

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**FATORES CONTROLADORES DOS ASPECTOS TEXTURAIS EM ROCHAS
SILICICLÁSTICAS DEFORMADAS POR BANDAS CATACLÁSTICAS**

ANDREZZA SOUSA SILVA

CAMPINA GRANDE-PB

2018

ANDREZZA SOUSA SILVA

**FATORES CONTROLADORES DOS ASPECTOS TEXTURAIS EM ROCHAS
SILICICLÁSTICAS DEFORMADAS POR BANDAS CATACLÁSTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral da Universidade Federal de Campina Grande para a obtenção do título de mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

Orientador: Francisco César Costa Nogueira

CAMPINA GRANDE

2018

S586f

Silva, Andrezza Sousa.

Fatores controladores dos aspectos texturais em rochas siliciclásticas deformadas por bandas cataclásticas / Andrezza Sousa Silva. – Campina Grande, 2018.

65 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018.

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

Referências.

1. Porosidade das Rochas. 2. Análise de Imagens. 3. Parâmetros de Formas. I. Nogueira, Francisco Cézar Costa. II. Título.

CDU 552.12(043)

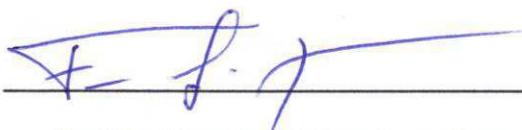
ANDREZZA SOUSA SILVA

**FATORES CONTROLADORES DOS ASPECTOS TEXTURAIS EM ROCHAS
SILICICLÁSTICAS DEFORMADAS POR BANDAS CATACLÁSTICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral da Universidade Federal de Campina Grande para a obtenção do título de mestre em exploração petrolífera.

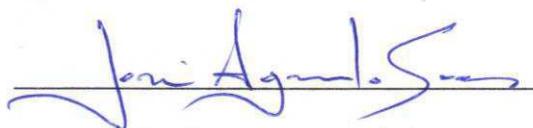
Data de aprovação: 19 / 03 / 2018

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Francisco César Costa Nogueira

Orientador



Prof. Dr. José Agnelo Soares

Avaliador



Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto

Avaliador externo

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela minha força, pela minha saúde, por todas as oportunidades, por todos os obstáculos superados e pela realização deste trabalho. Também O agradeço por ser um refúgio nos momentos de aflição.

Agradeço em especial aos meus pais, que foram a minha base, que me criaram para ser forte e superar todos os obstáculos e me apoiaram em todas as escolhas e momentos difíceis. À minha mãe Marisete e ao meu pai Aguinaldo estão todos os méritos desta dissertação.

Aos meus irmãos Angelo e Amanda por toda nossa história e pelo apoio em todos os momentos. Em especial a minha irmã Amanda que foi minha companheira diária e ouvinte no período de mestrado.

A toda minha família, meus tios, primos e avós. Sempre acreditaram em mim e estiveram ao meu lado sempre que precisei. Agradeço em especial aos meus segundos pais, meus avós Cleonice e Pedro, por tanta coisa que não há palavras para descrever.

Ao meu namorado e companheiro diário Felipe, muito obrigada por me entender e saber acalmar meus momentos de turbulência, obrigada por todo carinho e apoio nos momentos de dúvidas na preparação desta dissertação, e por sempre ter o conselho certo na hora certa.

Aos meus amigos do GEEP por toda a troca de experiência, dúvidas e soluções. Agradeço em especial a Gabriel pelo compartilhamento de tarefas na produção dos resultados, agradeço a Igor pelas discussões e pelos momentos de descontração, como também a Daniel e Franklyn por nossas fugas, embates, piadas e tantos outros momentos.

Ao meu orientador Francisco César pelo incentivo a pesquisa desde minha graduação, por todo apoio e contribuições a esta dissertação.

À Petrobras pela concessão de bolsa e pelo suporte à pesquisa através do projeto Petrobras/UFCG TC 0050.0096065.15.9.

Enfim, a todos que contribuíram direta e indiretamente na construção desta dissertação.

“A vida é um grande contrato de risco. E uma das cláusulas mais importantes desse contrato é que devemos viver cada dia como um novo capítulo e cada capítulo como uma aventura.” – O homem mais inteligente da história, Augusto Cury.

RESUMO

A Bacia Rio do Peixe (BRP) apresenta diversas estruturas rúpteis, dentre elas as bandas de deformação, que podem controlar as propriedades petrofísicas e aspectos texturais das rochas. Portanto, o objetivo deste trabalho é identificar os efeitos causados pelos diferentes tipos de bandas de deformação cataclásticas, em função da cinemática, sobre os aspectos texturais, distribuição de tamanho de grãos e poros, bem como porosidade em arenitos conglomeráticos. As propriedades dos grãos e dos poros foram extraídas através da análise de imagens em seções delgadas no *Avizo Fire 8.1*. No total foram analisadas 23 amostras, 19 com bandas de deformação (CB) com orientação definida (NW, NE, NS e EW), 2 amostras deformadas, porém sem bandas (SB) e 2 amostras da rocha hospedeira (ND). As rochas deformadas (CB e SB), apresentam redução no tamanho de grãos e pequeno acréscimo nos valores dos aspectos texturais em comparação a rocha não deformada (ND). Em relação à porosidade foi encontrada redução de 66% nas amostras CB e acréscimo de 13% nas SB. Ambos agrupamentos possuem maior conexão de grãos, permitindo o surgimento da macroporosidade, que não havia sido detectada nas amostras ND. Dentre as amostras com banda de deformação e cinemática definida, as rochas associadas ao sistema transcorrente dextral, de direção NW, possuem maior redução de diâmetro de grão, e menor redução de porosidade, cerca de 29%. As amostras com bandas de deformação NE e NS, formadas por cinemática transtensiva, são as amostras nas quais houve a menor quebra dos grãos, entretanto caracterizam-se pela presença de porosidade por fraturamento de grãos, gerando altos picos de macroporosidade. As amostras oriundas do sistema distensivo de direção EW possuem segunda maior redução de grãos, maior redução de porosidade e ausência de macroporosidade. Os aspectos texturais (circularidade, convexidade e razão de aspecto) das amostras com banda (NW, NE, NS e EW) é dependente da intensidade de cisalhamento provocado por diferentes sistemas deformacionais, quanto mais intenso mais cominuído será o grão, e conseqüentemente mais convexo, circular e menos alongado. Logo, é possível observar que a cinemática e a presença de bandas de deformação exercem controle sobre os aspectos texturais e petrofísicos dos arenitos conglomeráticos da Formação Antenor Navarro. E esse controle é definido pela compactação da rocha, rearranjo dos grãos, intensidade da catáclase, presença de fraturamento de grãos e cinemática atuante.

Palavras chave: Porosidade. Análise de imagens. Parâmetros de forma.

ABSTRACT

The Rio do Peixe Basin (RPB) presents several rump structures, among them the deformation bands, which can control the petrophysical properties and textured aspects of the rocks. Therefore, the objective of this work is to identify the effects caused by the different types of cataclastic deformation bands, as a function of kinematics, on the textural aspects, grain and pore size distribution, as well as porosity in conglomeratic sandstones. The grain and pore properties were extracted by thin section image analysis in Avizo Fire 8.1. In total, 23 specimens were analyzed, 19 with deformation bands (CB) with defined orientation (NW, NE, NS and EW), 2 deformed samples, but without bands (SB) and 2 samples of host rock (ND). The deformed rocks (CB and SB), present a reduction in grain size and small increase in the values of the textured aspects in comparison to the non-deformed rock (ND). In relation to the porosity, a reduction of 66% was found in the CB samples and a 13% increase in the SB. Both clusters have a larger grain connection, allowing the appearance of macroporosity, which had not been detected in the ND samples. Among the samples with deformation band and defined kinematics, the rocks associated to the dextral transcurrent system, NW direction, have a larger reduction of grain diameter, and a smaller reduction of porosity, about 29%. The samples with NE and NS deformation bands, formed by transtensive kinematics, are the samples with the lowest grain breakage. However, they are characterized by the presence of porosity by grain fracturing, generating high peaks of macroporosity. The samples from the EW steering distance system have the second largest grain reduction, greater reduction of porosity and absence of macroporosity. The textural aspects (roundness, convexity and aspect ratio) of the banded samples (NW, NE, NS and EW) are dependent on the shear strength caused by different deformation systems, the more intense the grain is, the more convex, circular and less elongated. Therefore, it is possible to observe that kinematics and the presence of deformation bands exert control over the texture and petrophysical aspects of the conglomeratic sandstones of the Antenor Navarro Formation. And this control is defined by the rock compaction, rearrangement of the grains, the intensity of the catachase, presence of grain fracture and active kinematics.

Keywords: Porosity. Image analysis. Form Parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa geológico simplificado da Província de Borborema mostrando a distribuição de bacias sedimentares e características geológicas importantes. (1) Bacias rift cretáceas (IC, Icó; IG, Iguatu, RPB, Rio do Peixe); (2) Sedimentos paleozóicos da Bacia do Parnaíba; (3) Cobertura do sedimento costeiro; (4) Zonas de cisalhamento (J, Jaguaribe, M, Malta, PA, Portalegre, R, Rio Piranhas, RF, Rodolfo Fernandes); (5) Zonas axiais; (6) Localização de perfil gravimétrico.	3
Figura 2: Mapa geológico da BRP, sobreposto ao modelo digital de terreno gerado a partir de dados do <i>shuttle radar topography mission</i> (SRTM).....	4
Figura 3: Ilustração dos 4 tipos de bandas de deformação segundo mecanismo de deformação.	8
Figura 4: Exemplos fictícios de padrões de selecionamento de grãos. Quanto maior a variação de tamanho de grãos menor o grau de selecionamento.....	11
Figura 5: Graus de esfericidade e arredondamento, a imagem ressalta a independência destas propriedades.....	12
Figura 6: Representação do perímetro convexo da forma A . A linha pontilhada representa o perímetro convexo de A	14
Figura 7: Esboço para ilustração da porosidade primária. (A) Porosidade intergranular (ou interpartícula), comumente encontrada em arenitos. (B) Porosidade mista intergranular (ou interpartícula) e intragranular (ou intrapartícula).	16
Figura 8: Localização das 19 amostras com bandas de deformação extraídas no afloramento 1.....	19
Figura 9: Mapa de localização dos afloramentos estudados.....	20
Figura 10: Preparação de lâminas delgadas e extração de imagens. (A) Amostras coletadas, (B) lâmina delgada, (C) microscópio com câmera acoplada, e (D) microfotografia da lâmina.	20
Figura 11: Esquema contendo as etapas realizadas para obtenção das propriedades e parâmetros desejados na análise de imagens.	21
Figura 12: Caixa de diálogo do <i>Avizo Fire</i> 8.1, após o carregamento da imagem.	22
Figura 13: Seleção de ROI no <i>Avizo Fire</i> . A) Imagem com ROI selecionado; B) Apenas a região de interesse.....	22

Figura 14: Segmentação de imagens. A) Caixa de diálogo da ferramenta <i>Interactive Thresholding</i> , possibilitando a mudança de intensidade os canais RGB; B) ROI da imagem; C) Seleção de intensidade que melhor se adequa para seleção de grãos e D) Imagem binarizada, onde os grãos são representados pela cor azul, enquanto o preto representa os elementos restantes da imagem.	24
Figura 15: Etapas da determinação da porosidade. A) Imagem fonte onde os poros são representados pela cor azul; B) Indicação da região segmentada pela cor vermelha; C) Resultado da segmentação, imagem binarizada onde a cor azul representa os poros da amostra e D) Tabela resultante da ferramenta <i>Material Statistics</i> , a qual fornece a contagem de pixels da imagem binarizada ($C_p = 1029444$ e $C_r = 7502604$). 25	25
Figura 16: Ilustração das etapas envolvidas na obtenção das dimensões de grãos e poros.	26
Figura 17: Uso e produto da ferramenta <i>Label Analysis</i> . A) Seleção do grupo de medidas; B) Tabela contendo as informações de área e diâmetro equivalente das partículas.....	26
Figura 18: Imagem antes e após a remoção de grãos menores. O antes é mostrado na imagem à esquerda e o depois na imagem à direita, com destaque indicado pela seta.	27
Figura 19: Resultado da análise de imagem para Figura 5. Onde C_v refere-se à convexidade e C_c à circularidade.	28
Figura 20: Gráfico de diâmetro equivalente de grãos versus área ocupada.....	30
Figura 21: Relação entre o tamanho médio de grãos dos agrupamentos ND, SB e CB.....	31
Figura 22: Gráfico de diâmetro equivalente de poros versus área ocupada.	32
Figura 23: Seção delgada da rocha não deformada, onde os poros são representados pela cor azul. A diferença nas classes (Tabela 2) de grãos presentes nesta rocha reduzem o espaço poroso e conseqüentemente o tamanho de poros. A forma irregular dos grãos facilita um empacotamento mais apertado, pois os grãos pequenos se alojam entre grandes grãos.	33
Figura 24: Relação entre porosidade e diâmetro médio de poros. Ambas propriedades apresentam uma aproximação exponencial com coeficiente de determinação $R^2 = 0.65$	34

Figura 25: Amostra com banda de deformação indicando regiões com presença ou não de poros conectados. A seta preta indica região com boa conexão de poros, já a seta vermelha indica uma situação inversa à anterior, um poro isolado.....	35
Figura 26: Microfotografia de amostra deformada, sem banda de deformação, SB. As setas vermelhas indicam algumas das regiões onde o fraturamento dos grãos gerou porosidade intragranular.	36
Figura 27: Gráfico correlacionando o diâmetro médio de poros e grãos das amostras estudadas.	36
Figura 28: Relação entre esfericidade e circularidade e entre arredondamento e convexidade.	37
Figura 29: Gráfico de circularidade média versus diâmetro médio de grãos. A circularidade varia de 0 a 1, quanto mais próximo à forma de um círculo maior será o valor de circularidade, já os menores valores são referentes a grãos alongados.	38
Figura 30: Quebra dos grãos em amostra com banda de deformação, as regiões contornadas por formas pontilhadas correspondem a um grupo de grãos que antes da deformação possivelmente constituíam apenas um grão. A) Microfotografia de seção delgada onde destacam-se grãos quebrados, a numeração indica a maioria dos grãos gerados na quebra; B) Imagem segmentada com grãos individualizados, em destaque para as linhas pontilhadas vermelha e amarelo, as mesmas representam grãos quebrados e os números indicam a individualização dos novos grãos.	39
Figura 31: Relação entre o tamanho médio dos grãos com a convexidade.	40
Figura 32: Gráfico de circularidade média versus convexidade média.	41
Figura 33: Gráfico de diâmetro médio de grãos versus razão de aspecto.	42
Figura 34: Gráfico de frequência de diâmetro de grãos para os agrupamentos ND, CB e SB. Os intervalos de tamanho de grãos estudados estão entre 0 e 50 μm , 50 e 1000 μm e 1000 e 5000 μm	43
Figura 35: Gráfico relacionando o diâmetro equivalente dos grãos com a porcentagem de área ocupada por grãos de tamanhos distintos. A letra n corresponde ao número de amostras analisadas em cada agrupamento.	45
Figura 36: Gráfico de tamanho médio de grãos dos agrupamentos ND, SB, NS, NE, NW e EW.	46
Figura 37: Gráfico de distribuição de tamanho de poros por porcentagem de área. A letra n corresponde ao número de amostras analisadas em cada agrupamento.	48

Figura 38: Microfotografia de seção delgada em amostra EW. Imagem identificando a região da banda de deformação, através da linha pontilhada, e os grãos adjacentes as bandas que fazem parte da zona intermediária (entre bandas).	49
Figura 39: Gráfico de porosidade versus diâmetro médio de poros. O contorno preto realça o comportamento das amostras ND e SB, enquanto o vermelho destaca as amostras com banda de deformação.	51
Figura 40: Microfotografias de seção delgada de amostras NE. (A) Representa amostra do agrupamento NE com compactação, apesar de compactada a amostra ainda possui diversos poros de diversos tamanhos. (B) Exemplo de rocha NE menos compactada, neste caso podemos visualizar melhor conexão de poros, como também a presença de grandes poros.	52
Figura 41: Microfotografias de seção delgada de amostras EW e NS. (A) Imagem de rocha afetada por cinemática distensiva de direção EW. (B) Arenito conglomerático com banda de deformação originada por cinemática transtensiva de direção NS.	53
Figura 42: Gráfico de diâmetro médio de grãos versus diâmetro médio de poros. A reta diagonal indica a linha de tendência inversamente proporcional entre as duas propriedades.....	54
Figura 43: Gráfico de circularidade média versus diâmetro médio dos grãos. O contorno vermelho destaca o comportamento da circularidade nas amostras com banda de deformação.....	55
Figura 44: Relação entre diâmetro médio de grãos e convexidade média.....	56
Figura 45: Gráfico de circularidade média versus convexidade média. Neste gráfico a linha de tendência e o coeficiente de correlação foram gerados sem os dados da amostra EW.....	57
Figura 46: Gráfico de diâmetro médio de grãos versus razão de aspecto média. Neste gráfico a linha de tendência e o coeficiente de correlação foram gerados sem levar em consideração os dados da amostra SB.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação granulométrica de Wentworth (1922) para sedimentos clásticos.	10
Tabela 2: Descrição das amostras e condições de regime de deformação previamente definidos, onde n representa o número de amostras.	29
Tabela 3: Limítrofes para definição do grau de esfericidade e arredondamento.	38
Tabela 4: Resultados de estudo em conglomerados por Ballas (2012a). $C_v < 250$ representa a porcentagem de grãos em volume abaixo de $250 \mu\text{m}$	46
Tabela 5: Dados obtidos referente à análise de grãos e poros. $C_a < 250$ representa a porcentagem de grãos em área abaixo de $250 \mu\text{m}$	47

LISTA DE SÍMBOLOS

φ	-	Porosidade
V_p	-	Volume de poros
V_t	-	Volume total da amostra
V_g	-	Volume de grãos
I_{vp}	-	Volume de poros interconectados
φ_e	-	Porosidade efetiva
C_v	-	Convexidade
C_c	-	Circularidade
R^2	-	Coefficiente de determinação

LISTA DE SIGLAS

- BRP - Bacia Rio do Peixe
- RGB - Padrão de cores (Red, Green, Blue)
- ROI* - Região de interesse
- NW - Amostras com bandas de deformação formadas em evento transcorrente de direção Noroeste
- NE - Amostras com bandas de deformação formadas em evento transtensivo com direção Nordeste
- NS - Amostras com bandas de deformação formadas em evento transtensivo com direção Norte-Sul, consiste em inflexão de bandas de direção Nordeste
- EW - Amostras com bandas de deformação formadas em evento distensivo de direção Leste-Oeste
- SB - Amostras coletadas em zona intermediária, deformadas, mas sem presença de bandas de deformação
- ND - Rocha com maior preservação das condições originais, possivelmente modificada apenas por processos sedimentares
- CB - Conjunto de todas as amostras com bandas de deformação, ou seja, grupo formado pelas amostras dos grupos NW, NE, NS e EW
- $C_v < 250$ - Porcentagem de grãos em volume com diâmetro abaixo de 250 μm
- $C_a < 250$ - Porcentagem de grãos em área com diâmetro abaixo de 250 μm
- NBD - Núcleo da banda
- GA - Grãos adjacentes

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa.....	2
1.2 Objetivos.....	2
2. CONTEXTO GEOLÓGICO	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
3.1 Bandas de deformação.....	6
3.2 Aspectos texturais das rochas sedimentares	9
3.2.1 Tamanho de grãos.....	9
3.2.2 Fábrica.....	12
3.2.3 Cálculo de aspectos de forma do grão	13
3.3 Porosidade.....	14
3.3.1 Tipos de porosidade primária	15
3.3.2 Principais tipos de porosidade secundária	16
3.3.4 Fatores que governam a porosidade das rochas.....	17
3.4 Análise digital de imagens	17
4. METODOLOGIA.....	18
4.1 Análise digital de imagens	20
4.1.1 Carregamento de imagens e seleção de ROIs.....	21
4.1.2 Segmentação de Imagens	23
4.1.3 Cálculo da Porosidade	23
4.1.4 Obtenção de tamanho de poros e grãos	25
4.1.5 Parâmetros de forma dos grãos.....	27
4.2 Grau de esfericidade e arredondamento.....	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
5.1 Efeito das bandas de deformação nas propriedades das rochas.....	30
5.1.1 Análise do tamanho de grãos.....	30
5.1.2 Análise de poros	31

5.1.3 Avaliação textural dos grãos	37
5.2 Efeito da cinemática nas características físicas dos arenitos conglomeráticos.....	44
5.2.1 Análise de tamanho de grãos	44
5.2.2 Análise de poros	47
5.2.3 Análise da textura dos grãos	54
6. CONCLUSÕES	59
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1. INTRODUÇÃO

As bandas de deformação atuam como barreira ou desvio ao fluxo de fluidos em reservatórios, pois comumente provocam redução na porosidade e permeabilidade, bem como o aumento na compactação das rochas. A formação de bandas cataclásticas pode promover o rearranjo, reorientação, fraturamento, quebra e esmagamento dos grãos. Ballas et al. (2015) associa esses tipos de comportamentos à intensidade da cataclase, que resulta na redução de permeabilidade em diferentes ordens de magnitude. A intensidade da cataclase, por sua vez, é controlada pelo regime tectônico e cinemática atuante, profundidade de soterramento e pelas características da rocha hospedeira (Ballas et al., 2015).

Da mesma forma que há distinção entre as propriedades da rocha hospedeira, a região entre bandas e o núcleo da deformação de bandas de deformação cataclásticas apresentam comportamentos diferenciados de acordo com a intensidade de deformação. Os aspectos texturais, a dimensão dos grãos e a porosidade são exemplos de características físicas das rochas que são modificadas.

A Bacia Rio do Peixe (BRP) é uma bacia rifte associada a reativação de zonas de cisalhamento Pré-Cambrianas durante a abertura do Oceano Atlântico (De Castro et al., 2007; Carvalho & Melo, 2012; Françolin et al., 1994). Segundo Nogueira et al. (2015), essa bacia possui estruturas associadas a dois campos de tensão, o primeiro relacionado à fase de abertura e evolução da bacia e o segundo referente à sua inversão. Dessa forma a BRP apresenta diversas feições estruturais, dentre elas bandas de deformação, principalmente associadas aos arenitos porosos das formações Antenor Navarro e Rio Piranhas. A formação dessas estruturas está associada a diferentes controles cinemáticos, que por sua vez, resultam em uma maior heterogeneidade entre as rochas deformadas.

A presença de bandas de deformação na BRP, em sua grande maioria cataclásticas, permite melhor compreensão das modificações existentes nas rochas deformadas. Sendo assim, neste trabalho foram analisadas amostras deformadas com bandas e sem bandas de deformação, bem como a rocha fonte da Formação Antenor Navarro, que é principalmente composta por arenitos conglomeráticos.

1.1 Justificativa

O estudo de análogos a reservatórios de petróleo é de fundamental importância para o desenvolvimento de novos métodos e técnicas de produção e estimulação. Logo, um conjunto de características deve ser levantado objetivando o desenvolvimento de modelagem e simulação destes reservatórios. Com estes modelos é possível investigar quais propriedades exercem maior controle sobre as rotas de fluxo e migração de fluidos. Dentre estas podem-se citar os aspectos texturais e as condições físicas das rochas, onde ambos podem promover mudanças em suas características petrofísicas. As bandas de deformação, em especial, podem alterar aspectos texturais da rocha hospedeira, gerando assim, uma nova combinação entre estes parâmetros. Um novo arranjo de grãos, por exemplo, trará novas características permoporosas. Em meio ao avanço tecnológico e crescente necessidade de pesquisas em reservatórios análogos, a BRP é um excelente laboratório para o estudo de reservatórios siliciclásticos compartimentados, pois apresenta diversas feições estruturais, dentre elas bandas de deformação, principalmente associadas aos arenitos porosos das formações Antenor Navarro e Rio Piranhas.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é compreender a influência de bandas de deformação cataclásticas e da cinemática atuante nas propriedades texturais e permoporosas dos arenitos conglomeráticos da BRP.

Portanto, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Selecionar amostras com bandas de deformação cataclásticas;
- Comparar as propriedades petrofísicas das bandas de deformação com as da rocha não deformada;
- Obter a distribuição de tamanho de poros e de grãos nas zonas de falha, entre bandas e na zona sem deformação;
- Contrastar as propriedades texturais (razão de aspecto, convexidade e circularidade), em arenitos conglomeráticos deformados e não deformados, com a distribuição de tamanho de grãos e de poros;
- Identificar qual o efeito da cinemática nos parâmetros texturais, tamanhos de poros e de grãos, assim como na porosidade.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

Localizada no extremo oeste do estado da Paraíba, a BRP pertence a um conjunto de bacias de pequeno a médio porte alocadas no Nordeste Setentrional do Brasil, conhecidas como Bacias Interiores do Nordeste (Nogueira et al., 2004). A origem dessas bacias associa-se ao processo de ruptura da América do Sul e África, pela reativação de zonas de cisalhamento do embasamento pré-cambriano (Carvalho & Melo, 2012), onde falhas normais e transcorrentes foram responsáveis pela abertura de grabens e semi-grabens durante o Eocretáceo (Carvalho et al., 2013).

Este grupo de bacias é composto (Figura 1) pelas bacias Rio do Peixe, Araripe e outras associadas a zona de cisalhamento Patos, bem como ao sistema rifte Tucano Jatobá (Sénant & Popoff, 1991). As Bacias interiores são parte do denominado *Trend* Cariri-Potiguar, e seu estudo é de fundamental importância, pois representam análogos a bacias de margem continental (Córdoba et al., 2008).

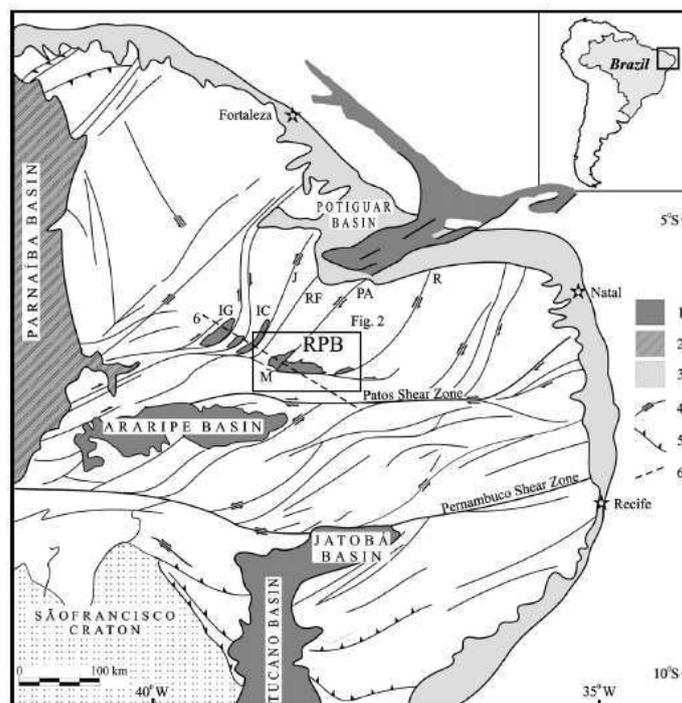


Figura 1: Mapa geológico simplificado da Província de Borborema mostrando a distribuição de bacias sedimentares e características geológicas importantes. (1) Bacias rift cretáceas (IC, Icó; IG, Iguatu, RPB, Rio do Peixe); (2) Sedimentos paleozóicos da Bacia do Parnaíba; (3) Cobertura do sedimento costeiro; (4) Zonas de cisalhamento (J, Jaguaribe, M, Malta, PA, Portalegre, R, Rio Piranhas, RF, Rodolfo Fernandes); (5) Zonas axiais; (6) Localização de perfil gravimétrico.

