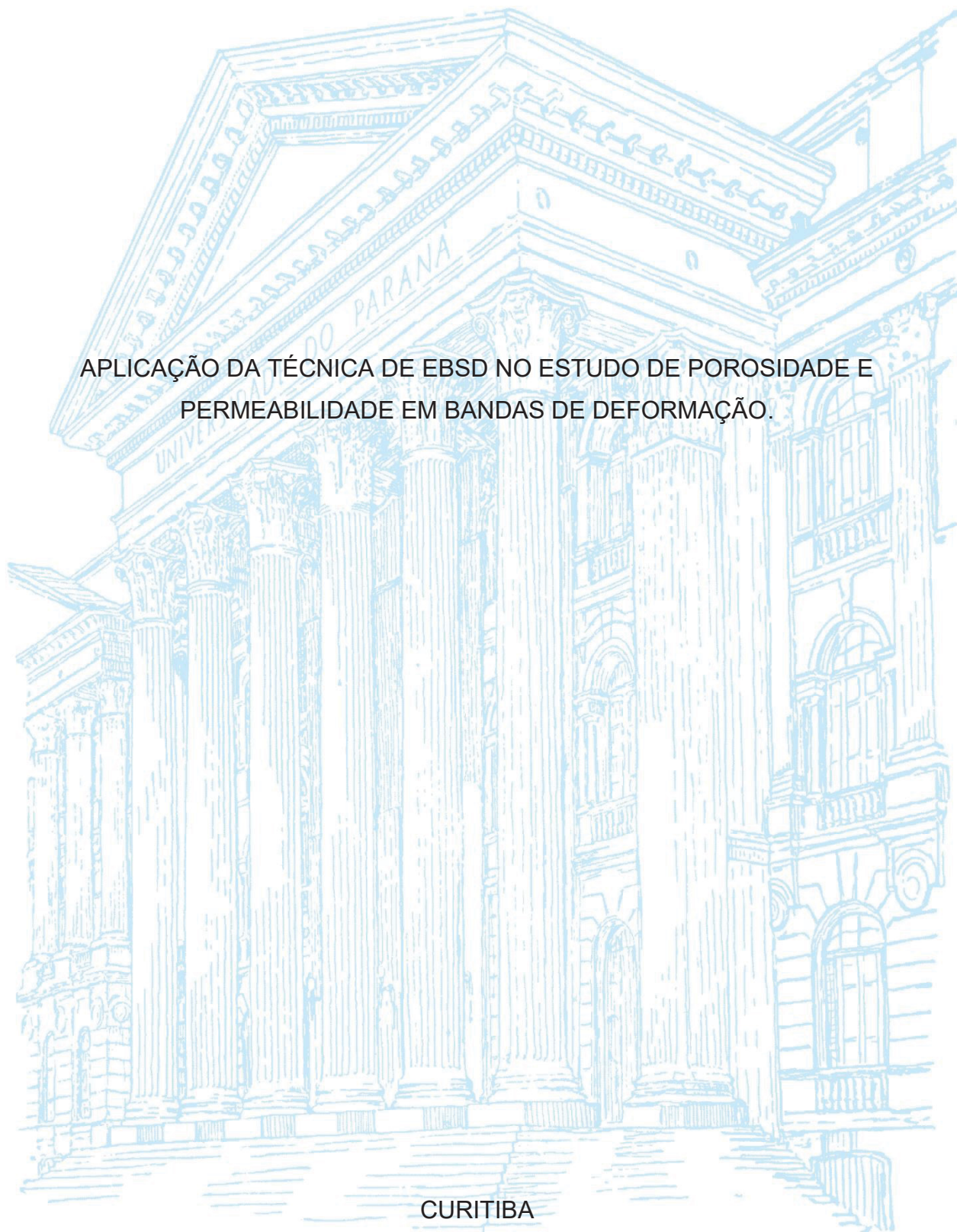


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FLÁVIA PRISCILA SOUZA AFONSO

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EBSD NO ESTUDO DE POROSIDADE E  
PERMEABILIDADE EM BANDAS DE DEFORMAÇÃO.



CURITIBA

2022

FLÁVIA PRISCILA SOUZA AFONSO

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EBSD NO ESTUDO DE POROSIDADE E  
PERMEABILIDADE EM BANDAS DE DEFORMAÇÃO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Evangelista Lagoeiro

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Afonso, Flávia Priscila Souza

Aplicação da técnica de EBSD no estudo de porosidade e permeabilidade em bandas de deformação / Flávia Priscila Souza Afonso – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Evangelista Lagoeiro

1. Arenito. 2. Porosidade. 3. Cristalografia. I. Lagoeiro, Leonardo Evangelista. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Geologia. III. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **FLÁVIA PRISCILA SOUZA AFONSO** intitulada: **APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EBSD NO ESTUDO DE POROSIDADE E PERMEABILIDADE EM BANDAS DE DEFORMAÇÃO**, sob orientação do Prof. Dr. LEONARDO EVANGELISTA LAGOEIRO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 22 de Fevereiro de 2022.

Assinatura Eletrônica

11/03/2022 12:08:35.0

LEONARDO EVANGELISTA LAGOEIRO

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

25/02/2022 19:26:56.0

CLAUDIO NERY LAMARÃO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ)

Assinatura Eletrônica

25/02/2022 16:04:14.0

PAOLA FERREIRA BARBOSA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA)

Dedico a todas as meninas, nascidas nas periferias, que tem a ousadia de sonhar com uma pós-graduação. Lutem como uma garota!

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela coragem, força, sabedoria e apoio emocional que me concedeu para que diante de tantas adversidades, eu conseguisse finalizar esta pesquisa.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR) e ao Programa de Pós-Graduação em Geologia (PPGeol) pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR (CME/UFPR) pelas análises de MEV e pela disponibilização do espaço para tratamento e preparação das amostras.

Ao Instituto LACTEC e a técnica Bruna Gomes Dias pelas análises de EBSD.

Ao Grupo de Pesquisa em Microscopia Digital e Análise de Imagens – MicDigi da PUC-Rio e ao Dr. Marcos Henrique de Pinho Mauricio pela obtenção e tratamento dos dados de Microtomografia computadorizada.

Ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Leonardo Lagoeiro a quem deixo registrado minha imensa admiração, respeito e gratidão por estar ao meu lado durante esta caminhada e por não me deixar desanimar.

Agradeço a minha querida amiga Paula Empinotti que foi meu suporte, minha incentivadora e minha melhor torcida durante todo esse processo.

A minha colega de profissão e amiga de pesquisa, Celeste Bertassoni pela ajuda com as imagens, preparação das amostras e nossas longas conversas de desabafo e incentivo.

## RESUMO

Os arenitos porosos do Grupo Ilhas, hospedam bandas de deformação (Bd) que alteram a capacidade de armazenamento de uma rocha considerada como uma possível rocha reservatório. Além das próprias características físicas e mineralógicas, as alterações impostas durante a colocação da Bd influenciam diretamente sobre o fechamento e selamento de poros, diminuindo a qualidade dessa rocha, como possível reservatório. Algumas técnicas de observação dessas estruturas e de análise de porosidade e permeabilidade já são largamente utilizadas em rochas, no entanto, ainda são poucas as informações a respeito das relações cristalográficas entre os cristais detríticos, que podem afetar a qualidade das rochas reservatórios. O objetivo deste estudo é aplicar diferentes técnicas de investigação microscópica e microestrutural para análise da influência da banda de deformação na diminuição desse espaço poroso. Os valores de porosidade medidos através da técnica de microtomografia computadorizada indicam que nos domínios externos a Bd a porosidade total chega a 13%, enquanto nos domínios internos, chegam a pouco mais de 1%. As análises de MEV demonstraram presença de microtexturas de fragmentação e dissolução nos grãos, além de presença de cimento preenchendo antigos poros. As análises de *EBSD* apontaram uma intensa fragmentação de grãos e ainda que a deformação plástica não foi marcante nestas amostras. No entanto há indícios dos eixos-c dos cristais de quartzo se alinharem grosseiramente paralelos ao *trend* da banda de deformação. Com isso, as bandas de deformação podem ser melhor classificadas como Banda de deformação cataclástica e sendo a fragmentação mecânica dos grãos e a formação de cimento o principal mecanismo de selamento dos poros e consequente redução da qualidade do reservatório.

**PALAVRAS-CHAVE:** Arenito. Microestruturas. Porosidade. Banda de deformação. Cristalografia

## ABSTRACT

The porous sandstones of the Ilhas Group, host deformation bands (Bd) that alter the storage capacity of a rock considered as a possible rock reservoir. In addition to the physical and mineralogical aspects, the changes imposed during the placement of Bd directly influence the closing and sealing of pores, reducing the quality of this rock, as a possible reservoir. Some techniques for observing these structures and analyzing porosity and permeability are already widely used in rocks. However, there is still little information about the crystallographic relationships between detrital crystals, which can affect the quality of reservoir rocks. The objective of this study is to apply different microscopic and microstructural investigation techniques to analyze the influence of the deformation band on the reduction of pore space. The porosity values measured using the computerized microtomography technique indicate that in the external domains, the total porosity of Bd reaches 13%, while in the internal domains, they reach just over 1%. The SEM analyzes showed that the presence of fragmentation and dissolution microstructures in the grains, in addition to the presence of cement filling old pores. The EBSD analyzes indicated an intense fragmentation of grains and little contribution of intracrystalline plasticity as deformation mechanism. However, there is evidence that the c-axes of the quartz crystals align roughly parallel to the trend of the deformation band. Thus, the deformation bands can be better classified as cataclastic deformation band and the mechanical fragmentation of the grains and cement formation are the main mechanism for sealing the pores and consequent reduction in the quality of the rock reservoir.

**KEYWORDS:** Sandstone. Microstructures. Porosity. Deformation band. Crystallography.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- PRINCIPAIS TIPOS DE BANDAS DE DEFORMAÇÃO, COM BASE NOS SEUS MECANISMOS DE DEFORMAÇÃO. (MODIFICADO DE FOSSEN ET AL., 2007). .....	144
FIGURA 2 - VISÃO MICROSCÓPICA DE ARENITOS VARIANDO DE MUITO BAIXA POROSIDADE / PERMEABILIDADE A ALTA POROSIDADE / PERMEABILIDADE. (MODIFICADO DO SITE DO DEPARTAMENTO DE MINAS, OESTE DA AUSTRÁLIA). .....	166
FIGURA 3 - A) ILUSTRAÇÃO DE COMO O FEIXE DE RAIOS X, QUE SE ORIGINA DE UMA FONTE, ATRAVESSA A AMOSTRA E POSTERIORMENTE ESSES FEIXES SÃO CAPTADOS POR UM RECEPTOR. B) AS FATIAS DA IMAGEM 2D SÃO RECONSTRUÍDAS A PARTIR DESSAS PROJEÇÕES, ENQUANTO DEPOIS PODEM SER EMPILHADAS E RENDERIZADAS PARA CRIAR O VOLUME #D PARA FINS DE EXIBIÇÃO. (MODIFICADO DE GUNTORO ET AL., 2019).....	177
FIGURA 4 - A) DESENHO ESQUEMÁTICO DA MONTAGEM DA COLUNA PARA DETECÇÃO DOS ELÉTRONS RETROESPALHADOS. (MODIFICADO DE MORALES ET AL., 2007); B) CONFIGURAÇÃO DO POSICIONAMENTO DA AMOSTRA EM RELAÇÃO AOS FEIXES E O DETECTOR. (MODIFICADO DO SITE DA OXFORD INSTRUMENTS).....	188
FIGURA 5 - A) PROVÍNCIAS ESTRUTURAIS BRASILEIRAS (SANTOS, 2011); B) LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA COLETA DAS AMOSTRAS, SEDES MUNICIPAIS MAIS IMPORTANTES E PRINCIPAIS VIAS DE ACESSO DA ÁREA DAS FOLHAS CAIMBÉ E JEREMOABO, (MODIFICADO DE SANTOS, 2011); C) ÁREA DAS FOLHAS CAIMBÉ E JEREMOABO NO CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL. (SANTOS, 2011). .....	20
FIGURA 6 - MICROSCÓPIO ZEISS IMAGER A2M. (FONTE: SITE ILAMIR). .....	211
FIGURA 7 - A) FOTO EXTERNA DO MICROTOMÓGRAFO XRADIA 510 VERSA; B) FOTO INTERNA DO MICROTOMOGRAFO.(FONTE: SITE DO MICDIG/PUC-RIO). .....	222
FIGURA 8 - A) EQUIPAMENTO LABOPOL PARA LIXAMENTO E POLIMENTO COM PASTA DE DIAMANTE; B) EQUIPAMENTO MINIMET 1000 PARA ULTRAPOLIMENTO.....	244
FIGURA 9 - IMAGENS DO SISTEMA DE EQUIPAMENTO MEV-EBSD (FONTE: SITE TESCAN).....	244
FIGURA 01 - A) CRÁTON DE SÃO FRANCISCO, JUNTAMENTE COM O SEU HOMÓLOGO AFRICANO, O CRÁTON DO CONGO, NO CENÁRIO TECTÔNICO DO GONDWANA OCIDENTAL. CRATONS DA AMÉRICA DO SUL E ÁFRICA: A - AMAZÔNIA; P - RIO DA PRATA; WA - ÁFRICA OCIDENTAL; SFC - SÃO FRANCISCO-CONGO; K - KALAHARI. CIDADES: S - SALVADOR E V - VITÓRIA (BRASIL); LUANDA (ANGOLA); LB LEBREVILLE (GABÃO) (FONTE: ALKMIM E MARTINS-NETO, 2012); B) LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DAS ROCHAS DE ESTUDO – GRUPO ILHAS – BACIA DE TUCANO CENTRAL (FONTE: MODIFICADO DE RODRIGUES, 2018); C) LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE COLETA DAS AMOSTRAS.. .....	29
FIGURA 02 - A) A) GRÃOS DE QUARTZO FINOS A MÉDIOS, COM A PRESENÇA DE ÓXIDO DE FERRO OCORRENDO LOCALMENTE; B) GRÃOS DE QUARTZO	

SUBARREDONDADOS; C) GRÃOS ANÉDRICOS DE MUSCOVITA DISPERSOS ENTRE GRÃOS DE QUARTZO FINOS A MÉDIOS; D) PRECIPITAÇÃO DE ÓXIDO DE FERRO ENTRE OS GRÃOS DE QUARTZO DOMINANTEMENTE SUBARREDONDADOS.....	32
FIGURA 03 - A) AMOSTRA DE MÃO, DE ONDE FORAM SELECIONADAS AS ÁREAS PARA LÂMINA DELGADA; B) PRESENÇA DE PRECIPITAÇÃO DE ÓXIDO DE FERRO; C) GRÃOS DE QUARTZO IMERSOS EM CIMENTO APRESENTANDO FORTE CONTRASTE DE TAMANHOS, VISTO EM LUZ NATURAL; D) GRÃOS DE QUARTZO IMERSO EM CIMENTO E CONTRASTE DE TAMANHO DOS GRÃOS, VISTO COM NICÓIS CRUZADOS.....	353
FIGURA 04 – A) ANÁLISE DE SUPERFÍCIE DE SEÇÃO POLIDA, MOSTRANDO OS CONTATOS BEM MARCADOS ENTRE OS GRÃOS; B) ANÁLISE DE FRAGMENTO DE ROCHA, MOSTRANDO GRÃOS DE CONTORNO MAIS ARREDONDADOS, COM ALTO VOLUME DE POROS; C) GRÃOS DE QUARTZO COM MARCAS DE DISSOLUÇÃO E PARTÍCULAS ADERENTES..	374
FIGURA 05 – A) ANÁLISE DE SUPERFÍCIE DE SEÇÃO POLIDA NA ZONA DE TRANSIÇÃO DA BANDA DE DEFORMAÇÃO E A DIFERENÇA ENTRE OS LIMITES DOS GRÃOS NAS DUAS ÁREAS. B) ANÁLISE DE SUPERFÍCIE SEÇÃO POLIDA NA BANDA DE DEFORMAÇÃO E A FALTA DE PERCEPÇÃO DOS LIMITES DOS DOS GRÃOS; C) PRESENÇA DE EXTREMIDADES ANGULOSAS E MARCAS DE ARRANCAMENTO; D) GRÃOS DE QUARTZO COM MARCAS DE DISSOLUÇÃO E IMERSOS EM UM CIMENTO SILICOSO.....	35
FIGURA 06 – A) MAPA DE FASES DO GRUPO DEMONSTRANDO A PRESENÇA DE APENAS UMA FASE MINERAL (QUARTZO); B) GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO, MÍNIMO E MÁXIMO DOS GRÃOS DAS SEÇÕES ANALISADAS DO GRUPO 1.....	377
FIGURA 07 – A) MAPA DE FASES DE UMA AMOSTRA DO GRUPO 2, MOSTRANDO A INTERFACE ENTRE A ÁREA DA BANDA E A ÁREA FORA DA BANDA DE DEFORMAÇÃO; B) GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO, MÍNIMO E MÁXIMO DOS GRÃOS DAS SEÇÕES ANALISADAS DO GRUPO 2... ..	377
FIGURA 08 – FIGURAS DE POLOS, EM RELAÇÃO AOS EIXOS C {0001}, EIXO <A> {11-20} E EIXO R {10-10}.....	378
FIGURA 09 – GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DE ÂNGULOS DE MISORIENTATION PARA AS SEÇÕES ANALISADAS.....	379
FIGURA 10 – MODELO 3D DA AMOSTRA MAIS REPRESENTATIVA DO GRUPO 1, COM ÊNFASE NA POROSIDADE TOTAL, POROSIDADE ABERTA E POROSIDADE FECHADA.....	379
FIGURA 11 – MODELO 3D DA AMOSTRA MAIS REPRESENTATIVA DO GRUPO 2, COM ÊNFASE NA POROSIDADE TOTAL, POROSIDADE ABERTA E POROSIDADE FECHADA.....	40

