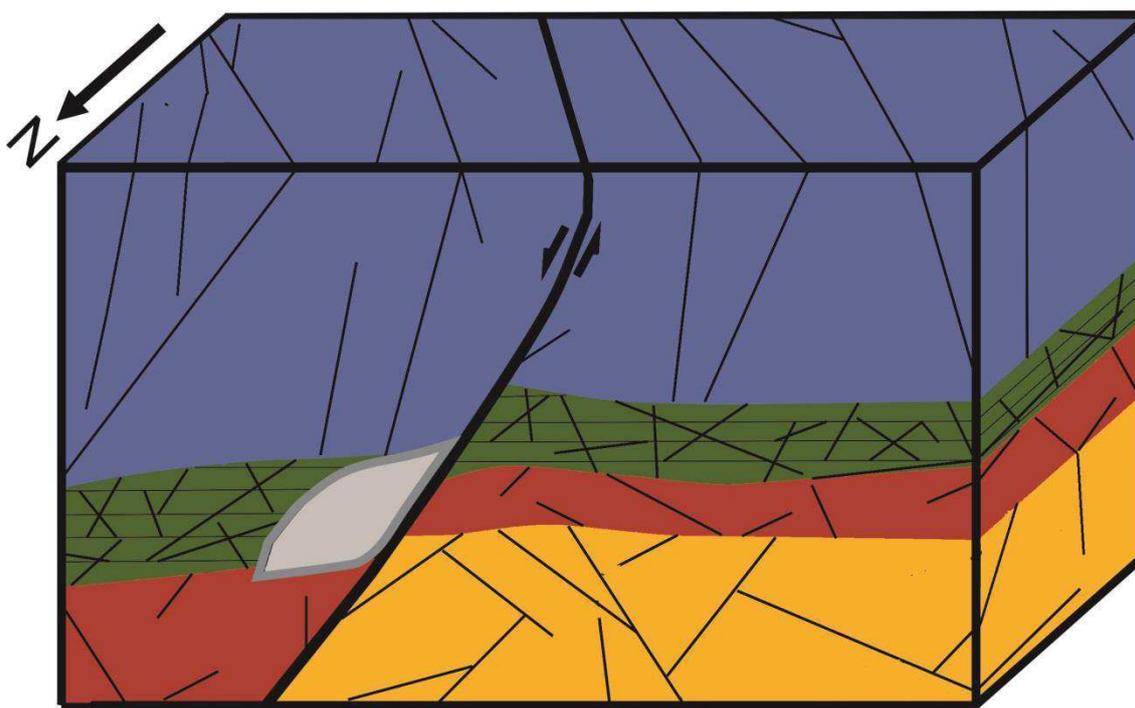
A adaptação da técnica de estratigrafia mecânica em bandas de deformação utilizou dos parâmetros petrofísicos, UCS e frequência dessas para a definição de unidade mecânica. Tendo assim 3 unidades mecânicas no afloramento que permitem e impedem a inflexão de algumas direções de bandas de deformação.

As unidades estratigráficas com maior granulometria apresentaram-se com bandas de deformação de maior espessura e também maior resistência a compressão uniaxial do que as areníticas finas, porém também permitem mecanicamente menor inflexão dos planos estruturais, fato esse comprovado pela comparação da frequência e dos mergulhos das bandas de deformação em cada unidade.

## INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados podem ser feitas algumas conclusões a respeito do impacto mecânico estratigráfico no desenvolvimento das bandas de deformação. Os parâmetros de porosidade, permeabilidade, módulos de Young e de Poisson juntamente com a frequência das bandas de deformação em cada estrato analisado evidencia o controle mecânico estratigráfico, o qual ora permite e ora impede a propagação da deformação dependendo da competência da camada.

A exposição da parede do afloramento foi de extrema importância para observar como a deformação se comporta de forma distinta em cada camada de arenito (Figura 34). Apesar de tratarem-se arenitos da Formação Antenor Navarro, ambos formados majoritariamente por grãos de feldspato, e ainda estarem posicionados em estratos em contato numa mesma coluna sedimentar, as diferenças granulométricas e de estrutura conferiram as camadas diferentes resistências mecânicas uma mesma deformação, impedindo a propagação de direções por essas distinções.