Fonte: De Castro et al. (2007).

Considerada uma das principais bacias interiores do Nordeste a BRP ocupa aproximadamente 1250 km² de área (Costa et al., 2010; Mendonça Filho et al., 2006).

Formada por depósitos sin-rifte de idade neocomiana possui controle estrutural associado as zonas de cisalhamento Portalegre (NE-SW) e Patos (E-W), e é constituída por três semi-grabens representados pelas sub-bacias Brejo das Freiras, Sousa e Pombal (Figura 2), de oeste para leste (Françolin et al., 1994; Sénant e & Popoff, 1991). Separadas por altos do embasamento, essas sub-bacias são controladas pelas zonas de cisalhamento Portalegre (NE-SW) e Patos (EW), além de algumas falhas associadas (Costa et al., 2010; Mendonça Filho et al., 2006; Françolin et al., 1994).

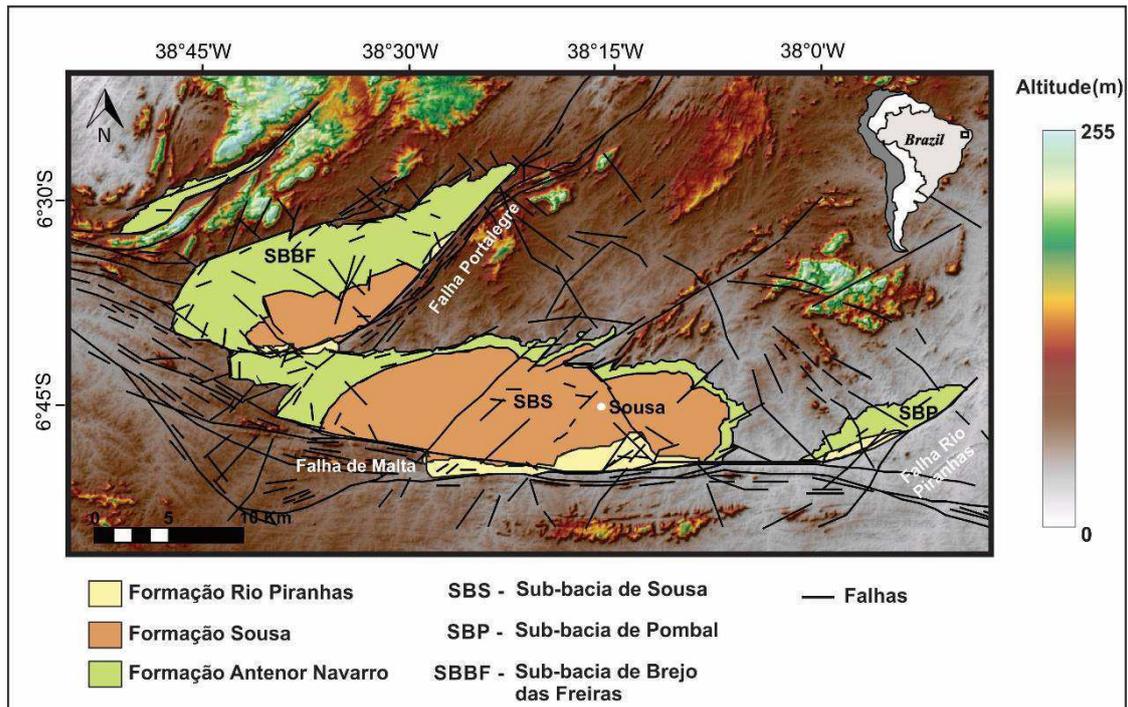


Figura 2: Mapa geológico da BRP, sobreposto ao modelo digital de terreno gerado a partir de dados do *shuttle radar topography mission* (SRTM).

Nogueira et al. (2015), Cordoba et al. (2008), Sénant e Popoff (1991) e Françolin et al. (1994) & constataram a presença de diversas estruturas rúpteis associadas ao campo de tensão da fase rift na BRP. Nogueira et al. (2015) associaram diversas estruturas à inversão da bacia, correspondente a um novo campo de tensão atuante na fase pós-rift. Uma das principais estruturas encontradas na BRP são as bandas de deformação.

A cobertura sedimentar da BRP é constituída por três formações geológicas, da base para o topo, Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas (Mendonça Filho et al., 2006), que ocorrem de forma interdigitada (Córdoba et al., 2008). Segundo Carvalho e Leonardi (1992) a sequência sedimentar da BRP é composta principalmente por sedimentos clásticos, com distribuição granulométrica particular em cada sub-bacia,

onde o material mais grosso se concentra nas bordas e os finos na região central da bacia.

A Formação Antenor Navarro é constituída por conglomerados com grãos imaturos em sua base, além de grãos finos e micáceos intercalados com argilitos, que ocorrem principalmente na parte superior, caracterizando uma passagem gradual dos sistemas de leque aluvial, fluvial típico à lacustre (Nogueira et al., 2004). Sua deposição ocorreu em um período de intensa atividade tectônica, quando as depressões originadas pelo tectonismo foram entulhadas sob um regime torrencial (Mendonça Filho et al., 2006).

A Formação Sousa compreende folhelhos e siltitos intercalados a arenitos (Córdoba et al., 2008), além de nódulos de carbonato e algumas ocorrências de margas. As principais estruturas sedimentares são estratificação acanalada e planar, marcas onduladas, gretas de contração, estruturas convolutas e evidências de bioturbação (Carvalho et al., 2013). Limita-se a dois terços da área total da bacia, com espessura média de 800 m (Mendonça Filho et al., 2006), e deposição associada a planície de inundação ou sistema fluvial meandrante e lacustre raso em período de influência tectônica relativamente calma (Nogueira et al., 2004).

A Formação Rio Piranhas, por sua vez, é composta por arenitos grossos, mal selecionados e intercalados a conglomerados (Carvalho; Leonardi, 1992), com estratificações cruzadas e plano paralelas, restrita ao sul da bacia (Mendonça Filho et al., 2006). Essa Formação é proveniente de leques aluviais de margem falhada associados a sistema fluvial entrelaçado (Córdoba et al., 2008).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Bandas de deformação

Em rochas porosas nem sempre as respostas à tensão são descontinuidades e superfícies de deslizamento (Fossen et al., 2007). Muitas vezes são formadas pequenas falhas com deslocamento milimétrico e comprimento variável entre dezenas e centenas de metros (Aydin e Johnson, 1983; Aydin, 1978), essas estruturas são denominadas de bandas de deformação. De forma geral a presença das bandas de deformação provoca redução da permabilidade e aumento na coesão quando comparadas à falhas comuns (Fossen et al., 2007), porém há casos em que essas estruturas aparecem como condutoras de fluidos (Parry et al., 2004).

Bandas de deformação dividem-se basicamente em duas zonas, a zona central que ocupa a maior parte da deformação, como também a zona intermediária, a qual representa uma zona de transição entre o núcleo da deformação e a rocha não deformada (Lothe et al., 2002). A zona central ou interna é composta por grãos fraturados e esmagados. Esses grãos apresentam uma considerável redução de tamanho e menor grau de selecionamento em relação a rocha hospedeira, esta zona ainda caracteriza-se por apresentar alto nível de consolidação (Aydin, 1978). A zona externa ou intermediária consiste no ajuste do espaço ocupado por cimento e poros. Neste caso a matriz sofreu deformação aumentando o contato entre os grãos e reduzindo o volume de poros. O empacotamento dos grãos nessa zona torna-se maior que na rocha não deformada (Aydin, 1978).

Frequentemente as bandas localizam-se próximas uma das outras, paralelas ou subparalelas, apresentam-se em aglomerados, podendo evoluir para um plano de escorregamento (Lothe et al., 2002). A combinação entre aglomerados de bandas de deformação, deslizamentos ocasionais e a zona externa ou intermediária compõe uma zona de dano (Shipton, 2013). A ocorrência das bandas de deformação pode se dar das seguintes formas: *singles* (única banda), *clusters* (aglomerado de bandas) e em zonas de danos de falha (Fossen e Bale, 2007).

Antonellini et al. (1994) classificaram as bandas de deformação em bandas sem catacláse, bandas com catacláse e bandas com *clay smearing*. Fossen et al. (2007) as classificam de acordo com a cinemática reinante durante a deformação, dividindo em bandas de dilatação, bandas de compactação e bandas de cisalhamento. O

desenvolvimento de uma banda de deformação depende de vários parâmetros físicos, como o regime tectônico, pressão confinante, pressão do fluido, temperatura e taxa de deformação, além de propriedades intrínsecas, como composição mineralógica, porosidade, tamanho e seleção dos grãos (Lothe et al., 2002; Fossen e Bale, 2007; Fossen et al., 2007).

Diferentes mecanismos de formação resultam em bandas com propriedades petrofísicas distintas. São quatro mecanismos de formação: fluxo granular (deslizamento, rotação do grão e rompimento do cimento), catacláse (fraturamento, moagem e ou abrasão de grãos), esmerilhamento de filossilicatos e dissolução e cimentação (Fossen et al., 2007). Dessa forma, as bandas de deformação também são classificadas de acordo com seu mecanismo de formação. Sendo assim, Fossen et al. (2007) classificam as bandas mecanicamente em: bandas de desagregação, bandas filossilicáticas, bandas cataclásticas e bandas de dissolução e cimentação (Figura 3).

Nas bandas de desagregação (Figura 3A) a tensão reorganiza os grãos, por rolamento ou apenas deslizamento, que corresponde a um fluxo granular não cataclástico. Os grãos por sua vez mantêm-se intactos, mas sua reorganização pode promover a dilatação ou compactação (Fossen e Bale, 2007). São identificadas em areias e arenitos pouco consolidados, sua espessura depende do tamanho de grão principal e a intensidade de deslizamento e compactação depende das propriedades da rocha (Fossen et al., 2007).

Bandas filossilicáticas (Figura 3B) são aquelas que apresentam acima de 10-15% de minerais lamelares em sua composição (Fossen et al., 2007). Pode ser considerado um tipo particular de bandas de desagregação, onde os filossilicatos como mica e argila são mecanicamente realinhados para formar uma estrutura paralela à banda (Fossen e Bale, 2007). Em certos casos os componentes lamelares podem agir como superfície de deslizamento antes da formação da banda, isso ocorre nas estruturas nomeadas de *clay smear* (Fossen et al., 2007).

Bandas cataclásticas tem o fraturamento de grãos ou catacláse como principal mecanismo de deformação (Fossen et al., 2007). São caracterizadas pela quebra de grãos e redução de porosidade (Antonellini et al., 1994). Caso as tensões nos contatos de grãos excedam sua resistência à tração, haverá a quebra e fraturamento dos grãos, refletindo na redução do tamanho de grão ou cominuição (Aydin et al., 2006). Essas

bandas apresentam um núcleo central com cataclase, composto por grãos de tamanhos variados, alto teor de matriz devido a redução do tamanho de grãos, grãos angulares e ausência de espaço poroso (Figura 3C), enquanto a rocha ao redor do núcleo apresentam compactação e suave fraturamento de grãos (Fossen et al., 2007).

Quando processos de cimentação e dissolução estão preferencialmente associados a bandas de deformação, tem-se as bandas de cimentação e de dissolução (Exner et al., 2013). Essas estruturas possuem empacotamento mais intenso que a rocha hospedeira e apresentam uma sutil evidência de cataclase (Figura 3D), a dissolução é promovida por minerais de argila no contorno dos grãos, enquanto a cimentação é promovida por superfícies novas e reativas originadas pelo esmagamento de grãos (Fossen et al., 2007).

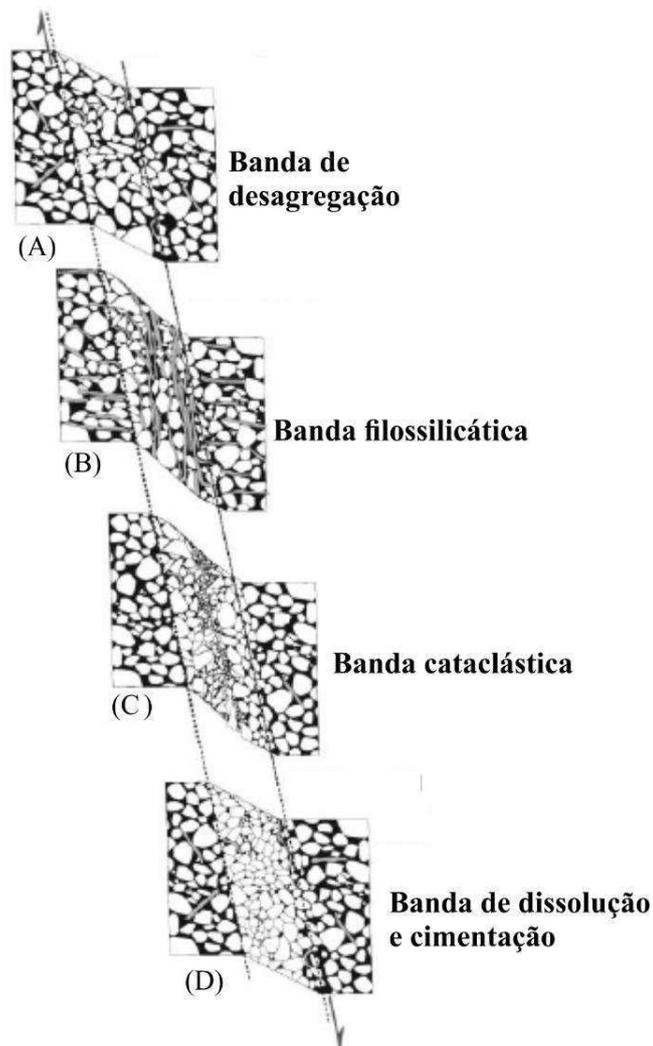


Figura 3: Ilustração dos 4 tipos de bandas de deformação segundo mecanismo de deformação.
Fonte: Fossen et al. (2007)

As características das bandas de deformação têm potencial para mudar as condições do reservatório, afetando assim a escolha das melhores estratégias para produção de óleo e gás (Fisher & Knipe, 2001; Hesthammer & Fossen, 2001; Ogilvie & Glover, 2001).. A redução da porosidade e da permeabilidade nas bandas de deformação, em comparação com o arenito não deformado, geralmente é vista como uma barreira na migração e acúmulos de fluidos, gerando fortes efeitos de comunicação em reservatórios (Antonellini et al., 1994; Holcomb et al., 2007; Faulkner et al., 2010; Aydin e Johnson, 1978). Para Aydin et al. (1978), a composição mineralógica da banda é igual à rocha hospedeira, porém com grãos muito menores em área e diâmetro, e esta diminuição aumenta a área de contato entre os grãos, preenchendo poros que antes não podiam ser preenchidos, consequentemente reduzindo a porosidade da rocha.

3.2 Aspectos texturais das rochas sedimentares

As rochas siliciclásticas são formadas por grãos, matriz, cimento e poros. Segundo Selley (2000) os grãos são partículas detritais que de maneira geral formam a estrutura de uma rocha sedimentar. A matriz é o detrito mais fino contido nesta estrutura, a mesma é depositada ao mesmo tempo que os grãos ou infiltra-se logo após a deposição. Já o cimento é originado por um processo pós-deposicional e compreende o crescimento mineral que ocorre nos espaços vazios do sedimento. Os poros são definidos como os espaços vazios que são ocupados por fluidos (Tiab e Donaldson, 2004), ou seja, são os espaços não ocupados por grãos, cimento e matriz (Selley, 2000).

A textura dos sedimentos é baseada no tamanho, forma e fábrica dos grãos. O tamanho e forma são aspectos individuais dos grãos e correspondem a forma, arredondamento e textura superficial das partículas, enquanto a fábrica está relacionada à disposição dos grãos na rocha através do empacotamento e orientação dos grãos (Boggs Jr, 2009).

3.2.1 Tamanho de grãos

As partículas de rochas siliciclásticas são encontradas em diversos tamanhos (Boggs Jr, 2009; Selley, 2000), o tamanho dos grãos é classificado desde a fração argila aos pedregulhos (Tiab e Donaldson, 2004; Boggs Jr, 2009). Em razão da ampla gama de

tamanhos são usadas escalas de tamanhos de grãos para classificar as rochas siliciclásticas. A escala mais usada atualmente é a de Wentworth (Selley, 2000; Boggs Jr, 2009; Folk, 1980). Esta escala é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação granulométrica de Wentworth (1922) para sedimentos clásticos.

Classe	Grão	Tamanho de Grão
1	Argila	< 4µm
2	Silte muito fino	> 4 µm e < 8 µm
3	Silte fino	> 8 µm e < 16 µm
4	Silte médio	> 16 µm e < 31 µm
5	Silte grosso	> 31 µm e < 62 µm
6	Areia muito fina	> 62 µm e < 125 µm
7	Areia fina	> 125 µm e < 250 µm
8	Areia média	> 250 µm e < 500 µm
9	Areia grossa	> 500 µm e < 1000 µm
10	Areia muito grossa	> 1000 µm e < 2000 µm
11	Grânulos	> 2000 µm e < 4000 µm
12	Seixos	> 4000 µm e < 64000 µm
13	Calhau	> 64000 µm e < 256000 µm
14	Matacão	> 256000 µm

Resumidamente, em ordem decrescente em tamanho os grãos de rochas siliciclásticas são classificados em cascalho, areia, silte e argila. A classificação dos grãos entre argila e matacão torna-se um indicativo de sua fonte. No processo de transporte da fonte para bacia sedimentar os grãos tem tamanhos reduzidos e tornam-se mais arredondados. De forma geral os grãos angulares permanecem próximos a sua fonte, enquanto as partículas esféricas e “lisas” indicam maior fluxo de transporte (Tiab e Donaldson, 2004).

O parâmetro que relaciona as classes (Tabela 1) de grãos presentes em uma rocha é o selecionamento dos grãos (Boggs Jr, 2009). Para Folk (1980) o selecionamento é um parâmetro pouco entendido, entretanto é função dos seguintes fatores: o tamanho dos grãos, o ambiente de deposição, energia e tempo de transporte. Sendo assim, uma rocha composta por apenas grãos de areia é melhor selecionada que uma rocha contendo grãos nas frações argila, silte e areia (Figura 4).

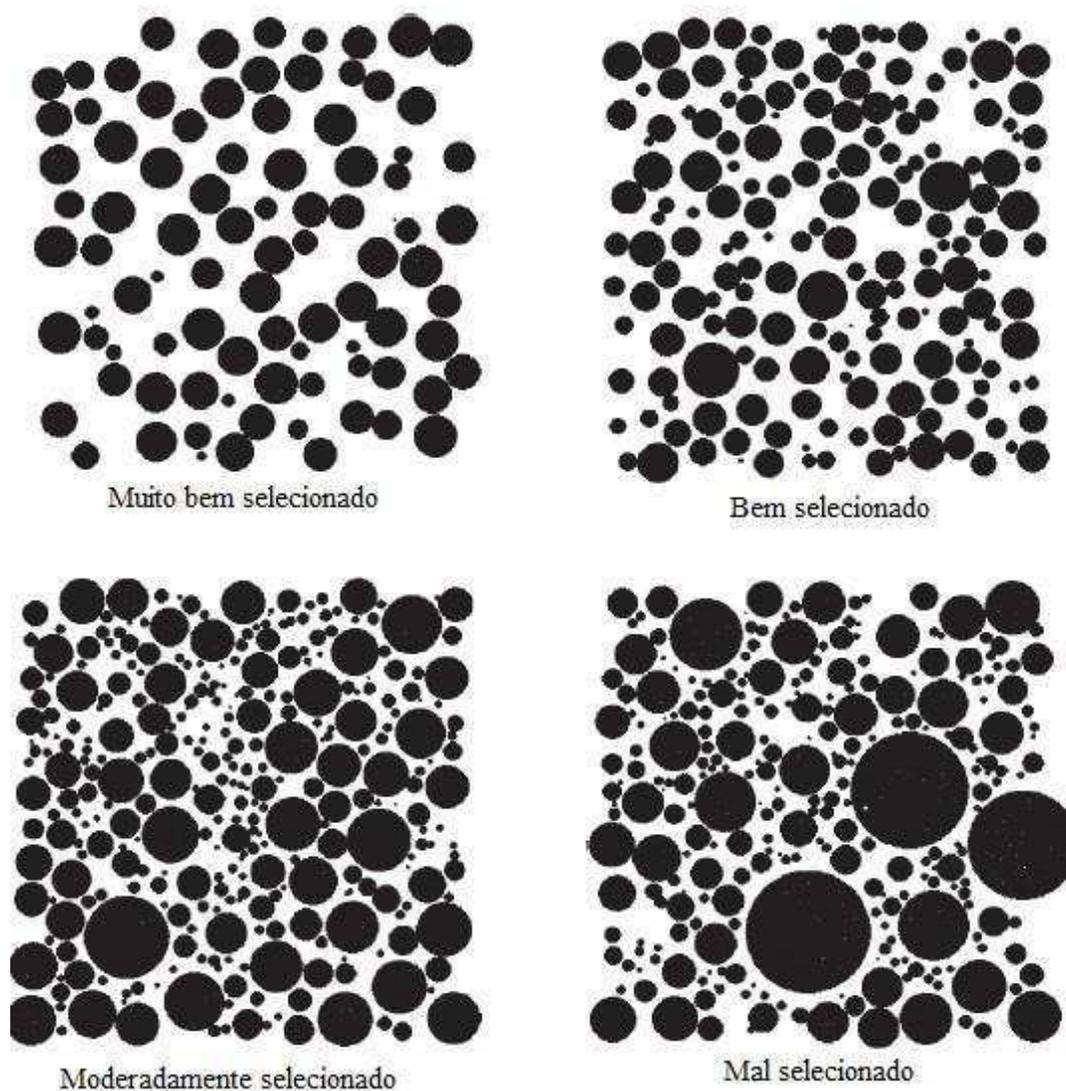


Figura 4: Exemplos fictícios de padrões de selecionamento de grãos. Quanto maior a variação de tamanho de grãos menor o grau de selecionamento.
 Fonte: Modificado de Boggs Jr (2009).

3.2.2 Parâmetros de forma dos grãos

A esfericidade e o arredondamento são os parâmetros de forma mais importantes dos grãos. Estes influenciam as propriedades petrofísicas das rochas, assim são estudados para explicar comportamentos distintos entre as rochas e suas propriedades (Tiab e Donaldson, 2004). A esfericidade é um parâmetro que indica o quanto um grão aproxima-se da forma de uma esfera (Selley, 2000; Tiab e Donaldson, 2004). O arredondamento é a proporção entre o raio médio de todos os limites (bordas) e o raio do maior círculo inscrito (Folk, 1980). Também pode ser definido como a medida da angulosidade ou curvatura de uma partícula (Boogs Jr, 2009; Tiab e Donaldson, 2004).

Os parâmetros de arredondamento e esfericidade são funções da energia do transporte, distância da fonte e idade das partículas. Grãos novos depositados próximo a fonte são angulares, enquanto grãos transportados por longas distâncias ou retrabalhamento de rochas sedimentares preexistentes, são mais esféricos e arredondados (Tiab e Donaldson, 2004). É importante ressaltar que mesmo sendo governadas pelos mesmo fatores, a esfericidade e o arredondamento são aspectos independentes (Selley, 2000); existem grãos pouco esféricos e bem arredondados e vice-versa (Figura 5). A esfericidade é classificada como alta ou baixa, enquanto o arredondamento pode ser muito angular, angular, sub-angular, sub-arredondado, arredondado e bem arredondado (Tiab e Donaldson, 2004; Boggs Jr, 2009).

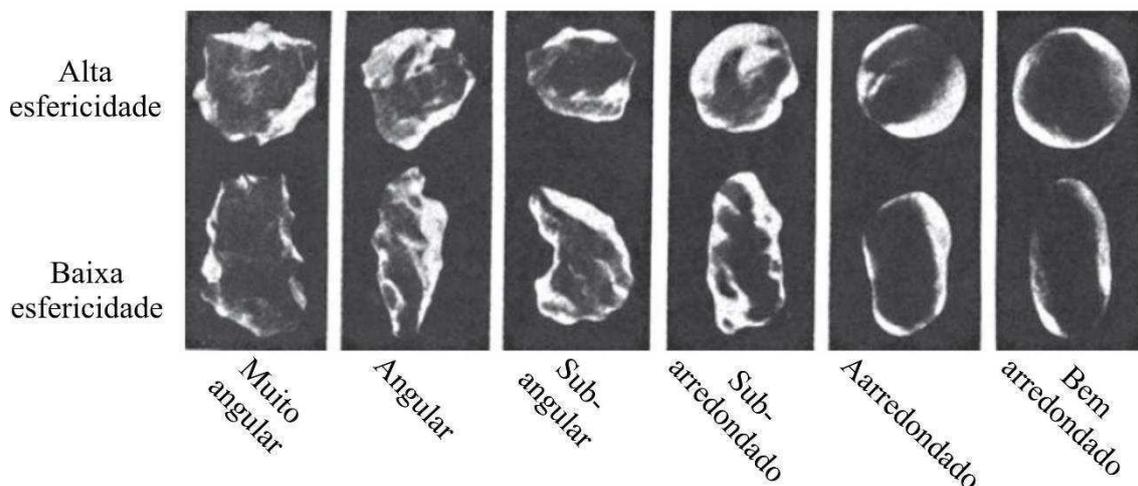


Figura 5: Graus de esfericidade e arredondamento, a imagem ressalta a independência destas propriedades.
Fonte: Powers, 1953.

2.2.3 Fábrica

A maneira em que os grãos dos sedimentos estão dispostos é denominada de fábrica, a qual refere-se a dois aspectos relacionados à disposição das partículas, o empacotamento e a orientação dos grãos (Selley, 2000). Diferente do tamanho e forma dos grãos, que são características individuais da partícula, a fábrica considera todos os grãos inclusos no sedimento (Boggs Jr, 2009), por isso apresenta uma relação direta com a porosidade primária das rochas (Selley, 2000).

O empacotamento consiste na relação espacial mútua entre os grãos em rochas sedimentares, que é dependente do tamanho, selecionamento do grão, forma e orientação das partículas (Boggs Jr, 2009). A orientação dos grãos é discutida em

relação à direção do fluxo dos grãos quando transportados e ao plano horizontal (Selley, 2000). As pequenas partículas com formas planares e alongadas tendem a ser transportadas por meio de suspensão (sem corrente de fluxo) e são comumente depositadas paralelamente à superfície do acamamento. Já as partículas transportadas e depositadas por correntes de tração ou fluxo de gravidade herdam a orientação do fluxo ou corrente de deposição, independentemente do tamanho (Boggs Jr, 2009).

3.2.4 Cálculo de aspectos de forma do grão

Os métodos de investigação usados para calcular os parâmetros de forma de grãos não são bem definidos. Geralmente o passo inicial da investigação é a geração de lâminas delgadas e polidas, quando a rocha é consolidada, bem como desagregação dos grãos no caso de rochas inconsolidadas. A partir destes, são desenvolvidos diversos métodos, investigação visual, análise de microfotografias, análise digital de imagens, etc. Além destes também são realizadas análises em rochas digitais em 3D, geradas através microtomografias de Raios-X.

Para o desenvolvimento destas análises são utilizadas formulações matemáticas que aproximam os resultados obtidos aos parâmetros texturais dos grãos. Os parâmetros aqui estudados são: convexidade, circularidade e razão de aspecto. As formulações matemáticas destas propriedades são direcionadas a medidas bidimensionais (2D).

