



Universidade Federal
de Campina Grande



Propriedades físicas de arenitos afetados por bandas de deformação nos diferentes elementos arquiteturais de uma zona de falha.

Autor:

Cayo César Cortez Pontes

Orientador:

Francisco César Costa Nogueira

Campina Grande – Paraíba

Fevereiro de 2017

Cayo César Cortez Pontes

Propriedades físicas de arenitos afetados por bandas de deformação nos diferentes elementos arquiteturais de uma zona de falha.

Dissertação de mestrado apresentada em 23 / 02 / 2017 à Universidade Federal de Campina Grande como requisito do Programa de Pós-graduação em Exploração Petrolífera e Mineral para obtenção do grau de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

Orientador:

Francisco César Costa Nogueira

Segundo orientador:

Francisco Hilário Rego Bezerra

Campina Grande – Paraíba

Fevereiro de 2017

Cayo César Cortez Pontes

Propriedades físicas de arenitos afetados por bandas de deformação nos diferentes elementos arquiteturais de uma zona de falha.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de pós-graduação em Exploração Petrolífera e Mineral da Universidade Federal de Campina Grande para obtenção do título de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

Francisco Cezar Costa Nogueira
Orientador

Francisco Hilário Rego Bezerra
Segundo orientador

Campina Grande – Paraíba.

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

P814p

Pontes, Cayo César Cortez.

Propriedades físicas de arenitos afetados por bandas de deformações nos diferentes elementos arquiteturais de uma zona de falha / Cayo César Cortez Pontes. – Campina Grande, 2017.

61 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e recursos Naturais, 2017.

"Orientação: Prof. Dr. Francisco Cezar Costa Nogueira, Prof. Dr. Francisco Hilário Rego Bezerra".

Referências.

1. Bandas de Deformação. 2. Resistência à Compressão Uniaxial. 3. Petrofísica. I. Nogueira, Francisco Cezar Costa. II. Bezerra, Francisco Hilário Rego. III. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande (PB). IV. Título.

CDU 552.08(043)

Cayo César Cortez Pontes

Propriedades físicas de arenitos afetados por bandas de deformação nos diferentes elementos arquiteturais de uma zona de falha.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de pós-graduação em Exploração Petrolífera e Mineral da Universidade Federal de Campina Grande para obtenção do título de Mestre em Exploração Petrolífera e Mineral.

Dissertação aprovada em:

Banca examinadora:

Francisco Cezar Costa Nogueira
Orientador

José Agnelo Soares
Membro interno

Tiago Siqueira de Miranda
Membro externo

Campina Grande – Paraíba.

2017

Aos meus pais Moreira Pontes e Dalvany Cortez.

Agradecimentos:

A realização deste trabalho não seria possível sem os esforços dos meus pais Francisco Moreira Pontes Filho e Dalvany Cortez Silva. Amo vocês. Eu não seria nada sem a atenção e determinação de vocês em me criar e cuidar tão bem. Meus melhores agradecimentos. E a Camilla e Cecília por todo apoio perante tantas situações.

As meninas que tão bem me acolheram e me apresentaram a minha nova morada, Edlayne e Kecinha. Muito obrigado por todos os conselhos e pela morada, e em especial minha companheira de todas as horas e apartamento, Eduarda. Obrigado por fazer meus dias melhores. E a todos amigos que com palavras de apoio me incentivaram durante esses dois anos.

Aos meus melhores e mais novos amigos Franklyn Macedão, Matheus Cabeludo, Fabrição, Henrickson e Pedro. Meus dias em Campina Grande não seriam tão divertidos e loucos sem a presença de vocês. Espero ter vocês por perto para toda a vida, como com todos os amigos do GEEP: Adna, Inácio, Andrezza, Igor, Gabriel, Ana Luisa, Isabelly, Daniel. Obrigado por todo apoio nas batalhas vencidas.