*Figura 34 - Modelo esquemático do afloramento em estudo. De baixo pra cima estão representadas as unidades estratigráficas 1 (amarelo), 2 (vermelho), 3(verde) e 4( azul). A caverna (cinza) encontra-se em sua maior área na unidade 3, com seu piso na unidade 2.*

A banda de deformação principal atinge todas as unidade estratigráficas e tem maior expressão nessa orientação NE, fato que reforça o caráter de atuação estrutural regional. Apesar de imprimir maior deslocamento, não rompe a unidade estratigráfica 3,

que se comporta de forma a oferecer menor competência, permitindo uma maior deformação, podendo ser observada pela frequência das BDs e os outros parâmetros apresentados. Essa mesma unidade é a única a ter uma estratificação plano paralela, a qual podemos associar a maior deformação, uma vez que seria mais um plano de fraqueza, contribuindo assim para uma menor resistência da rocha. Há ainda uma maior inflexão da banda de deformação principal ao atingir a unidade estratigráfica 3, chegando a se aproximar do ângulo da estratificação plano paralela, em que encontramos a parede da caverna que representa uma maior retrabalhamento dos sedimentos. Com isso, podemos concluir que a presença da estrutura sedimentar proporciona a rocha uma menor resistência à atuação da deformação, permitindo uma maior propagação de bandas de deformação.

O modelo geológico tridimensional permitiu a visualização das geometrias que as bandas de deformação apresentam e sua penetrabilidade em cada unidade estratigráfica. Além disso, possibilitou a visualização do formato da caverna, a descontinuidade dos estratos estratigráficos e as áreas entre bandas de deformação. (Anexo 1). A partir dessa técnica, observa-se que as bandas de deformação com planos mais espessos e visíveis em todas as escalas não penetram todas as unidades. A maior granulometria permite a formação de bandas de deformação mais espessas, porém resiste mais as deformações, fato conferido pela maior presença de bandas de deformação nos arenitos mais finos.

A espessura das camadas também tem influência na propagação da deformação. Os estratos mais finos permitem maior propagação da deformação, apresentando menor resistência e maior frequência das estruturas. Os valores do módulo de Poisson apresentam uma relação diretamente proporcional com os valores UCS, aferindo que as rochas com maiores valores comportam de maneira mais rúptil. Esse comportamento ocorre nas camadas com maior granulometria e de caráter maciço, além de serem compostas apenas por feldspato. As rochas que apresentam minerais micáceos tem comportamento mais maleável, chegando a não se romper em alguns momentos, como na unidade 3. Portanto, podemos relacionar que quanto maior a granulometria menor a frequência de bandas de deformação, maior o comportamento rúptil e resistência a deformação da camada, apresentando maiores valores de UCS e razão de Poisson.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alikarami, R., Torabi, A., Kolyukhin, D., Skurtveit, E. Geostatistical relationship between mechanical and petrophysical properties of deformed sandstone. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2013. 63; 27-38.

Antonellini, M. A., Aydin, A., Pollard, D.D. Microstructure of deformation bands in porous sandstones at Arches National Park, Utah. *Journal of Structural Geology*. 1994. 16;941-959.

Aydin, A. Small Faults Formed as Deformation Bands in Sandstone. *Pure appl. Geophysics*. 1978. 116; 913-930.

Bai, T., Pollard, D. Fracture Spacing in Layered Rocks: A New Explanation Based on the Stress Transition. *Journal of Structural Geology* 22(1):43-57. 2000.

Bertotti, G., Hardebol, N., Koppen, T. J. K. and Luthi, S. M. 2007. Toward a quantitative definition of mechanical units: New techniques and results from an outcropping deep-water turbidite succession (Tanqua-Karoo Basin, South Africa).

Bizzi, L.A.; Schobbenhaus, C.; Vidotti, R.M.; Gonçalves, J.H. (eds.). 2003. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Brasília. CPRM.