Similar a esfericidade, porém obtida em 2D, a circularidade indica o quanto a forma de uma partícula é próxima da forma do círculo (Campaña et al., 2016), e pode ser representada pela seguinte fórmula:

$$Circularidade = \frac{4\pi \times \text{Área}}{\text{Perímetro}^2} \quad (1)$$

A razão de aspecto pode ser definida como a razão entre a largura e o comprimento da partícula, sendo então um parâmetro relativo à alongação (Benito-Calvo e De la Torre, 2011).

$$Razão\ de\ aspecto = \frac{Largura}{Comprimento} \quad (2)$$

A convexidade é uma medida que leva em conta a presença de covas e entalhes em uma partícula, relacionando o perímetro convexo total com o perímetro da partícula. O perímetro convexo total (Figura 6) é um contorno que engloba todo o polígono ou forma a ser analisada (Silva, 2018).

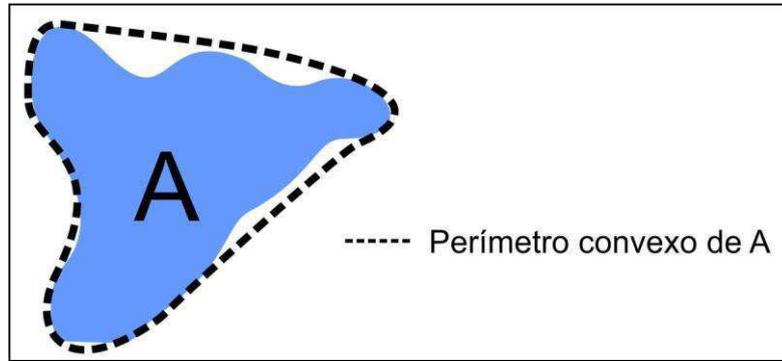


Figura 6: Representação do perímetro convexo da forma A. A linha pontilhada representa o perímetro convexo de A.

Essa medida pode representar o grau de maturidade do grão, tendo em vista que essa maturidade regulariza a superfície do grão tornando esse parâmetro mais próximo de 1.

$$\text{Convexidade} = \frac{\text{Perímetro convexo total}}{\text{Perímetro}} \quad (3)$$

Em todos os parâmetros citados as medidas variam de 0 a 1, o quanto mais perto de 1, as partículas estão mais próximas de atingir o ponto máximo daquele parâmetro.

3.3 Porosidade

A porosidade (Eq. 4) de uma rocha é uma medida da capacidade de armazenamento e retenção de fluidos (Ahmad, 2001), e é definida como sendo a razão entre o espaço total de poros e o volume total (Selley, 2000; Rosa et al., 2006; Boggs Jr, 2009; Tiab & Donaldson, 2004). Logo tem-se:

$$\varphi = \left(\frac{V_t - V_g}{V_t} \right) \times 100 = \left(\frac{V_p}{V_t} \right) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

V_p = Volume de poros;

V_t = Volume total da amostra;

V_g = Volume de grãos;

φ = Porosidade.

Segundo Boggs Jr (2009), a Equação 4 fornece a porosidade absoluta da rocha, entretanto para exploração petrolífera é mais interessante o estudo da porosidade efetiva, que por sua vez é a relação entre os poros interconectados numa rocha e seu volume total (Selley, 2000). A porosidade efetiva é expressa pela seguinte equação:

$$\varphi_e = \left(\frac{IVp}{Vt} \right) \times 100 \quad (5)$$

Onde IVp é o volume de poros interconectados e φ_e a porosidade efetiva. Geralmente menor que a porosidade total, a porosidade efetiva controla o fluxo de fluidos dentro da rocha. A presença de porosidade efetiva significa que há permeabilidade na rocha (Selley, 2000).

Quanto a sua origem, a porosidade pode ser primária ou secundária. A porosidade primária é aquela desenvolvida no período de deposição do material, já a secundária é resultante de alguns processos geológicos subsequentes à conversão dos sedimentos em rocha (Rosa et al., 2006). Dessa forma a porosidade primária é classificada em intergranular (interpartícula), intragranular (intrapartícula) e intercristalina, enquanto a porosidade secundária é classificada em intercristalina, dissolução, fenestral, móldica, vugular e de fratura.

3.3.1 Tipos de porosidade primária

A porosidade intergranular ou interpartícula refere-se aos vazios entre grãos, ou seja, todos os tipos de vazios intersticiais em todos os tipos de rocha (Figura 7 A), esses vazios variam desde o tamanho subcapilar até o supercapilar (acima de 0,5 mm de diâmetro) (Tiab & Donaldson, 2004). Este tipo de porosidade é muito importante, e sofre um decréscimo progressivo em rochas carbonáticas devido à diagênese, mas é o tipo de porosidade dominante em arenitos (Selley, 2000).

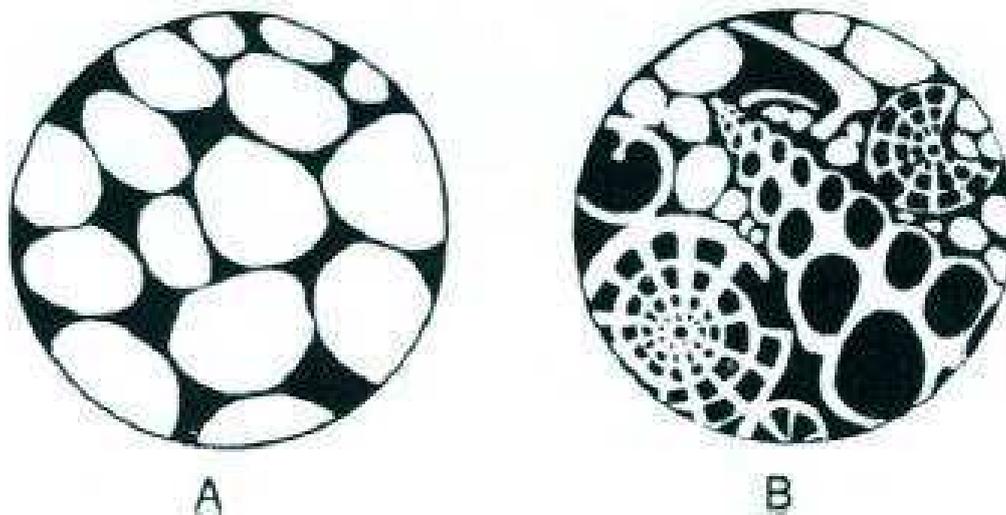


Figura 7: Esboço para ilustração da porosidade primária. (A) Porosidade intergranular (ou interpartícula), comumente encontrada em arenitos. (B) Porosidade mista intergranular (ou interpartícula) e intragranular (ou intrapartícula).
Fonte: Selley (2000).

Os espaços porosos dentro de partículas ou grãos das rochas são conhecidos como porosidade intragranular ou intrapartícula (Boggs Jr, 2009), conforme Figura 7 B. Esse tipo de porosidade é mais comum em carbonatos, como por exemplo cavidades de moluscos, corais e microfósseis podem ser classificadas como porosidade primária intragranular ou intrapartícula (Selley, 2000).

A porosidade primária intercrystalina é representada por espaços porosos entre cristais quimicamente formados (Boogs Jr, 2009), espaços entre planos de clivagem e cristais, bem como vazios em redes cristalinas (Tiab & Donaldson, 2004). Os espaços porosos intercrystalinos geralmente são subcapilares, ou seja, o diâmetro de poros é inferior a 0,002 mm (2 μm), esse range de porosidade tanto em redes de cristais como entre partículas de tamanho argila vem sendo chamada de microporosidade (Tiab & Donaldson, 2004).

3.3.2 Principais tipos de porosidade secundária

A porosidade secundária por dissolução, é originada pela dissolução de cimentos ou grãos estruturais em sedimentos siliciclásticos, bem como dissolução de cimento, fósseis, cristais estruturais, etc. em rochas químicas (Boggs Jr, 2009).

A porosidade intercrystalina é classificada como porosidade primária, entretanto as rochas carbonáticas sofrem recristalização, neste caso a porosidade intercrystalina

torna-se secundária. Os poros de rochas cristalinas são cavidades planares cruzadas obliquamente umas com as outras, e não há restrição de limites entre poros adjacentes. Geralmente esse tipo de rocha torna-se um ótimo reservatório de petróleo (Selley, 2000).

Porosidade por fraturas ocorre por meio de processos tectônicos, compactação ou dissecação (Boggs Jr, 2009). Neste tipo de porosidade, além de fraturas, também são incluídas, juntas, fissuras e falhas; muitas vezes a porosidade de fratura controla o fluxo de fluido de reservatórios de petróleo (Tiab & Donaldson, 2004).

3.3.4 Fatores que governam a porosidade das rochas

A porosidade das rochas sedimentares é afetada por diversos fatores, desde variáveis físicas até processos pós-deposicionais. As principais características que afetam a porosidade são: tamanho de grãos, selecionamento, forma, empacotamento, arranjo dos grãos, compactação, dissolução e cimentação (Boggs Jr, 2009).

Segundo Tiab e Donaldson (2004), a porosidade é independente do tamanho de grãos, entretanto rochas com grãos menos selecionados tendem a ter menor porosidade que as rochas com grãos mais selecionados. Os autores ainda citam os efeitos do grau de cimentação, compactação e consolidação, bem como o empacotamento dos grãos. As rochas inconsolidadas apresentam altos valores de porosidade, enquanto as rochas altamente cimentadas são pouco porosas; já a compactação tende a reduzir o espaço poroso e provoca a expulsão de parte dos fluidos contidos na rocha.

3.4 Análise digital de imagens

O crescente avanço tecnológico aliado à necessidade de respostas rápidas ou imediatas, contribuiu significativamente para o uso contínuo de softwares computacionais como ferramenta para extração de informação em imagens, objetivando a solução de diversos problemas, tais como descoberta automática de fissuras em materiais, cálculo do volume sanguíneo nas câmaras do coração, contagem de microrganismos em amostras orgânicas, entre outras atribuições (Neves; Pelaes, 2001).

Um dos métodos mais utilizados para obtenção das propriedades texturais de rochas é a análise de imagens. Desenvolvimentos recentes em análise e processamento de imagem digital indicam esta técnica como uma metodologia promissora para caracterização de partículas (Đuriš et al., 2016). A determinação da forma de partículas

empregando métodos assistidos em computadores é de grande utilidade, pois reduz consideravelmente o tempo de obtenção das propriedades (Fernlund, 2005).

Apesar da análise de imagens proporcionar dados exatos para parâmetros relacionados ao tamanho e forma da partícula, o método possui muitas fontes de erro e incerteza nos resultados, tais como a qualidade da imagem e a orientação das partículas, que por sua vez influenciam nos parâmetros de tamanho e forma dos grãos (Đuriš et al., 2016). Entretanto, comparando com o método indireto de peneiramento, onde o tamanho das partículas é medido indiretamente através da quantificação de fração por intervalo, a análise de imagem fornece informações exatas, além de outras propriedades que podem ser analisadas no desenvolvimento de uma pesquisa (Tafesse et al., 2012).

Portanto, a análise digital de imagens é uma ferramenta de extração de atributos bastante eficaz e de precisão relativamente alta. Os principais erros desta técnica estão associados a obtenção da imagem e não ao processamento, quanto melhor a qualidade, contraste, brilho e iluminação da imagem melhor serão os resultados. Outra dificuldade ou barreira encontrada é o maquinário, dependendo do tipo de análise realizada será necessário o uso de computadores de alta performance, e conseqüentemente alto custo.

4. METODOLOGIA

Para realização deste trabalho foram analisados dois afloramentos da Formação Antenor Navarro, em especial as fácies conglomeráticas. O afloramento 1 é caracterizado pela presença de bandas de deformação, enquanto o afloramento 2 apresenta rocha sem deformação e representa a rocha hospedeira da formação estudada. Em ambos os afloramentos foram extraídas 23 amostras, 19 do afloramento 1 (Figura 8) e 2 do afloramento 2. As amostras do afloramento 1 foram previamente mapeadas e coletadas. A localização dos afloramentos pode ser visualizada na Figura 9.

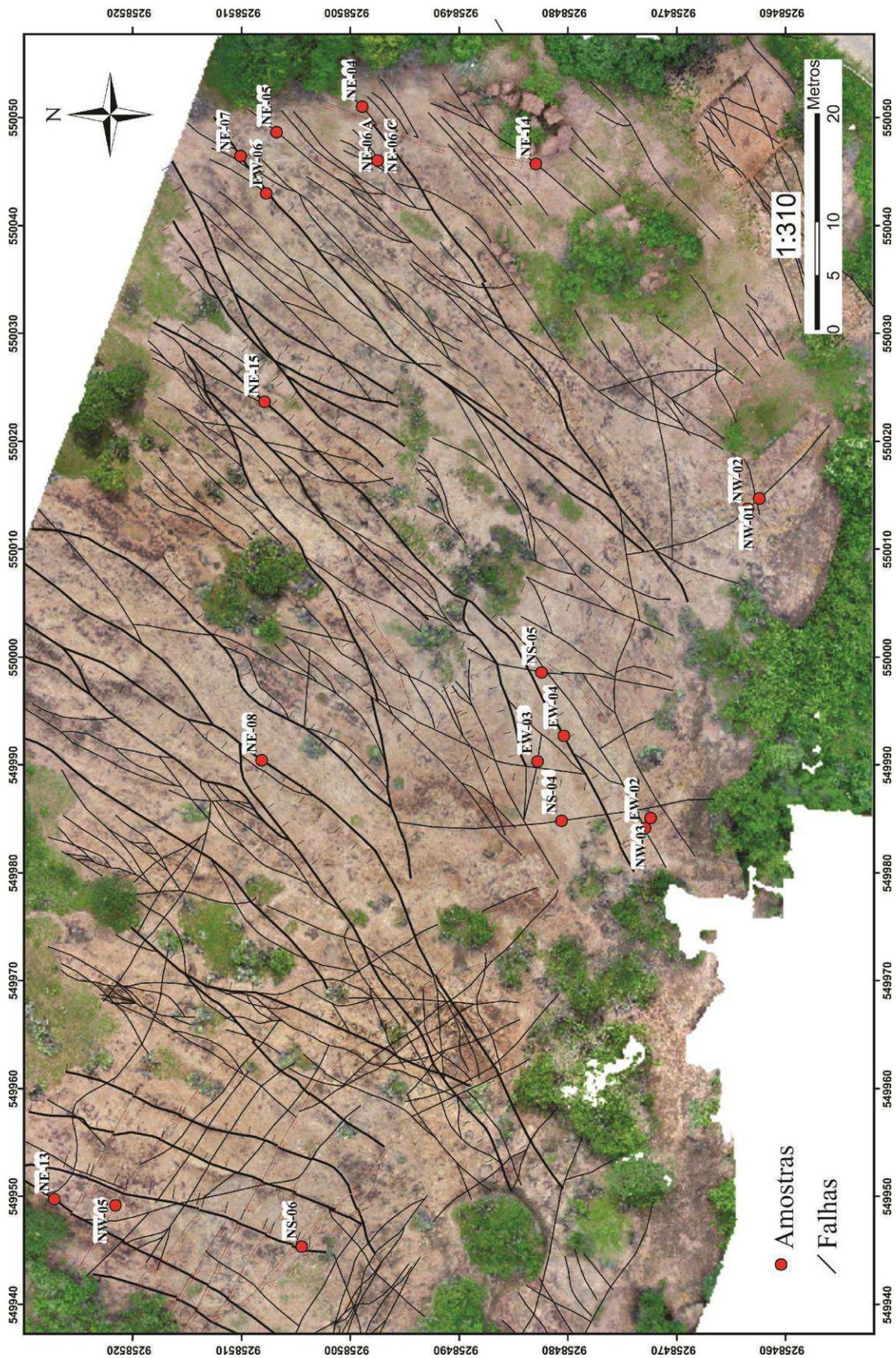


Figura 8: Localização das 19 amostras com bandas de deformação extraídas no afloramento 1.

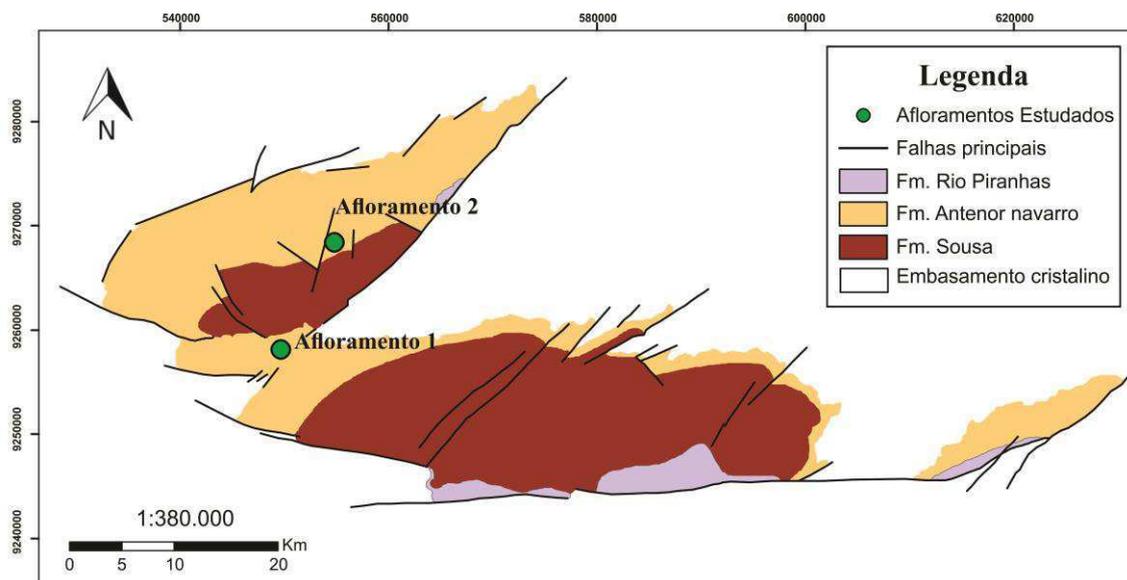


Figura 9: Mapa de localização dos afloramentos estudados.

As amostras coletadas foram enviadas para o grupo NEXT na Università Delgi Studi di Parma, onde foram preparadas lâminas delgadas de seção polida. Com auxílio de microscópio óptico com câmera acoplada, as lâminas foram fotografadas, gerando imagens com tamanho de pixel entre 4 e 6,5 μm .

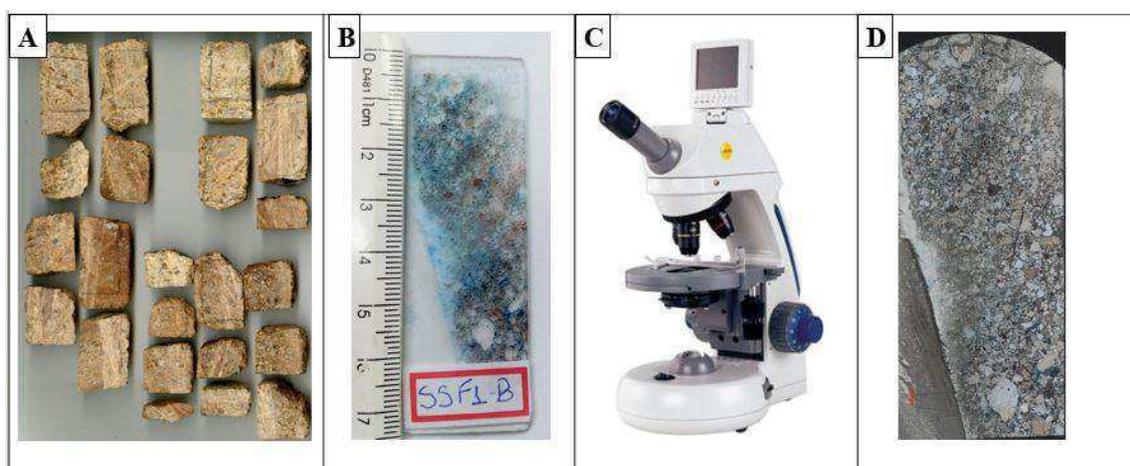


Figura 10: Preparação de lâminas delgadas e extração de imagens. (A) Amostras coletadas, (B) lâmina delgada, (C) microscópio com câmera acoplada, e (D) microfotografia da lâmina.

4.1 Análise digital de imagens

A análise bidimensional (2D) de imagens foi realizada no *software Avizo Fire 8.1*. Através desta análise é possível obter diversas propriedades e parâmetros de forma de partículas. Neste trabalho foram obtidas as dimensões de grãos e poros, porosidade convexidade, circularidade e razão de aspecto. O fluxograma de trabalho referente à

análise de imagens é apresentado na Figura 11. Este resume as etapas realizadas no Avizo Fire para obtenção dos dados.

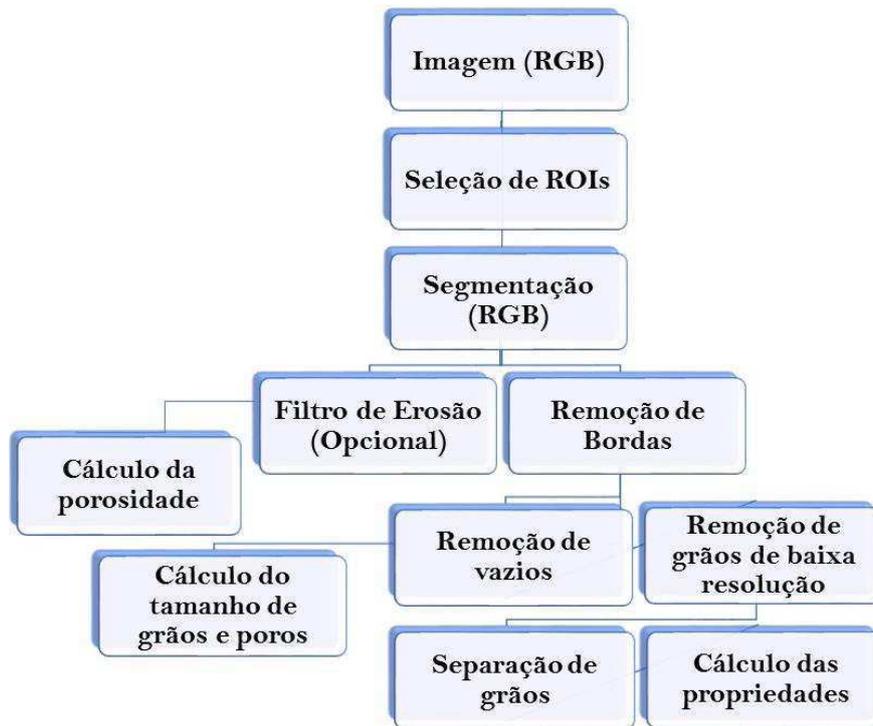


Figura 11: Esquema contendo as etapas realizadas para obtenção das propriedades e parâmetros desejados na análise de imagens.

4.1.1 Carregamento de imagens e seleção de ROIs

As imagens extraídas das lâminas delgadas são carregadas no *Avizo Fire*. O tratamento dessas imagens em escala de cores do padrão RGB é feita por meio da seleção do canal de conversão colorido em uma caixa de diálogo do *software* (Figura 12). Ainda deve-se informar o tamanho de pixel da imagem, para a perfeita calibração do tamanho das partículas na imagem com o seu tamanho real. O tamanho do *pixel* é inserido na entrada nomeada de *voxel size* (Figura 12), a mesma é referente ao tamanho do *voxel*, que por sua vez é o *pixel* em 3D. Como o ambiente trabalhado é em 2D, deve-se inserir o tamanho do *pixel* da imagem, e à medida que as ferramentas são usadas no *Avizo Fire*, o modo de operação em 2D deve ser escolhido.

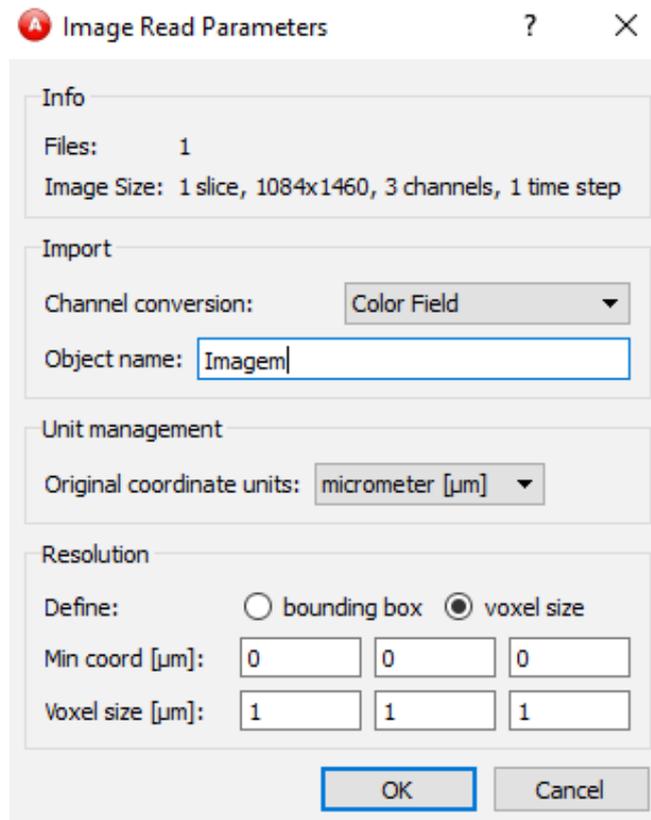


Figura 12: Caixa de diálogo do Avizo Fire 8.1, após o carregamento da imagem.

Em seguida, a ferramenta *Ortho Slice* é aplicada possibilitando a visualização da imagem. Após visualização, o comando *Extract Subvolume* é utilizado para selecionar a região de interesse (ROI) dentro da imagem (Figura 13).

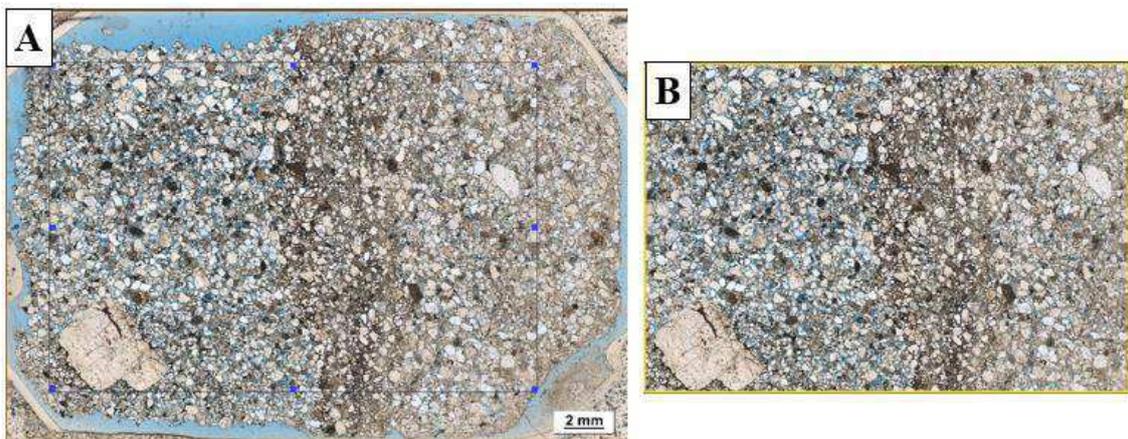


Figura 13: Seleção de ROI no Avizo Fire. A) Imagem com ROI selecionado; B) Apenas a região de interesse.

4.1.2 Segmentação de Imagens

A segmentação é uma das tarefas essenciais para o processamento digital de imagens. Sucintamente, a segmentação implica no reconhecimento e individualização dos elementos presentes na imagem, e sua fragmentação ocorre em regiões com características distintas, como intensidade, textura e cor (Nunes & Conci, 2007; Neves & Pelaes, 2001).

A segmentação aplicada subdivide a imagem por diferenças na intensidade de cores. Para a realização desta tarefa utiliza-se a ferramenta *Interactive Thresholding* que permite controlar a intensidade dos canais RGB (**R**ed, **G**reen e **B**lue). A intensidade de cada canal é indicada por números inteiros entre 0 e 255, conforme a Figura 14A. A imagem de entrada no software (Figura 14B) é completamente coberta por uma cor e à medida que os valores de intensidade das cores são alterados (manualmente) ficam coloridos apenas os elementos da imagem contidos no intervalo de cores escolhido. Um exemplo desta etapa é apresentado na Figura 14C. O resultado da segmentação em imagens coloridas, além da subdivisão de partes de interesse da imagem, é a binarização da mesma (Figura 14D).