Ao meu professor, amigo e orientador Cezar Nogueira. Sem sua confiança e empenho eu não teria aprendido tanto! Graças a você evolui bastante como profissional e pessoa. E a todos os meus mestres que sempre estiveram disponíveis e contribuíram de forma ímpar para formação desse trabalho: Agnelo Soares e Hilário Bezerra. E a todos os outros que ajudaram na fase de pesquisa a escrita, campos e tantas discussões geológicas e filosóficas, meu muito obrigado!

Resumo:

Bandas de deformação são estruturas rúpteis que ocorrem em arenitos porosos e podem alterar as propriedades físicas, comportamento mecânico e hidráulico das rochas, resultando na compartimentação de reservatórios. O objetivo deste trabalho foi compreender a variação das propriedades de Resistência à Compressão Uniaxial (UCS), porosidade, Razão de Poisson, Módulos de Young e incompressibilidade nos diferentes elementos arquiteturais da zona de falha: protólito não deformado, zona de dano e núcleo da falha. Para isso realizamos perfis para medição de parâmetros estruturais e geomecânicos com auxílio do esclerômetro (Schmidt Hammer), análises laboratoriais de porosidade, tanto por meio digital em seção delgada como por permoporosímetro a gás, cálculos dos módulos de Young, incompressibilidade e Razão de Poisson. Os resultados indicam que no afloramento correspondente ao núcleo da falha os valores de UCS foram até três vezes maiores que aqueles na zona de dano e quatro vezes maiores que a zona não deformada. A porosidade apresenta decréscimo médio de 10% na zona de dano e até 75% no núcleo da falha. A porosidade estimada por medições em permoporosímetro a gás, módulos de Young, incompressibilidade e Razão de Poisson foram calculados no núcleo da falha. Nesse elemento arquitetural as zonas com bandas possuem resistência até duas vezes maior que a zona sem banda, com efeito no módulo de Young e no módulo de incompressibilidade, porém ambas com deformação ocorrida em caráter rúptil, evidenciado pelo atributo Razão de Poisson. Concluímos assim que bandas de deformação afetam diretamente as propriedades físicas de arenito em diferentes níveis de intensidade. A ocorrência de tais heterogeneidades podem ter impactos importantes na produção já que impõe anisotropias aos reservatórios.

Palavras chave: Bandas de deformação, Resistência à compressão uniaxial, Petrofísica

Abstract:

Deformation bands are brittle structures that occur in porous sandstones and may change the physical properties, geomechanical and hydraulic behavior of the rock, leading to the compartmentation of reservoirs. The objective of this research was to understand the variation of the properties of uniaxial compressive strength (UCS), porosity, Poisson's ratio, Young's and incompressibility's modulus in different architectural elements of fault zone: protolith, damage zone and fault core. For this we extracted profiles for the measurement of structural and geomechanics with aid of Schmidt hammer, laboratorial analysis of porosity, both thin section digital means and by gas permoporosimeter, and Young's, incompressibility and Poisson's ratio calculations. The results indicate that in outcrop corresponding to the nucleus of fault the UCS values were up to three times higher than those in the damage zone and four times higher than the protolith. The porosity shows an average decrease of 10% in the damage zone and up to 75% in the fault core. Porosity by gas, Young's and incompressibility modulus and Poisson's ratios was calculated in core fault. In this architectural element with bands have resistance up to twice times than zone without bands, marked in the Young's modulus as well as the incompressibility's modulus, however both with deformation occurring in a brittle character, evidenced by Poisson's ratio. We conclude that deformation bands directly affect the physics properties of sandstones in different levels of intensity. The occurrence of such heterogeneities may have important impacts on the production since it imposes anisotropies to the reservoirs.

Keywords: Deformation bands, uniaxial compressive strength, petrophysical.