Braathen, A., Tveranger, J., Fossen, H., Skar, T., Cardozo, N., Bastesen, E., and Sverdrup, E., 2009. Fault facies and its application to sandstone reservoirs. *AAPG Bulletin*, v. 93, no. 7, pp. 891–917.

Castro, D. L.; Castelo Branco, R. M. G. Caracterização da arquitetura interna das bacias do Vale do Cariri NE do Brasil, base em modelagem gravimétrica 3-D. *Revista Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro, n. 17, v. 2/3, p. 129-144, 1999.

Cooke, M. L., Simo, J. A., Underwood, C. A., Rijken, P. Mechanical stratigraphic controls on fracture patterns within carbonates and implications for groundwater flow. *Sedimentary Geology*. Volume 184, Issues 3–4, 15 February 2006, Pages 225-239.

Córdoba, V. C., Antunes, A. F., Jardim de Sá, E. F., Silva, A. N., Sousa, D. C., Lins, F. A. P. L. Análise estratigráfica e estrutural da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil: integração de dados a partir do levantamento sísmico pioneiro 0295\_rio\_do\_peixe\_2d. *Boletim de Geociências da Petrobras*. 2008.

Costa, A.B.S. 2010. *Diagênese e proveniência dos arenitos da tectonossequência rifte nas Bacias do Rio do Peixe e do Araripe, NE do Brasil*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 93 p.

De Castro, D.L., Oliveira, D.C., Castelo Branco, R.M.G., 2007. On the tectonics of the Neocomian Rio do Peixe rift basin, NE Brazil: lessons from gravity, magnetic and radiometric data. *J. S. Am. Earth Sci.* 24, 184–202.

Dongfang Qu, Jan Tveranger, Muhammad Fachri; Influence of deformation-band fault damage zone on reservoir performance. *Interpretation* ; 5 (4): SP41–SP56.

Fachri, M. Rotevatn A. Tveranger J., 2013a, Fluid flow in relay zones revisited: Towards an improved representation of small-scale structural heterogeneities in flow models: *Marine and Petroleum Geology*, v. 46, p. 144–164

Fachri, M., Tveranger J., Cardozo, N., Pettersen O., 2011, The impact of fault envelope structure on fluid flow: A screening study using fault facies: *AAPG Bulletin*, v. 95, no. 4, p. 619–648

Faulkner, D. R; et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow of fault zones. *Journal of Structural Geology*, v. 32, p. 1557-1575, 2010.

Ferrill, D. A., Morris, A. P., McGinnis, R. N., 2009. Crossing conjugate normal faults in field exposures and seismic data. *AAPG Bull.* 93, 1471-1488.

Ferrill, D. A., Morris, A.P., 2008. Fault zone deformation controlled by carbonate mechanical stratigraphy, Balcones fault system, Texas. *AAPG Bull.* 92, 359-380.

Ferrill, D.A., and Morris, A.P., 2003, Dilational normal faults: *Journal of Structural Geology*, v. 25, p. 183–196.

Ferrill, D.A., Morris, A.P., 2003. Dilational normal faults. *Jornal. Structural. Geology.* 25, 183–196.

Ferrill, D.A., Morris, A.P., McGinnis, R.N., Smart, K.J., Wigginton, S.S., Hill, N.J., 2017. Mechanical stratigraphy and normal faulting. *Journal of Structural Geology*.

Flodin, E. A., Aydin, A., Durlflosky, L. A. & Yeten, B. 2001. Representation of fault zone permeability in reservoir flow models. Paper SPE 71617, presented at the SPE Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 30 September – 3 October.

Fontes, C. Q., Nona Rodada de Licitações Bacia do Rio do Peixe, Brasil Round nove. Agência Nacional de Petróleo. Superintendência de Definição de Blocos. 2007.

Fossen, H., Schultz, R.A., Torabi, A., 2011. Conditions and implications for compaction band formation in the Navajo Sandstone, Utah. *Journal of Structural Geology*, 33: 1477-1490.

Fossen, H.; Schultz, R.; Shipton, Z.K.; Mair, K. Deformation bands in a sandstone e a review. *Journal of the Geological Society.* v. 164, p. 755-769, 2007.