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	12
1.2 OBJETIVOS.....	12
<b>2 BASES CONCEITUAIS</b> .....	<b>12</b>
2.1 BANDAS DE DEFORMAÇÃO .....	12
2.2 POROSIDADE .....	14
2.3 MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X .....	16
2.4 ELECTRON BACKSCATTER DIFFRACTION (EBSD) – DIFRAÇÃO DE ELETRONS RETROESPALHADOS.....	18
<b>3 GEOLOGIA DA ÁREA</b> .....	<b>19</b>
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>20</b>
4.1 MICROSCOPIA ÓTICA .....	20
4.2 MICROTOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X .....	21
4.3 ELECTRON BACKSCATTER DIFFRACTION TECHNIQUE (EBSD) .....	22
<b>5 RESULTADOS</b> .....	<b>24</b>
5.1 ARTIGO APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EBSD NO ESTUDO DE POROSIDADE E PERMEABILIDADE EM BANDAS DE DEFORMAÇÃO.....	25
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>43</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A porosidade é um dos parâmetros fundamentais para determinar o fluxo de fluidos através das rochas e do solo. No entanto, em vez de ser imutável, a porosidade geralmente evolui com o tempo, o que tem consequências importantes para uma série de processos, incluindo a extração de hidrocarbonetos de reservatórios subterrâneos, bombeamento de águas subterrâneas em aquíferos e sequestro de carbono em formações geológicas. Para a indústria de petróleo e gás, em particular, entender os mecanismos que impulsionam a evolução da porosidade é um desafio crítico na avaliação da estratégia de extração e da viabilidade econômica (Girnun et al., 2020)

Os processos que alteram a porosidade das rochas podem ser de natureza física ou química. Durante a compactação mecânica, por exemplo, os grãos podem ser reorganizados e até fraturados para reduzir o volume total de poros (Serra, 1986; McDonald e Schmidt, 1992; Chuhan et al., 2002, 2003; Bjørlykke, 2006; Makowitz e Milliken, 2003). Além disso, reações químicas, incluindo precipitação mineral, dissolução e substituição, também podem causar o fechamento dos espaços vazios ou até mesmo a criação de um novo espaço poroso (Taylor, 1950; Dapples, 1979; Chuhan et al., 2002; Anovitz et al., 2015). Dessa forma, uma maneira de avaliar a qualidade de um reservatório é caracterizá-lo a partir de dois aspectos importantes da diagênese: a superfície ou borda dos grãos detríticos e a cimentação, ou seja, material em solução o qual preenche e sela o espaço poroso. Além disso é importante considerar que as deformações naturais de rochas e sedimentos altamente porosos tendem a formar estruturas conhecidas como bandas de deformação, que variam com relação ao mecanismo de deformação e cinemática, dependendo das condições externas e propriedades intrínsecas do meio deformante. Segundo Fossen et al. (2007), as bandas de deformação em rochas porosas são zonas que tendem a aumentar a coesão e reduzir a porosidade e a permeabilidade se comparadas às fraturas comuns.

Observações ao microscópio ótico, embora forneçam uma visão geral do agregado e seu espaço poroso, não permitem investigar os mecanismos de crescimento e seus aspectos cristalográficos. A aplicação da técnica de EBSD tem revelado feições microestruturais e cristalográficas importantes,

relacionadas aos mecanismos de crescimento mineral e de suas orientações cristalográficas. Nesse sentido o EBSD pode ser uma técnica considerada crucial, uma vez que através dela pode-se obter dados cristalográficos essenciais ao entendimento dos mecanismos de crescimento de grãos de quartzo e seu cimento. A caracterização dos aspectos relacionados a evolução dessas rochas permite entender a relação da porosidade e permeabilidade com o cimento de sílica. Além do mais, a caracterização das microestruturas e suas relações cristalográficas, são fundamentais para o entendimento da influência das bandas de deformação na porosidade e permeabilidade destas rochas e de que forma essas características influenciam na qualidade do reservatório.

### **1.1. JUSTIFICATIVA**

O emprego de variadas técnicas para a análise de microestruturas tem se tornado uma saída em potencial para identificação de possíveis processos geomecânicos que possam impactar na qualidade de rochas reservatórios. Desta forma o estudo da aplicação de diferentes técnicas, tanto de análise em duas dimensões quanto em três dimensões podem ser um diferenciador no entendimento do arcabouço estrutural dessas rochas e no quanto de informação essas rochas podem fornecer quanto a sua capacidade como reservatório.

### **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo do estudo realizado foi analisar as relações entre os grãos de quartzo detrítico e o cimento de sílica em bandas de deformação de arenitos com potencial para reservatórios. Para isso utilizou-se de um conjunto de técnicas de microscopia ótica de superfície e análise 3D, a fim de entender quais informações essas técnicas podem fornecer sozinhas e de forma conjugadas, para o entendimento da evolução da porosidade e permeabilidade destas rochas.

## **2. BASES CONCEITUAIS**

Neste capítulo, serão abordados alguns aspectos conceituais a respeito das bandas de deformação que são importantes para o desenvolvimento deste trabalho, assim como uma contextualização a respeito das técnicas utilizadas para o desenvolvimento desta pesquisa.

### **2.1. Bandas de Deformação**

O termo banda de deformação já foi utilizado em diversos campos da ciência, como por exemplo, na ciência dos materiais (Brown et al., 1968) e deformação cristaloplástica de rocha (Passchier e Trouw, 1996). No entanto, foi aplicado pela primeira vez no contexto da deformação de arenito por Aydin e colaboradores (Aydin, 1978; Aydin e Johnson, 1978, 1983). A compreensão a respeito dessas estruturas e sua influência no arcabouço estrutural das rochas ainda estão evoluindo, no entanto, é conhecido que diferentes tipos de bandas cinemáticas apresentam diferenças significativas em relação aos mecanismos de deformação, alteração da estrutura dos poros da rocha e, portanto, porosidade e permeabilidade de possíveis rochas reservatório (Fossen et al., 2007).

Segundo Fossen et al. (2007), diferentes mecanismos de deformação associadas às diferentes propriedades petrofísicas podem produzir diferentes bandas de deformação (figura 01). Esses mecanismos dependem de condições como: mineralogia, tamanho e forma do grão, cimentação, estado de tensão e condições internas e externas. De acordo com essas condições é possível classificar alguns mecanismos de deformação dominantes, são eles:

*Banda de desagregação* – desenvolve-se através da desagregação, geralmente por meio de cisalhamento de grãos e deslizamento de limites, sendo comuns em arenitos mal consolidados. Em relação às características petrofísicas, estas bandas podem apresentar tanto caráter de dilatação quanto de compactação. No entanto, estudos anteriores revelam que nestas bandas os contrastes de porosidade e permeabilidade são baixos e apresentam em geral pouca influência na permeabilidade em reservatórios de arenitos (Fossen et al., 2007).

*Bandas de filossilicato* – Geralmente ocorrem em arenitos com percentual de minerais micáceos entre 10-15% (Knipe et al., 1997). Neste tipo de mecanismo os minerais placóides promovem um deslizamento de borda de grãos por meio de fricção ao invés de cataclase (Fossen et al., 2007). Em relação as suas propriedades petrofísicas, Knipe (1992) afirma que a quantidade, o tipo e a distribuição destes filossilicatos ao longo da banda tendem a reduzir a permeabilidade da rocha reservatório.

*Bandas cataclásticas* – estas bandas desenvolvem-se principalmente por meio de fraturamento mecânico dos grãos. Geralmente apresentam uma ampla distribuição granulométrica e um alto teor de matriz (Fossen et al., 2007). Segundo suas propriedades petrofísicas, o esmagamento dos grãos e a alteração na distribuição de tamanho destes grãos durante a deformação cataclástica são os principais causadores da diminuição da porosidade. Holcomb e Olsson (2003) comprovaram também que assim como há diminuição da porosidade em bandas cataclásticas, a permeabilidade também foi reduzida em cerca de duas ordens de magnitude.

*Dissolução, cimentação e Diagênese* – Tanto a dissolução quanto a cimentação podem ocorrer preferencialmente ao longo de uma banda de deformação durante ou após a deformação (Fossen et al., 2007). A dissolução é causada por argilominerais nos limites dos grãos e é uma característica comum das bandas de deformação formadas em profundidades mais rasas. Enquanto a cimentação nas bandas de deformação é promovida por superfícies frescas e altamente reativas formadas durante a trituração ou deslizamento dos limites dos grãos. Com relação à porosidade e permeabilidade, tanto a cimentação quanto a dissolução podem reduzi-las consideravelmente, geralmente ocasionada pela reorganização dos grãos e até mesmo esmagamento mecânico (Ngwenya et al., 2000; Ogilvie e Glover, 2001).

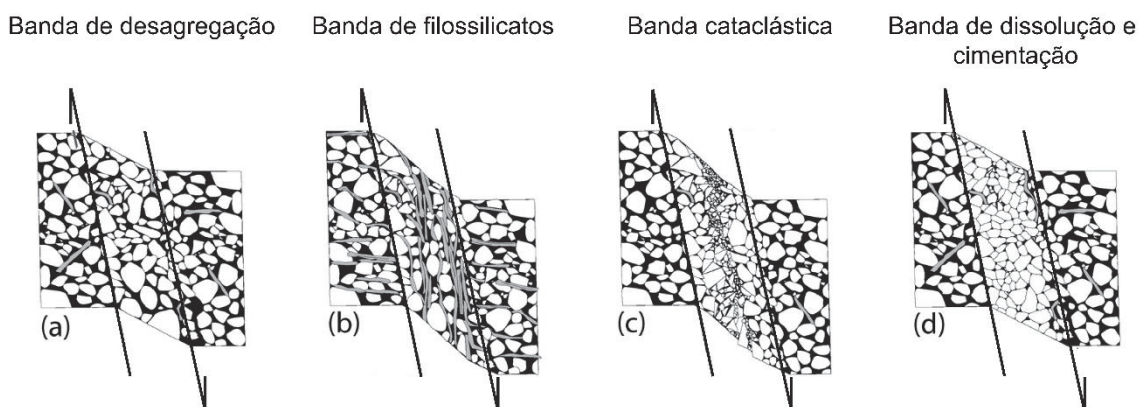


Figura 1- Principais tipos de bandas de deformação, com base nos seus mecanismos de deformação. (modificado de Fossen et al., 2007).

## 2.2. Porosidade

No âmbito de estudos geológicos a porosidade desempenha um papel essencial. É este fator que controla o armazenamento de fluidos em aquíferos,

o armazenamento ou não de óleo e gás em sistemas geotérmicos, e ainda, a extensão e conectividade da estrutura de poros controla o fluxo de fluido e o transporte através de formações geológicas, bem como a relação individual entre os minerais componentes e as propriedades de volume da rocha.

Segundo Rosa et al. (2006) a porosidade é definida como sendo a relação entre o volume de vazios de uma rocha e o volume total da mesma (figura 02). Ainda segundo a autora, a porosidade pode ser classificada em:

*Porosidade absoluta:* É a relação entre o volume total de vazios de uma rocha e o volume total da mesma.

*Porosidade efetiva:* É a relação entre os espaços vazios interconectados de uma rocha e o seu volume total. Do ponto de vista da engenharia de reservatórios, a porosidade efetiva é o valor que se deseja quantificar, pois representa o espaço ocupado por fluidos que podem ser deslocados do meio poroso. Rochas com materiais intergranulares, pobre a moderadamente cimentados, apresentam valores aproximadamente iguais de porosidades absoluta e efetiva. Já rochas altamente cimentadas, bem como calcários, podem apresentar valores bem diferentes para essas duas porosidades.

*Porosidade primária:* É aquela que se desenvolveu durante a deposição do material sedimentar. Exemplos de porosidade primária ou original são a porosidade intergranular dos arenitos e as porosidades intercrystalina e oolítica de alguns calcários.

*Porosidade secundária:* É aquela resultante de alguns processos geológicos subsequentes à conversão dos sedimentos em rochas. Exemplos de porosidade secundária ou induzida são dados pelo desenvolvimento de fraturas, como as encontradas em arenitos, folhelhos e calcários, e pelas cavidades devidas à dissolução de parte da rocha, comumente encontradas em calcários.

Segundo Rosa et al. (2006), em rochas sedimentares clásticas, principalmente arenitos, a porosidade comumente é do tipo intergranular e ocorre quando é decorrente do espaço vazio remanescente depois que a porosidade inicial foi reduzida pela cimentação. Os autores indicam que a porosidade inicial depende principalmente do grau de seleção dos grãos de areia, por exemplo, para grãos moderadamente arredondados e aproximadamente de mesmo tamanho a porosidade pode variar de 35% a 40%. Caso as dimensões das partículas sejam muito variadas, a porosidade será

pequena, pois os grãos menores preencherão parcialmente os interstícios existentes entre os grãos maiores e a porosidade será em torno de 30% ou menos. Como regra geral, a cimentação e as irregularidades de grãos diminuem o valor da porosidade inicial de 30 e 40% para cerca de 10 e 20%.