Lista de figuras:

	n.
Figura 1: Mapa de localização da área estudada.	1
Figura 2.1: Localização das Bacias Interiores do Nordeste e <i>Trend</i> Cariri-Potiguar. Adaptado de Nogueira <i>et al.</i> 2015.	4
Figura 2.2: Coluna estratigráfica da Bacia do Rio do Peixe proposta por Silva (2009), e modificada neste trabalho, com ênfase nas relações de interdigitação entre suas formações.	6
Figura 2.3: Mapa geológico da Bacia do Rio do Peixe, com seus falhamentos principais e sub-bacias. Adaptado de Nogueira <i>et al.</i> 2015. SBBF: Sub-bacia Brejo das Freiras; SBS: Sub-bacia Sousa; SBP: Sub-bacia Pombal.	7
Figura 2.4: Ambientes tectônicos propícios a formação de BD, segundo Araujo Netto (2011). Em (A) soerguimento vertical; (B) rifteamento; (C) falhas de empurrão; (D) halocinese; (E) lutocinese; (F) áreas de ocorrência de colapso vertical.	9
Figura 2.5: Diagrama esquemático relacionando os diferentes tipos de bandas de deformação com o conteúdo filossilicático vs. Profundidade. Adaptado de Fossen <i>et al.</i> (2007).	10
Figura 2.6: Sequência hierárquica na formação das BD. Em (A) <i>singles</i> ; (B) <i>singles</i> conectados; (C) <i>cluster</i> ; (D) <i>slip surface</i> . Adaptado de Fossen <i>et al.</i> (2007).	11
Figura 2.7: Bandas de deformação classificadas de acordo com sua cinemática, segundo Fossen et al. (2007).	12
Figura 2.8: Princípio operacional do Martelo de Schmidt. (Adaptado de McCarroll, 1994).	17
Figura 2.9: Ábaco para correção dos valores de rebote (VR) não horizontais. Adaptado de Basu & Aydin, 2004.	19
Figura 2.10: Diferentes procedimentos para o teste de Martelo de Schmidt. Modificado de Buyuksagis <i>et al.</i> 2007.	19
Figura 3.1: Fluxograma das atividades desenvolvidas durante o trabalho proposto.	23
Figura 3.2: Mapa geológico da Bacia do Rio do Peixe com a localização dos afloramentos estudados. Os elementos arquiteturais estão representados por PT – Protólito não deformado, ZD – Zona de dano e NF – Núcleo da falha, com a individualização das três sub-bacias que compõem a Bacia Rio do Peixe, sub-bacia Brejo das Freiras (SBBF), sub-bacia Sousa (SBS) e sub-bacia Pombal (SBP).	24
Figura 3.3: Metodologias aplicadas. (A) Perfil geomecânico iniciado em zona de <i>single</i> , atravessando um <i>cluster</i> marcado pela maior resistência ao intemperismo e conseqüentemente relevo positivo (B) Medição do valor de rebote do Martelo de Schmidt	25
Figura 3.4: (A) Plugadeira manual utilizada para retirada em plugues. (B) Localização do ponto de coleta orientada de um plugue, com indicação do norte geográfico para orientação das seções delgadas. (C) Exemplo de plugue coletado para análises em laboratório.	26
Figura 3.5: Equipamentos para preparação e análise de plugues. (A) Serra com disco diamantado utilizado para adequação do tamanho dos plugues. (B) Retificadora de plugues. (C) Equipamento de análise de porosidade e permeabilidade Ultra-Poro/Perm-500, com copo matriz e <i>Core holder</i> . (D)	27