A segmentação é uma tarefa semiautomática, portanto o operador é responsável por definir as intensidades adequadas dos canais RGB. A maioria das imagens analisadas apresentam excesso de segmentação, pois é mais fácil remover o excesso do que corrigir grandes falhas.

4.1.3 Cálculo da Porosidade

As lâminas delgadas, em sua preparação, foram impregnadas com resina (azul de metileno), dessa forma essa resina tende a ocupar o espaço poroso e é identificada pela cor azul (Figura 15A). Logo, para a determinação da porosidade segmenta-se a cor azul na imagem (Figura 15B e 15C). Após a etapa de segmentação (Seção 4.1.2) pode ser necessário filtrar a imagem, caso haja segmentação demasiada. Neste caso aplica-se o filtro de erosão por meio da ferramenta *Erosion*. A erosão remove pontos isolados e partículas pequenas, encolhe outras partículas, descarta picos nos limites do objeto e desconecta algumas partículas (Avizo Fire 8.1).

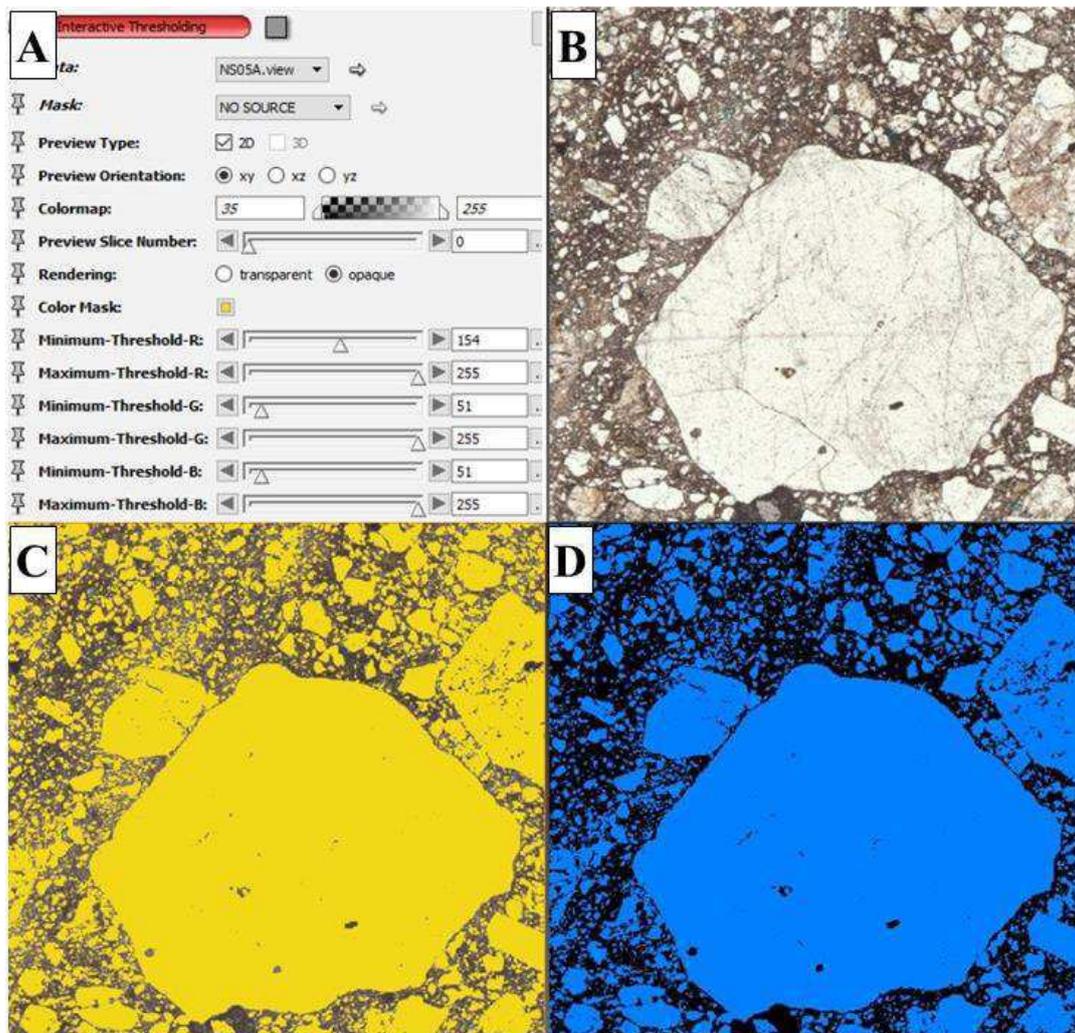


Figura 14: Segmentação de imagens. A) Caixa de diálogo da ferramenta *Interactive Thresholding*, possibilitando a mudança de intensidade os canais RGB; B) ROI da imagem; C) Seleção de intensidade que melhor se adequa para seleção de grãos e D) Imagem binarizada, onde os grãos são representados pela cor azul, enquanto o preto representa os elementos restantes da imagem.

Após a segmentação e filtragem (opcional), aplica-se a ferramenta *Material Statistics*, a mesma realiza a contagem de pixels dos poros (selecionados durante a segmentação) e a dos pixels restantes, ou seja, a parte não segmentada. O resultado desta ferramenta é uma tabela com a contagem dos pixels, conforme a Figura 15D. Dessa forma a porosidade da amostra pode ser calculada de acordo com a Equação 6:

$$\emptyset = \left(\frac{C_p}{C_p + C_r} \right) \times 100 \quad (6)$$

Onde C_p (cor azul, Figura 15C) representa a contagem de pixels dos poros, enquanto C_r (cor preta, Figura 15C) refere-se a contagem dos pixels restantes.

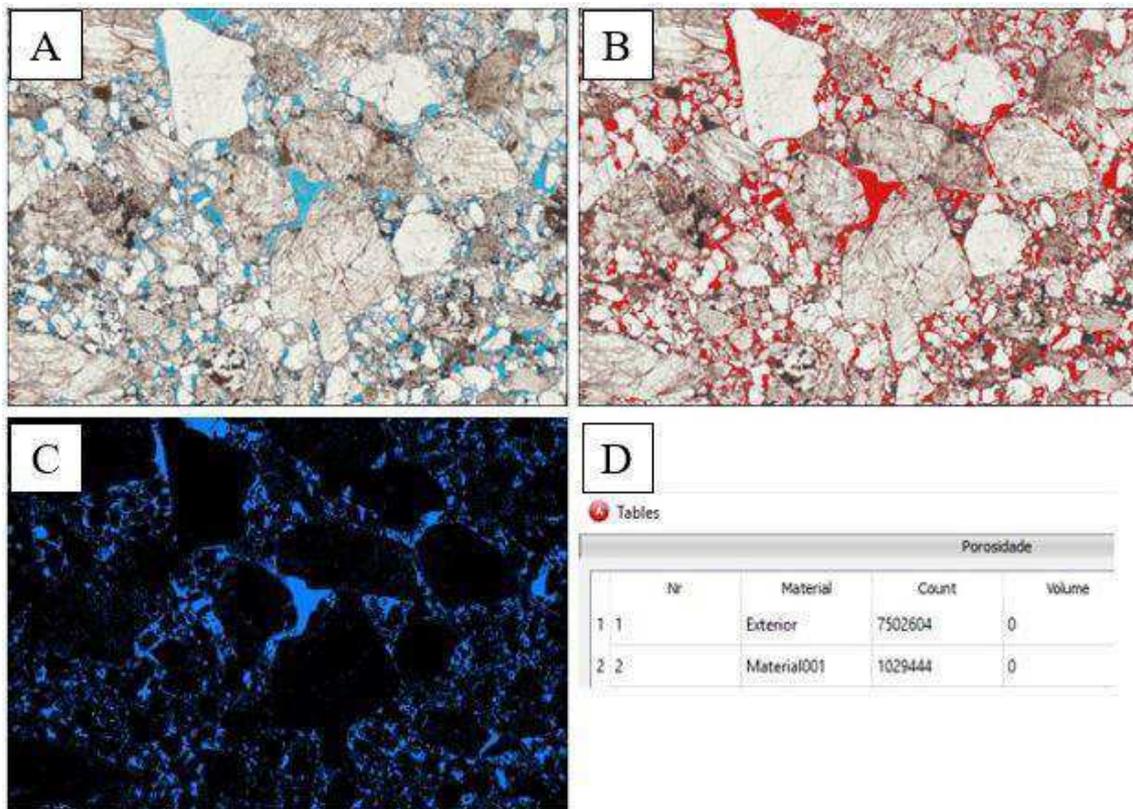


Figura 15: Etapas da determinação da porosidade. A) Imagem fonte onde os poros são representados pela cor azul; B) Indicação da região segmentada pela cor vermelha; C) Resultado da segmentação, imagem binarizada onde a cor azul representa os poros da amostra e D) Tabela resultante da ferramenta Material Statistics, a qual fornece a contagem de pixels da imagem binarizada ($C_p = 1029444$ e $C_r = 7502604$).

4.1.4 Obtenção de tamanho de poros e grãos

Após a segmentação e utilização do filtro de erosão, espaços vazios internos aos grãos, gerados pela ferramenta *Erosion* ou por mudança de cor, são preenchidos com o emprego da ferramenta *Remove Small Holes*. Para resultados mais precisos é necessário remover os efeitos de borda, ou seja, grãos incompletos que são cortados quando a região de interesse é selecionada, logo a ferramenta *Border Kill* é utilizada. A etapa final consiste na individualização dos grãos e poros por meio da ferramenta *Labeling*. O passo a passo da obtenção de tamanho de poros e grãos é ilustrado na Figura 16.

A partir disso é possível aplicar ferramentas de contagem e mensuração para cada partícula, sendo assim, aplica-se a ferramenta *Label Analysis* que é composta por grupos de medidas que permitem a obtenção de diversas propriedades de partículas. Deve-se selecionar o grupo de medidas desejado (Figura 17A) e o produto é uma tabela de dados, com informação de cada grão ou poro da amostra (Figura 17B). Nesta etapa foram medidos diâmetro equivalente e área de poros e grãos.

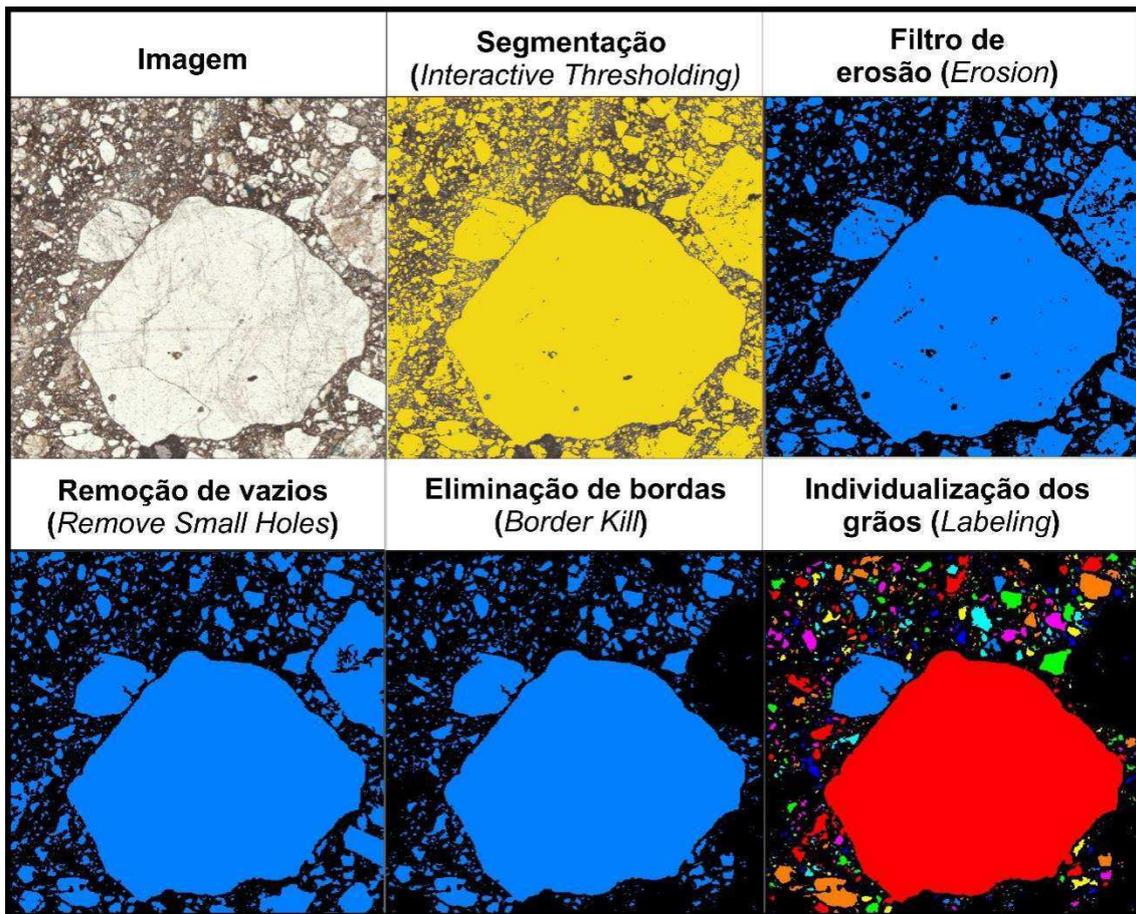


Figura 16: Ilustração das etapas envolvidas na obtenção das dimensões de grãos e poros.

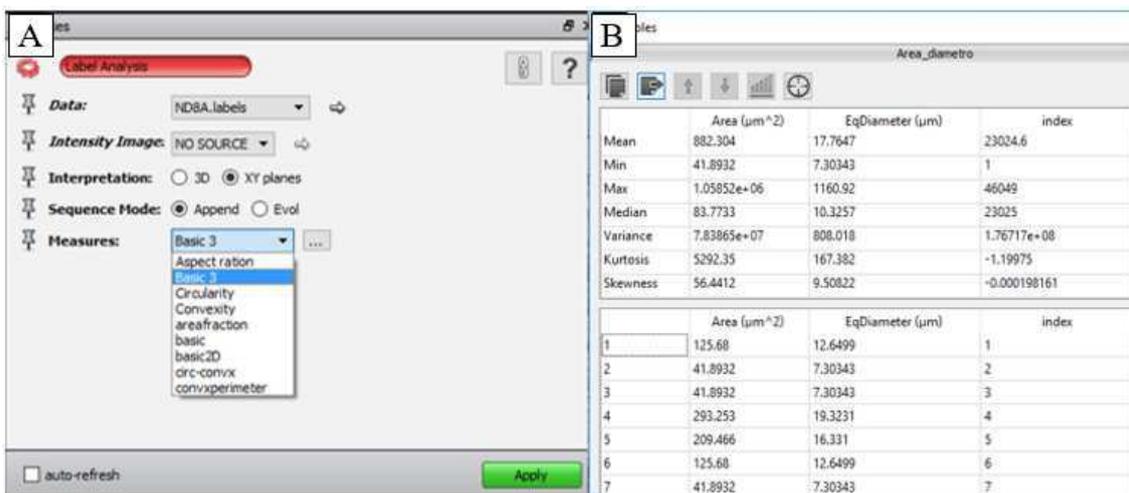


Figura 17: Uso e produto da ferramenta *Label Analysis*. A) Seleção do grupo de medidas; B) Tabela contendo as informações de área e diâmetro equivalente das partículas.

4.1.5 Parâmetros de forma dos grãos

Após o término das etapas citadas do item 4.1.1 ao 4.1.4, a imagem com os grãos individualizados é submetida ao filtro *Remove Small Spots*, o mesmo é utilizado para remoção de grãos menores (Figura 18), ou seja, grãos de baixa resolução. Grãos pequenos não apresentam resultados aceitáveis principalmente para os parâmetros de circularidade e convexidade, mascarando em especial o valor médio destas propriedades. Desta forma a remoção de pequenos grãos torna o resultado mais confiável e real. Em grande parte das amostras foram removidos os grãos menores que 250 μm .

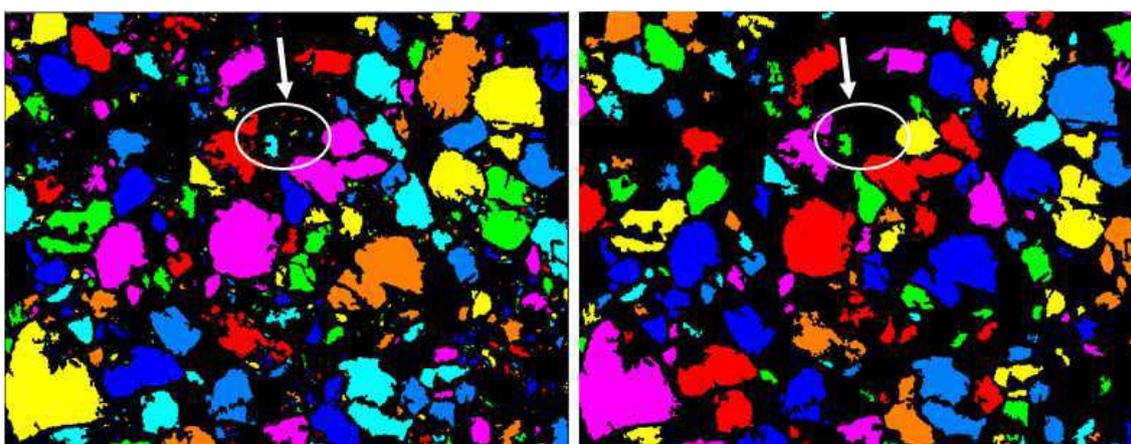


Figura 18: Imagem antes e após a remoção de grãos menores. O antes é mostrado na imagem à esquerda e o depois na imagem à direita, com destaque indicado pela seta.

Após a remoção de pequenas partículas a ferramenta *Label Analysis* é aplicada com grupo de medidas configurado para obtenção dos seguintes parâmetros: *length* (máximo diâmetro de *Feret*), *width* (mínimo diâmetro de *Feret*), área, perímetro e perímetro convexo total. Com estes dados é possível calcular a razão de aspecto, circularidade e convexidade dos grãos, conforme as seguintes equações:

$$\text{Razão de aspecto} = \frac{\text{Width}}{\text{Length}} \quad (7)$$

$$\text{Circularidade} = \frac{4\pi \times \text{Área}}{\text{Perímetro}^2} \quad (8)$$

$$\text{Convexidade} = \frac{\text{Perímetro convexo total}}{\text{Perímetro}} \quad (9)$$

4.2 Grau de esfericidade e arredondamento

Com intuito de identificar os padrões de arredondamento e esfericidade das amostras estudadas, foram realizados testes de convexidade e circularidade. O teste foi realizado em grãos de uma imagem padrão que representa as relações entre esfericidade e arredondamento (Figura 5).

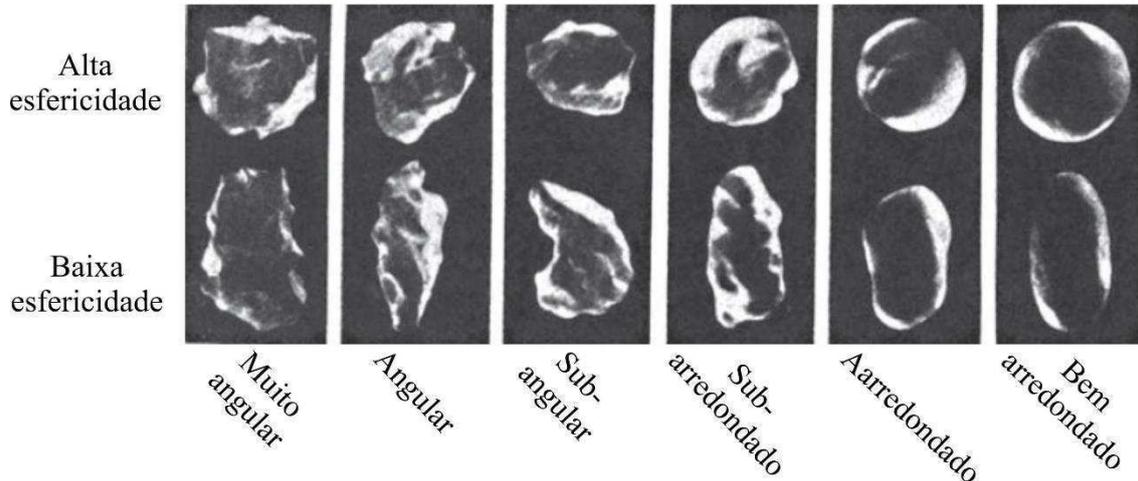


Figura 5: Padrão utilizado para análise de esfericidade e arredondamento em 2D.
Fonte: Powers, 1953.

Para tal, a Figura 5 foi submetida às etapas de segmentação, filtragem e extração de parâmetros texturais (circularidade e convexidade). O resultado deste teste pode ser visualizado na Figura 19.

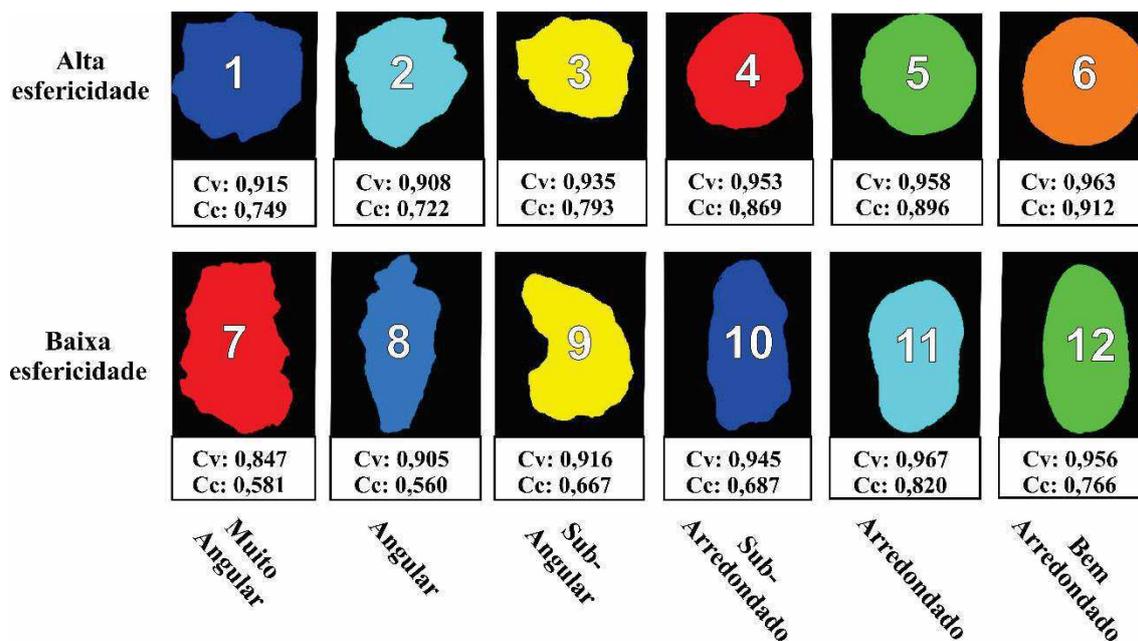


Figura 19: Resultado da análise de imagem para Figura 5. Onde Cv refere-se à convexidade e Cc à circularidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são referentes a análise digital de 23 amostras, das quais 21 são do afloramento 1 e 2 do afloramento 2. As amostras do afloramento 1 foram extraídas numa região de intensa deformação, onde foram coletadas 19 amostras com bandas e 2 sem bandas de deformação, porém todas são deformadas. As bandas de deformação das amostras estudadas são todas cataclásticas.

Já as amostras provenientes do afloramento 2 não apresentam deformação e são tratadas como rocha hospedeira. As condições de tensão e direção de deformação das amostras deformadas foram previamente definidas e são apresentadas na Tabela 2. As amostras com bandas de deformação também serão analisadas em conjunto. As quais serão comparadas às amostras sem bandas e não deformadas, investigando assim o efeito geral das bandas de deformação nos aspectos texturais e na porosidade.

Tabela 2: Descrição das amostras e condições de regime de deformação previamente definidos, onde **n** representa o número de amostras.

Nomenclatura	Afloramento	N	Condição das amostras
NW	1	3	Amostras com bandas de deformação formadas em evento transcorrente de direção NW
NE	1	9	Amostras com bandas de deformação formadas em evento transtensivo com direção NE
NS	1	3	Amostras com bandas de deformação formadas em evento transtensivo com direção NS, consiste em inflexão de bandas de direção NE
EW	1	4	Amostras com bandas de deformação formadas em evento distensivo de direção EW
SB	1	2	Amostras coletadas em zona intermediária, deformadas, mas sem presença de bandas de deformação.
ND	2	2	Rocha com maior preservação das condições originais, possivelmente é modificada apenas por processos sedimentares.
CB*	1	19	Conjunto de todas as amostras com bandas de deformação, ou seja, grupo formado pelas amostras dos grupos NW, NE, NS e EW.

* O conjunto de amostras CB engloba as amostras dos agrupamentos EW, NW, NS e NE, e é usado para investigar os efeitos das bandas de deformação, sem considerar a cinemática.

Para tanto, os resultados serão apresentados de duas formas, a primeira irá tratar do efeito das bandas de deformação nos aspectos texturais e porosidade (CB, ND e SB), já o segundo será direcionado ao efeito dos diferentes tipos de cinemática nas

propriedades dos arenitos conglomeráticos com banda de deformação (NW, EW, NE, NS, ND e CB).

5.1 Efeito das bandas de deformação nas propriedades das rochas

5.1.1 Análise do tamanho de grãos

O intervalo de diâmetro de grãos para todas as amostras varia de 6 a 8000 μm . As amostras com maior porcentagem de área ocupada por grãos grandes pertencem ao grupo ND, que representa a rocha sem deformação e, portanto, com grãos mais preservados. A maior ocupação de área por grãos nas amostras ND está entre 1000 e 5000 μm (Figura 20). As amostras submetidas a deformação apresentam redução de clastos. Principalmente as amostras CB (Figura 20), onde a maior concentração de grãos ocorre entre 50 e 1000 μm . As amostras do grupo CB apresentam quebra, reorientação e rearranjo dos grãos, no núcleo da falha. Este mesmo comportamento foi observado Aydin (1978) e Antonellini et al. (1994), o qual está associado a origem de uma banda cataclástica. A considerável redução de diâmetro dos grãos encontrada nas amostras deformadas por bandas de deformação provavelmente ocorre pelo processo de cominuição dos grãos, gerado pela cataclase da rocha. Em seus estudos Aydin (1978) e Antonellini et al. (1994) que a quebra, compactação e esmagamento de grãos são os processos cataclásticos mais comuns.