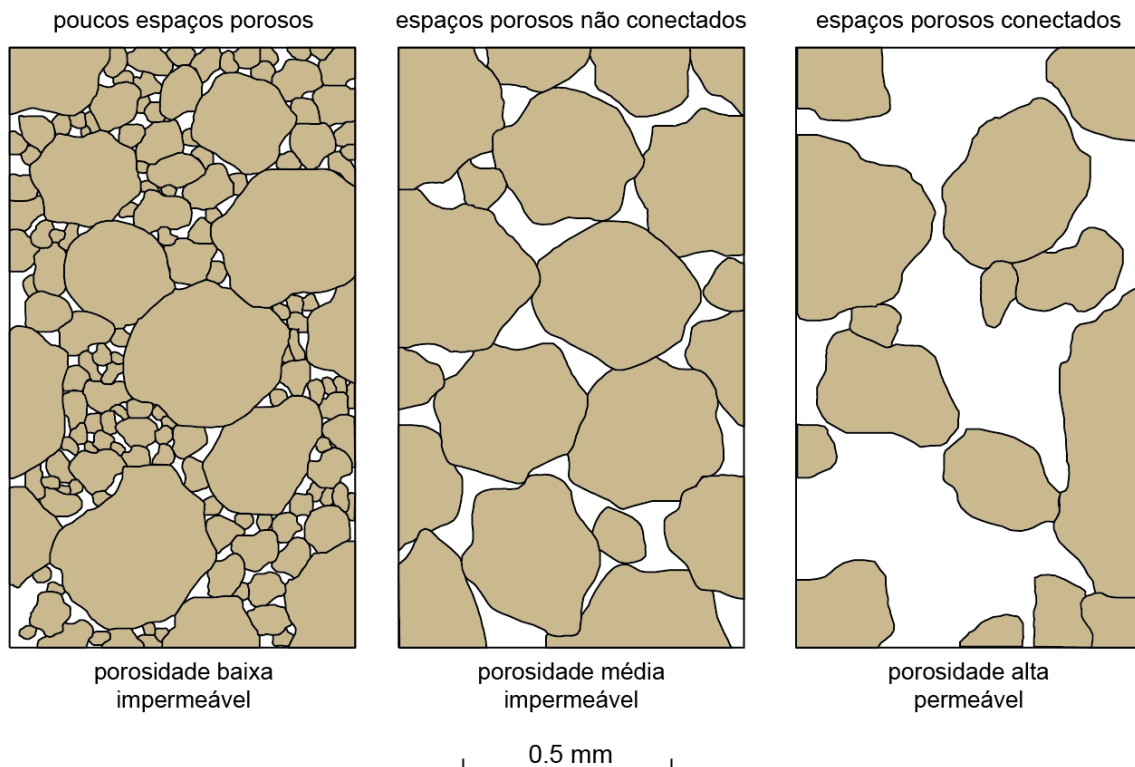


Figura 2 - Visão microscópica de arenitos variando de muito baixa porosidade / permeabilidade a alta porosidade / permeabilidade. (Modificado do site do Departamento de Minas, Oeste da Austrália).

### 2.3. Microtomografia Computadorizada de Raios-X

No início da década de 90 a tomografia computadorizada começou a ser utilizada no campo das geociências, mais especificamente em pesquisas relacionadas a estudos na área petrolífera para análise de rochas sedimentares e potenciais rochas reservatórios.

A microtomografia computadorizada de raios-X ( $\mu$ CT) é uma técnica de análise tridimensional (3D) não destrutiva, que fornece dados texturais de rochas e minerais em alta resolução, que não seriam possíveis de serem observados apenas em análises microscópicas bidimensionais (2D). Além disso, a aplicação desta técnica fornece também dados a respeito da quantificação de área e volume da amostra analisada (Reis Neto et al., 2011).

Nesta técnica, para a aquisição, a amostra/objeto de estudo é exposta ao feixe de raios-X incidente e girada 180 ° para obter uma série de projeções, normalmente entre 600 a 3600 projeções (Palombo, 2017). Essas projeções são então reconstruídas para criar fatias 2D (imagens de projeção) do volume medido. Os pixels nas fatias 2D retêm informações espaciais sobre seus elementos de volume de origem (voxels) para que as fatias pudessem ser empilhadas para recriar o volume 3D do espécime (Palombo, 2017). Essas fatias 2D também são os "dados brutos" que podem ser colocados no fluxo de trabalho de processamento de dados em software adequado para tratamento (Palombo, 2017). Uma ferramenta típica de processamento de dados de imagens  $\mu$ CT em relação à caracterização mineral pode ser generalizada em várias etapas que são ilustradas na figura 03.

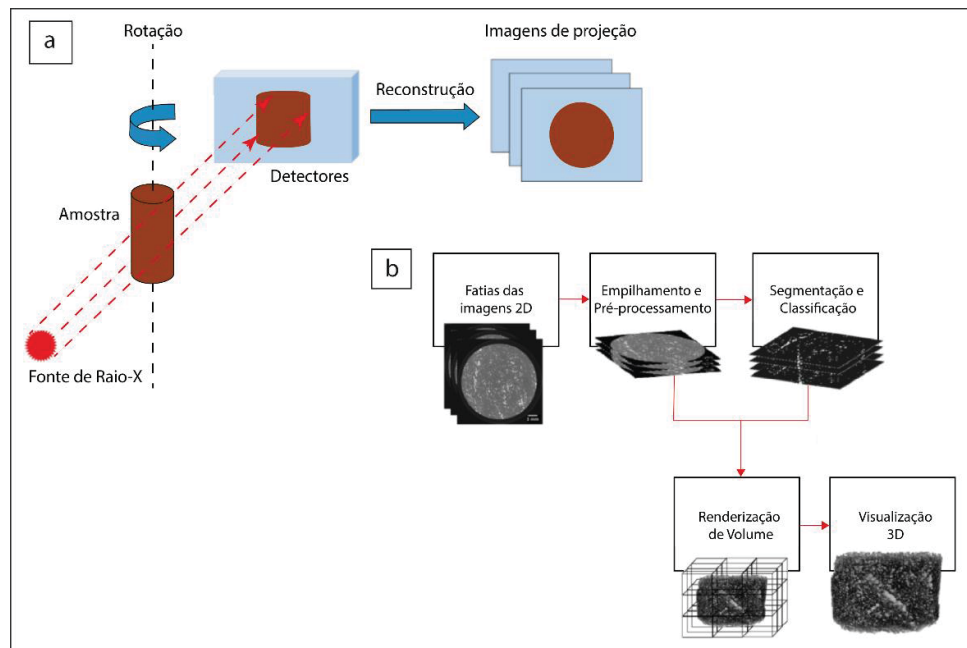


Figura 3 - a) Ilustração de como o feixe de raios X, que se origina de uma fonte, atravessa a amostra e posteriormente esses feixes são captados por um receptor. b) As fatias da imagem 2D são reconstruídas a partir dessas projeções, enquanto depois podem ser empilhadas e renderizadas para criar o volume 3D para fins de exibição. (modificado de Guntoro et al., 2019)

Segundo Reis Neto et al. (2011), diferentes materiais apresentam diferentes intensidades de atenuação, que dependem dos diferentes coeficientes de atenuação linear das fases distintas que estão sendo analisadas. O número atômico efetivo e a densidade da amostra a ser analisada, são os principais parâmetros determinativos do grau de absorção dos raios X (Reis Neto et al.,

2011). Com isso, as imagens geradas são representadas de acordo com a escala de cinza associada àquele objeto de estudo (Palombo, 2017).

#### 2.4 Electron Backscatter Diffraction (EBSD) – Difração de Elétrons Retroespalhados

Esta técnica permite a análise cristalográfica de um material, ou seja, a determinação da orientação e estrutura cristalina pontualmente ou em áreas específicas. Nesta técnica a superfície da amostra a ser analisada é posicionada no porta-amostras a um ângulo de  $70^\circ$  em relação ao feixe de elétrons (figura 04) de modo a diminuir o percurso dos elétrons retroespalhados e diminuir a fração de elétrons absorvidos (Morales et al., 2007). O feixe de elétrons é direcionado para a área de interesse. O espalhamento elástico dos elétrons incidentes prova a difração na condição de Bragg, como os elétrons da amostra (Morales et al., 2007). As figuras de difração são capturadas por uma tela de fósforo posicionada no interior da câmara de vácuo e conectada a uma TV ou câmara CCD (Pinto et al., 2003). A imagem é processada e então comparada com padrões pré-estabelecidos.

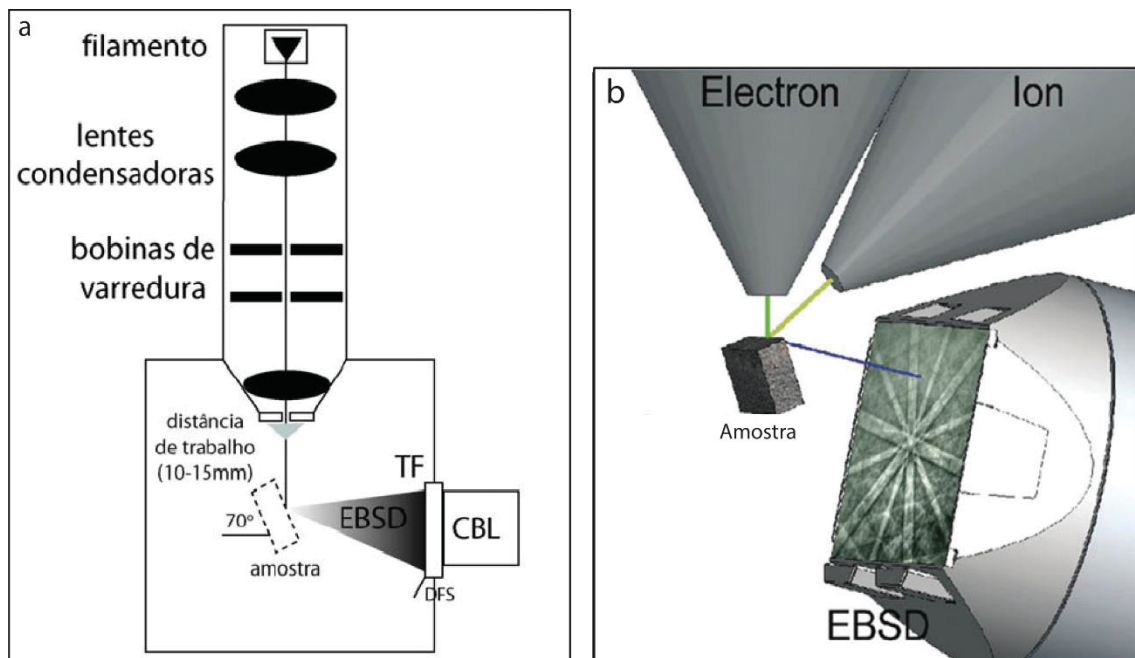


Figura 4 - a) Desenho esquemático da montagem da coluna para detecção dos elétrons retroespalhados. (modificado de Morales et al., 2007); b) Configuração do posicionamento da amostra em relação aos feixes e o detector. (modificado do site da Oxford Instruments)

### 3. GEOLOGIA DA ÁREA

As rochas utilizadas para o desenvolvimento desta pesquisa, pertencem ao Grupo Ilhas, componente da Bacia de Tucano Central (BTC), situada no nordeste do Estado da Bahia, na região do município de Jeremoabo.

A BTC é parte integrante do Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá (RTJ), ramo abortado e preservado do Rifte Sul Atlântico. Este rifte, por sua vez, está relacionado à separação continental América do Sul-África e à abertura do oceano Atlântico Sul, durante o Mesozóico (Santos 2011).

O embasamento da BTC é formado por representantes da Província São Francisco e da Província Borborema (Santos 2011). Magnavita (1992) classificou a BTC como uma bacia do tipo rifte-sinéclise (*rift-sag*), que apresenta no seu depocentro principal, mais de 9.000 metros de sedimentos, divididos em três supersequências (Costa et al., 2007): pré-rifte, sinrifte e pós-rifte.

O Grupo Ilhas foi formalizado e denominado como Formação Ilhas em 1958, no *Estudo da Bacia*, quando foi dividido nos membros inferior e superior. Posteriormente, Viana et al. (1971) elevaram a Formação à categoria de grupo.

O Grupo Ilhas aflora nos extremos SW, NW e NE da Folha Caimbé, onde se prolonga para a Folha Jeremoabo associada à Zona de Acomodação do Arco Vaza-Barris, conformando uma faixa aproximadamente NW-SE (Santos, 2011).

Costa et al. (2004) descrevem o Grupo Ilhas, nessa região, como formado por arenitos que variam, em granulometria, da fração areia fina a média até areia grossa a muito grossa, com grânulos e seixos dispersos ou alinhados ao longo das camadas. Os mesmos apresentam colorações amareladas e avermelhadas, são empacotados segundo geometria tabular, e caracterizados como friáveis a semifriáveis. Apresentam ainda estratificações cruzadas, tanto tangenciais como acanaladas, ambas com pequeno, médio e grande porte, e estruturas secundárias, a maioria das vezes de grande porte, como laminações convolutas e estruturas de escorregamento e de escape de fluidos. Além disto, Costa et al. (2004), ressaltam que este Grupo é marcado pela presença constante de sistemas de juntas e falhas, de direções N-S e NNE-SSW, com grandes exposições de bandas de deformação destacadas no relevo.

Santos (2011) resalta que devido à composição das rochas sedimentares, predominantemente arenosas, as juntas e falhas tendem a

desenvolver, com freqüência, bandas de deformação. Estas bandas são importantes feições no contexto hidrogeológico da região, pois podem atuar tanto como barreiras, como condutos ao fluxo subterrâneo.

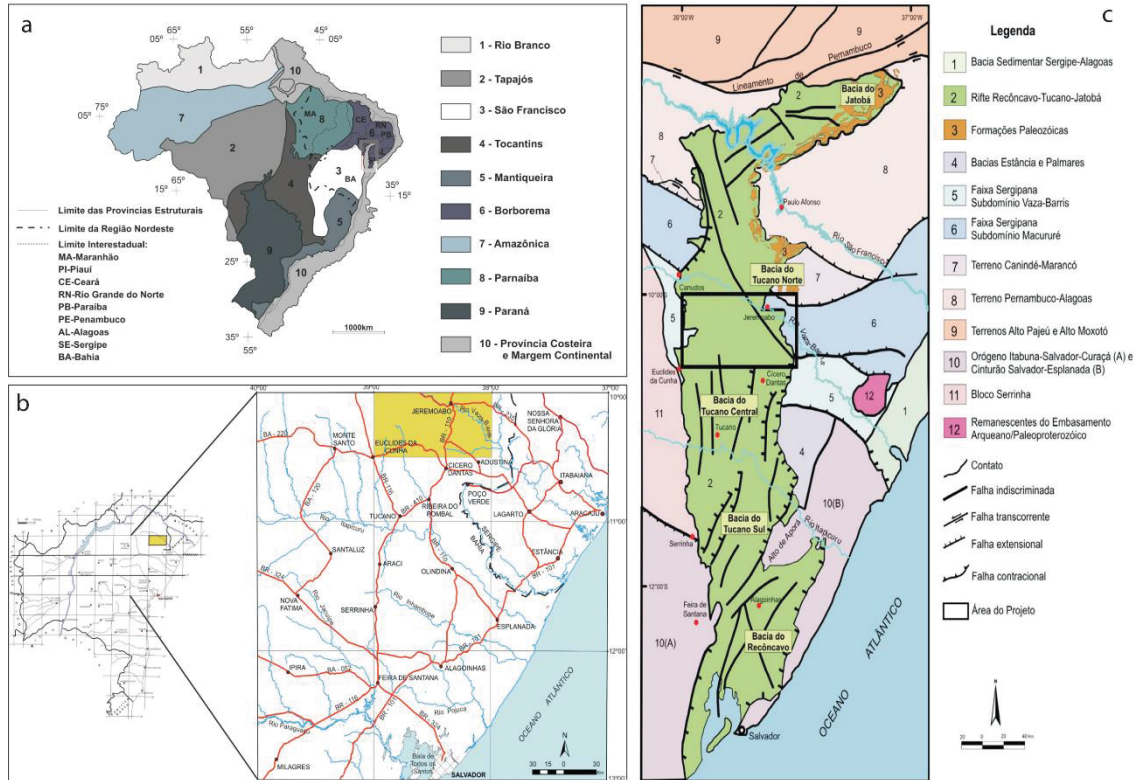


Figura 5 - a) Províncias estruturais brasileiras (Santos, 2011); b) Localização geográfica da área coleta das amostras, sedes municipais mais importantes e principais vias de acesso da área das folhas Caimbé e Jeremoabo, (modificado de Santos, 2011); c) Área das folhas Caimbé e Jeremoabo no contexto geológico regional. (Santos, 2011).

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização desta pesquisa foram empregadas um conjunto de técnicas, as quais individualmente fornecem dados e observações a respeito da porosidade de rochas. No estudo em questão estas técnicas foram realizadas em conjunto afim de obter informações relevantes para a pesquisa.