Equipamento Autolab 500 para medição de velocidade de onda compressional e cisalhante e compressibilidade da rocha.	
Figura 4.1: Architectural elements of fault zone. DB – Deformation Bands.	30
Figura 4.2: (A) Localization of Rio do Peixe Basin and study area. (B) Geological map of RPB featured to main faults that affect the basin. Modified by Françolin et al. (1994) and Medeiros et al. (2005), with the localization of outcrops representing the fault core, damage zone and protolith.	31
Figura 4.3: Photos corresponding to (A) conglomerate sandstone of fine to clay matrix affected by DB and (B) plug representative of conglomerate sandstone unit of fine to clay matrix	33
Figura 4.4: Outcrops in (A) protolith, (B) damage zone, (C) fault core and (D) variation between DB and zone spacing between bands present in the same architectural element of fault zone.	34
Figura 4.5: Uniaxial compressive strength values in each architectural elements of fault zone.	37
Figura 4.6: Position of geomechanical profile (PG) and <i>scanlines</i> (SC) performed in damage zone (Figure 6 A) and fault core (Figure 6 B). n – numbers of samples; yellow lines – main <i>cluster</i> of damage zone; red line – fence.	38
Figura 4.7: Scanlines performed in (A, B) damage zone and (C, D, E) fault core.	40
Figura 4.8: Photomicrography of the three architectural elements present in the fault zone and their counterparts processed by the Imago software. (A, B) protolith, (C, D) damage zone and (E, F) fault core. P = Porosity.	44
Figura 4.9: (A) Porosity vs. Number of samples. (B) Young's modulus vs. Porosity, (C) Incompressibility modulus vs. Porosity and (D) Poisson's ratio vs. Porosity.	45
Anexo 1: Variação no número e espessura de bandas com a mudança de litologia.	58
Anexo 2: Valores de UCS na mesma BD em diferentes litologias.	58
Anexo 3: (A) <i>cluster</i> presente na zona de dano e (B) vários <i>clusters</i> no núcleo da falha.	59
Anexo 4: Superfície de deslizamento presente no elemento arquitetural correspondente ao núcleo da falha.	60
Anexo 5: Perfil geomecânico realizado na BRP em diferentes fácies para observar influência de BD na UCS.	60
Anexo 6: Banda de deformação com intensa cataclase (cominuição e rearranjo de grãos) e conseqüentemente preenchimento dos poros.	61

Lista de tabelas:

Tabela 1: Porosity values measured in thin section	42
--	----

Lista de abreviações:

ASTM	Sociedade Americana de Ensaios de Materiais.
BD	Bandas de deformação
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral.
E	Módulo de Young
ISRM	Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas.
MS	Martelo de Schmidt
SBBF	Sub-bacia Brejo das Freiras;
SBS	Sub-bacia Sousa;
SBP	Sub-bacia Pombal
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
UCS	Resistência à compressão uniaxial
VR	Valor de Rebote

Sumário:

Capítulo 1. Apresentação	1
Capítulo 2. Introdução	3
2.1 Objetivos	3
2.2 Contexto Geológico	3
2.3. Estado da Arte	7
2.3.1. Bandas de deformação	8
2.3.1.1. Fatores condicionantes das bandas de deformação	9
2.3.1.2. Classificação das bandas de deformação	10
2.3.1.3. Classificação hierárquica	11
2.3.1.4. Classificação cinemática	12
2.3.1.5. Classificação baseada nos mecanismos de deformação	12
2.3.1.6. Importância no fluxo de fluidos	14
2.3.2. Martelo de Schmidt	15
2.3.2.1 Princípio Operacional	16
2.3.2.2. Tipos de martelo e calibração	17
2.3.2.3. Requisitos da amostra e do teste	18
2.3.2.4. Normatização do valor de rebote (VR)	18
2.3.2.5. Padronização dos dados	19
2.3.2.6. Propriedades influenciadoras	20
2.3.3. Propriedades petrofísicas	21
2.3.3.1. Porosidade	21
2.3.3.2. Módulo de Young, Incompressibilidade e Razão de Poisson	21
Capítulo 3. Materiais e métodos	23
3.1. Revisão bibliográfica	23
3.2. Aquisição e processamento de dados	24
3.2.1. Caracterização geológica em campo	24
3.2.2. Ensaio geomecânicos e <i>scanlines</i>	25
3.2.3. Amostragem	26
3.2.4. Análise petrofísica	27
3.3. Interpretação integrada	28
3.4. Elaboração da dissertação	28
Capítulo 4. Propriedades físicas de arenitos afetados por bandas de deformação nos diferentes elementos arquiteturais de uma zona de falha.	29
4.1 INTRODUCTION	29
4.2 GEOLOGICAL SETTINGS	32
4.3 METHODS	33
4.3.1 Geomechanical analysis	34
4.3.2 Scanline	35
4.3.3 Petrophysical analysis	36
4.4 RESULTS	36
4.4.1 Uniaxial Compressive Strength (UCS)	37
4.4.2 Scanlines	39
4.4.3 Porosity	41
4.4.4 Young's modulus, incompressibility modulus and Poisson's ratio.	45