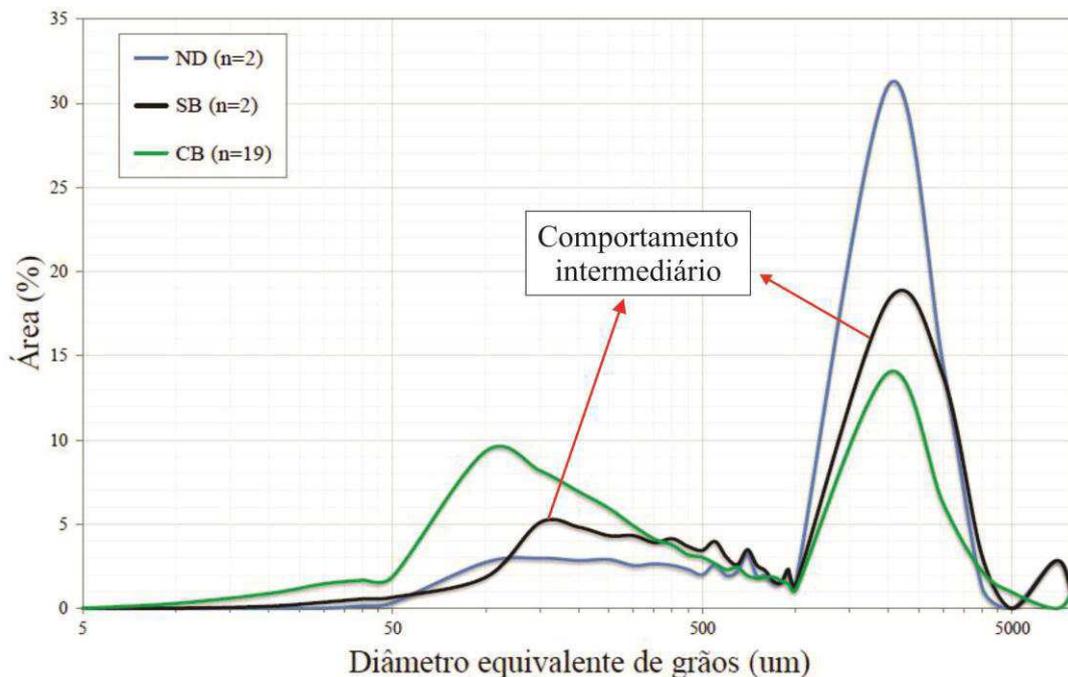


Figura 20: Gráfico de diâmetro equivalente de grãos versus área ocupada.

A curva preta (Figura 20) no gráfico de diâmetro equivalente de grãos versus porcentagem de área ocupada é praticamente central, limitada superior e inferiormente pelas amostras dos grupos CB e ND. Esse comportamento intermediário é característica das amostras SB, pois elas recebem um nível de tensão inferior às amostras CB, que resulta no rearranjo dos grãos, fraturas sutis e quebra parcial dos grãos. As amostras deformadas que não apresentam bandas de deformação (SB) localizam-se numa região entre bandas. Os efeitos na distribuição de tamanho de grãos nestas amostras foram intermediários.

O diâmetro médio dos grãos na banda de deformação chega a ser uma ordem de grandeza menor que o da rocha não deformada. A partir da Figura 21 é possível observar que o diâmetro médio dos grãos da rocha não deformada (ND) decresce da ordem das centenas para as dezenas nas rochas SB e CB. Logo a redução da média do diâmetro de grãos em relação as rochas ND foi de 69% para as amostras SB e 79% para as CB.

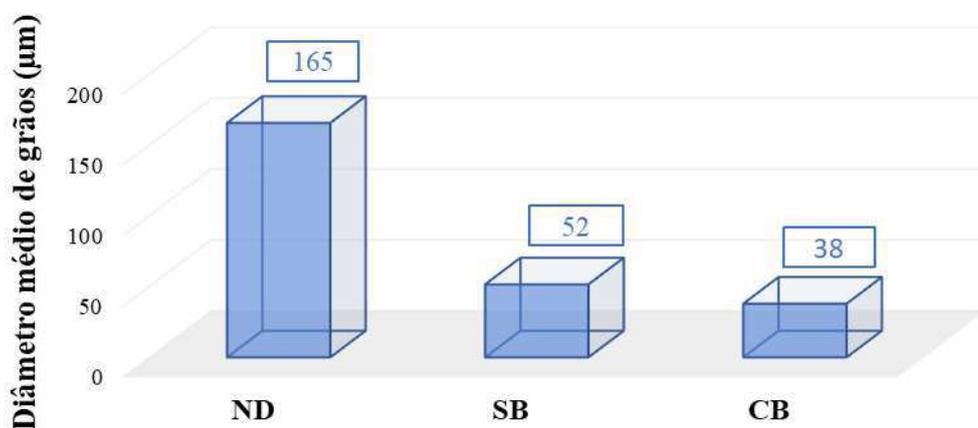


Figura 21: Relação entre o tamanho médio de grãos dos agrupamentos ND, SB e CB.

5.1.2 Análise de poros

O diâmetro equivalente de poros das amostras estudadas está no intervalo de 6 a 4000 µm (Figura 22). A relação entre diâmetro de poros e porcentagem de área revelou três intervalos preferenciais para distribuição dos mesmos (Figura 22). O primeiro intervalo concentra poros entre 6 e 50 µm e representa a microporosidade da rocha, o

segundo intervalo, ou mesoporosidade, encontra-se entre 50 e 1000 μm , e por fim o terceiro pico de concentração de poros está entre 1000 e 4000 μm e representa a macroporosidade da rocha.

As amostras inseridas na condição de não deformadas (ND) são aquelas que apresentam maior parte de sua área ocupada por poros pequenos, o que remete aos maiores valores de microporosidade entre todas as condições estudadas. Além disso, apresentam boa concentração de mesoporos, entretanto são desprovidas de macroporosidade.

A ausência de grandes poros pode ser explicada pelo arranjo dos grãos nesta rocha. As amostras do agrupamento ND possuem grãos irregulares tanto em forma como em tamanho (Figura 23), essas características não permitem uma boa conexão dos poros, e dessa forma apenas microporosidade e mesoporosidade são identificadas. Entretanto, menores diâmetros de poros não implicam redução de porosidade. Ao observar a Figura 24, nota-se que apesar do menor tamanho médio de poros as amostras do grupo ND apresentam o segundo maior valor de porosidade: 7,62%.

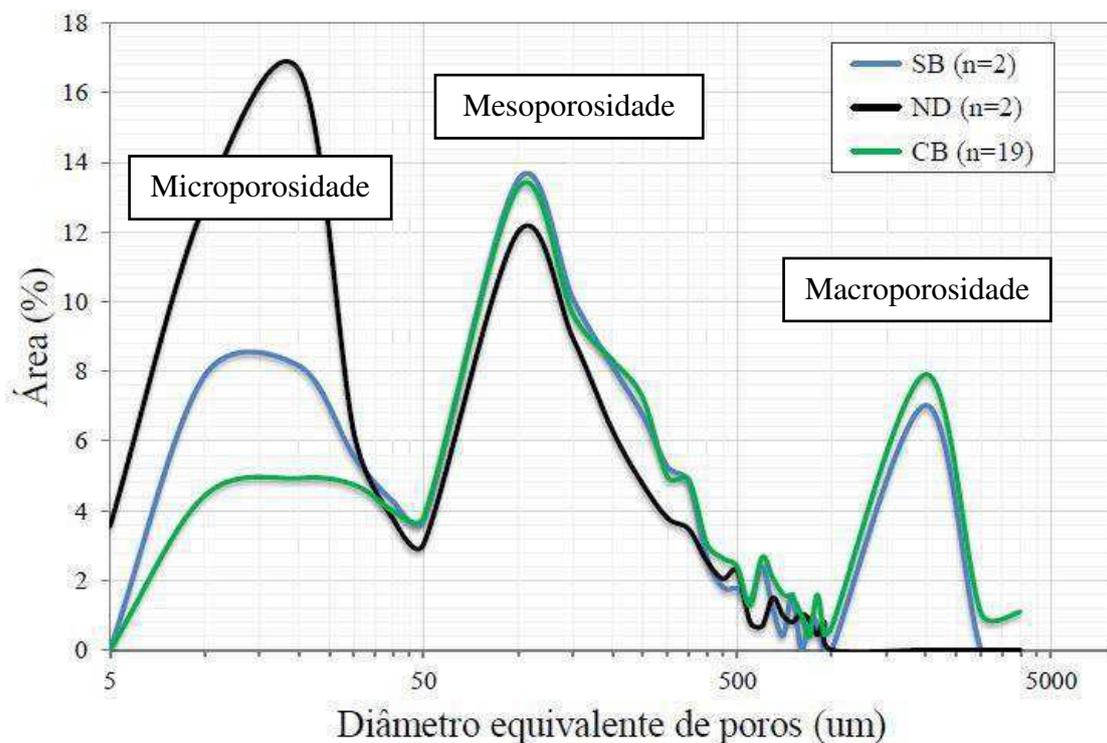


Figura 22: Gráfico de diâmetro equivalente de poros versus área ocupada.

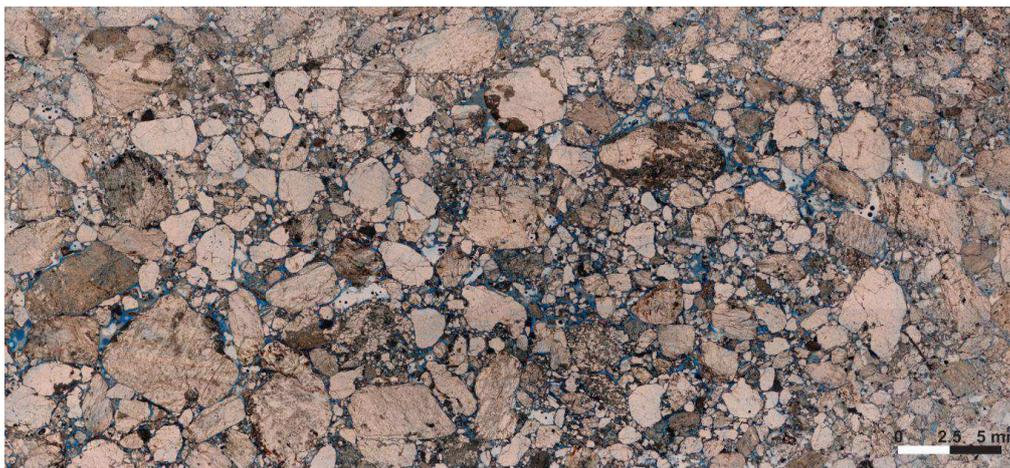


Figura 23: Seção delgada da rocha não deformada, onde os poros são representados pela cor azul. A diferença nas classes (Tabela 2) de grãos presentes nesta rocha reduzem o espaço poroso e consequentemente o tamanho de poros. A forma irregular dos grãos facilita um empacotamento mais apertado, pois os grãos pequenos se alojam entre grandes grãos.

O conjunto de amostras SB, deformadas e sem bandas de deformação, apresenta poros mais distribuídos, mas a maior concentração de poros está na região da mesoporosidade (Figura 22). O sensível fraturamento e a quebra parcial dos grãos, permitiu uma nova acomodação dos mesmos, uma melhora nos aspectos texturais que se referem a arredondamento e esfericidade, resultando no aumento dos mesoporos e neste caso da porosidade da rocha quando comparada às amostras ND (Figura 24). O agrupamento de amostras SB revelou o aumento de 13% na porosidade em relação a rocha hospedeira, ND.

O pico de concentração de tamanho de poros para as amostras CB também está na região da mesoporosidade. O comportamento da distribuição de tamanho de poros foi muito similar entre as amostras SB e CB. Entretanto as amostras com bandas de deformação apresentaram a maior redução na porcentagem de área ocupada por microporos. A diminuição gerada pelo processo de formação de uma banda de deformação cataclástica comumente reduz a porosidade da rocha deformada (Fossen & Bale, 2007; Antonellini et al., 1994), sendo assim a porosidade das rochas com bandas de deformação é de 2.6%. Assim, foi constatada a redução de 66% da porosidade das rochas CB em relação as rochas não deformadas (ND). Comportamento semelhante foi obtido por Aydin (1978), identificou-se que a redução da porosidade durante a formação da banda de deformação é maior que 60% quando comparada a rocha sem deformação.

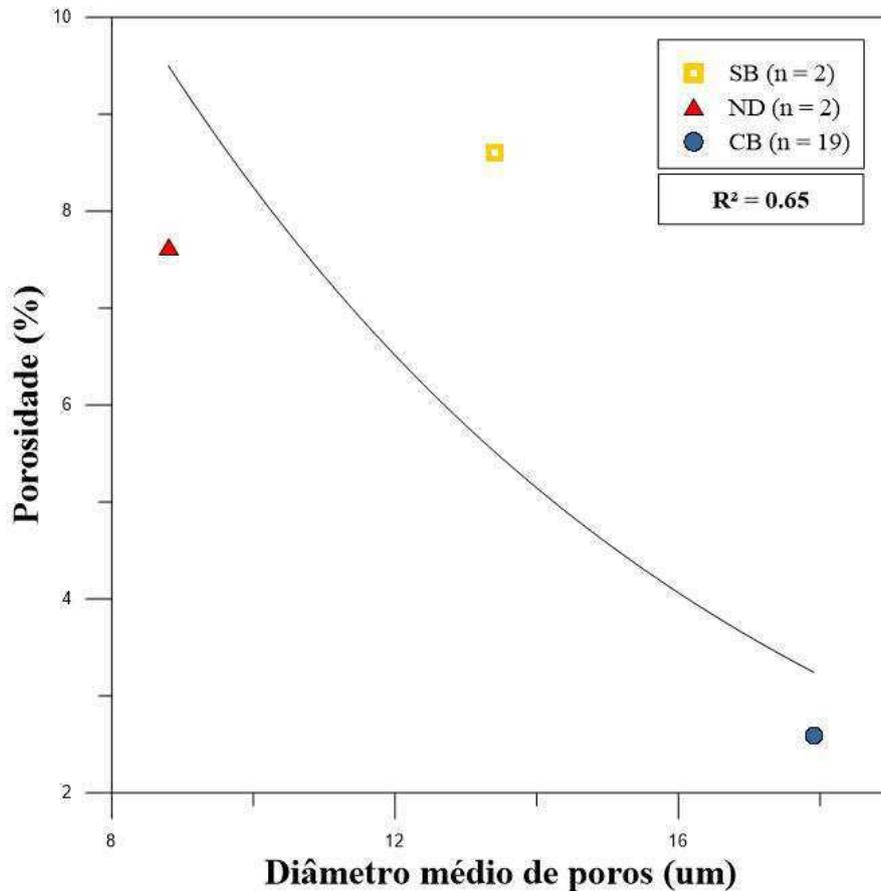


Figura 24: Relação entre porosidade e diâmetro médio de poros. Ambas propriedades apresentam uma aproximação exponencial com coeficiente de determinação $R^2 = 0.65$.

A maior média de tamanho de poros, 17.91 μm , está associada à menor porosidade (Figura 24) e pertence ao agrupamento de amostras com bandas de deformação (CB). O menor valor médio é apresentado pelas rochas não deformadas, 8.80 μm , enquanto as amostras SB possuem valor médio de 13.42 μm . A relação entre diâmetro médio de poros e porosidade, apresentada na Figura 24, não é bem definida, entretanto percebe-se que o aumento de porosidade tende a ser inversamente proporcional ao crescimento de diâmetro médio de poros. Isto é observado principalmente nos agrupamentos de amostras CB e ND. A redução do tamanho de grãos e o novo rearranjo dos grãos tanto nas amostras SB e CB aumentou a conectividade dos poros. Neste caso poros antes não conectados passam a se conectar resultando no aumento do tamanho dos poros (Figura 25), pois a análise de imagens permite a mensuração do diâmetro equivalente do poro efetivo. Entretanto, essa conexão de poros não significa aumento na porosidade absoluta, mas sim na porosidade efetiva, o que corresponde ao aumento do tamanho do poro sem acréscimo na porosidade. Na Figura 25 observa-se que o rearranjo dos grãos gerou uma zona de

maior porosidade efetiva (seta preta na Figura 25), ou seja, maior tamanho de poro, como também uma zona menos conectada (seta vermelha na Figura 25), onde os poros são isolados e apresentam tamanho inferior a região com maior porosidade efetiva.

As amostras SB apresentam o maior valor de porosidade e valor intermediário de diâmetro médio de poros, pois zonas intermediárias de bandas de deformação estão propícias a maior empacotamento que a rocha hospedeira reduzindo assim o volume dos poros. Entretanto o aumento do contato entre os grãos provoca fraturas resultando em porosidade intragranular (Figura 26), aumentando a presença de poros maiores. Isso contribui para o aumento da porosidade em relação à rocha não deformada, como também na redução da média de tamanho de grãos.

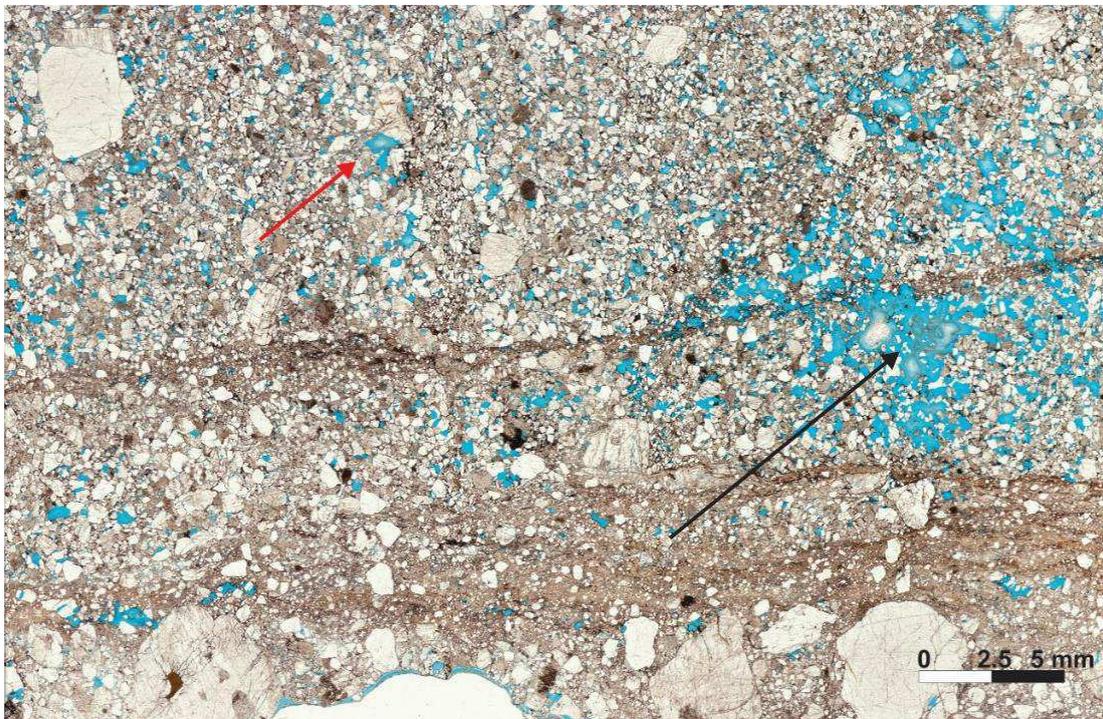


Figura 25: Amostra com banda de deformação indicando regiões com presença ou não de poros conectados. A seta preta indica região com boa conexão de poros, já a seta vermelha indica uma situação inversa à anterior, um poro isolado.

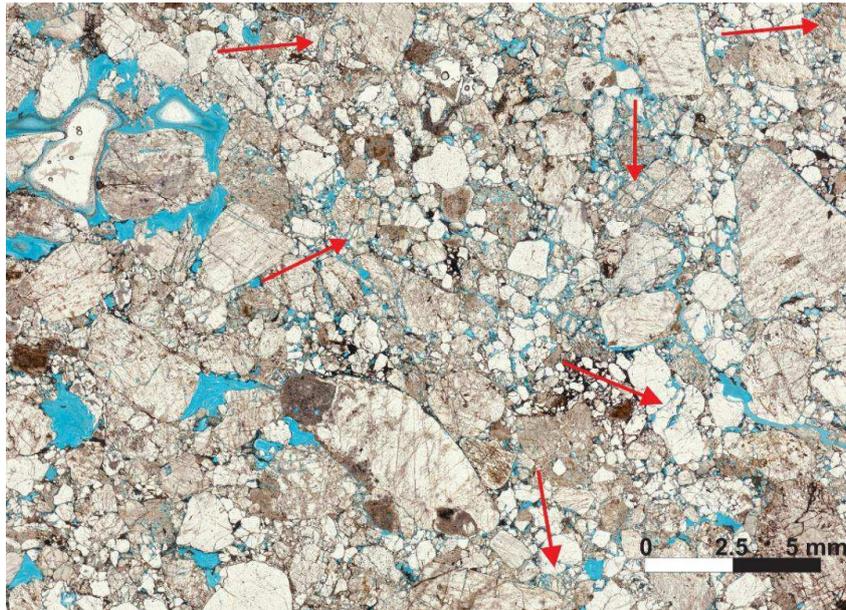


Figura 26: Microfotografia de amostra deformada, sem banda de deformação, SB. As setas vermelhas indicam algumas das regiões onde o fraturamento dos grãos gerou porosidade intragranular.

Em complemento, também foi observada uma relação exponencial inversamente proporcional entre tamanho médio de grãos e poros (Figura 27), com índice de correlação $R^2 = 0.90$. Logo entende-se que a redução do diâmetro dos grãos causada pela deformação cataclástica resultou no aumento do tamanho dos poros através da melhoria da conexão dos poros.

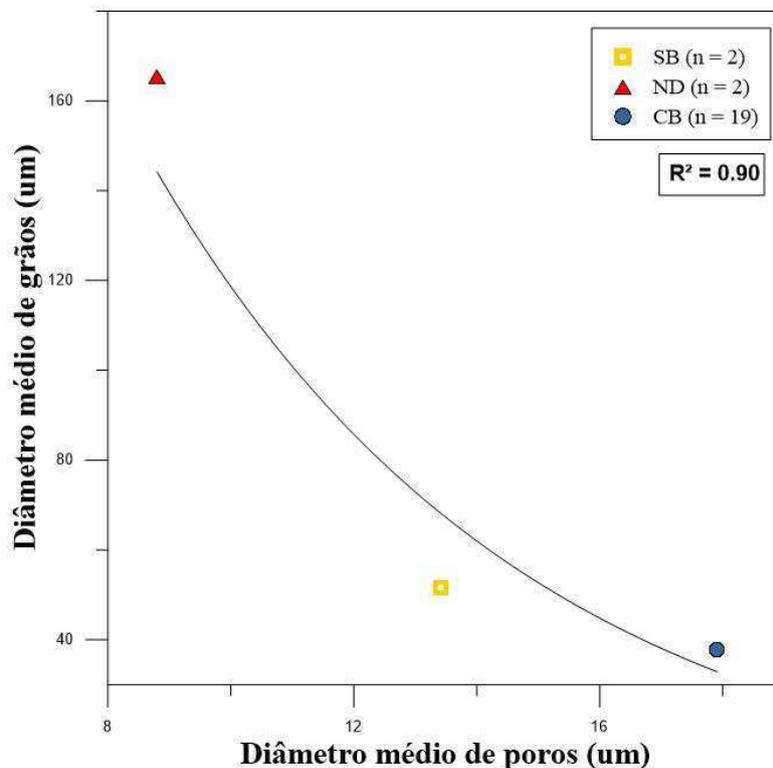


Figura 27: Gráfico correlacionando o diâmetro médio de poros e grãos das amostras estudadas.

5.1.3 Avaliação textural dos grãos

Os parâmetros texturais avaliados são circularidade, convexidade e razão de aspecto. Onde a circularidade e convexidade são medidas representativas da esfericidade e arredondamento, respectivamente. De acordo com os métodos apresentados no item 4.2 foi gerado um gráfico (Figura 28) que correlaciona as informações de convexidade e circularidade, com os graus de arredondamento e esfericidade de imagem padrão (Figura 5) para investigação destes últimos parâmetros.

As amostras de 1 a 6 na Figura 28 representam grãos de alta esfericidade, já as enumeradas de 7 a 12 apresentam baixa esfericidade. Observa-se que o conjunto de amostras com alta esfericidade possui maior circularidade, enquanto as amostras com baixa esfericidade apresentam maiores valores de convexidade. Também foi possível definir os valores limitantes em relação ao grau de arredondamento e esfericidade, indicados nas linhas tracejadas da Figura 28 e definidos na Tabela 3.

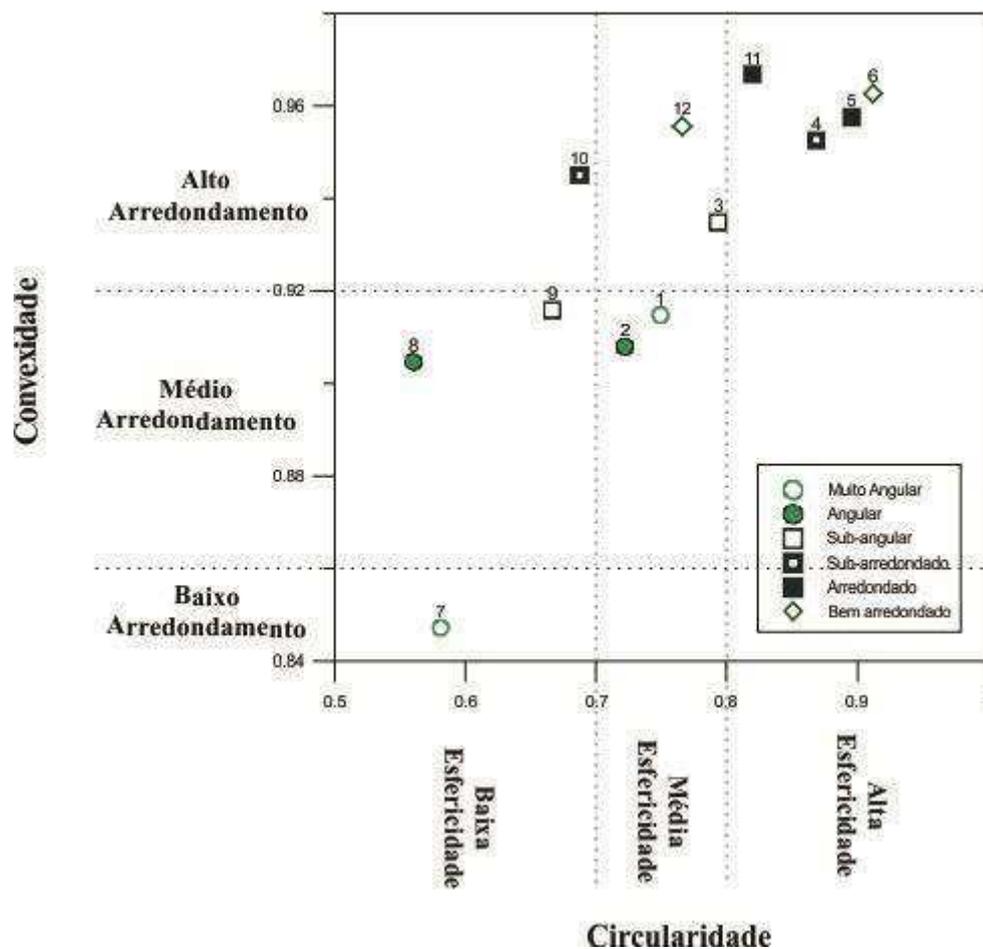


Figura 28: Relação entre esfericidade e circularidade e entre arredondamento e convexidade.

Tabela 3: Limítrofes para definição do grau de esfericidade e arredondamento.

	Baixo	Médio	Alto
Arredondamento	$Cv < 0.88$	$0.88 \geq Cv \geq 0.92$	$Cv > 0.92$
Esfericidade	$Cc < 0.70$	$0.70 \geq Cc \geq 0.80$	$Cc > 0.80$

* Cv é igual a convexidade e Cc a circularidade

Os valores médios de circularidade das amostras estudadas não ultrapassam a limítrofe 0.5 (Figura 29). Logo, de acordo com a Tabela 3 todas as amostras estão inseridas no contexto de baixa esfericidade. A rocha hospedeira ND, controlada apenas por fatores sedimentares, apresenta o menor valor médio de circularidade 0.30 (Figura 29). Por se tratar de arenitos conglomeráticos com grãos imaturos, mal selecionados (Nogueira et al., 2004; Carvalho e Leonardi, 1992), e que foram depositados próximos a rocha fonte (Costa et al., 2010), as rochas não deformadas apresentam grãos pouco retrabalhados, alongados e menos semelhantes a um círculo.