##### 4.1 Microscopia Ótica

A análise petrográfica é a principal técnica aplicada para reconhecimento das fases mineralógicas presentes na rocha. Para esta análise foram selecionadas quatro amostras representativas e localizadas em pontos estratégicos em relação à banda de deformação. Desta forma foram selecionadas: uma área na banda de deformação, uma área na interface da banda de deformação e fora da banda, uma área fora da banda de deformação

e outra área próxima à banda de deformação. As amostras foram seccionadas e laminadas, com impregnação com corante azul, afim de preencher com a cor azul os poros presentes na rocha. Após a coloração as amostras foram lixadas, coladas, secas, cortadas, desbastadas e finalizadas para que a fatia de rocha chegasse a espessura de 30 micrometros para que assim pudesse ser analisada em microscópio de luz polarizada. Posteriormente à preparação de lâmina delgada, impregnada na resina azul, as lâminas foram analisadas no Laboratório de Petrografia do Instituto LAMIR pertencente à Universidade Federal do Paraná com um auxílio de um Microscópio de polarização Zeiss, modelo Imager A2m e as fotomicrografias obtidas através do *software* para tratamento de imagens Axio Vision (figura 06).

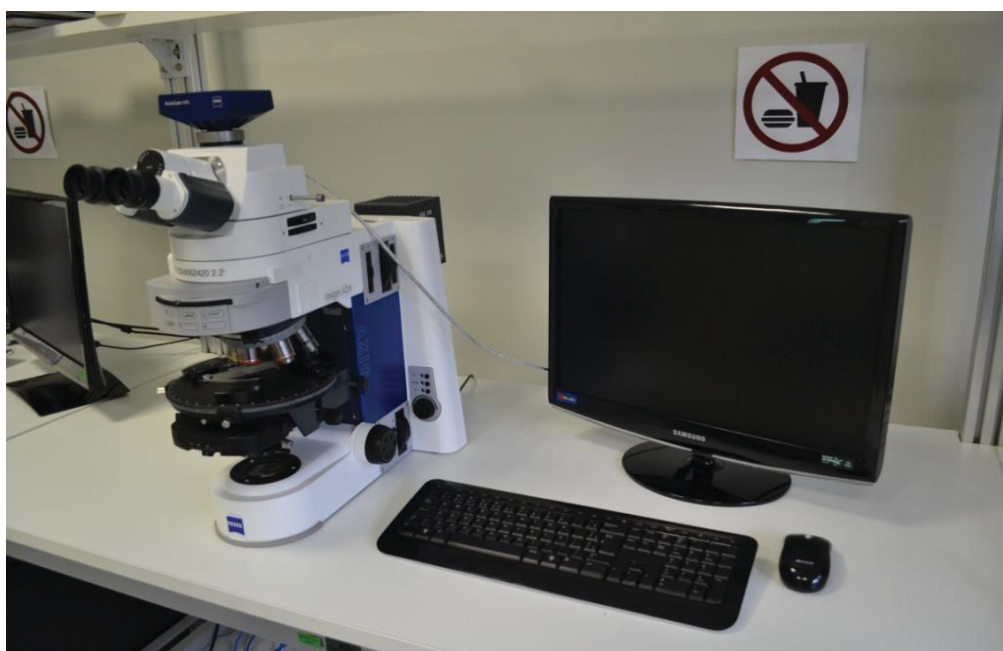


Figura 6 - Microscópio Zeiss Imager A2m. (Fonte: site Ilamir).

#### **4.2 Microtomografia Computadorizada de Raios – X**

A microtomografia computadorizada ( $\mu$ CT) é uma técnica de avaliação de materiais, que utiliza o princípio físico da atenuação de raios X para formação de imagens bidimensionais e tridimensionais. Essa técnica possibilita a visualização tridimensional e em alta resolução de pequenas amostras, por meio da união digital de centenas de cortes transversais. O Equipamento utilizado nesta técnica foi um Microtomógrafo da marca Zeiss, modelo Xradia 510 Versa (figura 07), que possui um sistema de lentes para seleção de volumes de interesse IVOI's). O sistema possui até 160 kV de energia, 10 W de potência e sua resolução espacial

de até 0,7  $\mu\text{m}$ . Para a visualização, tratamento e aquisição das imagens utilizadas nesta pesquisa foi utilizado *Software Dragonfly*.

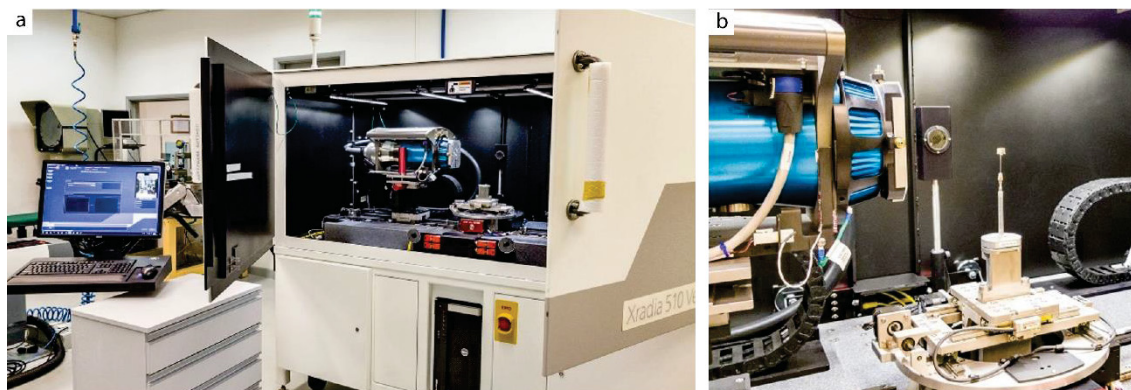


Figura 7 - a) Foto externa do microtomógrafo Xradia 510 Versa; b) Foto interna do microtomógrafo.(Fonte: site do MicDig/PUC-RIO).

Para a análise de  $\mu\text{CT}$  foram selecionados fragmentos das rochas de tamanho aproximado de 10mm x 10mm x 10mm. Estes foram selecionados de acordo com as áreas de interesse, resultando em fragmentos dentro da banda de deformação (BD), distantes da BD e na interface da BD e a área fora da banda. Para aplicação desta técnica não houve preparação prévia dos fragmentos. Foram geradas imagens de 3 planos de corte perpendiculares e a visualização 3D, todos com tamanho do pixel de aproximadamente 9 $\mu\text{m}$ .

### 4.3 Electron Backscatter Diffraction technique (EBSD)

A técnica de análise da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) associada à Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD) tem uma grande relevância para a obtenção de informações sobre as fases cristalográficas e sua orientação. As amostras que são submetidas a essa análise necessitam de um preparo cuidadoso, com vários processos de polimento, a fim de que a amostra esteja livre de qualquer tipo de imperfeição, garantindo assim que a emissão dos sinais será de alta qualidade e que gerarão as informações esperadas. As amostras de rochas selecionadas para a técnica de EBSD foram selecionadas de acordo a sua localização em relação a banda de deformação. Desta forma, quatro amostras foram selecionadas, duas representando a BD e duas fora da BD. A preparação de amostras para a aplicação desta técnica é dividida em várias fases. A fase inicial é coleta do material e a escolha da face a ser analisada. A mesma deve ser representativa do material de interesse. Na

segunda fase está a preparação do material para análise. Para análise de rochas e minerais é possível que a preparação seja através de confecção de lâminas delgadas ou seções embutidas, neste caso foi escolhida a confecção de embutimentos. Os fragmentos de rocha são embutidos individualmente em fôrmas circulares de silicone com resina epóxi metalográfica. Após o endurecimento total da resina, que varia de 18 a 24 horas, as amostras foram cortadas e alinhadas para exposição total da face a ser analisada. O desbaste de exposição da face foi feito com lixa de carbetto de silício, até que a mesma estivesse lisa e a superfície da amostra estivesse totalmente aparente. A fase seguinte de polimento, foi realizada no Centro de Microscopia da Universidade Federal do Paraná.

Para as rochas de estudo, classificadas como arenitos, levando em consideração suas características físicas, a sequência selecionada, de acordo com a metodologia da técnica foi de: Polimento com pasta de diamante de 9, 6, 3, 1 e 0,5 micrômetros ( $\mu\text{m}$ ). Para todos estes polimentos foram utilizados panos de nylon autocolantes em uma politriz semi-automática da marca STRUERS, modelo Laboforce 5 (figura 08), com uma força aplicada individualmente em cada amostra de 10N e com velocidade de 50 rpm por aproximadamente 20 minutos. Posteriormente ao polimento as amostras foram submetidas ao ultrapolimento, este realizado com sílica coloidal (20 nm) em uma politriz de precisão da marca Buehler, modelo MiniMet 1000 semi-automática (figura 08), com uma força de aproximadamente 20N e com uma rotação de 40 rpm por pelo menos 90 minutos. Uma preparação adequada e correta, resultará em uma amostra com face perfeitamente plana, sem riscos, espelhada e totalmente livre de qualquer deformação obtida durante a fase de preparação, garantindo assim que a emissão dos sinais será de alta qualidade e que gerarão as informações esperadas.

Após a preparação dos embutimentos foram selecionadas pequenas áreas dentro destas amostras. Com auxílio de uma lupa, as áreas foram selecionadas para aquisição de dados cristalográficos, determinação de possíveis feições microestruturais e informações acerca da caracterização da deformação. Posteriormente, as amostras já com as áreas selecionadas foram submetidas a análise de EBSD. Esta análise foi realizada no Instituto Lactec em

um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do tipo FEG, modelo Mira3 LM, da marca TESCAN, equipado com um EBSD, EDS e WDS (figura 09) da Oxford Instruments. Para esta análise as amostras já preparadas foram colocadas no MEV com uma inclinação de 70° a partir da horizontal. A amostra é bombardeada por um feixe de elétrons que ao interagir com o sólido da amostra é refratado ao longo dos planos cristalinos. A interação entre planos de difração formam as bandas de Kikuchi que contém as informações cristalográficas do ponto analisado e os padrões de difração. As intersecções formadas entre essas bandas representam direções cristalográficas que são capturadas por uma câmera de vídeo de alta resolução localizada no interior do MEV. O processamento dos dados obtidos no EBSD foi feito utilizando o *software* AZtecCrystal (Oxford Instruments), no qual foram gerados mapas de fase, mapa de tamanho de grão, mapa de borda de grão, mapa de orientação cristalográfica e figuras de polo.

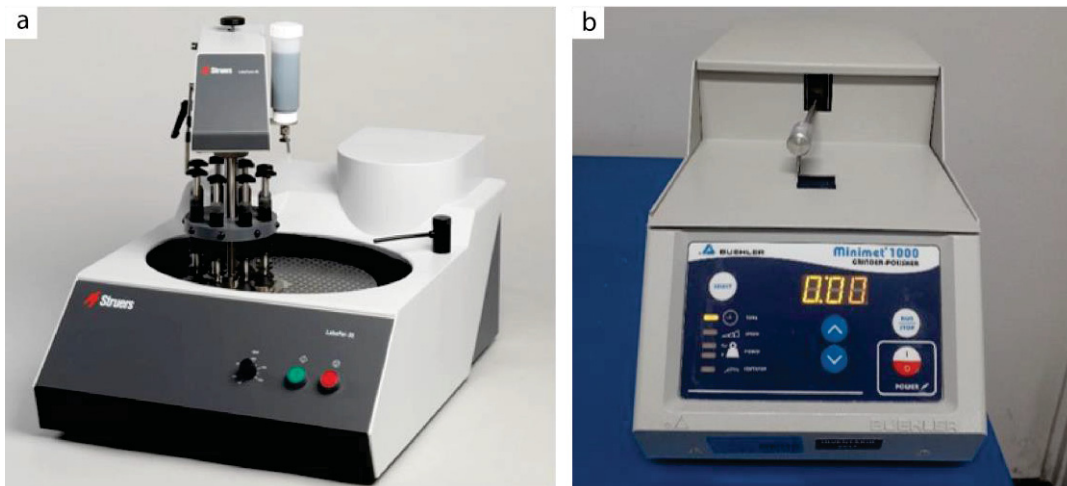


Figura 8 - a) Equipamento Labopol para lixamento e polimento com pasta de diamante; b) Equipamento Minimet 1000 para ultrapolimento.

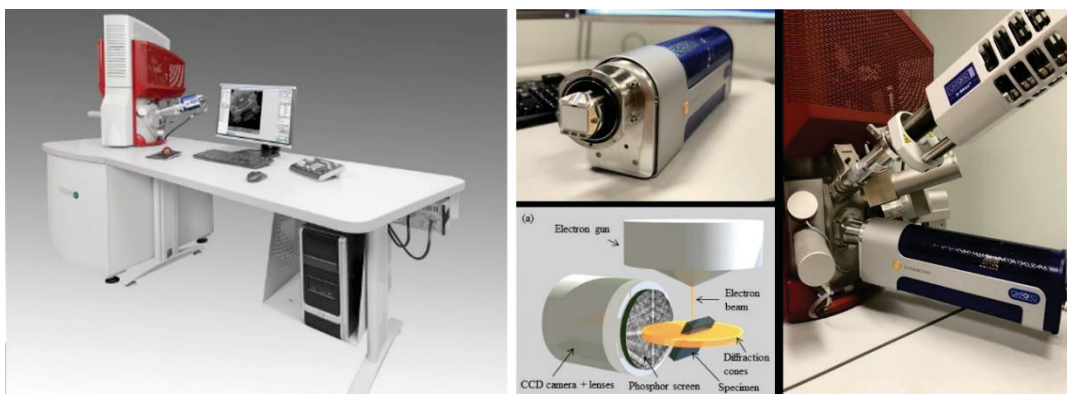


Figura 9 - Imagens do sistema de equipamento MEV-EBSD (Fonte: site Tescan)

## 5. RESULTADOS

Os resultados dessa dissertação serão apresentados na forma de artigo científico intitulado de “*Aplicação da técnica de EBSD no estudo de porosidade e permeabilidade em bandas de deformação*”

### 5.1. APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE EBSD NO ESTUDO DE POROSIDADE E PERMEABILIDADE EM BANDAS DE DEFORMAÇÃO

#### RESUMO

Os arenitos porosos do Grupo Ilhas, hospedam bandas de deformação (Bd) que alteram a capacidade de armazenamento de uma rocha considerada como uma possível rocha reservatório. Além das próprias características físicas e mineralógicas, as alterações impostas durante a colocação da Bd influenciam diretamente sobre o fechamento e selamento de poros, diminuindo a qualidade dessa rocha, como possível reservatório. Algumas técnicas de observação dessas estruturas e de análises de porosidade e permeabilidade já são largamente utilizadas em rochas, no entanto, ainda são poucas as informações a respeito das relações cristalográficas entre os cristais detríticos, que podem afetar a qualidade das rochas reservatórios. O objetivo deste estudo é aplicar diferentes técnicas de investigação microscópica e microestrutural para análise da influência da banda de deformação na diminuição desse espaço poroso. Os valores de porosidade medidos através da técnica de microtomografia computadorizada indicam que nos domínios externos à Bd a porosidade total chega a 13%, enquanto nos domínios internos, chega a pouco mais de 1%. As análises de MEV demonstraram presença de microtexturas de fragmentação e dissolução nos grãos, além de presença de cimento preenchendo antigos poros. As análises de EBSD apontaram uma intensa fragmentação de grãos, e ainda, que a deformação plástica não foi marcante nestas amostras. No entanto há indícios dos eixos-c dos cristais de quartzo se alinharem grosseiramente paralelo ao *trend* da banda de deformação. Com isso, as bandas de deformação podem ser melhor classificadas como Banda de deformação cataclástica e sendo a fragmentação mecânica dos grãos e a formação de cimento, os principais mecanismos de selamento dos poros e da conseqüente redução da qualidade do reservatório.