Françolin, J. B. L. Analyse structurale du bassin du Rio do Peixe (Brésil). 1992. 240 f. Tese (Doutorado) - Centre Armoricaïne d'Étude Structurale des Socles, Université de Rennes. 1992.

Françolin, J. B. L.; Cobbold, P.R.; Szatmari, P. Faulting in the Early Cretaceous Rio do Peixe (NE Brazil) and its significance for the opening of the Atlantic. *Journal of Structural Geology*, v. 16, p. 647-661, 1994.

Françolin, J. B. L.; Szatmari, P. Mecanismo de rifteamento da porção oriental da margem brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 17, p. 196-207, 1987.

Gibson, R. G. Physical character and fluid-flow properties of sandstone-derived fault zone: Geological Society (London) Special Publication. v. 127, p. 83–97, 1998.

Jamison, W.R., 1979. Laramide deformation of the Wingate Sandstone, Colorado National Monument: A study of cataclastic flow. Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, 1124 College Station, Texas, U.S.A., 170p.

Knipe, R. J. Faulting, fault sealing and fluid flow in hydrocarbon reservoirs: an introduction: Geological Society of London, Special Publication, v. 147, p. 7–21, 1998.

Law, A. M., Kelton, W. D., 1991. Simulation Modeling and Analysis. McGraw – Hill international Editions. Industrial Engineering Series.

Leonardi, G.; Carvalho, I. S. As Pegadas de dinossauros das bacias do Rio do Peixe, PB. apud: C. Schobbenhaus; D.A. Campos; E.T. Queiroz; M. Winge; C.O. Berbert; M. Born (Eds.), Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. 1992.

Lima Filho, M. F. Evolução tectono-sedimentar da Bacia do Rio do Peixe - PB. 1991. 99 f. Dissertação Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 1991.

Manzocchi, T., Matthews, J.D., Strand, J.A. et al. 2008b. A study on the structural controls on oil recovery from shallow marine reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 14, 55–70.

Matos, R. M. D. Tectonic evolution of the Equatorial South Atlantic. In: Mohriak, W.; Talwani, M. Atlantic rifts and continental margins. *Geophysical Monograph*, v. 115, p. 331-354, 2000.

Matos, R. M. D. The Northeast Brazilian rift system. *Tectonics*, Washington, v. 11, p. 766-791, 1992.

McGinnis, R.N., Ferrill, D.A., Morris, A.P., Smart, K.J., 2016. Insight on mechanical stratigraphy and subsurface interpretation. In: B. Krantz, C. Ormand, B. Freeman (Eds.), 3-D Structural Interpretation: Earth, Mind, and Machine. *AAPG Memoir* 111, 111–120.

McQuillan, H., 1974. Fracture patterns on Kuh-e Asmari anticline, southwest Iran. *AAPG Bull.* 1177 58, 236–246.

McQuillan, H.; Small-Scale Fracture Density in Asmari Formation of Southwest Iran and its Relation to Bed Thickness and Structural Setting. *AAPG Bulletin* ; 57 (12): 2367–2385.

Mendonça Filho, J. G. Aspectos Geoquímicos do óleo da Bacia de Sousa (Cretáceo Inferior), Nordeste do Brasil: Contexto Geológico. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 25, p. 91-98, 2006.

Moraes, A., 1995, Estudo da distribuição dos campos de tensões locais e da geração de falhas em regime extensional pelo Método dos Elementos Finitos. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 241pp.

Morris, A.P., Ferrill, D.A., McGinnis, R.N., 2009b. Mechanical stratigraphy and faulting in Cretaceous carbonates. *AAPG Bull.* 93, 1459-1470.

Nogueira, F. C. C., Oliveira, M. S. De, Castro, D. L. de. Estudo Magnético e Gravimétrico do Arcabouço Estrutural da Bacia Rio do Peixe-PB, Universidade Federal do Ceará, Revista de Geologia, v. 17, n. 1, p. 74-87, 2004.

Nogueira, F. C. C.; et al. Cretaceous intracontinental rifting and post-rift inversion in NE Brazil: Insights from the Rio do Peixe Basin. *Tectonophysics*, p. 16, 2015.