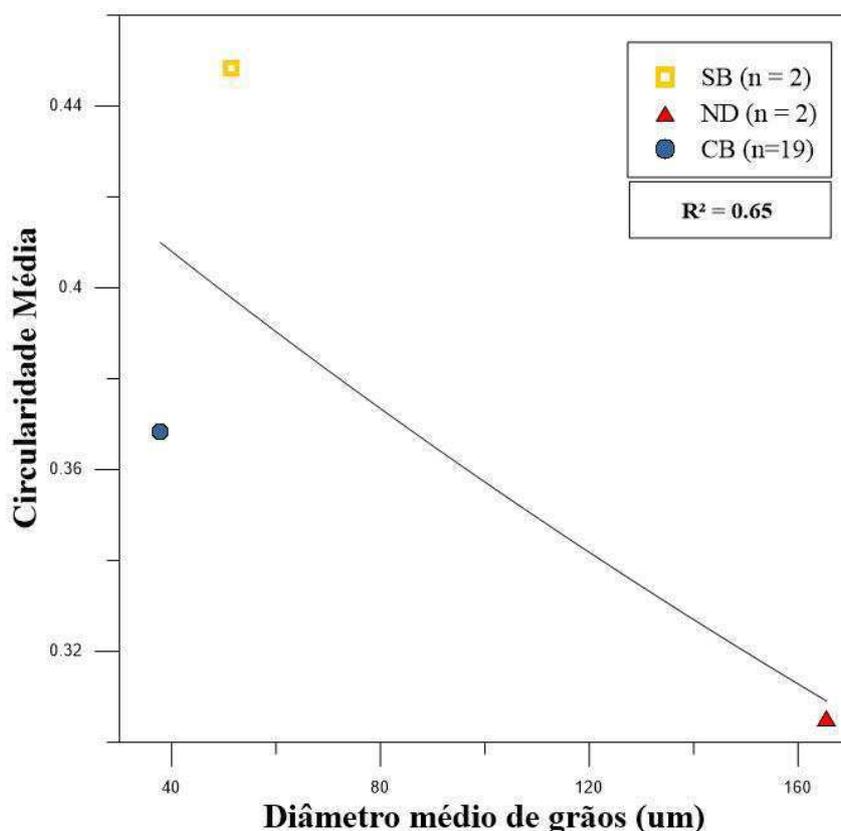


Figura 29: Gráfico de circularidade média versus diâmetro médio de grãos. A circularidade varia de 0 a 1, quanto mais próximo à forma de um círculo maior será o valor de circularidade, já os menores valores são referentes a grãos alongados.

Os maiores valores médios de circularidade são referentes ao grupo de amostras SB, 0.45, o maior contato entre grãos ocasionado pelo empacotamento mais apertado em relação a rocha hospedeira, provoca a suavização da superfície do grão por meio do atrito gerado. O resultado são grãos menos alongados e com formas mais próximas de um círculo.

O grupo de amostras CB possui valor de circularidade média 0.37, apresenta circularidade menor que as amostras SB e maior que a rocha não deformada ND. A cominuição gerada pela cataclase quebra os grãos, muitas vezes em mais que dois pedaços e sem forma definida, porém mais alongados (Figura 30). Isso reduz significativamente a circularidade média das amostras. Dessa forma o diâmetro dos grãos não é a principal variável que interfere nos valores de circularidade das amostras, como mostrado na Figura 29, onde é possível observar uma correlação exponencial aproximadamente inversa com coeficiente de determinação $R^2 = 0.65$.

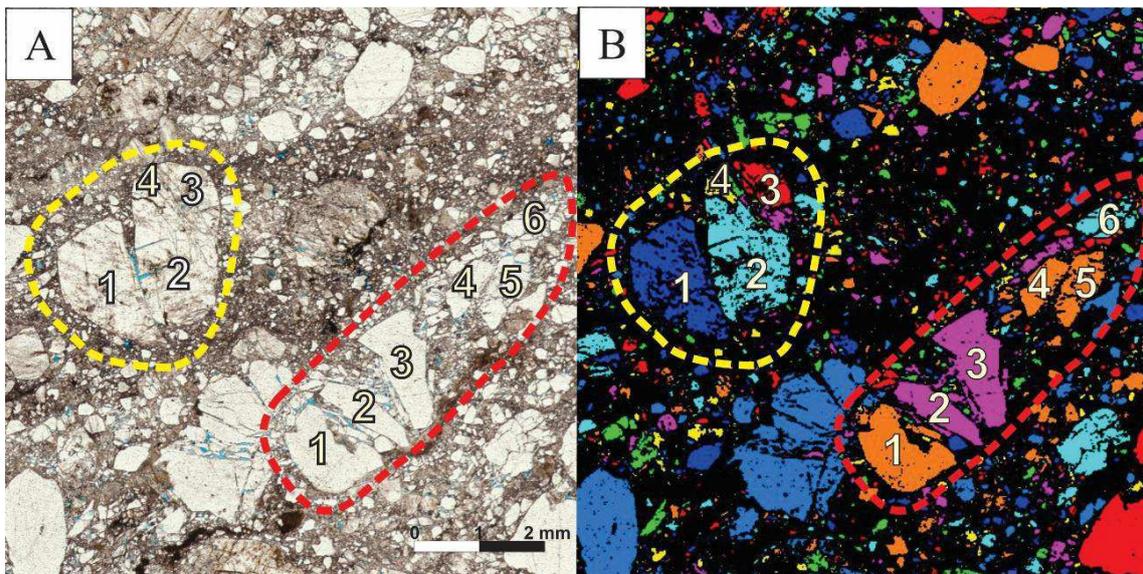


Figura 30: Quebra dos grãos em amostra com banda de deformação, as regiões contornadas por formas pontilhadas correspondem a um grupo de grãos que antes da deformação possivelmente constituíam apenas um grão. A) Microfotografia de seção delgada onde destacam-se grãos quebrados, a numeração indica a maioria dos grãos gerados na quebra; B) Imagem segmentada com grãos individualizados, em destaque para as linhas pontilhadas vermelha e amarelo, as mesmas representam grãos quebrados e os números indicam a individualização dos novos grãos.

O valor médio de convexidade para os três agrupamentos estudados não ultrapassa 0.76, dessa forma estes podem ser classificados como rochas de baixo arredondamento (Tabela 3). A convexidade das amostras estudadas apresenta uma relação inversamente proporcional com o diâmetro médios dos grãos (Figura 31), com índice de correlação $R^2 = 0.96$, logo grãos menores são mais convexos.

As amostras menos convexas pertencem às rochas não deformadas, com média de 0.71, pois apresentam grãos maiores com menor retrabalhamento durante a fase deposicional. Entretanto, quando as rochas deformadas são analisadas, observa-se um acréscimo nos valores médios de convexidade, 0.76 para o agrupamento SB e 0.75 para as amostras com banda de deformação, CB. O aumento da convexidade nas amostras deformadas ocorre pelo maior contato entre os grãos, gerado pela compactação da rocha ao longo da formação da banda. Nas amostras SB as arestas dos grãos são suavizadas e, em consequência, os grãos ficam mais arredondados e convexos, entretanto as amostras com banda de deformação também apresentam fraturamento de grãos. O fraturamento origina grãos menos uniformes e mais angulares (Figura 30) que os grãos das amostras deformadas, porém sem banda. Consequentemente, há a redução da convexidade média das amostras CB quando comparadas às amostras SB.

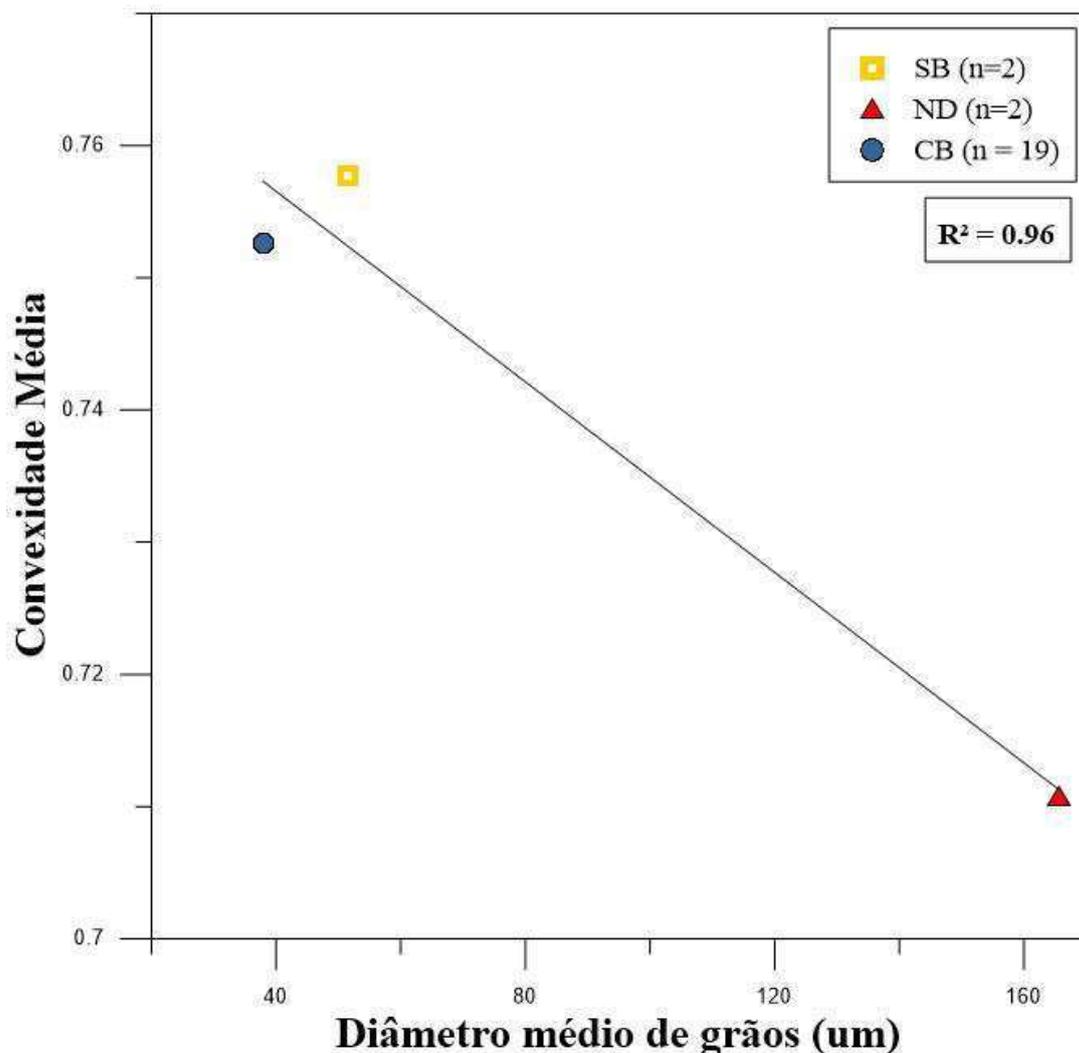


Figura 31: Relação entre o tamanho médio dos grãos com a convexidade.

A convexidade e a circularidade das amostras estudadas apresentam uma relação logarítmica (Figura 32), com coeficiente de correlação $R^2 = 0.78$. A partir da Figura 32 nota-se que o aumento da circularidade provoca o aumento da convexidade e vice-versa. Dessa forma foi observado que o arredondamento e esfericidade das amostras estudadas, representados em 2D pelos parâmetros convexidade e circularidade, são praticamente dependentes, embora sejam a propriedades comumente independentes igualmente observado por Boggs (2009) e Selley (2000). Apesar da presença de bandas de deformação aumentar os valores de circularidade e convexidade, a mudança não é suficiente para aumentar o grau de esfericidade e arredondamento (Tabela 3) no caso aqui estudado.

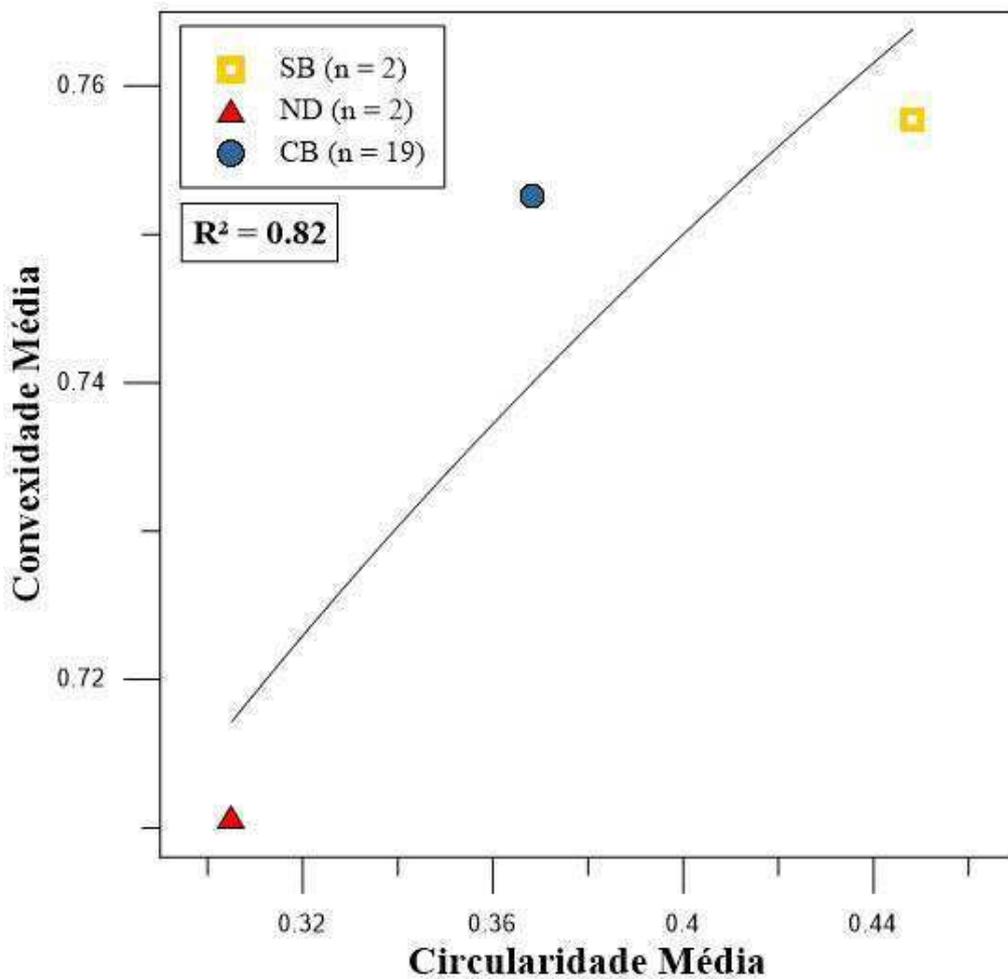


Figura 32: Gráfico de circularidade média versus convexidade média.

A razão de aspecto é um parâmetro de alongação de partículas, desta forma há uma leve relação entre esta propriedade e o tamanho dos grãos (Figura 33), pois geralmente grãos pequenos são menos alongados que grãos maiores. Logo, observa-se

que os maiores valores médios de razão de aspecto correspondem às amostras com banda, CB, pois nelas houve uma considerável redução de grandes grãos devido a cataclase (Figura 20). Mesmo apresentando valor médio de diâmetro de grãos similar aos das amostras CB, a razão de aspecto média das amostras SB é inferior e mais próxima ao valor das amostras sem deformação, ND, pois não há presença considerável de grãos menores que 50 μm (Figura 34).

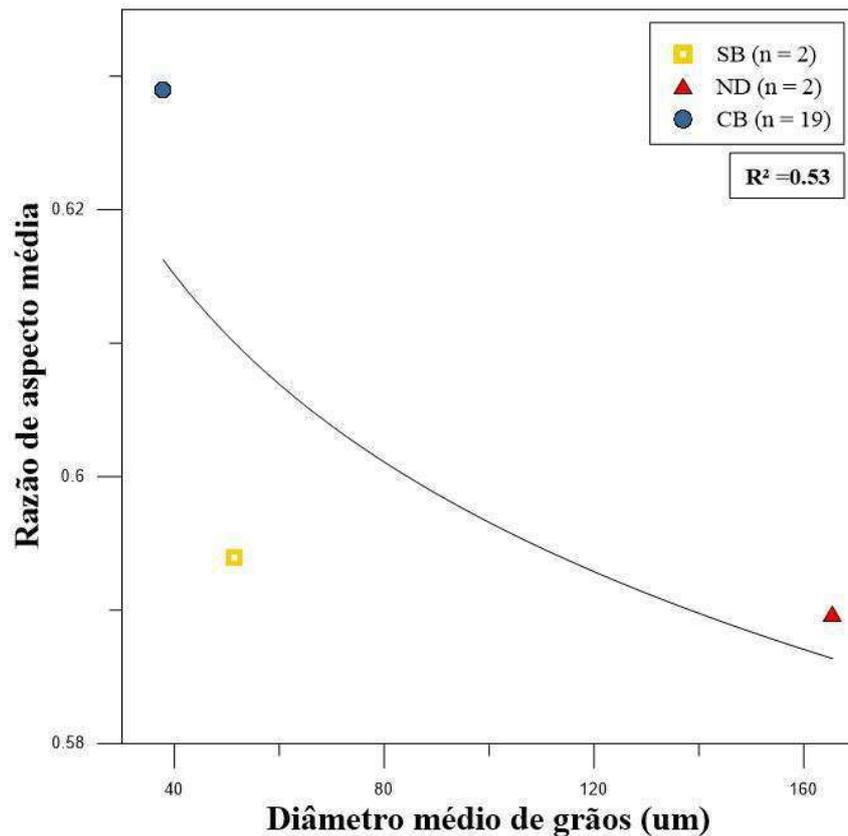


Figura 33: Gráfico de diâmetro médio de grãos versus razão de aspecto.

A frequência de diâmetro de grãos permite uma interpretação mais clara da razão de aspecto que a média do diâmetro dos grãos. Para tanto foram analisados 3 intervalos de tamanho de grãos, o primeiro entre 0 e 50 μm , o segundo entre 50 e 1000 μm , e por fim o intervalo de 1000 a 5000 μm . O resultado desta análise está representado na Figura 34. A maior frequência de grãos abaixo de 50 μm pertence as amostras com banda de deformação (CB), apresentando 79% dos grãos neste intervalo. Os agrupamentos ND e SB apresentam valores de frequência abaixo de 50 μm bem inferior ao agrupamento CB, sendo 22% para o ND e 16 % para o SB. Assim, pode-se visualizar que as amostras CB, que apresentam os maiores valores médios de razão de aspecto, são também as que apresentam maior frequência de grãos pequenos. Enquanto

as amostras SB e ND, que apresentam baixa frequência de pequenos grãos, possuem menor razão de aspecto média. Campaña et al. (2016), aplicaram a circularidade, convexidade e razão de aspecto para o estudo de partículas sedimentares, buscando interpretar o tipo de transporte e de fonte sedimentar. Em relação à razão de aspecto, os autores concluíram que os resultados apresentaram difícil interpretação e menos eficiência na identificação dos processos sedimentares. Entretanto em rochas deformadas, nas quais houve cominuição dos grãos a razão de aspecto pode ser um indicativo de intensidade de deformação.

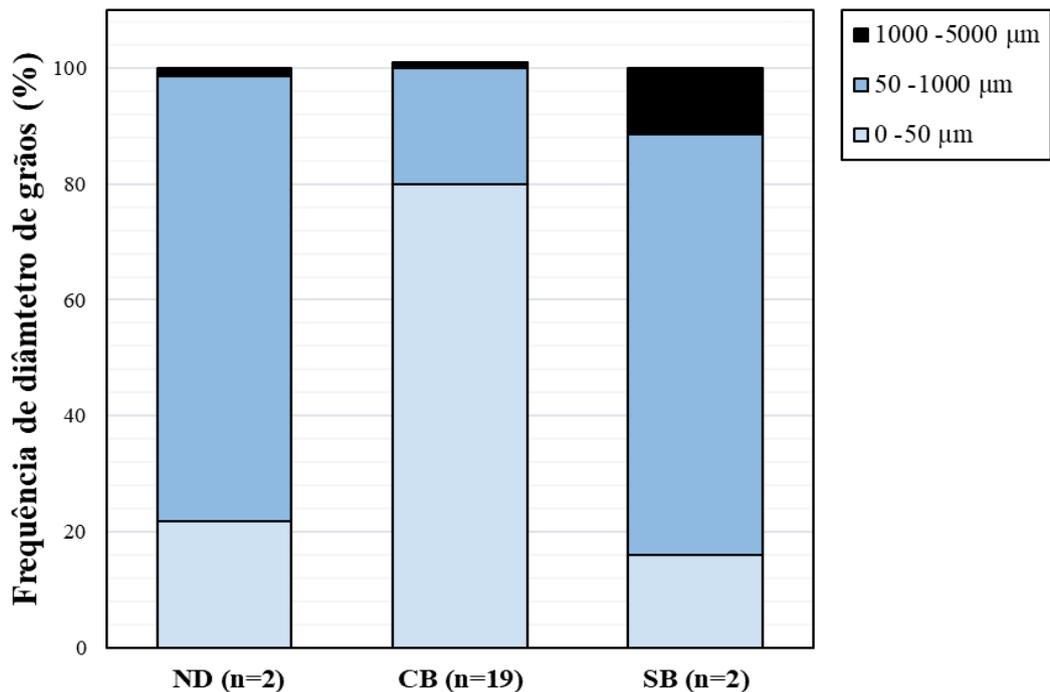


Figura 34: Gráfico de frequência de diâmetro de grãos para os agrupamentos ND, CB e SB. Os intervalos de tamanho de grãos estudados estão entre 0 e 50 μm, 50 e 1000 μm e 1000 e 5000 μm.

Balsamo e Storti (2011) realizaram avaliação textural de arenitos deformados por bandas de deformação cataclásticas através da circularidade, convexidade e razão de aspecto. Os arenitos conglomeráticos falhados apresentaram aumento da convexidade, bem como redução da circularidade e razão de aspecto em comparação aos arenitos conglomeráticos não deformados. Com exceção da convexidade, os outros parâmetros texturais possuem comportamento diferente dos apresentados pelo agrupamento CB. Apesar de também apresentarem intensa cominuição dos grãos, os arenitos conglomeráticos deformados estudados por Balsamo e Storti (2011) são pobremente litificados. Em contraste, os arenitos da Formação Antenor Navarro possuem alto índice de litificação. Logo, isto pode ser um fator determinante para diferenciação do

comportamento da circularidade e razão de aspecto, pois em cada situação a resposta a tensão pode ser diferente, como por exemplo as alterações no empacotamento, no rearranjo e contato dos grãos.

5.2 Efeito da cinemática nas características físicas dos arenitos conglomeráticos

5.2.1 Análise de tamanho de grãos

As amostras com bandas de deformação (NE, NW, NS e EW) apresentam nitidamente maior redução na porcentagem de área ocupada por grãos maiores, e consequentemente um acréscimo de grãos menores (Figura 35). A presença de regimes tectônicos distintos e diferentes direções de aplicação de tensão também afeta a distribuição de tamanho de grãos.

As amostras EW pertencem a um sistema puramente distensivo, onde este foi o evento precursor da formação destas estruturas. As bandas de deformação formadas por este evento são bastante compactadas e o núcleo da banda apresenta alto nível de cominuição, isso aumenta a porcentagem de área ocupada por grãos pequenos, e consequentemente reduz a ocupação por grãos com diâmetro acima de 1000 μm . Desta forma as amostras EW possuem o segundo menor pico na região de grãos acima de 1000 μm , conforme Figura 35.

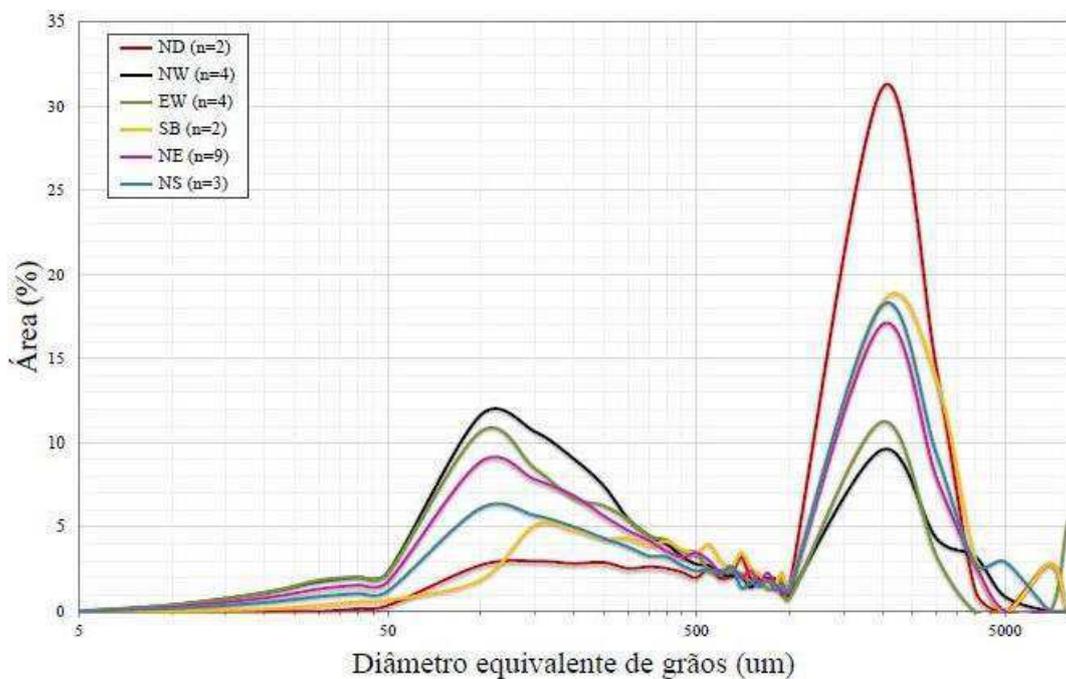


Figura 35: Gráfico relacionando o diâmetro equivalente dos grãos com a porcentagem de área ocupada por grãos de tamanhos distintos. A letra n corresponde ao número de amostras analisadas em cada agrupamento.

O agrupamento de amostras com bandas de deformação originadas por evento transcorrente de direção NW é o mais afetado. E este grupo possui o menor pico de grãos de diâmetro equivalente acima de 1000 μm (Figura 35), e conseqüentemente a maior porcentagem de área ocupada por grãos pequenos. Este comportamento é associado à transcorrência, que provoca arraste e cominuição dos grãos por processo de cisalhamento, o que aumenta o contato entre os mesmos provocando quebra e esmagamento.

Em meio ao grupo de amostras com bandas de deformação, as amostras NE e NS sofrem menos efeitos na distribuição dos grãos, vale ressaltar que ambas foram geradas em evento transtensivo e a deformação de direção NS é oriunda da inflexão do sistema transtensivo NE. As curvas de distribuição de grãos de ambos agrupamentos apresentam formas bem semelhantes, entretanto a porcentagem de área ocupadas por grãos pequenos é maior para as amostras NE e conseqüentemente grãos com diâmetro acima de 1000 μm estão em maior concentração nas amostras NS.

O tamanho médio de grãos dos agrupamentos estudados varia de 35 μm a 165 μm (Figura 36). A maior média é referente à rocha fonte, sem deformação ND, com 165 μm . A rocha deformada, porém sem banda (SB), possui média de diâmetro de grãos de 52 μm . Enquanto as rochas com bandas de deformação dos agrupamentos NS, NE, NW e EW, apresentam respectivamente os valores médios, 41 μm , 40 μm , 36 μm e 35 μm . A porcentagem de redução de diâmetro médio de grãos para o agrupamento com bandas de deformação em relação a rocha sem deformação foi de 75% e 76% para os agrupamentos NS e NE, bem como 78 % e 79% para as rochas dos agrupamentos NW e EW.