**PALAVRAS-CHAVE:** Arenito. Microestruturas. Porosidade. Banda de deformação. Cristalografia.

## **ABSTRACT**

The porous sandstones of the Ilhas Group, host deformation bands (Bd) that alter the storage capacity of a rock considered as a possible rock reservoir. In addition to the physical and mineralogical aspects, the changes imposed during the placement of Bd directly influence the closing and sealing of pores, reducing the quality of this rock, as a possible reservoir. Some techniques for observing these structures and analyzing porosity and permeability are already widely used in rocks. However, there is still little information about the crystallographic relationships between detrital crystals, which can affect the quality of reservoir rocks. The objective of this study is to apply different microscopic and microstructural investigation techniques to analyze the influence of the deformation band on the reduction of pore space. The porosity values measured using the computerized microtomography technique indicate that in the external domains, the total porosity of Bd reaches 13%, while in the internal domains, they reach just over 1%. The SEM analyzes showed that the presence of fragmentation and dissolution microstructures in the grains, in addition to the presence of cement filling old pores. The EBSD analyzes indicated an intense fragmentation of grains and little contribution of intracrystalline plasticity as deformation mechanism. However, there is evidence that the c-axes of the quartz crystals align roughly parallel to the trend of the deformation band. Thus, the deformation bands can be better classified as cataclastic deformation band and the mechanical fragmentation of the grains and cement formation are the main mechanism for sealing the pores and consequent reduction in the quality of the rock reservoir.

**KEYWORDS:** Sandstone. Microstructures. Porosity. Deformation band. Crystallography.

## **INTRODUÇÃO**

A porosidade é um dos parâmetros fundamentais para determinar o fluxo de fluidos através das rochas e do solo. No entanto, a porosidade geralmente evolui com o tempo, o que tem consequências importantes para uma série de processos, incluindo a extração de hidrocarbonetos de reservatórios

subterrâneos, bombeamento de águas subterrâneas em aquíferos e sequestro de carbono em formações geológicas (Girnun et al. 2020). Os processos que alteram a porosidade das rochas podem ser de natureza física ou química. Durante a compactação mecânica, por exemplo, os grãos podem ser reorganizados e até fraturados para reduzir o volume total de poros (Serra 1986; McDonald e Schmidt 1992; Chuhan et al. 2002, 2003; Bjørlykke 2006; Makowitz e Milliken 2003). Além disso, reações químicas, incluindo precipitação mineral, dissolução e substituição, também podem causar o fechamento dos espaços vazios ou até mesmo a criação de um novo espaço poroso (Taylor 1950; Dapples 1979; Chuhan et al. 2002; Anovitz et al. 2015). É importante considerar que fatores como a diagênese e até mesmo a deformação natural de rochas e sedimentos altamente porosos tendem a formar estruturas que podem selar e preencher este espaço poroso, diminuindo assim a porosidade e permeabilidade dessas rochas. Uma das estruturas que podem ser formadas através das deformações naturais das rochas são as bandas de deformação (Bd) que segundo Fossen *et al.* (2007), em rochas porosas, estas bandas tendem a aumentar a coesão e reduzir a porosidade e a permeabilidade se comparadas as fraturas comuns.

A aplicação da técnica de Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD) tem revelado feições microestruturais e cristalográficas importantes, relacionadas aos mecanismos de crescimento mineral e de suas orientações cristalográficas, feições estas que não podem ser observadas apenas com análise de microscópio de luz visível. Além da técnica de EBSD, a Microtomografia Computadorizada de Raios-X ( $\mu$ CT) também é uma ferramenta que fornece dados importantes a respeito da porosidade. Entretanto não aborda os aspectos microestruturais. Mas quando aplicada em conjunto com o EBSD torna-se uma técnica imprescindível na caracterização dos aspectos relacionados a evolução dessas rochas. Isso permite entender por exemplo, a relação da porosidade e permeabilidade com o cimento de sílica dentro e fora da banda de deformação. Desta forma, o objetivo geral desta pesquisa é conciliar as técnicas de análise de porosidade e permeabilidade já aplicadas amplamente e complementar com os dados cristalográficos obtidos a partir da análise de

EBSD a fim de ter uma caracterização completa dessas feições microestruturais e suas relações com a capacidade de armazenamento das rochas estudadas.

### *Contexto Geológico*

As rochas analisadas fazem parte do Grupo Ilhas, localizado na Bacia de Tucano Central que é uma subdivisão da Bacia de Tucano. Esta por sua vez, é parte integrante do Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá (RTJ), ramo abortado e preservado do Rifte Sul Atlântico, relacionado a fragmentação do Gondwana. Este rifte promoveu a separação continental América do Sul-África e a abertura do oceano Atlântico Sul (figura 01) no Mesozóico (Santos, 2011). O embasamento do rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá é formado por rochas das províncias São Francisco e Borborema. A Bacia do Tucano é subdividida nas sub-bacias do Tucano Sul, Tucano Central e Tucano Norte (figura 01b) por grandes feições estruturais de direção NW/SE: Zona de Acomodação do Rio Itapicuru, que separa as sub-bacias do Tucano Sul e Central, e a Zona de Acomodação do Vaza-Barris, que limita as sub-bacias do Tucano Central e Norte (Santos, 2011). Segundo Costa et al. (2007) a deposição do Grupo Ilhas pertence a Supersequência Rifte. Este, por sua vez, não apresenta variações significativas nos padrões litoestratigráficos e foi cartografado como indiviso na região de Jeremoabo. Em geral o Grupo Ilhas foi classificado por Santos (2011) como um pacote sedimentar constituído basicamente por arenitos vermelhos a amarronzados, médios a grossos, dispostos em bancos espessos separados por intercalações subordinadas de folhelho e siltito e frequentes níveis de arenitos conglomeráticos a conglomerados na base de estruturas acanaladas, além de alguns ritmitos de arenito e folhelho. Faz limite superior com a Formação Massaracá e inferior com a Formação Candeias (Santos, 2011). Estratificação convoluta e outras estruturas indicativas de fluidização também são freqüentes nas rochas desse grupo. Além disso, o Grupo Ilhas é marcado também pela presença constante de sistemas de juntas e falhas, de direções N-S e NNE-SSW, com grandes exposições de bandas de deformação destacadas no relevo (Costa et al., 2004).

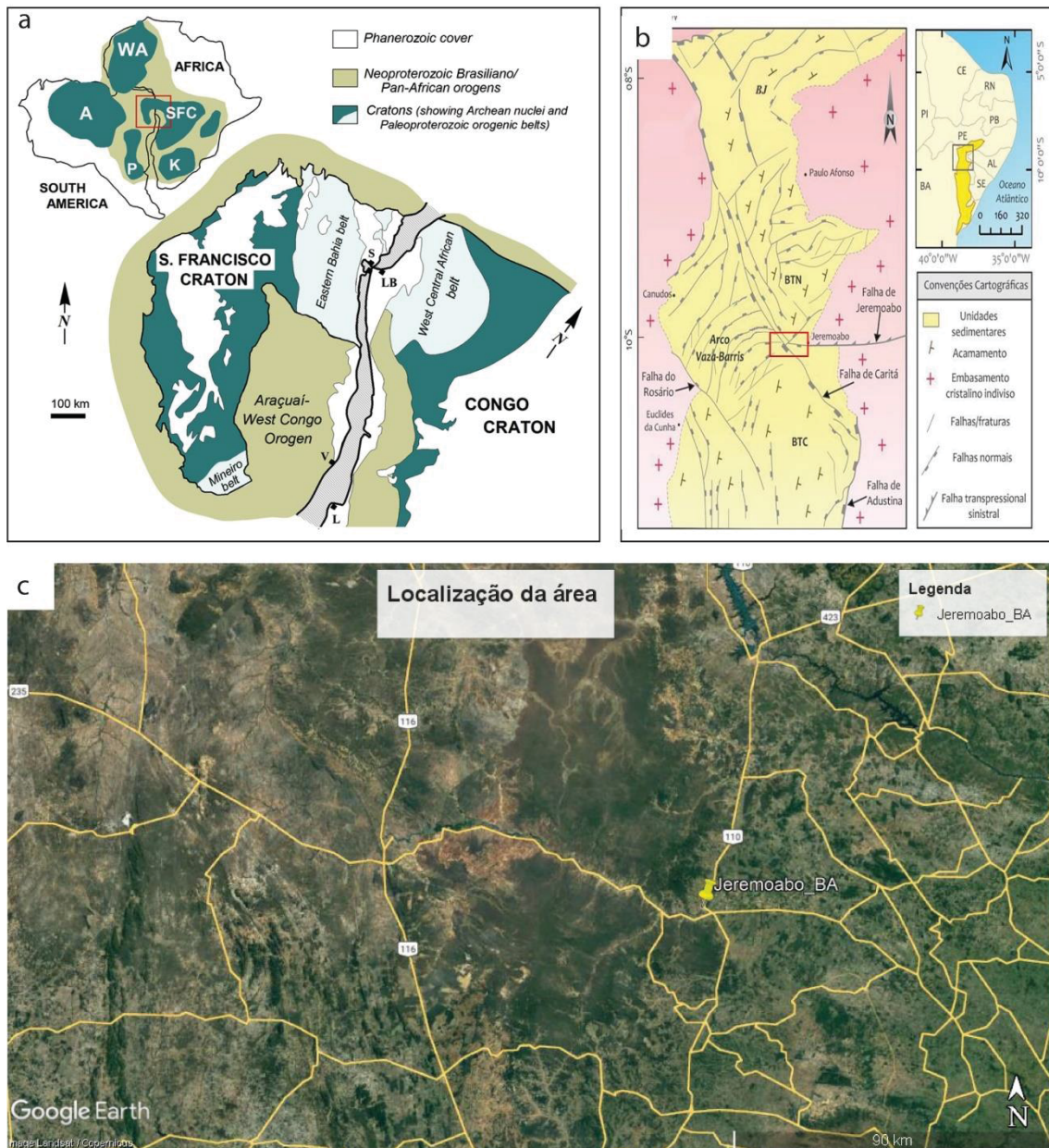


Figura 01 – a) Cráton de São Francisco, juntamente com o seu homólogo africano, o Cráton do Congo, no cenário tectônico do Gondwana Ocidental. Cratons da América do Sul e África: A - Amazônia; P - Rio da Prata; WA - África Ocidental; SFC - São Francisco-Congo; K - Kalahari. Cidades: S - Salvador e V - Vitória (Brasil); Luanda (Angola); LB Lebrville (Gabão) (Fonte: Alkmim e Martins-Neto, 2012); b) Localização da área das rochas de estudo – Grupo Ilhas – Bacia de Tucano Central (Fonte: modificado de Rodrigues, 2018); c) Localização da área de coleta das amostras.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Petrografia

Para a análise petrográfica foram confeccionadas lâminas delgadas das rochas coletadas. As áreas foram selecionadas de acordo com análise macroscópica e marcadas de acordo com a proximidade da Banda de deformação para que se pudesse entender o arranjo dos minerais dentro e fora

das bandas de deformação. As amostras foram impregnadas com resina e corante azul para detecção dos poros vazios e posteriormente descritas com o auxílio de um microscópio de polarização Zeiss, modelo Imager A2m. As fotomicrografias foram adquiridas através do *software* para tratamento de imagens Axio Vision.

#### *Microtomografia computadorizada de raios-x*

Para as análises de microtomografia foram cortadas amostras de tamanho 10mm X 10mm X 10mm. Para a escolha das áreas também se considerou áreas próximas à banda de deformação. Desta forma foram selecionados fragmentos que corresponderam a domínios internos e externos às bandas de deformação. O Equipamento utilizado nesta técnica foi um Microtomógrafo da marca Zeiss, modelo Xradia 510 Versa, que possui um sistema de lentes para seleção de volumes de interesse (IVOI's). A tensão de aceleração é de até 160 kV de energia, com potência de 10 W e resolução espacial de até 0,7  $\mu\text{m}$ . Foram geradas imagens de 3 planos de corte perpendiculares para visualização 3D, todos com tamanho do pixel de aproximadamente 9 $\mu\text{m}$ . Para a visualização, tratamento e aquisição das imagens utilizadas nesta pesquisa foi utilizado *Software Dragonfly*.

#### *Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD)*

Para o imageamento de feições cristalográficas e microestruturas, foram selecionadas amostras em domínios internos e externos às bandas de deformação. As amostras foram embutidas e posteriormente a superfície analisada foi metalizada em ouro. Para a realização desta análise foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura TESCAN VEGA3 LMU, que conta com um sistema de microanálise química por dispersão de energia de raios-X (EDS - Oxford) com software AZTech (Advanced) com detetor tipo SDD de 80 mm<sup>2</sup> em um microscópio com canhão de elétrons por emissão de campo (FEG).

As amostras analisadas por esta técnica necessitam de um preparo especial, com vários processos de polimento, a fim de que a superfície analisada esteja livre de qualquer tipo de imperfeição, garantindo assim uma emissão de sinais de alta qualidade proporcionando padrões de difração inequívocos para determinação da simetria do mineral analisado. As amostras de rochas foram

escolhidas de acordo com a sua localização em relação à banda de deformação. Após a seleção da área foi feito um corte das rochas e em seguida a confecção de embutimentos com os fragmentos com resina epóxi metalográfica. Após o endurecimento total da resina, que varia de 18 a 24 horas, as amostras foram cortadas e alinhadas para exposição total da face a ser analisada. O desbaste de exposição da face foi feito com lixa de carbetto de silício, até que a superfície da amostra estivesse totalmente exposta e lisa. Posteriormente, a superfície revelada foi polida em várias etapas com pasta de diamante de 9, 6, 3, 1 e 0,5 micrômetros ( $\mu\text{m}$ ). Todo o polimento foi feito com pano de nylon autocolante em uma politriz semi-automática da marca STRUERS, modelo Laboforce 5, com uma força aplicada individualmente em cada amostra de 10N e com velocidade de 50 rpm por aproximadamente 20 minutos. A etapa final de acabamento consistiu no polimento com sílica coloidal em uma politriz de baixa rotação da marca Buehler, modelo MiniMet 1000 semi-automática. A força aplicada foi de 20 N a uma rotação de 40 rpm por 90 minutos.

#### *Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-EDS)*

A análise de microtexturas e imageamento dos poros em alta definição foi realizada com um Microscópio Eletrônico de Varredura FEI Quanta 450 FEG. Nesta análise foram utilizadas as seções polidas utilizadas no EBSD, além de fragmentos de rocha coletados em amostras dos domínios externos e internos à banda de deformação e alguns fragmentos no contato entre os domínios. Os fragmentos, foram revestidos como uma fina camada de ouro com o auxílio de uma metalizadora da marca Bal-Tec modelo SCD 050 Sputter Coater. Após o tratamento, as amostras foram analisadas e as imagens de alta resolução foram adquiridas em diferentes ampliações, com voltagem de aceleração de 10kV.

## **RESULTADOS**

Para uma melhor análise dos dados, as amostras foram organizadas em dois grupos. As classificadas como Grupo 1 - amostras de áreas externas a banda de deformação e que aparentemente conservam as características diagenéticas da rocha e o Grupo 2 – com amostras internas à banda de deformação.

#### *Análise por Microscopia de Luz Visível (MLV)*

As análises petrográficas microscópicas das amostras do grupo 1 revelam se tratar de arenitos com composição modal de 95% de quartzo e 5% de muscovita (figura 02). Os grãos de quartzo são arredondados a subarredondados, apresentam esfericidade média a alta e seleção variando de moderada a bem selecionada. Os contatos entre os grãos são em sua maioria subretilíneos e a granulometria varia de 1,16 mm a 0,24 mm. Os grãos de muscovita ocorrem de forma dispersa, são finos de 0,16 mm a 0,30 mm e seus contatos com os cristais de quartzo são subretilineos. Foi possível perceber a presença de uma leve quantidade de cimento silicoso e em maior quantidade, cimento de óxidos/hidróxidos de ferro (figura 02).