4.5 DISCUSSIONS	45
4.6 CONCLUSIONS	47
Capítulo 5. Integração dos resultados e conclusões	49
Referências Bibliográficas	52
Anexos	58

Capítulo 1. Apresentação

A presente dissertação de mestrado apresenta os métodos e resultados aplicados no estudo de bandas de deformação (BD) que afetaram as propriedades físicas de arenitos da Formação Antenor Navarro na Bacia Rio do Peixe, localizado na porção oeste do estado da Paraíba (Figura 1). Tal trabalho inclui o capítulo de resultados escrito em forma de um artigo científico, submetido a uma revista científica especializada no assunto. O estudo foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pós Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, da Universidade Federal de Campina Grande.

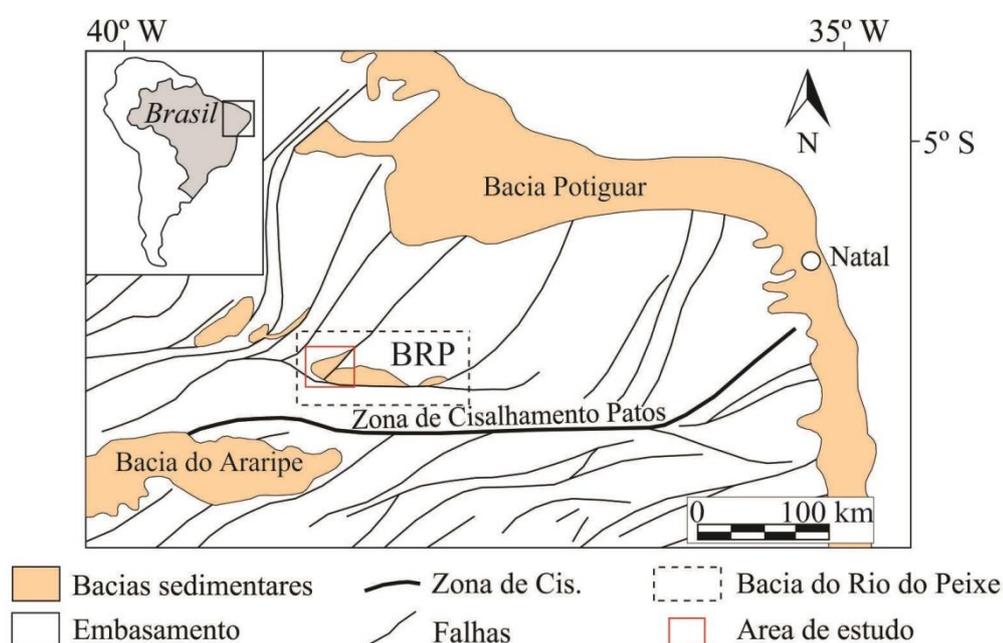


Figura 1: Mapa de localização da BRP da área estudada.

Para os trabalhos de campo foram realizados perfis geomecânicos *in situ*, *scanlines* e amostragem de plugues para confecção de seções delgadas e análise laboratorial, onde foram observadas propriedades físicas da rocha como porosidade, razão de Poisson, módulos de Young e incompressibilidade.

Este trabalho consiste na apresentação dos objetivos e localização da área de estudo, descrição dos materiais e métodos utilizados, estado da arte com foco em bandas de deformação (BD) e *Schmidt Hammer*, um artigo intitulado “Propriedades físicas de arenitos nos diferentes elementos arquiteturais de uma zona de falha.” onde foram descritas a variação de porosidade, módulo de Young, módulo de incompressibilidade, Razão de Poisson e resistência à compressão uniaxial em arenitos afetados por BDs em diferentes elementos

arquiteturais presentes em uma zona de falha, e por fim, uma síntese das conclusões e referências utilizadas em todo o trabalho.

Capítulo 2. Introdução

2.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral analisar as variações petrofísicas e geomecânicas das rochas siliciclásticas afetadas por bandas de deformação, presentes na Bacia do Rio do Peixe (BRP). Buscamos compreender como ocorrem tais variações em diferentes cenários deformacionais presentes em uma zona de falha (protólito não deformado, zona de dano e núcleo da falha) afetando rochas análogas a reservatórios petrolíferos.