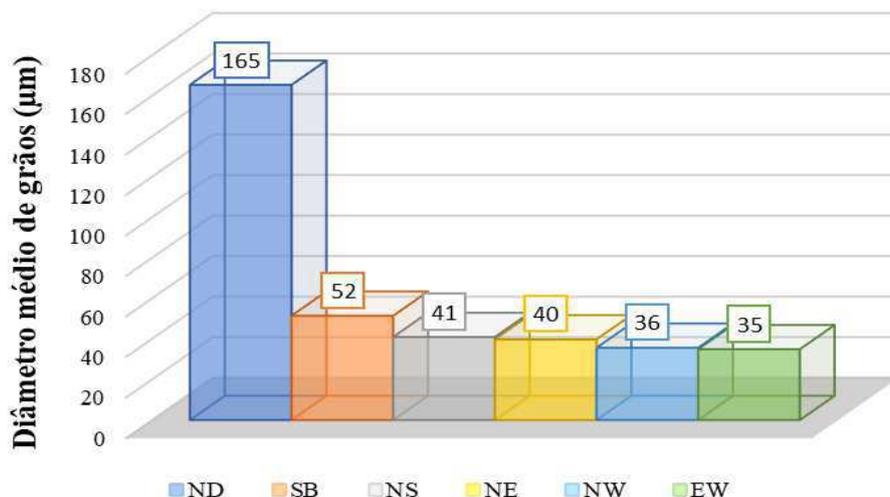


Figura 36: Gráfico de tamanho médio de grãos dos agrupamentos ND, SB, NS, NE, NW e EW.

A redução do tamanho médio de grãos pode ser considerada alta. Ballas et al. (2012a), analisaram diferentes tipos de deformação cataclástica em conglomerados (Tabela 4), rocha fonte, zona de dano, bandas porocataclásticas e cataclásticas. O nível máximo de deformação encontrado em *clusters* com intensa cataclase, nas bandas cataclásticas, representou 54% de redução da média de tamanho de grãos. As zonas de danos estudadas por Ballas et al. (2012a) assemelham-se ao agrupamento SB e a redução da média de diâmetro de grãos encontrada pelos autores foi de 21%, enquanto o agrupamento SB apresenta decréscimo de 69%.

Tabela 4: Resultados de estudo em conglomerados por Ballas et al. (2012a). Cv < 250 representa a porcentagem de grãos em volume abaixo de 250 µm.

Agrupamento	Média de grãos (µm)	Cv < 250 (%)	Porosidade (%)
Rocha fonte	683	-	26 – 29
Zona de dano	Próximo à rocha fonte	-	23 – 33
Bandas porocataclásticas	540	23	19 – 24
Bandas cataclásticas	317	65	2.5 – 18

* Dados: Ballas et al. (2012a).

Outro resultado apresentado por Ballas et al. (2012a) é a concentração volumétrica de grãos com diâmetro abaixo de 250 µm. Observado apenas para as amostras com bandas porocataclásticas e cataclásticas, a análise resultou em 23% e 65% dos grãos abaixo de 250 µm para as condições porocataclástica e cataclástica, respectivamente (Tabela 4). No caso aqui estudado realizou-se análise em relação à área, logo a porcentagem de grãos em área abaixo de 250 µm (Ca < 250) foi de 9% nas amostras sem deformação (Tabela 5). As amostras SB apresentam Ca < 250 µm = 18%,

resultando em um aumento de 97% em relação as rochas sem deformação (ND). Já os agrupamentos NS e NE apresentam concentração de grãos abaixo de 250 μm mais próxima às bandas porocataclásticas apresentadas por Ballas et al. (2012a), sendo 21% para as amostras NS e 29% para as NE. Em consequência, há o acréscimo de grãos menores que 250 μm em 128 % e 224% para as amostras NS e NE quando comparado ao agrupamento ND. Os agrupamentos NW e EW apresentam maior concentração de grãos abaixo de 250 μm , o que já era esperado por apresentarem maior concentração de grãos abaixo de 500 μm (Figura 35). Sendo assim, a concentração de pequenos grãos é de 33% para o agrupamento EW, com um aumento de grãos abaixo de 250 μm de 270% em relação às amostras ND, enquanto as amostras NW apresentam 39% de $\text{Ca} < 250$ e 331% de acréscimo de pequenos grãos (abaixo de 250 μm). Isto implica que as amostras EW e NW estão em um nível maior de intensidade de deformação em relação as bandas porocataclásticas, bem como menor intensidade de deformação em relação as rochas com bandas cataclásticas apresentadas por Ballas et al. (2012a).

Tabela 5: Dados obtidos referente à análise de grãos e poros. $\text{Ca} < 250$ representa a porcentagem de grãos em área abaixo de 250 μm .

Agrupamento	Média de grãos (μm)	$\text{Ca} < 250$(%)	Acréscimo de grãos < 250 μm (%)	Porosidade (%)
ND	165	9	0	7 - 8.4
SB	52	18	97	7.27 - 9.95
NS	41	21	128	0.95 - 1.45
NE	40	29	224	0.58 - 5.19
NW	36	39	331	0.71 - 10.5
EW	35	33	270	0.21 - 2.81

5.2.2 Análise de poros

São avaliados os mesmos intervalos de distribuição do tamanho de poros do tópico 4.1.2, onde foi observado três intervalos preferenciais, o intervalo de microporosidade que concentra poros entre 6 e 50 μm , o intervalo que apresenta poros com diâmetro equivalente entre 50 e 1000 μm , representando a mesoporosidade, e por fim o intervalo de macroporosidade, com pico de concentração de poros entre 1000 e 4000 μm (Figura 37).

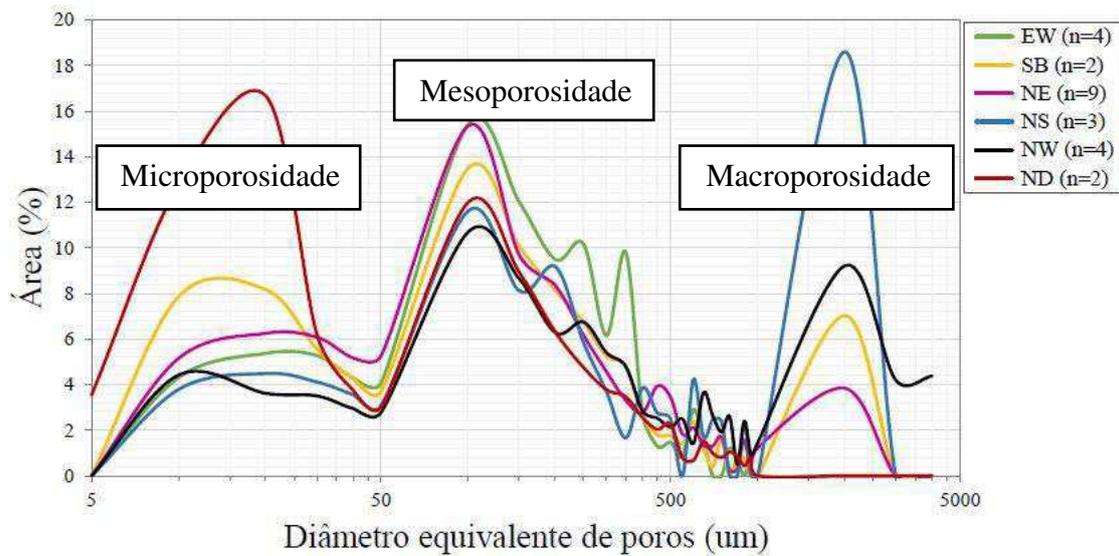
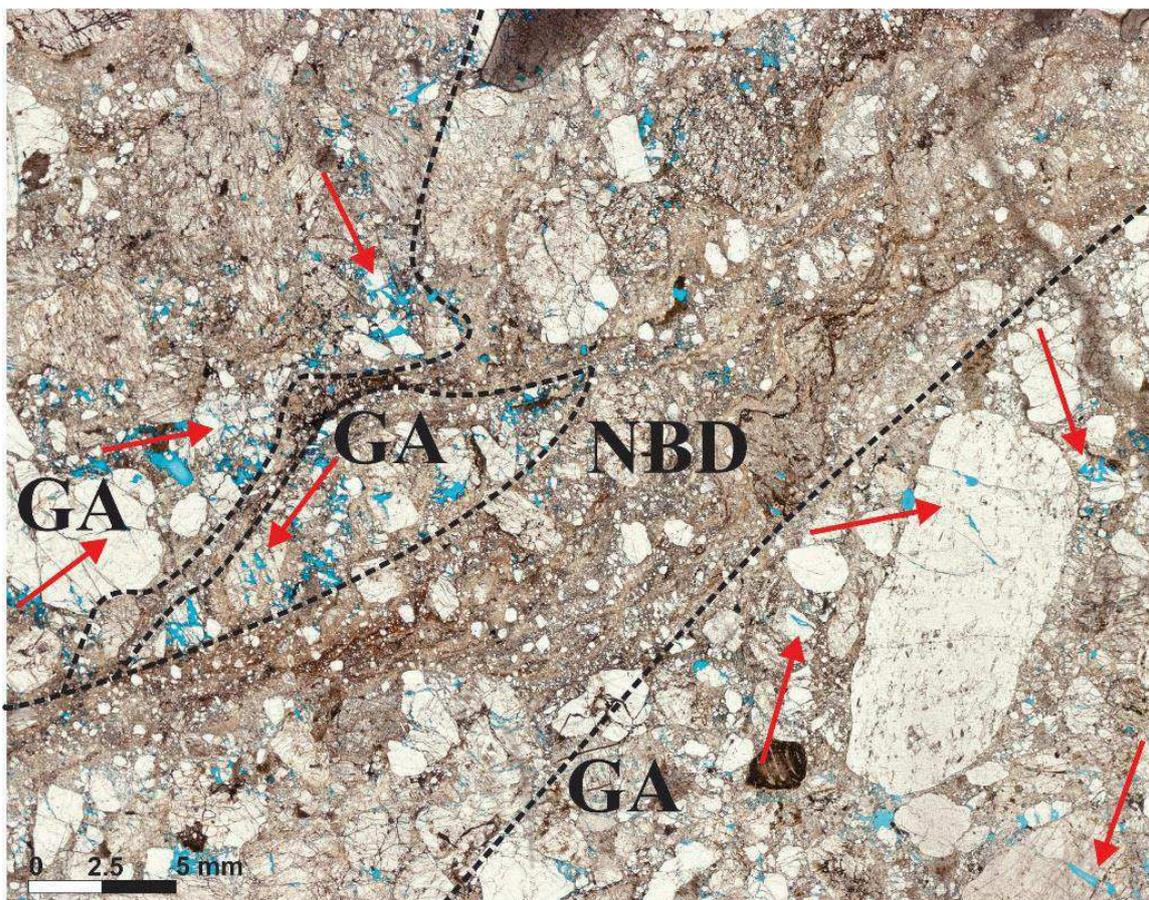


Figura 37: Gráfico de distribuição de tamanho de poros por porcentagem de área. A letra n corresponde ao número de amostras analisadas em cada agrupamento.

Os arenitos conglomerados dos agrupamentos ND e EW não apresentam macroporos. As rochas submetidas ao evento distensivo de direção EW são caracterizadas pela presença de bandas de compactação, e intenso esmagamento dos grãos, isso reduz significativamente a fusão dos poros. Entretanto os grãos adjacentes à banda são fraturados, gerando porosidade secundária por fratura (Figura 38), que corresponde ao aumento da mesoporosidade (Figura 37). Logo, em relação a rocha hospedeira os arenitos conglomerados do agrupamento EW apresentam redução considerável de microporos (Figura 37), devido à compactação e ao esmagamento dos grãos, onde foram gerados grãos muito pequenos que obstruem grande parte dos poros entre 5 e 50 μm (microporos).



NBD - Núcleo da Banda

GA - Grãos adjacentes

➔ Porosidade de fratura

- - - Limite da banda

Figura 38: Microfotografia de seção delgada em amostra EW. Imagem identificando a região da banda de deformação, através da linha pontilhada, e os grãos adjacentes as bandas que fazem parte da zona intermediária (entre bandas).

Os agrupamentos NE, NS e NW possuem poros com tamanhos inclusos em todos os intervalos estudados. A redução do tamanho de grãos gerou um novo arranjo na rocha, que por sua vez aumentou a fusão entre os poros. Isto é responsável pelo surgimento de macroporos. Em consequência houve a redução da área ocupada por microporos, de 16% na rocha não deformada (ND) para aproximadamente 5% nas amostras com bandas de deformação (Figura 37).

Apesar do aumento no tamanho dos poros, as rochas com bandas de deformação não são as mais porosas, ou seja, o aumento do tamanho de poros não reflete o acréscimo da porosidade (Figura 39). Entretanto, no gráfico da Figura 39 são observados dois comportamentos. O primeiro associado às amostras dos agrupamentos SB e ND, e o segundo referente as amostras com bandas (NE, NW, NS, EW). As rochas não deformadas (ND) e deformadas sem bandas de deformação (SB), apresentam uma

correlação em que o tamanho de poros cresce com o aumento da porosidade (contorno preto na Figura 39). Contudo, os arenitos conglomeráticos com bandas de deformação possuem mesmo *range* de diâmetro médio de poros e porosidades distintas (contorno vermelho na Figura 39, indicando que a cinemática atuante exerce influência sobre a porosidade das rochas.

A variação da porosidade das amostras é apresentada na Tabela 5. As amostras com banda de deformação (NS, NW, NE e EW) dispõem quase que totalmente de porosidade inferior as amostras ND, com exceção para uma amostra do agrupamento NW que possui porosidade 10.5%. As SB, mesmo deformadas apresentam porosidade próxima e até maior que as amostras ND. Ballas et al. (2012a), identificaram um comportamento semelhante entre a rocha fonte e a zona de dano (semelhante ao agrupamento SB), onde a porosidade na zona de dano variou de 23 a 33%, enquanto a rocha fonte apresentou variação entre 26 e 29% (Tabela 4). Neste exemplo observa-se que há amostras da zona de dano com porosidade maior que a da rocha fonte.

O comportamento mais uniforme entre os três intervalos de tamanho de poros estudados está associado ao agrupamento NW. Neste percebe-se menor variação na intensidade dos picos (Figura 37). Entretanto, dentre as condições estudadas é a com menor concentração de microporos. De forma geral os arenitos conglomeráticos encontrados nestas condições caracterizam-se pela intensa quebra de grãos. Apesar disto a compactação e esmagamento dos grãos é menor que o presente nas amostras NE, NS e EW, o que favorece um empacotamento mais frouxo, promovendo maior união entre os poros e menor redução de porosidade. Logo, dentre as amostras estudadas apenas as do agrupamento NW possuem poros entre 4000 e 5000 μm (Figura 37), compreendendo a maior porosidade das amostras com bandas de deformação, 5.40% (Figura 39), como também a menor redução de porosidade quando comparada a rocha não deformada (ND). A redução foi de 29%.

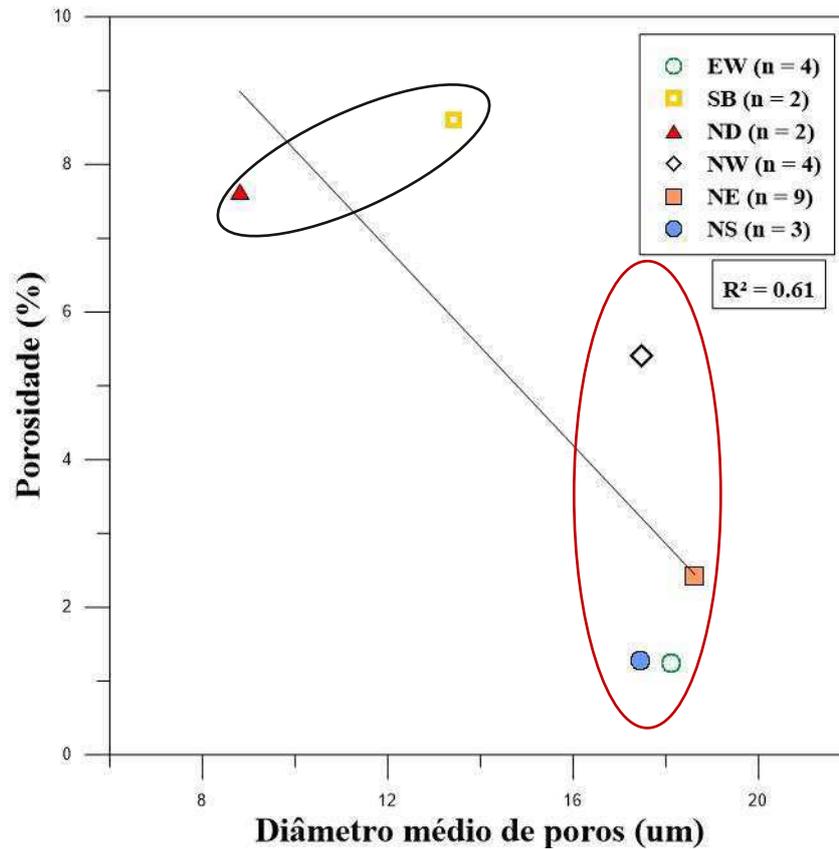


Figura 39: Gráfico de porosidade versus diâmetro médio de poros. O contorno preto realça o comportamento das amostras ND e SB, enquanto o vermelho destaca as amostras com banda de deformação.

As rochas com bandas de deformação de cinemática transtensiva de direção NE contém maior concentração de mesoporos. Possuem o menor acréscimo na concentração de macroporos, como também o menor decréscimo de microporos (Figura 37), dentre todos os agrupamentos. Possuem o maior valor médio de diâmetro de poros, 18.63 μm e o segundo maior valor de porosidade dos agrupamentos com bandas de deformação, 2.43% (Figura 39).

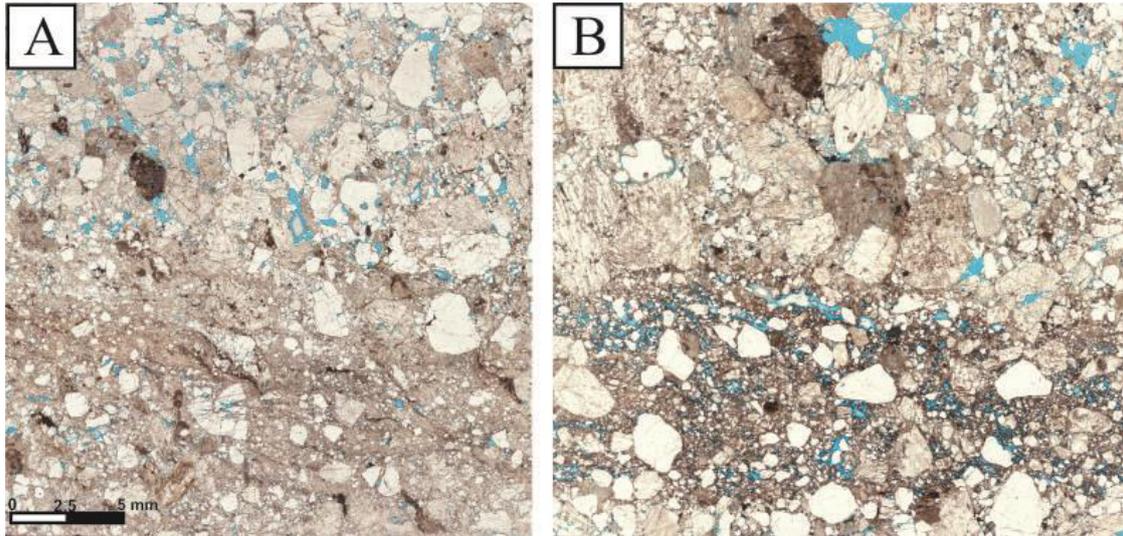


Figura 40: Microfotografias de seção delgada de amostras NE. (A) Representa amostra do agrupamento NE com compactação, apesar de compactada a amostra ainda possui diversos poros de diversos tamanhos. (B) Exemplo de rocha NE menos compactada, neste caso podemos visualizar melhor conexão de poros, como também a presença de grandes poros.

Os arenitos conglomeráticos dos agrupamentos NS e EW expõem os menores valores de porosidade, 1.27% e 1.24% respectivamente, ou seja, houve uma redução de aproximadamente 83% na porosidade destas amostras quando comparadas à rocha hospedeira ND. As rochas destes agrupamentos são as mais compactadas, entretanto as amostras do grupo EW contém maior quebra e esmagamento de grãos (Figura 41), enquanto as amostras NS possuem maior preservação de grandes grãos aliado a alta compactação (Figura 41). Lembrando que o sistema NS é uma inflexão do sistema NE, houve uma redução de porosidade de 47% nas amostras NS em relação às NE. Apesar da alta compactação e baixa porosidade, as amostras do agrupamento NS apresentam empacotamento mais frouxo na área adjacente a banda, bem como porosidade de fratura. Aliado a isso foi observado que entre as amostras com bandas de deformação são as que possuem menor porcentagem de área ocupada por pequenos grãos (Figura 36). A soma desses fatores contribuiu para a presença de grandes poros, e consequentemente essas amostras apresentam o maior pico de macroporos (Figura 37).

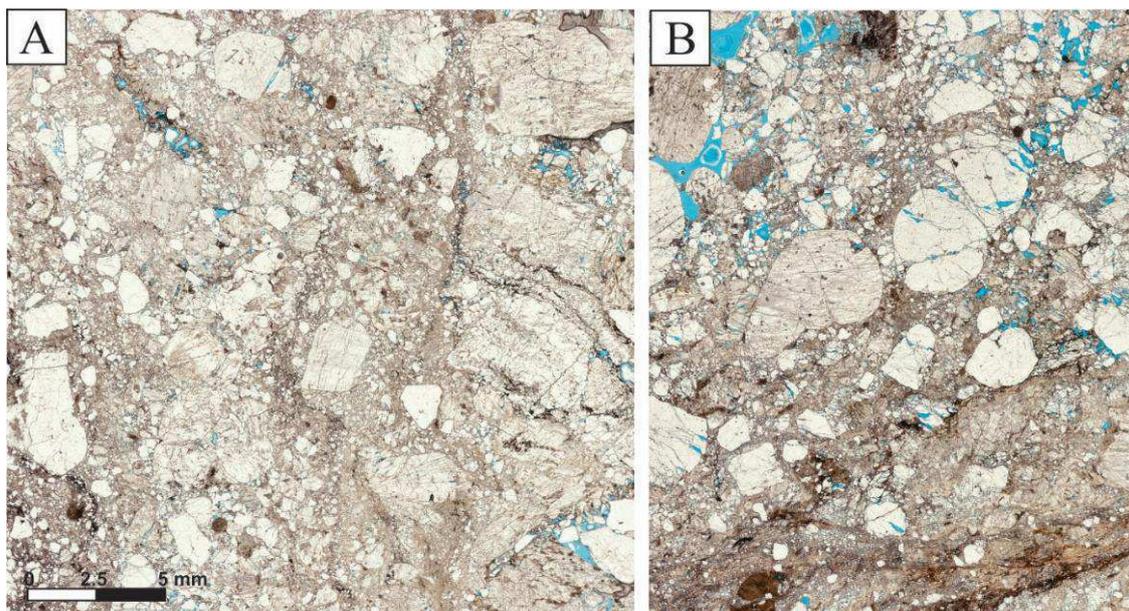


Figura 41: Microfotografias de seção delgada de amostras EW e NS. (A) Imagem de rocha afetada por cinemática distensiva de direção EW. (B) Arenito conglomerático com banda de deformação originada por cinemática transtensiva de direção NS.

Para a maioria dos agrupamentos com banda de deformação foi observado o acréscimo no diâmetro de poros em relação à rocha hospedeira, o que não significou aumento na porosidade, como comentado anteriormente. Todavia foi constatado que uma relevante relação entre o diâmetro de poros e de grãos, conforme Figura 42, onde observa-se uma relação linear inversa com coeficiente de correlação $R^2 = 0.85$. Sendo assim, percebe-se que a distribuição do tamanho de poros nas condições aqui estudadas é fortemente dependente do tamanho dos grãos. À medida que o tamanho de grãos foi reduzido pelos mecanismos de formação de bandas, o tamanho de poros foi aumentado, ou seja, a deformação dessas rochas provocou o rearranjo dos grãos permitindo fusão de poros nas áreas adjacentes as bandas, aumentando o diâmetro equivalente de poros, porém reduzindo a porosidade principalmente no núcleo da deformação. Todavia, Ballas et al. (2012b) constatou que a cominuição dos grãos resultou na redução do tamanho dos poros.

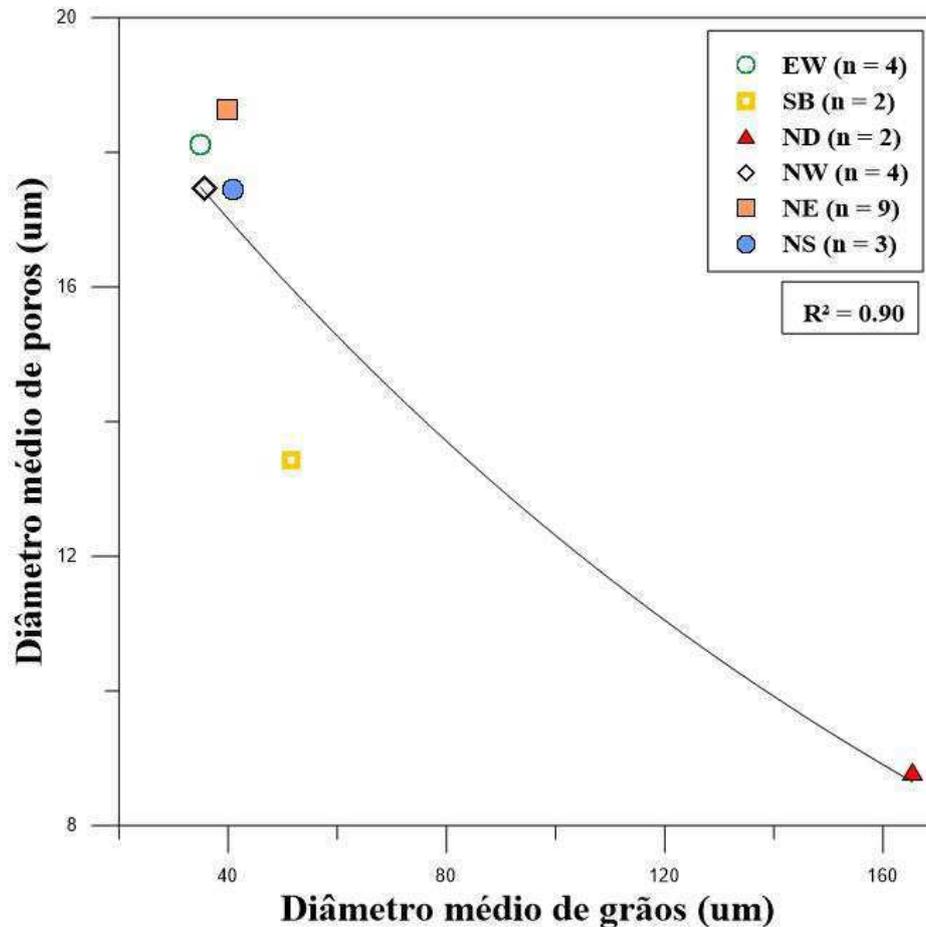


Figura 42: Gráfico de diâmetro médio de grãos versus diâmetro médio de poros. A reta diagonal indica a linha de tendência inversamente proporcional entre as duas propriedades.