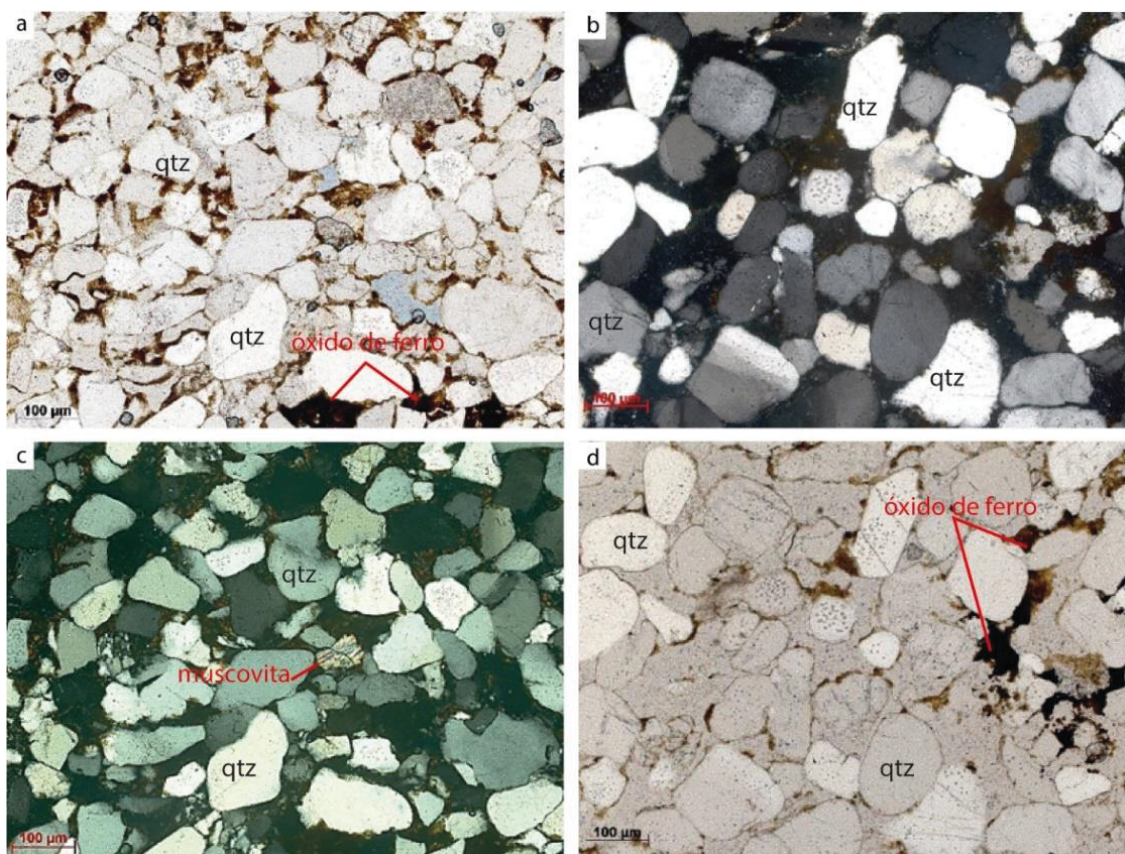


Figura 02 - a) Grãos de quartzo finos a médios, com a presença de óxido de ferro ocorrendo localmente; b) grãos de quartzo subarredondados; c) grãos anédricos de muscovita dispersos entre grãos de quartzo finos a médios; d) precipitação de óxido de ferro entre os grãos de quartzo predominantemente subarredondados.

A análise petrográfica do grupo 2 revelou características diferentes daquelas encontradas no grupo anterior. Os cristais apresentam uma maior variação de tamanho, diferindo pouco na composição modal que é de 97% de quartzo e 3% de muscovita (figura 03). Os grãos de quartzo apresentam granulometria variando de 1,2 mm a 0,06 mm, são mais angulosos a irregulares,

apresentam esfericidade média a baixa, podendo ser mal a bem selecionados, com muitos contatos irregulares. Os grãos de muscovita se apresentam de forma muito dispersa com granulometria de 0,1 mm a 0,06 mm. Ainda é possível perceber presença de cimento de sílica e óxido/hidróxido de ferro (figura 03), porém em menor quantidade que nas amostras do grupo 1.

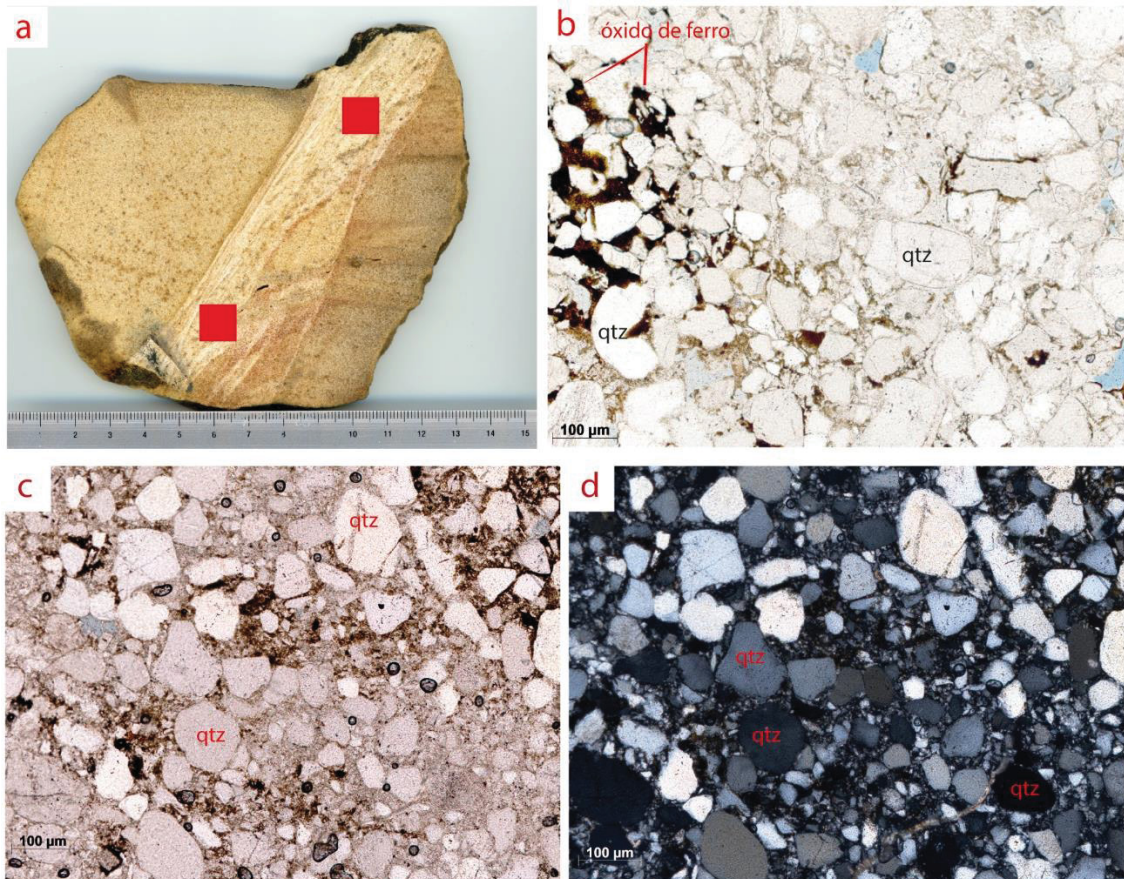


Figura 03 – a) Amostra de mão, de onde foram selecionadas as áreas para lâmina delgada; b) presença de precipitação de óxido de ferro; c) grãos de quartzo imersos em cimento apresentando forte contraste de tamanhos, visto em luz natural; d) grãos de quartzo imerso em cimento e contraste de tamanho dos grãos, visto com nicóis cruzados.

#### *Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-EDS)*

As análises realizadas com o sistema MEV-EDS permitiram a observação de microestruturas impossíveis de serem observadas ao MLV. Para visualização das microestruturas tridimensionais, foram observadas superfícies produzidas por fraturamento manual das amostras. Na seção polida a amostra apresenta composição química essencialmente de  $\text{SiO}_2$  (quartzo). O espaço poroso é preenchido por resina epóxi como mostrado na figura 04a. Os contornos dos grãos da amostra do grupo 1, externa à banda de deformação, apresentam grãos

arredondados os quais se tocam ou estão envolvidos pelo cimento da matriz. Esse domínio mostra a porosidade preservada. Na visualização do fragmento de rocha (figura 04b) foi possível perceber marcas de dissolução na superfície dos grãos (figura 04c) e uma leve presença de um cimento de sílica, com a porosidade ainda preservada. Os grãos apresentaram uma boa esfericidade e é possível perceber a presença de partículas aderentes (figura 04c).

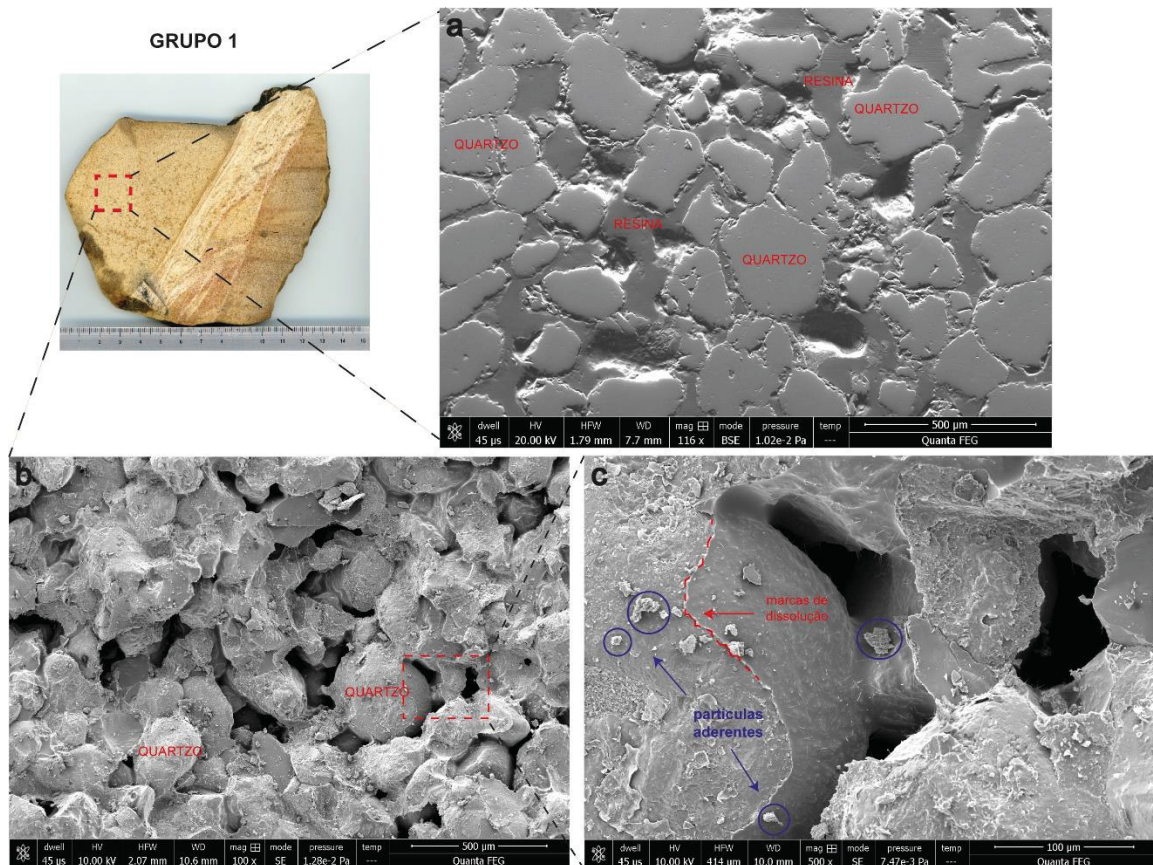


Figura 04 – a) análise de superfície de seção polida, mostrando os contatos bem marcados entre os grãos; b) análise de fragmento de rocha, mostrando grãos de contorno mais arredondados, com alto volume de poros; c) grãos de quartzo com marcas de dissolução e partículas aderentes.

As análises do grupo 2 mostram uma drástica redução da porosidade. Na Figura 5a é visto o contato entre dos domínios externos e internos a banda de deformação. Praticamente não se observa a presença da resina nas zonas deformadas (figura 5b). Por outro lado, na região não afetada pela banda de deformação observa-se poros preenchidos por resina (figura 5a). Os contatos entre os grãos de quartzo são imperceptíveis nas imagens de elétrons retroespalhados e o único contraste composicional observado é entre a resina e a sílica, indicando um selamento quase completo do espaço poroso.

As imagens de elétrons secundários (SEI) mostram um mosaico tridimensional de grãos sem espaço vazio entre eles, o que mostra também, que as microestruturas das zonas deformadas se caracterizam por grãos em contato mútuo em uma matriz fina composta por sílica. Nestas imagens, ao contrário das seções polidas, é possível identificar os contornos dos grãos como visto na figura 5c e 5d, além de microestruturas que indicam dissolução e marcas de arrancamento.

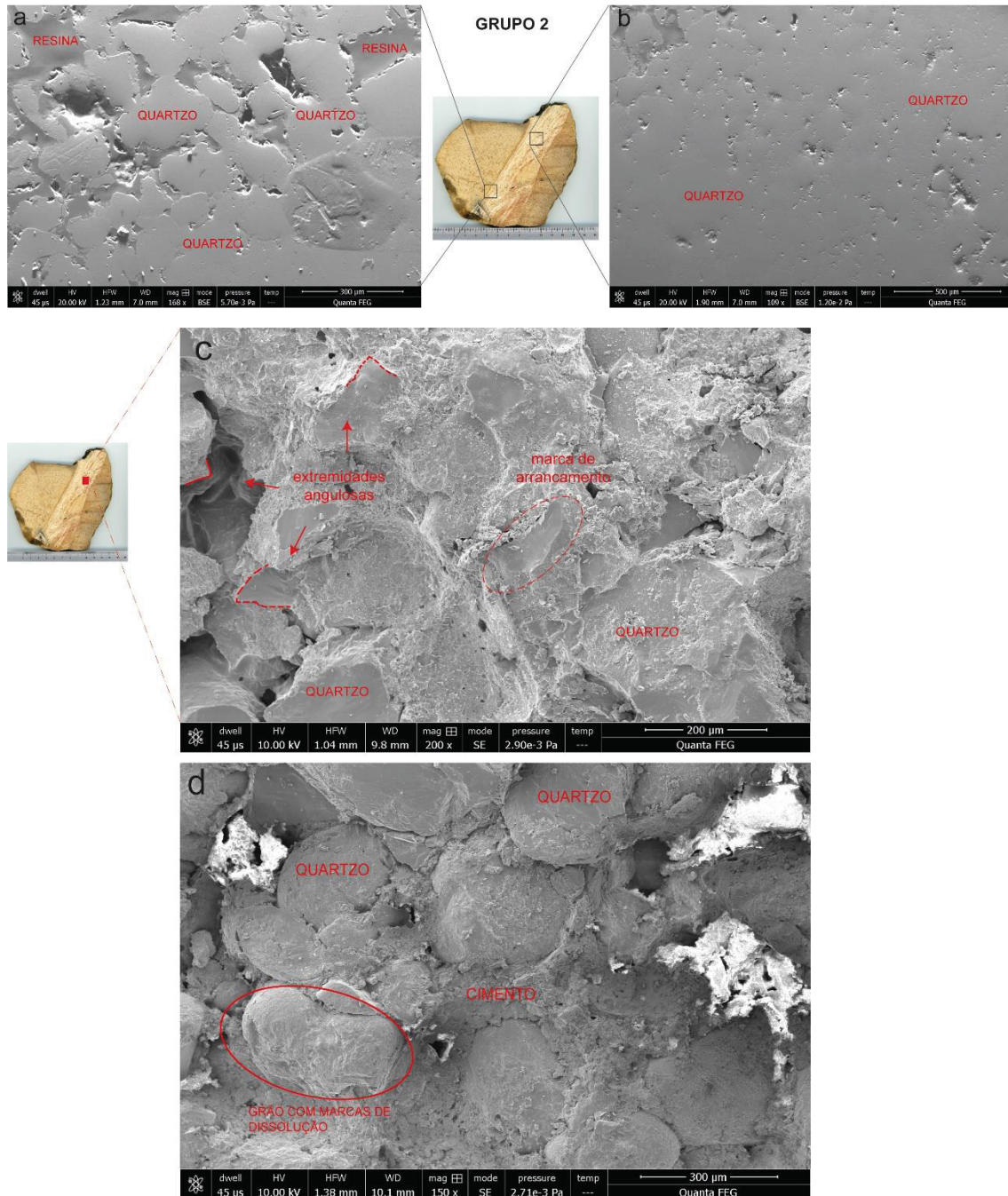


Figura 05 – a) análise de superfície de seção polida na zona de transição da banda de deformação e a diferença entre os limites dos grãos nas duas áreas. b) análise de superfície de

seção polida na banda de deformação e a falta de percepção dos limites dos grãos; c) presença de extremidades angulosas e marcas de arrancamento; d) grãos de quartzo com marcas de dissolução e imersos em um cimento silicoso.