Oliveira, M.E.; Silva, F.C.A. A importância da estratigrafia mecânica no desenvolvimento de falhas e juntas em contexto de bacias sedimentares: contribuição de modelos experimentais. *Geologia USP. Série Científica*, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 39-55, oct. 2016.

Pontes, C. C. C. Propriedades físicas de arenitos afetados por bandas de deformação nos diferentes elementos arquiteturais de uma zona de falha. Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

Ponte, F. C., Hashimoto, A. T., Dino, R. Geologia das bacias mesozoicas do interior do Nordeste do Brasil. Petrobrás/CENPES/DIVEX;SEBIPE, Relatório Interno, Rio de Janeiro, RJ. 1991.

Ponte, F.C.; Ponte Filho, F.C. Estrutura geológica e evolução tectônica da Bacia do Araripe. DNPM, Recife - PE, p. 68. 1996.

Renshaw, C. E., T. A. Myse, and S. R. Brown, Role of heterogeneity in elastic properties and layer thickness in the jointing of layered sedimentary rocks, *Geophys. Res. Lett.*, 30(24), 2295.

Roche, V., Homberg, C., Rocher, M., 2013. Fault nucleation, restriction, and aspect ratio in layered sections: Quantification of the strength and stiffness roles using numerical modeling. *J. Geophys. Res., Solid Earth*, 118, 1–15.

Schultz, R.A., Okubo, C.H., Fossen, H. Porosity and grain size controls on compaction band formation in Jurassic Navajo Sandstone. *Geophysical Research Letters*. 2010. v37.

Seeburger, D. A.; Aydın, A.; Warner, J. L.; White, R. E. Structure of fault zones in sandstone and its effect on permeability. *AAPG Bulletin*, v. 75, p. 669–694, 1991.

Sénant, J., Popoff, M., 1991. Early Cretaceous extension in northeast Brazil related to the South Atlantic opening. *Tectonophysics* 198, 35–46.

Silva, A. N. Arquitetura, litofácies e evolução tectonoestratigráfica da bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil. Dissertação n° 79/PPGG, 2009.

Souza, F.M.S., 2015. Caracterização de estruturas rúpteis e impactos na simulação de fluxo em arenitos da Bacia Rio do Peixe. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Exploração Petrolífera e Mineral. Campina Grande. 2016.

Srivastava, N. K.; Carvalho, I. S. Bacias do Rio do Peixe. Aracaju: Fundação Paleontológica Phoenix, Informativo Phoenix, n. 71, p. 1-4, 2004.

Torabi, A., Alikarami, R. Heterogeneity within deformation bands in sandstone reservoirs, technical paper. 46th American Rock Mechanics Association Symposium, Chicago 24th–27th June (2012). (7 pp.)

Tveranger, J., A. Braathen, T. Skar, and A. Skauge, 2005, Centre for integrated petroleum research; research activities with emphasis on fluid flow in fault zones: Norwegian Journal of Geology, v. 85, p. 63-71.

Underhill, J. R.; Woodcock, N. H. Faulting mechanisms in high porosity sandstones: New Red Sandstone, Arran, Scotland, in M. E. Jones and R. M. F. Preston, eds., Deformation of sediments and sedimentary rocks: Geological Society Special Publication, v, 29, p. 91–105, 1987.