Como objetivo específico este trabalho visa contribuir para:

- Caracterizar a relação entre a resistência à compressão uniaxial e intensidade de bandas de deformação, através da aquisição de dados geomecânicos *in situ* de arenitos deformados com o uso do *Schmidt Hammer*.
- Comparar as variações geomecânicas e petrofísicas entre a rocha não deformada e rochas deformadas por BD, bem como variações entre os diferentes cenários deformacionais afetados por BD.
- Estimar o comportamento geomecânico e as propriedades físicas das rochas deformadas, como UCS e porosidade, nos diferentes elementos arquiteturais presentes em uma zona de falha.
- Entender as relações entre deformação uniaxial (módulo de Young), deformação hidrostática (módulo de incompressibilidade) e comportamento rúptil-dúctil (Razão de Poisson) entre rochas com banda e sem banda de deformação.

2.2 Contexto Geológico

A Bacia do Rio do Peixe pertence ao sistema de Bacias Interiores do Nordeste que corresponde a um conjunto remanescente de bacias sedimentares, de pequeno e médio porte (Araripe, Icó, Iguatu, Rio do Peixe, etc.) que tiveram origem a partir do preenchimento de depressões geradas pelo evento que separou os continentes Africano e Sul-americano (Ponte et al., 1991). Essas bacias estão situadas a sul da Bacia Potiguar e ao norte das bacias de

Tucano-Jatobá, onde de acordo com vários autores, constitui o *trend* Cariri-Potiguar (figura 2.1), demarcando um eixo de rifteamento de idade neocomiana a barremiana (Silva, 2009).