### *Análises por EBSD*

Foram selecionadas quatro amostras para análises de EBSD com o intuito de comparar as microestruturas externas e internas das bandas de deformação. Os resultados estão apresentados na forma de mapas de fase e mapas de orientação. Para efeitos de comparação as amostras do grupo 1 correspondem apenas às zonas não deformadas. Já nas amostras do grupo 2 aparecem os dois domínios.

As amostras do grupo 1, como mostrado na figura 06a, apresentam uma microestrutura granular constituída essencialmente por grãos de quartzo. Os tamanhos dos grãos estão distribuídos em uma faixa que vai de 12,5  $\mu\text{m}$  até 465  $\mu\text{m}$  em diâmetro correspondente ao círculo equivalente ao perímetro dos grãos (figura 06b). A média geral é 55,9  $\mu\text{m}$  com um desvio padrão de 56  $\mu\text{m}$ . No domínio correspondente as amostras do domínio externo à Bd, a porosidade calculada pelas áreas não indexadas fica em torno de (38,17%) da área mapeada por EBSD. A área escura corresponde a locais onde não houve identificação mineral. Portanto, excluindo a possibilidade de que esses locais seja artefatos resultante do processo de confecção, assume-se que são vazios, e, logo, são considerados como poros.

Por outro lado, ao analisar os resultados do mapeamento de EBSD da área deformada (grupo 2) observa-se um fechamento do espaço poroso e uma forte diminuição no tamanho dos grãos. A distribuição dos tamanhos situa-se em um intervalo menor quando comparada aos domínios não deformados (figura 7a). O tamanho mínimo e máximo é de 16,1 e 231,8  $\mu\text{m}$ , respectivamente, com desvio padrão de apenas 33,5  $\mu\text{m}$  e uma média geral de 38,5  $\mu\text{m}$  (figura 7b).

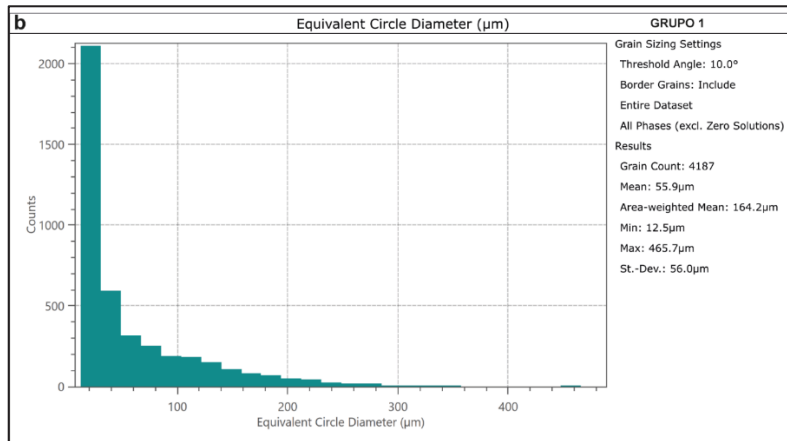
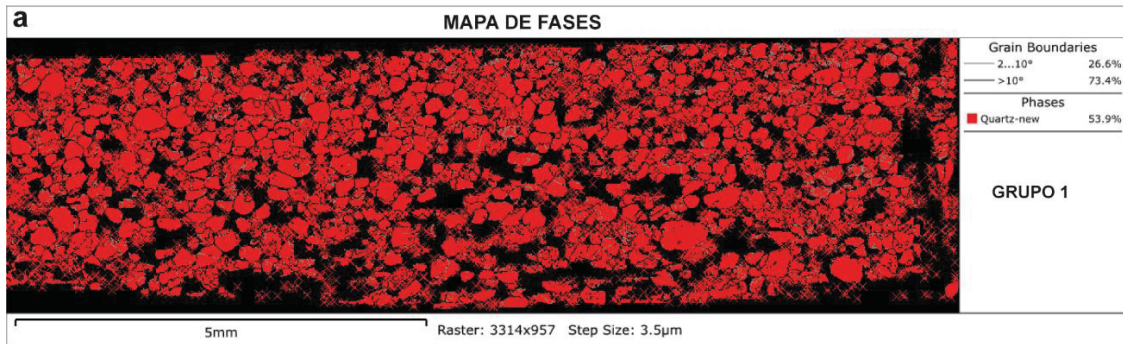


Figura 06 – a) Mapa de fases do grupo demonstrando a presença de apenas uma fase mineral (quartzo); b) Gráfico de distribuição do diâmetro médio, mínimo e máximo dos grãos das seções analisadas do Grupo 1.

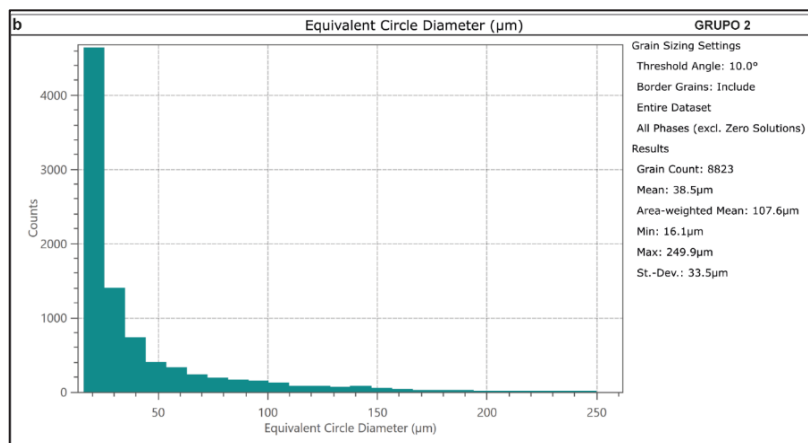
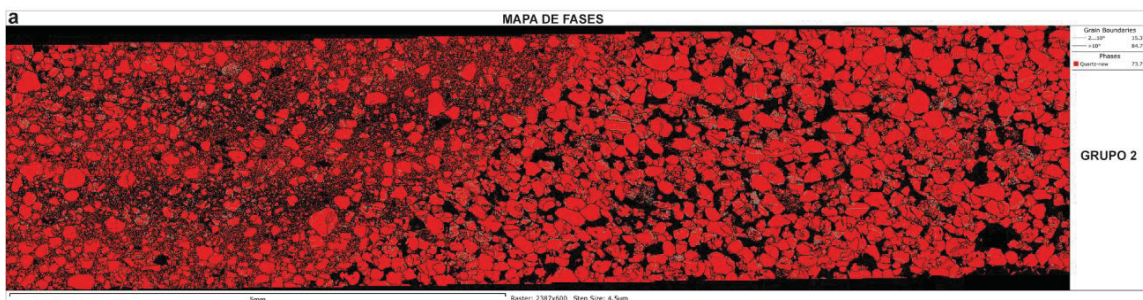


Figura 07 – a) mapa de fases de uma amostra do grupo 2, mostrando a interface entre a área da banda e a área fora da banda de deformação; b) gráfico de distribuição do diâmetro médio, mínimo e máximo dos grãos das seções analisadas do Grupo 2.

As figuras de polos obtidas para os agregados de quartzo não mostram uma textura cristalográfica marcante mesmo para zona deformada (figura 08). A diferença entre ambos os domínios é marcada por uma tendência de alinhamento dos eixos c dos cristais de quartzo ao longo da direção da banda de deformação. Os eixos <a> tem uma distribuição ao longo da direção aproximadamente perpendicular ao plano da banda de deformação. A contribuição da deformação plástica é desprezível uma vez que a distribuição dos ângulos de desorientação situa-se dentro da distribuição aleatória teórica para o agregado. O ponto que chama a atenção é um máximo em torno de  $60^\circ$  o que pode corresponder a geminação do tipo Dauphiné para os grãos de quartzo (figura 09). Esse tipo de feição pode ser uma herança dos grãos detríticos decorrentes de processos deformacionais pré-diagênese.

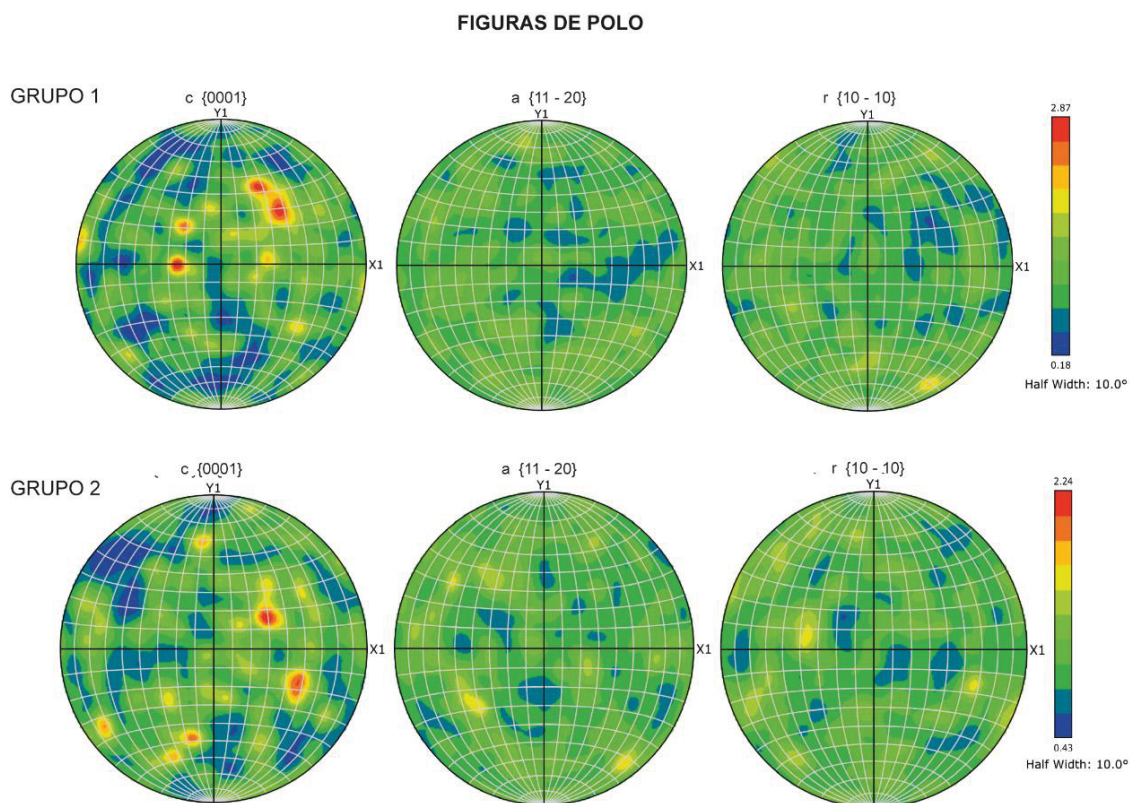


Figura 08 - Figuras de polos, em relação aos eixos c {0001}, eixo <a> {11-20} e eixo r {10-10}.

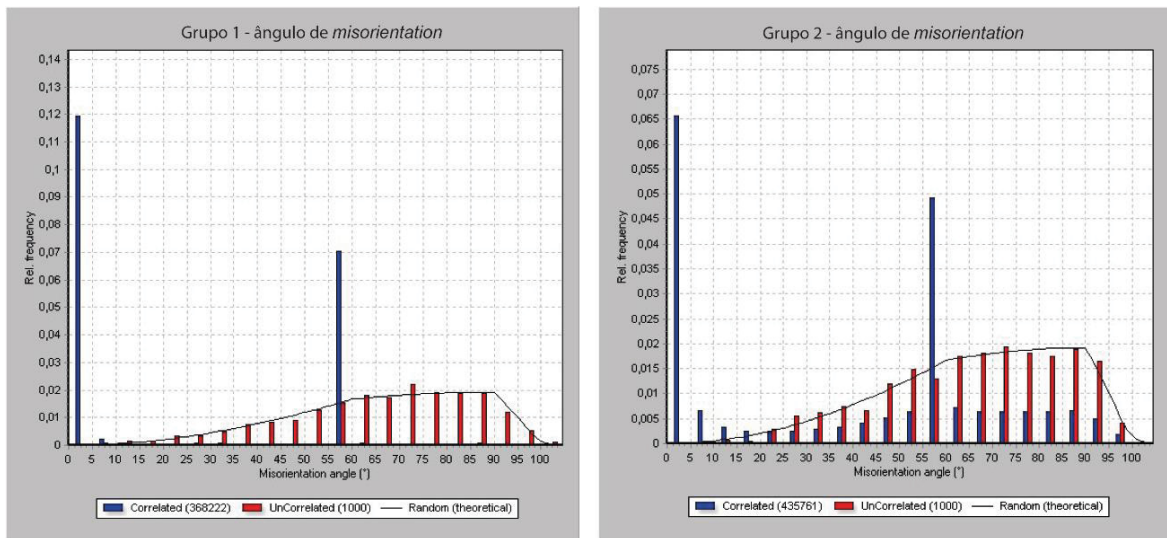


Figura 09 - Gráfico de distribuição de ângulos de *misorientation* para as seções analisadas.

### Análise de porosidade

As reconstruções tridimensionais realizadas com a microtomografia computadorizada são apresentadas nas figuras 10 e 11. As amostras do grupo 1 apresentaram uma porosidade total de cerca de 13%, porosidade esta que se apresenta aberta quase que em sua totalidade. Vale ressaltar que tanto as amostras do grupo 1 quanto do grupo 2 o foram analisadas com um valor espacial de  $\sim 9\mu\text{m}$ .

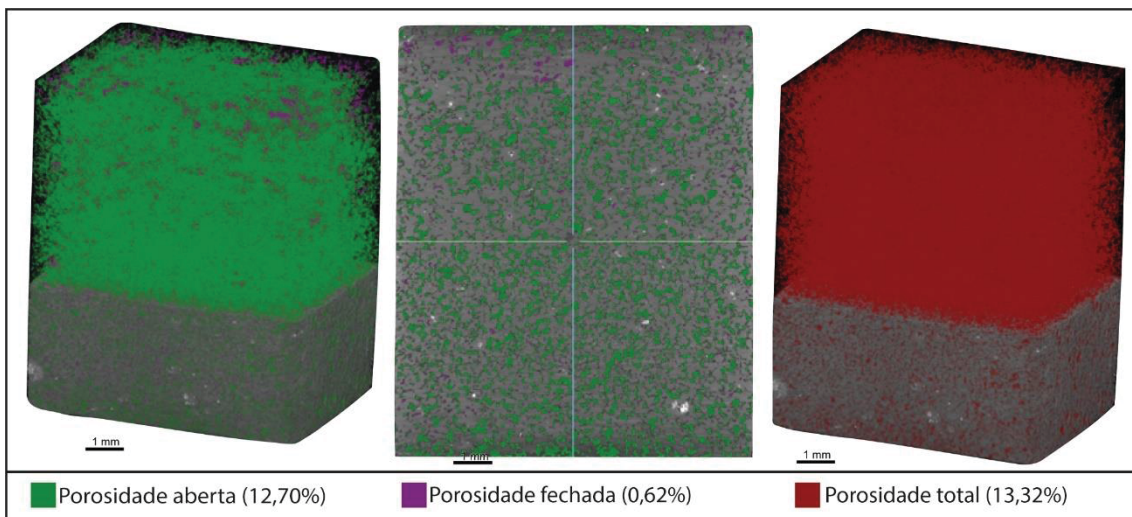


Figura 10 – Modelo 3D da amostra mais representativa do grupo 1, com ênfase na porosidade total, porosidade aberta e porosidade fechada.