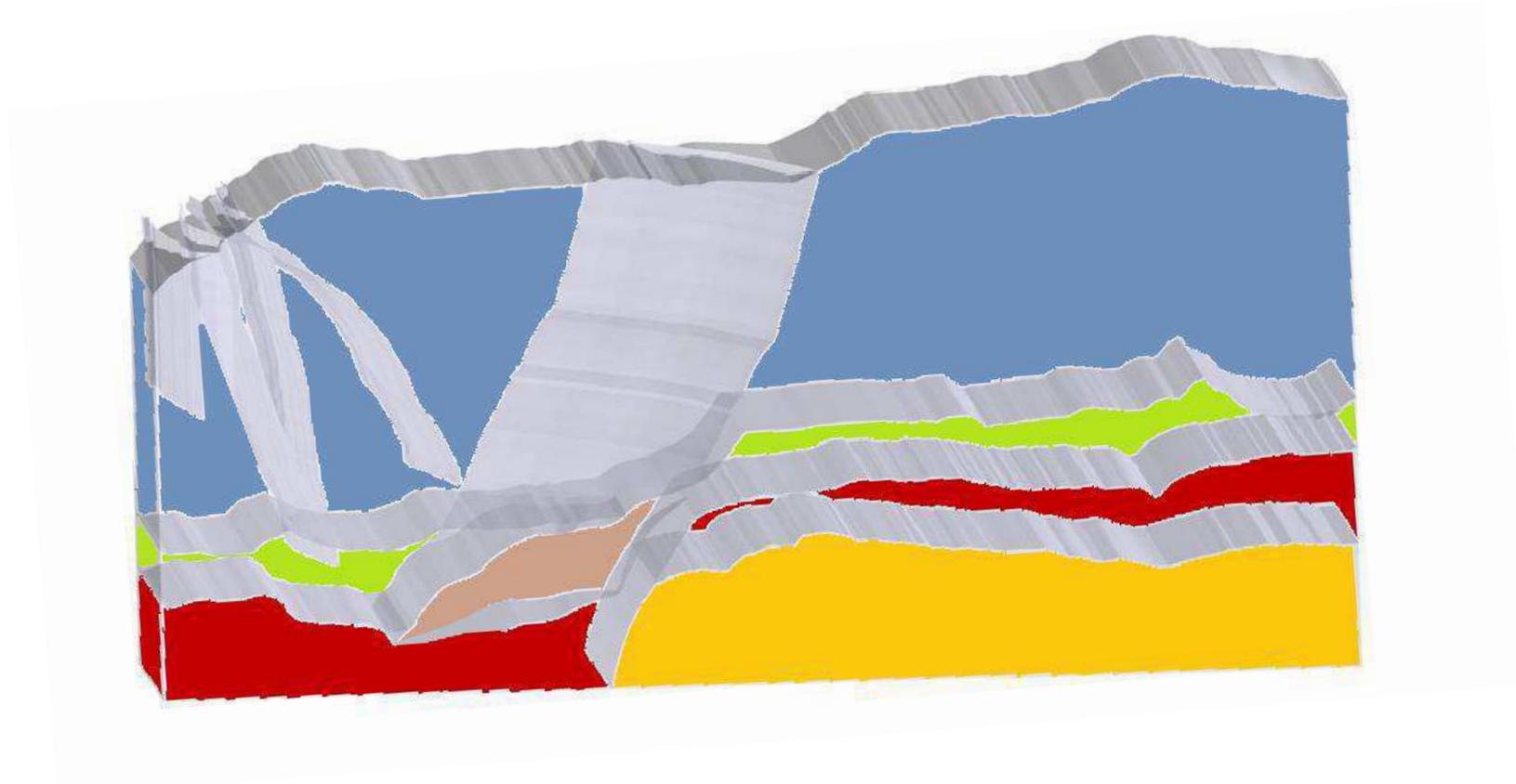
Vasconcelos, E. C. Estudo Faciológico da Formação Souza (Grupo Rio do Peixe, PB). 1980. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, 1980.

Wendland, E., Pizarro, M. L. P., 2010. Modelagem computacional do fluxo unidimensional de água em meio não saturado do solo. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.30, n.3, p.424-434.

Young, S.R., 1982. Characterization of and parameters controlling small faults in naturally deformed, porous sandstones. M.S. Thesis, Texas A&M University, College Station, 1416 Texas, 118 p.

Zahm, C. K., Hennings, P. H. 2009. Complex fracture development related to stratigraphic architecture: Challenges for structural deformation prediction, Tensleep Sandstone at the Alcova anticline, Wyoming. AAPG Bulletin, V. 93, No. 11.

## ANEXO



*Anexo 1 - Modelo digital geológico apresentando os limites estratigráficos, caverna e representando bandas de formação principal e algumas mais espessas.*