5.2.3 Análise da textura dos grãos

A circularidade média das amostras varia entre 0.28 e 0.43, entretanto não apresenta relação com tamanho dos grãos (Figura 43). Porém, a região contornada pelo destaque vermelho na Figura 43 indica nitidamente a variação da circularidade de acordo com o tipo de cinemática atuante. A quebra de grãos é um dos efeitos da acomodação da deformação. Diferentes tipos de deformação possuem intensidade e forma de quebra de grãos diferentes, gerando valores de circularidade distintos para diferentes tipos de cinemática. Os maiores valores de circularidade correspondem a amostras submetidas a regime de transcorrência pura de direção NW, onde o cisalhamento provoca intensa cominuição aliada a deformação dos grãos, de tal forma que os mesmos se tornam mais circulares. O regime deformacional transtensivo que ocorre nos sentidos NE e NS, atua com intensidade inferior a transcorrência, apresentando valores intermediários de circularidade média, 0.382 e 0.381 respectivamente. O agrupamento de amostras EW possui o menor valor médio de

circularidade 0.27. Neste caso os grãos foram quebrados, mas a deformação do sistema distensivo não provocou o modelamento dos grãos, por apresentar menor componente cisalhante em meio às situações estudadas.

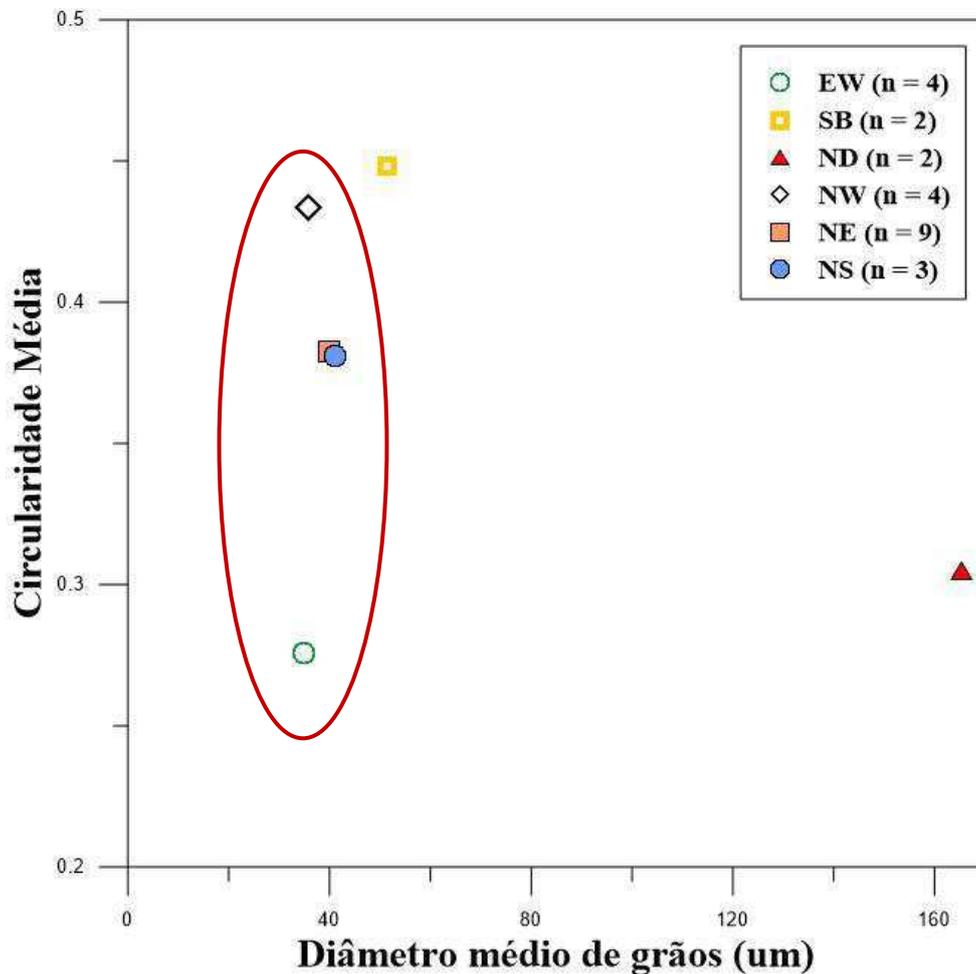


Figura 43: Gráfico de circularidade média versus diâmetro médio dos grãos. O contorno vermelho destaca o comportamento da circularidade nas amostras com banda de deformação.

A convexidade das amostras com banda de deformação apresenta uma leve relação inversa com o diâmetro médio de grãos, com índice de correlação $R^2 = 0.71$ (Figura 44). Os diferentes valores de convexidade para os agrupamentos estudados, provavelmente, estão relacionados aos processos e intensidade de deformação sofridos pela rocha. A convexidade média dos agrupamentos com bandas (NW, NS, NE e EW) está entre 0.74 e 0.77.

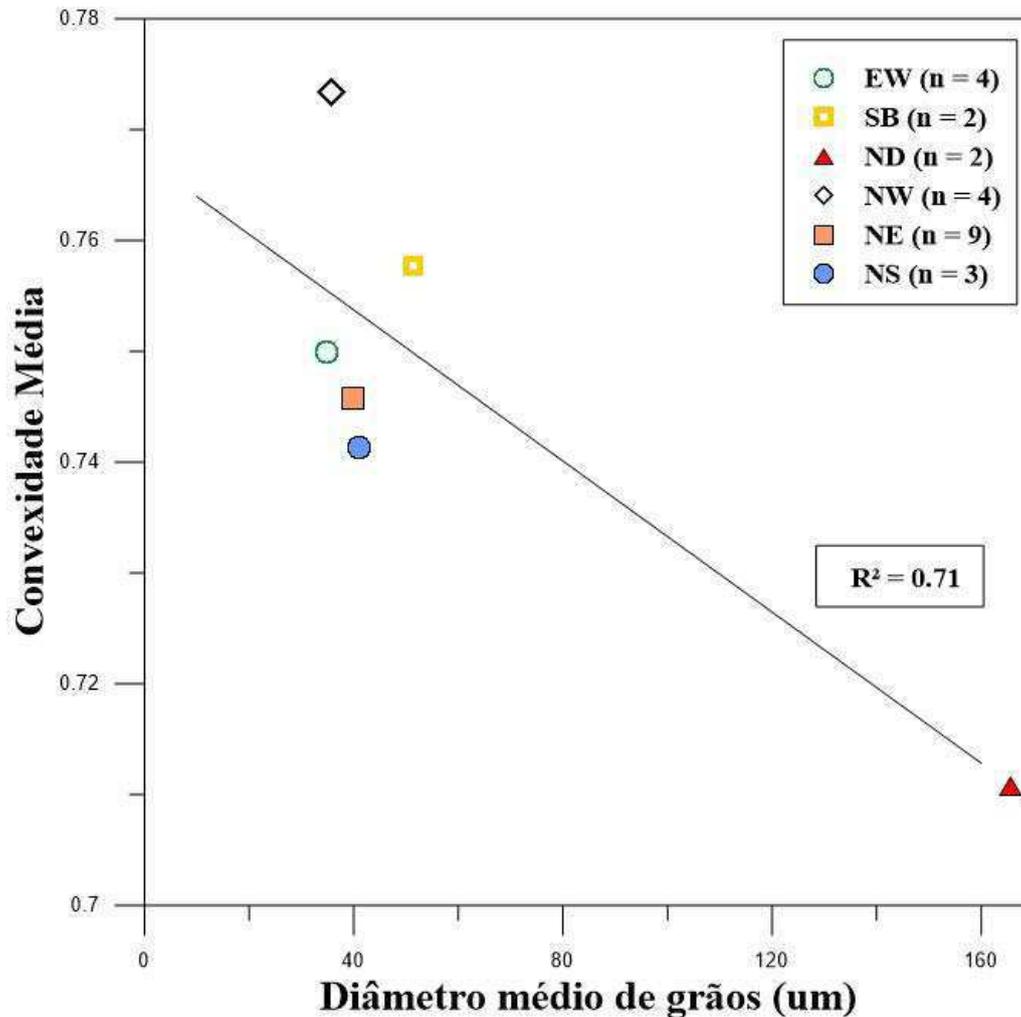


Figura 44: Relação entre diâmetro médio de grãos e convexidade média.

Apesar de serem aspectos texturais normalmente independentes, o arredondamento e a esfericidade dos grãos, representados pela convexidade e circularidade, na zona de deformação possuem dependência. Com exceção do agrupamento EW, todos os outros expõem relação proporcionalmente linear (reta diagonal na Figura 45) entre esses dois aspectos, com coeficiente de determinação $R^2_{(EW)} = 0.89$, portanto altos valores de circularidade correspondem a altos valores de convexidade e vice-versa, isso também foi observado nos estudos de Campaña et al. (2016). Assim sendo, além de fatores sedimentares a circularidade e a convexidade dos grãos aqui estudados são influenciados pela cinemática e o mecanismo deformacional atuante na formação das bandas de deformação.

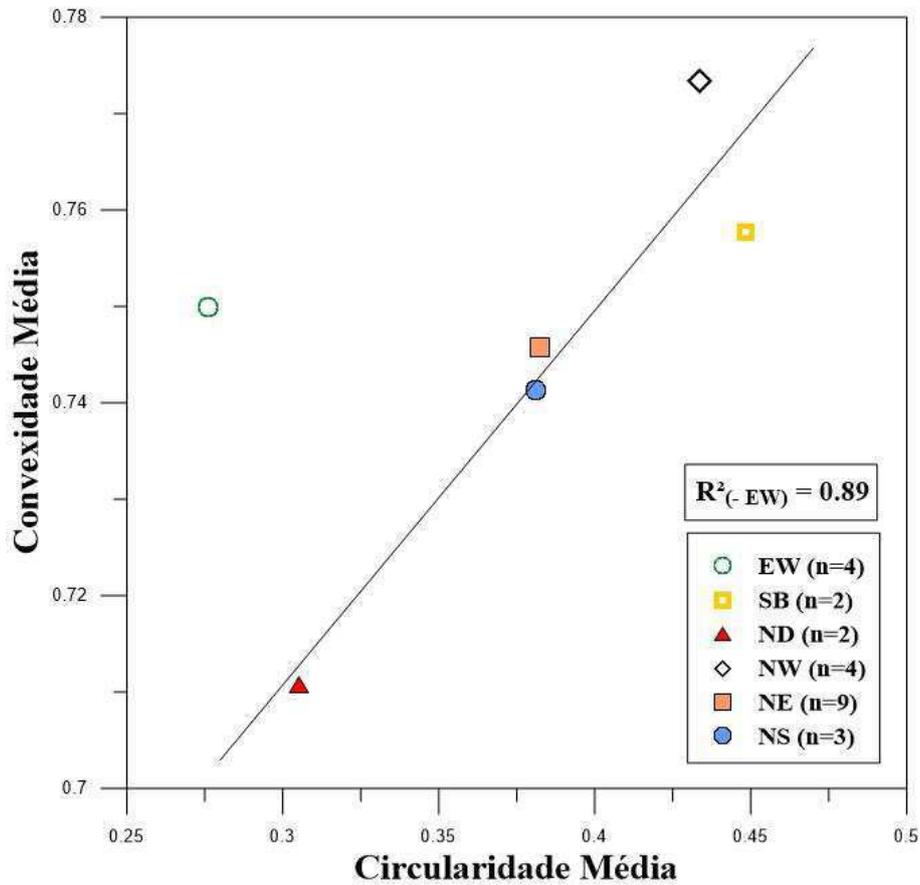


Figura 45: Gráfico de circularidade média versus convexidade média. Neste gráfico a linha de tendência e o coeficiente de correlação foram gerados sem os dados da amostra EW.

A razão de aspecto, por ser um parâmetro de alongação, apresenta uma boa correlação com o tamanho médio de grãos. Menores diâmetros de grãos correspondem a maior razão de aspecto, com exceção do agrupamento SB. Sendo assim, há uma relação inversa entre a razão de aspecto e o tamanho de grãos, o coeficiente de determinação neste caso foi calculado desconsiderando a influência do agrupamento SB, onde $R^2_{(-SB)} = 0.92$ (Figura 46). Para as amostras com bandas de deformação a razão de aspecto relaciona-se com a porcentagem de grãos em área abaixo de 250 μm . Os arenitos com banda de deformação de cinemática NW e EW apresentam aos maiores valores médios de razão de aspecto, 0.64 e 0.63, bem como a maior concentração de pequenos grãos, sendo 33% para as amostras EW e 39% para as amostras NW (Tabela 5). Já os agrupamentos NE e NS possuem valores intermediários de razão de aspecto, 0.620 e 0.623, também apresentam valores intermediários em relação ao decréscimo de tamanho de grãos, com 21% dos grãos abaixo de 250 μm para a NS e 29% para as rochas NE. Os valores de razão de aspecto das amostras SB e ND são os menores, bem como a

concentração de pequenos grãos (Tabela 5), provavelmente por serem as rochas com menor atuação da deformação.

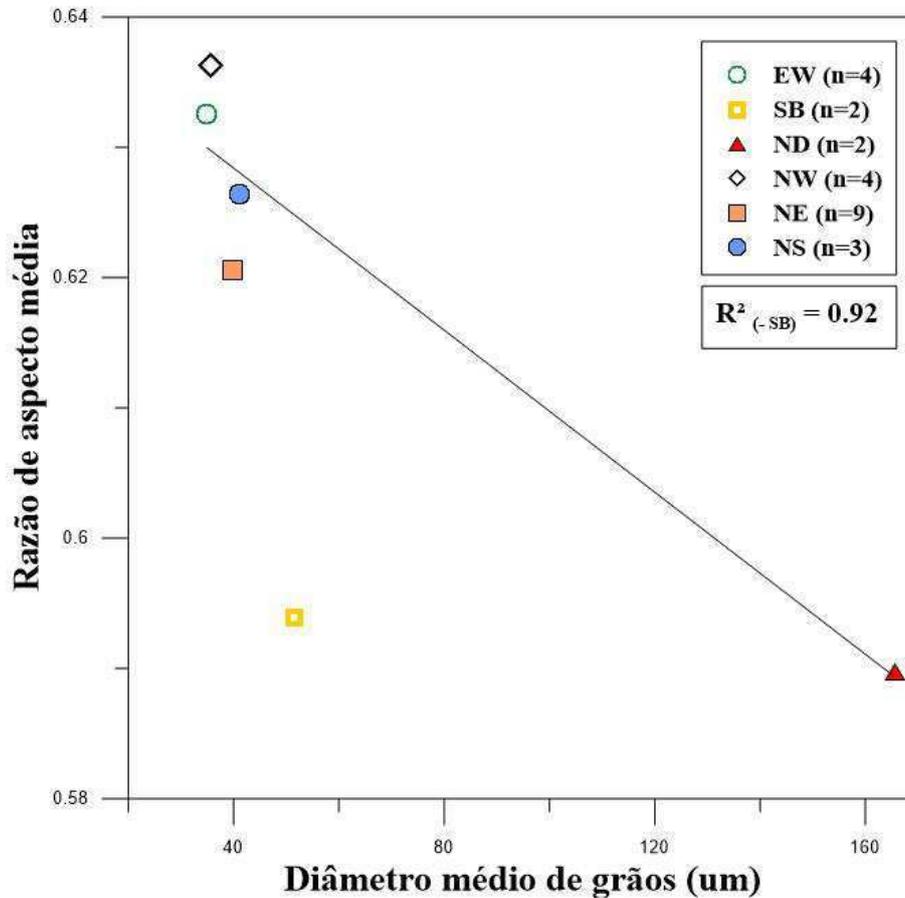


Figura 46: Gráfico de diâmetro médio de grãos versus razão de aspecto média. Neste gráfico a linha de tendência e o coeficiente de correlação foram gerados sem levar em consideração os dados da amostra SB.

Apesar dos resultados aqui apresentados evidenciarem quase sempre melhora dos aspectos texturais (circularidade, convexidade e razão de aspecto), os principais estudos com bandas de deformação cataclásticas indicam que a cominuição dos grãos gera grãos menores, irregulares e angulares (Ballas et al. 2012a,b); Balsamo e Storti, 2011; Aydin, 1978; Antonellini et al., 1994)

6. CONCLUSÕES

O comportamento da distribuição de poros e grãos em todas as condições analisadas (CB, ND, SB, NW, NE, NS e EW) foi bastante similar, revelando que a identidade original da distribuição de tamanho de grãos e poros das amostras são as mesmas, e foram modificadas pela deformação. Tal fato reforça a hipótese das amostras não deformadas, do afloramento 2, serem as fácies representantes da porção não afetada pela tectônica rúptil que deformou as rochas do afloramento 1.

A análise textural da rocha fonte, proveniente do afloramento 2, sem deformação, indica que a mesma é imatura, com grãos alongados, pouco esféricos e pouco arredondados. A presença de bandas cataclásticas nessas rochas promoveu abrasão nas bordas dos grãos, através da compactação, maior contato e quebra de grãos, bem como a redução de porosidade e aumento na fusão dos poros. Em algumas situações, o fraturamento e a quebra originaram grãos mais alongados e angulares, como por exemplo a circularidade das amostras EW, como também maior espaço poroso, entretanto os valores médios dos aspectos texturais ainda foram maiores para todas as amostras. Embora a circularidade e convexidade sofram pequenas alteração pela cataclase da rocha, o grau de esfericidade e arredondamento não chega a ser alterado, sendo assim ambas propriedades são principalmente controladas por processos sedimentares.

A cinemática atuante na formação das bandas de deformação ocasionou diferentes efeitos nas rochas. Dentre os efeitos responsáveis pelas alterações nos aspectos texturais e de porosidade pode ser destacada a compactação das bandas e da região entre bandas, a cominuição intensa dos grãos, assim como fraturamento da zona imediatamente adjacente a banda de deformação.

As feições NW apresentam alta percentagem de macroporos, maior porosidade entre as amostras deformadas, pouca microporosidade e maiores índices de retrabalhamento e maturidade, portanto, são provavelmente as feições com maior probabilidade de exercer um controle efetivo sobre o fluxo de fluidos na BRP.

Por fim, os aspectos texturais e petrofísicos dos arenitos conglomeráticos da Formação Antenor Navarro são controlados por fatores tectônicos, em especial por bandas de deformação cataclásticas, onde o controle destes parâmetros são exercidos pela compactação da rocha, rearranjo dos grãos, intensidade da cataclase, presença de fraturamento de grãos e cinemática atuante. Outros fatores precisam ser melhor estudados, pois podem ser fundamentais para o controle dos aspectos de textura como propriedades petrofísicas, tais como o selecionamento, orientação e grau de empacotamento dos grãos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONELLINI, M. A.; AYDIN, A.; POLLARD, D. D. *Microstructure of deformation bands in porous sandstones at Arches National Park, Utah*. Journal of Structural Geology, v. 16, p. 941-959, 1994.

AHMAD, T. *Reservoir Engineering Handbook*. 2. ed., Butterworth-Heinemann, 1211 p., 2001.

AVIZO. *The 3D Analysis Software for Scientific and Industrial Data*. Avizo Fire, versão: 8.1, 2016.

AYDIN, A. *Small faults formed as deformation bands in sandstone*. Pure and Applied Geophysics, v. 116, p. 913-930, 1978.

AYDIN, A.; JOHNSON, A. M. *Development of faults as zones of deformation bands and as slip surfaces in sandstone*. Pure and Applied Geophysics, v. 116, p. 931-942, 1978.

AYDIN, A.; JOHNSON; A. M. *Analysis of faulting in porous sandstones*. Journal of Structural Geology, v. 5, n. 1, p. 19-31, 1983.

AYDIN, A.; BORJA, R. I.; PETER, E. *Geological and mathematical framework for failure modes in granular rock*. Journal of Structural Geology, v. 28, p. 83–98, 2006.

BALLAS, G., SOLIVA, R., SIZUN, J., BENEDICTO, A., CAVAILHES, T., RAYNAUD, S (2012a). *The importance of the degree of cataclasis in shear bands for fluid flow in porous sandstone Provence, France*. AAPG Bulletin, v. 96, n°. 11, pp. 2167–2186.

BALLAS, G., SOLIVA, R., SIZUN, J (2012b). *The Role of Cataclasis in Shear and Compaction Bands on Water Flow in Porous Sandstone, Provence, France*. 3rd International Conference on Fault and Top Seals - From Characterization to Modelling Montpellier, France, 1-3 October 2012.

BALLAS, G.; FOSSEN, H.; SOLIVA, R. *Factors controlling permeability of cataclastic deformation bands and faults in porous sandstone reservoirs*. Journal of Structural Geology, v. 76, p. 1-21, 2015.

BALSAMO, F., STORTI, F. *Size-dependent comminution, tectonic mixing, and sealing behavior of a “structurally oversimplified” fault zone in poorly lithified sands: Evidence for a coseismic rupture?* GSA Bulletin, v. 123; n°. 3/4, p. 601–619, 2011.

BENITO-CALVO, A., DE LA TORRE, I. *Analysis of orientation patterns in Olduvai Bed I assemblages using GIS techniques: Implications for site formation processes.* Journal of Human Evolution, v. 61, p. 50-60, 2011.

BOGGS Jr, S. *Petrology of sedimentary rocks.* Cambridge, 2 ed., 2009.

CAMPAÑA, I., BENITO-CALVO, A., PÉREZ-GONZALEZ, A., BERMÚDEZ C.J.M., CARBONELL, E. *Assesing automated image analysis of sand grain shape to identify sedimentary facies, Gran Dolina archeological site (Burgos, Spain).* Sedimentary Geology, v.346, p. 72-83, 2016.

CARVALHO, I.S., LEONARDI, G. *Geologia das bacias de Pombal, Sousa, Uiraúna – Brejo das Freiras e Vertentes (Nordeste do Brasil).* Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 64, n. 3, p. 231-252, 1992.

CARVALHO, I. S.; MELO, J. H. G. *Bacias interiores do Nordeste.* São Paulo: Beca, cap.6 (21b). 800 p.(Geologia do Brasil), 2012.

CARVALHO, I. S., MENDES, J. C., Costa, J. *The role of fracturing and mineralogical alteration of basement gneiss in the oil exhsudation in the Sousa Basin (Lower Cretaceous), Northeastern Brazil.* Journal of South American Earth Sciences, v. 47, p. 47-54, 2013.

CÓRDOBA, V. C., ANTUNES, A. F., JARDIM DE SÁ, E. F., SILVA, A. N., SOUSA, D. C., LINS, F. A. P. L. et al. *Análise estratigráfica e estrutural da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil: integração a partir do levantamento sísmico pioneiro 0295_RIO_DO_PEIXE_2D.* B. Geoci. Petrobras, Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, p. 53-68, 2008.

COSTA, A. B. S.; CÓRDOBA, V. C.; JARDIM DE SÁ; E. F. *Diagênese and provenance of sandstones of the rift tectonosequende of Araripe and Rio do Peixe basins, NE Brazil.* II Central e North Atlantic Conjugate Margins Conference, v. VII, p. 60-64, Lisboa, 2010.

De CASTRO, D. L.; OLIVEIRA, C. O.; BRANCO, R. M. G. C. *On the tectonics of the Neocomian Rio do Peixe Rift Basin, NE Brazil: Lessons from gravity, magnetics, and radiometric data.* Journal of South American Earth Sciences, v. 24, p. 184–202, 2007.

ĐURIŠ, M., ARSENIJEVIĆ, Z., JACIMOVSKI, D., RADOIČIĆ, T.K. *Optimal pixel resolution for sand particles size and shape analysis.* Powder Technology, p.177–186, 2016.

EXNER, U.; KAISER, J.; GIER, S. *Deformation bands evolving from dilation to cementation bands in a hydrocarbon reservoir (Vienna Basin, Austria).* Marine and Petroleum Geology, v. 43, p. 504-515, 2013.

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.

FERNLUND, J.M.R. *Image analysis method for determining 3-D shape of coarse aggregate.* Cement Concrete Research, v. 35, p. 1629–1637, 2005.

FRANÇOLIN, J. B. L.; COBBOLD, P. R; SZATMARI, P. *Faulting in the Early Cretaceous Rio do Peixe basin (NE Brazil) and its significance for the opening of the Atlantic.* Journal of Structural Geology, v.16, n. 5, p. 647-661, 1994.

FISHER, Q.J.; KNIPE, R.J., 2001. *The permeability of faults within siliciclastic petroleum res-ervoirs of the North Sea and Norwegian Continental Shelf.* Mar. Pet. Geol. 18 (10),1063–1081

FOLK, R. L. *Petrology of sedimentar rocks.* Hemphill Publishing Company, Austin, Texas, 1980.

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.

FOSSEN, H.; BALE, A. *Deformation bands and their influence on fluid flow.* AAPG Bulletin, v. 91, n. 12, p. 1685–1700, 2007.

HESTHAMMER, J.; FOSSEN, H. *Structural core analysis from the Gullfaks area, northern North Sea.* Marine and Petroleum Geology, v. 18, p. 411–439, 2001.

HOLCOMB, D.; RUDNICKI, J. W.; ISSEN, K. A.; STERNLOF, K. *Compaction localization in the Earth and the laboratory: state of the research and research directions*. Acta Geotechnica, v. 2, p. 1-15, 2007.

LOTHE, A. E.; GABRIELSEN, R. H.; BJØRNEVOLL, H.; LARSEN, B. T. *An experimental study of the texture of deformation bands: effects on the porosity and permeability of sandstones*. Petroleum Geoscience, V. 8, p. 195–207, 2002.

MENDONÇA FILHO, J. G., CARVALHO, I. S., AZEVEDO, D. A. *Aspectos geoquímicos do óleo da Bacia de Sousa (cretáceo inferior), nordeste do Brasil: Contexto geológico*. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 25, n. 1, p. 91-98, 2006.

NEVES, S. C. M.; PELAES, E. G. *Estudo e implementação de técnicas de segmentação de imagens*. Revista Virtual de Iniciação Acadêmica da UFPA, v. 1, n.2, Julho, 2001.

NOGUEIRA, F.C.C.; MARQUES, F. O.; BEZERRA, F. H. R.; DE CASTRO, D. L.; FUCK, R. A. *Cretaceous intracontinental rifting and post-rift inversion in NE Brazil: Insights from the Rio do Peixe Basin*. Tectonophysics, v.644–645, p.92–107, 2015.

NOGUEIRA, F. C. C.; OLIVEIRA, M. S.; 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.

NUNES, E. O.; CONCI, A. *Segmentação por textura e localização do Contorno de regiões em imagens multibandas*. IEEE Latin America Transactions, v. 5, n. 3, 2007.

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

PARRY, W. T; CHAN, M. A.; BEITLER, B. *Chemical bleaching indicates episodes of fluid flow in deformation bands in sandstone*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, vol. 88, p. 175–91, 2004.

ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J.A.D. *Engenharia de Reservatórios de Petróleo*. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2006.

SELLEY, R. C. *Applied sedimentology*. Academic Press, 2 ed., 446 p., 2000.

SÉNANT, J.; POPOFF, M. *Early Cretaceous extension in northeast Brazil related to the South Atlantic opening*. Tectonophysics, 198 (1991), p. 35-46, 1991.

SHIPTON, Z. H.; COWIE, P. A. *A conceptual model for the origin of fault damage zone structures in high-porosity sandstone*. Journal of Structural Geology, v. 25, p. 333-344, 2003.

SILVA, L. P. M. *Polígonos convexos e regulares*. 2018. Disponível em: <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/matematica/poligonos-convexos-regulares.htm>. Acesso em: Abril de 2018.

TAFESSE, S., FERNLUND J.M.R., BERGHOLM F. *Digital sieving-Matlab based 3-D image analysis*. Engineering Geology, v.137-138, p. 74-84, 2012.

TIAB, D.; DONALDSON, E. C. *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*. Elsevier, 976 p., 2004.

WENTWORTH, C. K. *A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments*. The Journal of Geology v.30, n°. 5 (Jul. - Aug., 1922): 377-392.