As rochas analisadas no grupo 2 apresentaram uma porosidade total extremamente baixa quando comparada ao grupo 1, além de apresentar apenas 1,29% de porosidade total, a pouca porosidade presente se encontrada fechada, além disso não apresenta conexão.

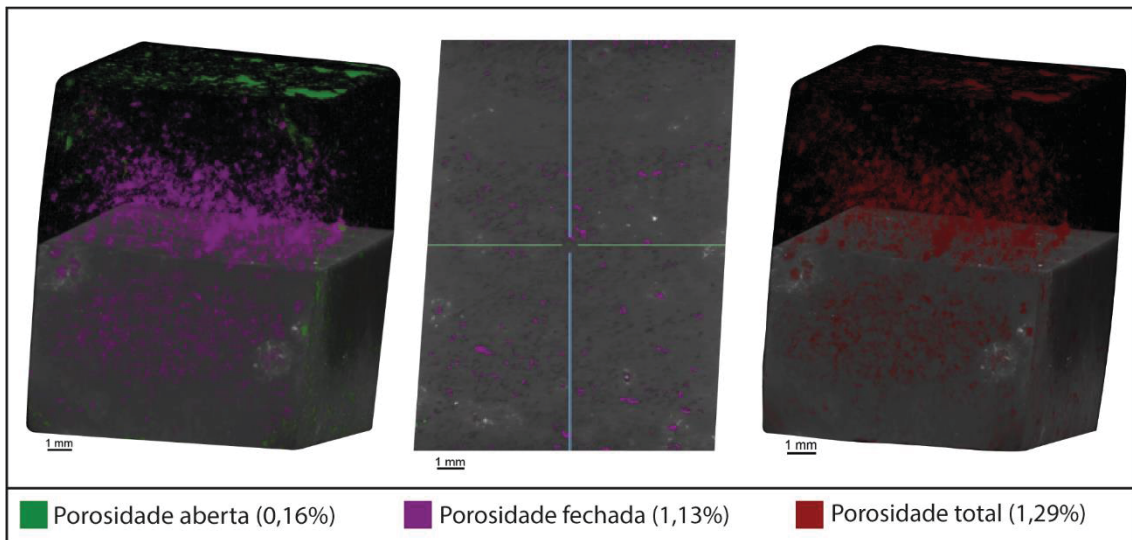


Figura 11 - Modelo 3D da amostra mais representativa do grupo 2, com ênfase na porosidade total, porosidade aberta e porosidade fechada.

## DISCUSSÃO

As bandas de deformação em rochas porosas são zonas de deformação que tendem a ter maior coesão e redução da porosidade e permeabilidade, em comparação com fraturas comuns (Fossen et al., 2007). As análises de  $\mu$ CT nas amostras de estudo, demonstraram uma intensa redução da porosidade total quando comparadas às amostras internas e externas à Bd. As análises das amostras externas à Bd revelaram uma porosidade total de cerca de 13%, deste percentual, 99% dos poros encontram-se abertos. As análises dentro da banda de deformação demonstraram uma porosidade total de um pouco mais de 1%, destes poros, cerca de 5% apenas encontram-se abertos, no entanto, não necessariamente estão conectados. A alta porcentagem de poros fechados no domínio interno à Bd, demonstra que esta apresenta um caráter selante, e pode ser considerada como uma barreira para o fluxo de possíveis fluidos. Por outro lado, a porcentagem de poros abertos nas amostras externas a Bd, demonstram que possivelmente estas rochas apresentam uma propensão à movimentação de fluidos.

As análises petrográficas e de MEV permitiram identificar que nas amostras do domínio externo a Bd há uma pequena quantidade de matriz, e os grãos mais bem selecionados quando comparado ao domínio interno à Bd. Além da presença marcante de cimento silicoso, no domínio interno à Bd é possível

encontrar pequenas e isoladas concentrações de cimento composto por sílica e hidróxido/óxido de ferro.

O mapa de fases gerado com dados de EBSD demonstram claramente que dentro do domínio interno à Bd os grãos são mais angulosos e com um espectro de distribuição granulométrica maior, diferente do domínio externo à BD, que é composto, em sua maioria, por grãos subarredondados. O tamanho dos grãos também apresenta uma variação entre os domínios, sendo que no domínio interno à Bd há uma maior concentração de grãos cominuídos. Segundo Palombo (2017), a alta variação da dimensão dos grãos também causam diminuição da porosidade, uma vez que os grãos mais finos acabam ocupando e preenchendo os poros entre os grãos mais grossos. Logo, é possível que parte da diminuição da porosidade no domínio interno da Bd esteja relacionado com essa cominuição de grãos, que por sua vez ocuparam os poros que anteriormente estavam vazios.

As análises de MEV-EDS demonstraram que as superfícies dos grãos de quartzo apresentam marcas de dissolução, tanto nas amostras internas à Bd quanto às externas. No entanto, as amostras internas a Bd apresentam grãos com grau de dissolução mais elevado que o outro grupo. Além disso, a presença de partículas aderentes também foi observada em ambos os grupos. Segundo Costa et al. (2014), as marcas de dissolução dos grãos, podem estar relacionadas com a tensão gerada durante a deformação. A presença de partículas aderentes, por sua vez, pode ser interpretada como resultado da fragmentação de minerais, produzidos por impacto mecânico (Costa et al., 2014), ou até mesmo pela própria dissolução.

As análises isoladas de MEV não permitiram identificar o real grau de esmagamento e diferença de tamanho entre os grãos. No entanto, as análises de contorno de grãos realizada com o auxílio de EBSD demonstram com detalhes a diferença granulométrica das rochas localizadas no domínio interno à banda de deformação. Fossen et al. (2007) definiu como bandas de deformação cataclásticas aquelas que apresentam uma porosidade reduzida pelo esmagamento de grãos e consequente alteração na distribuição de tamanho de grão. Esta característica foi observada nas amostras de estudo, principalmente

com as imagens dos mapas de fases. Isto pode indicar a classificação desta banda como banda de deformação cataclástica.

As figuras de polo obtidas através da análise de EBSD demonstraram um comportamento similar para as amostras internas e externas a Bd. Dentro da banda de deformação há um leve indício de um *trend* de orientação. No entanto, não há evidências claras de crescimento orientado em nenhum dos grupos.

De acordo com os dados obtidos é possível perceber que as técnicas empregadas de forma individual, exibem dados importantes, no entanto não conclusivos. Porém, empregados de forma conjunta, exibem resultados que se complementam.

As técnicas de petrografia e  $\mu$ CT, que são as mais comumente empregadas em análises de porosidade e permeabilidade, exibem resultados importantes acerca de quantificação e qualificação dos poros, mas não são suficientes para análises microestruturais que podem gerar dados a respeito das condições de formação, dinâmica deposicional e microestruturas que podem ou não interferir na qualidade desses poros e conseqüentemente do possível reservatório.

As análises de MEV-EDS e MEV-EBSO fornecem dados a respeito da natureza microestrutural e composicional das rochas, dos poros e dos intertícios. Estes dados somados aos anteriores, permitem interpretações muito mais completas e detalhadas.

Todas as análises empregadas indicam que a banda de deformação estudada apresenta características de esmagamento e fragmentação dos grãos. A diminuição granulométrica dos grãos no domínio interno a Bd pode ter causado a obstrução dos poros, e conseqüentemente diminuiu a porosidade. No entanto, aliada à fragmentação, a formação de cimento, que pode estar relacionada a dissolução dos grãos, também foi um fator determinante para a obstrução destes poros. Ambos os fatores comprometem a porosidade, bem como a qualidade dessa rocha como reservatório.

## 6. REFERENCIAS

ALKMIM, F. F. de; MARTINS NETO, M. A. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, v. 33, n. 1, p. 127-139, maio 2012.

ANOVITZ, L. M.; COLE D. R. 2015. Characterization and Analysis of Porosity and Pore Structures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 80 (1): 61–164.

ANOVITZ, L.M.; FREIBURG, J.T.; WASBROUGH, M.; MILDNER, D.F.R.; LITTRELL, K.C.; PIPICH, V.; ILAVSKY, J. 2018. The effects of burial diagenesis on multiscale porosity in the St. Peter Sandstone: an imaging, small-angle, and ultra-small-angle neutron scattering analysis. *Mar. Petrol. Geol.* 92, 352–371.

AYDIN, A. 1978. Small faults formed as deformation bands in sandstones. *Pure and Applied Geophysics*, 116: 913 – 930.

AYDIN, A.; JOHNSON A.M. 1978. Development of faults as zones of deformation bands and as slip surfaces in sandstones. *Pure and Applied Geophysics*, 116: 931–942.

AYDIN, A.; JOHNSON A.M. 1983. Analysis of faulting in porous sandstones. *Journal of Structural Geology*, 5: 19 – 31.

BJØRLYKKE, K. 2006. Effects of compaction processes on stresses, faults, and fluid flow in sedimentary basins: examples from the Norwegian margin. *Spec. Publ. Geol. Soc. Lond.* 253, 359 – 379

BROWN N.; DUCKETT R.A.; WARD I.M. 1968. Deformation bands in polyethylene terephthalate. *British Journal of Applied Physics*, 1: 1369 – 1379.

CHUHAN, F.A.; KJELDSTAD, A.; BJØRLYKKE, K.; HØEG, K. 2002. Porosity loss in sand by grain crushing—experimental evidence and relevance to reservoir quality. *Mar. Petrol. Geol.* 19, 39 – 53.

CHUHAN, F.A.; KJELDSTAD, A.; BJØRLYKKE, K.; HØEG, K. 2003. Experimental compression of loose sands: relevance to porosity reduction during burial in sedimentary basins. *Can. Geotech. J.* 40, 995–1011.

COSTA, I.P.; BUENO, G.V.; MILHOMEM, P.S.; SILVA, H.S.L. E; KOSIN, M.D. 2007. Sub-bacia de Tucano Sul e Central. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15 (2): 433-443.

COSTA, P.M.; ANDRADE, C.; FREITAS, M.C. Análise microtextural: princípios, procedimentos e caracterização micromorfológica de grãos de quartzo. In Dinis, P.A.; Gomes, A.; Monteiro Rodrigues, S., eds. - Proveniência de materiais geológicos: abordagens sobre o Quaternário de Portugal. Coimbra: Associação

Portuguesa para o Estudo do Quaternário, 2014. ISBN 978-989-97140-2-1. p 19-36.

COSTA, P.R.C.; JARDIM DE SÁ, E.F.; ALVES DA SILVA, F.C. 2004. Bandas de deformação na região de Jeremoabo (BA), Bacia do Tucano: implicações na compartimentação de reservatórios petrolíferos. 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás - IBP. p. 1-6.

DAPPLES, E.C. 1979. Diagenesis of sandstones. In: Larsen, G., Chilingar, G.V. (Eds.), Diagenesis in Sediments and Sedimentary Rocks. Elsevier, Amsterdam, pp. 31–97.

FOSSÉN, H.; SCHULTZ, R.A.; SHIPTON, Z.K.; MAIR, K. 2007. Deformation bands in sandstone review. *Journal of the Geological Society*, 164: 755 - 769.

GIRNUN, J.; EMMANUEL, S.; LEVENSON, Y.; ANOVITZ, L. 2020. Quantification of mechanical compaction and cementation during contact metamorphism of sandstone. *Journal of Structural Geology*. 136.

GUNTORO, P.I.; GHORBANI, Y.; KOCH, P.-H.; ROSENKRANZ, J. X-ray Microcomputed Tomography ( $\mu$ CT) for Mineral Characterization: A Review of Data Analysis Methods. *Minerals* 2019, 9, 183.

HOLCOMB, D.J.; OLSSON, W.A. 2003. Compaction localization and fluid flow. *Journal of Geophysical Research*, 108 (B6), 2290.

KNIPE, R.J. 1992. Faulting processes and fault seal. In: Larsen, R.M., Brekke, B.T., Larsen, B.T. & Talleraas, E. (eds) Structural and Tectonic Modelling and its Application to Petroleum Geology. Norwegian Petroleum Society Special Publication, 1, 325–342.

KNIPE, R.J.; FISHER, Q.J.; CLENNELL, M.R. 1997. Fault seal analysis: successful methodologies, application and future directions. In: Møller-Pedersen, P. & Koestler, A.G. (eds) Hydrocarbon Seals: Importance for Exploration and Production. Norwegian Petroleum Society Special Publication, 7, 15 – 40.

MAGNAVITA, L.P. 1992. Geometry and kinematics of the Recôncavo-Tucano-Jatobá rift, NE Brasil. Oxford. 493 p. Tese de Doutorado em Geociências, Universidade de Oxford, Grã-Bretanha.

MAKOWITZ, A.; MILLIKEN, K.L. 2003. Quantification of brittle deformation in burial compaction, frio and mount simon formation sandstones. *J. Sediment. Res.* 73, 1007–1021.

MC DONALD, D.A.; SCHMIDT, V. 1992. Porosity Evolution of Sandstone reservoirs. IHRDC, Boston, MA, p. 147.

MORALES, L. F. G.; HINRICHS, R.; FERNANDES, L. A. D. 2007. A técnica de Difração de Elétrons Retro Espalhados (EBSD) em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e sua aplicação no estudo de rochas deformadas. *Revista Pesquisas em Geociências*. 34 (1) :19 - 34.

NGWENYA, B.T.; ELPHICK, S.C.; MAIN, I.G.; SHIMMIELD, G.B. 2000. Experimental constraints on the diagenetic self-sealing capacity of faults in high porosity rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 183, 187–199.

OGILVIE, S.R.; GLOVER, P.W.J. 2001. The petrophysical properties of deformation bands in relation to their microstructure. *Earth and Planetary Science Letters*, 193, 129–142.

PALOMBO, L. 2017. A microtomografia de raios X e a porosimetria por intrusão de mercúrio na determinação de porosidade e densidade de rochas reservatório. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 88p.

PASSCHIER, C.W.; TROUW, R.A.J. 1996. *Microtectonics*. Springer, Berlin, Alemanha.

PINTO, A. L.; LOPES, A. M. In *Textura e relações de orientação: deformação plástica, recristalização e crescimento de grão*. São Paulo: André P. Tschiptschin Ed., IPEN, 2a ed. p. 441-459, 2003

REIS NETO, J.M.R.; FIORI, A.P.; LOPES, A.P.; MARCHESE, C.; COELHO, C.V.P.; VASCONCELLO, E.M.G.; SILVA, G.F.; SECCHI, R. 2011. A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas. *Revista Brasileira de Geociências*, 41: 498 - 508.

RODRIGUES, R. S. Análise macro, meso e microscópica de bandas de deformação em arenitos porosos: aplicação na Bacia do Tucano-BA, NE do Brasil. 2018. 134f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

ROSA, A. J., CARVALHO, R. S., XAVIER, J. A. D., Engenharia de reservatório de petróleo, editora Interciência, 2006.

SANTOS, C.C.; REIS, C. 2011. Mapa Geológico da Folha Caimbé (SC-24-Z-A-I). Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), Escala 1: 100000.

SERRA, O. 1986. *Fundamentals of Well-Log Interpretation. The Interpretation of Logging*. Data: Developments in Petroleum Science, p. 663.

TAYLOR, J.M. 1950. Pore-Space Reduction in Sandstones, vol. 34. AAPG Bulletin, pp. 701–716.

VIANA, C.F.; GAMA JUNIOR, E.G. da; SIMÕES I. de A.; MOURA, J.A.; FONSECA, J. dos R.; ALVES, R.J. 1971. Revisão estratigráfica da Bacia do Recôncavo. Boletim Técnico da Petrobrás, 14 (3/4): 157-192.