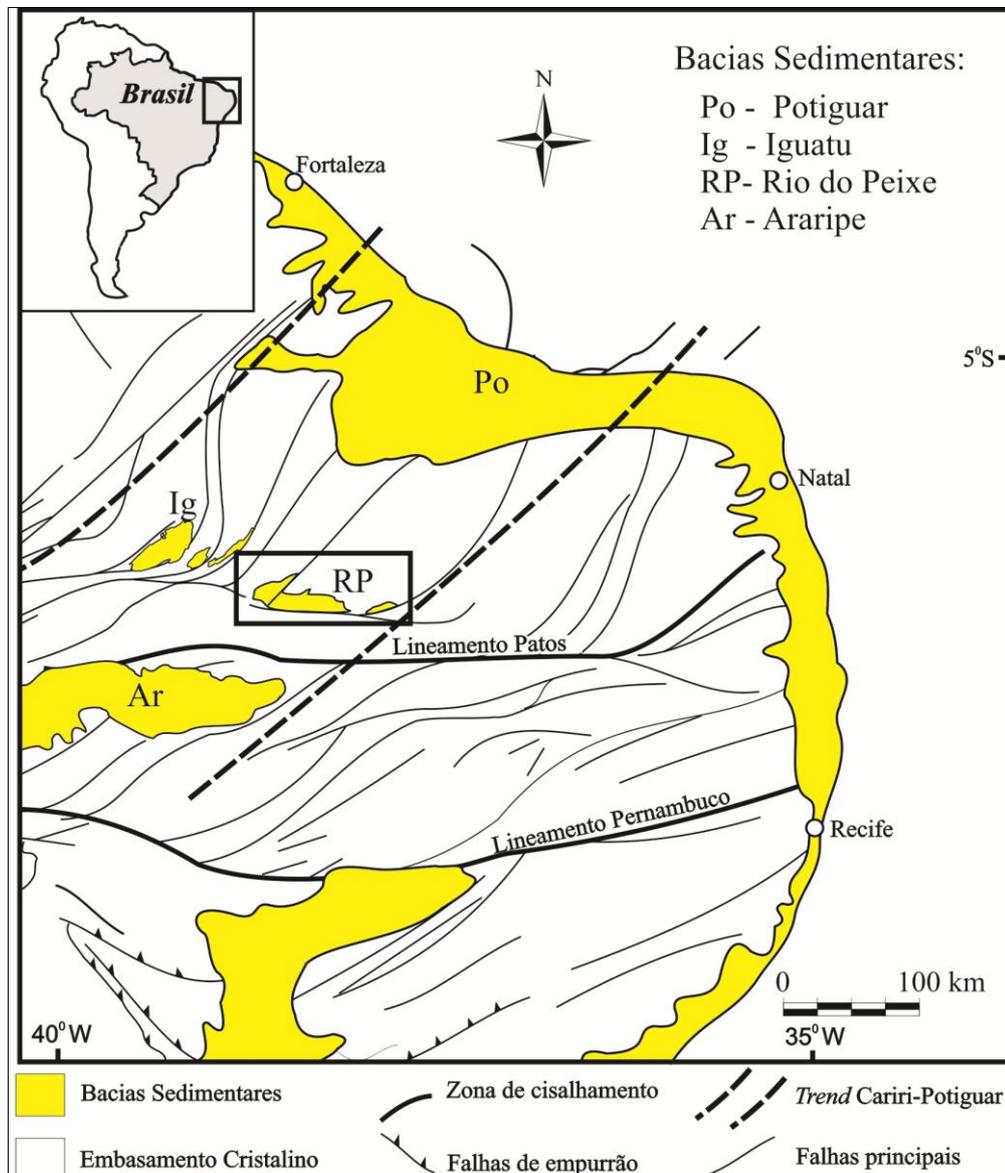


Figura 2.1: Localização das bacias interiores do Nordeste e *Trend* Cariri-Potiguar. Adaptado de Nogueira *et al.* 2015.

Segundo Córdoba *et al.* (2007) o *Trend* Cariri-Potiguar foi objetivo de mapeamento e atividade exploratória por parte do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) e empresas consorciadas com a Petrobras, entre as décadas de 60 a 80. Além dos interesses exploratórios, tais bacias podem contribuir como análogos de campo para a compreensão das rochas e processos nas bacias de margem continental.

O embasamento cristalino das bacias interiores do Nordeste é formado por rochas pré-cambrianas de diferentes domínios estruturais pertencentes à Província Borborema, mais especificamente aos domínios tectônicos Central, Rio Grande do Norte e Ceará (Medeiros et al., 2005) que se encontram intensamente deformados e estruturados por zonas de cisalhamento neoproterozóicas. Segundo De Castro & Castelo Branco (1999), a reativação eocretácica dessas zonas, durante o processo de rifteamento intracontinental mesozóico, associado à abertura e formação do Atlântico Sul, condicionou a estruturação interna das bacias interioranas do nordeste do Brasil.

A Bacia do Rio do Peixe está inserida, dentro do contexto da Província Borborema, no domínio Rio Grande do Norte, acima da zona de cisalhamento Patos, sendo composta por três grandes regiões de subsidência, que são consideradas sub-bacias, de oeste para leste: Brejo das Freiras, Sousa e Pombal (Françolin et al., 1994), alongados segundo o *trend* dominante do embasamento adjacente. O semi-gráben Brejo das Feiras, alongado na direção NE-SW, é controlado pela Falha Portalegre, na mesma direção, sendo o depocentro da Bacia do Rio do Peixe com profundidade de até 1.900 m (Nogueira et al., 2004). Segundo Silva (2014) a borda NW desse semi-gráben é caracterizada pela justaposição das unidades sedimentares, em não conformidade, sobre o embasamento. O semi-gráben Sousa, com maior extensão entre todos os semi-grábens da bacia, apresenta sua extensão principal E-W acompanhando a falha que delimita a borda sul da bacia, a Falha Malta, e seu limite norte é marcado por uma não conformidade, correspondente a margem flexural (Silva, 2014). Segundo este mesmo autor essa sub-bacia apresenta dois depocentros alinhados segundo a direção E-W, com até 1100m de espessura sedimentar. O semi-gráben Pombal é a região de subsidência de menor expressão, com espessura estimada menor que 300 m (Françolin et al., 1994) e possui um *trend* E-W/NE acompanhando a Falha Rio Piranhas.

Esses semi-grábens dividem a Bacia do Rio do Peixe em três sub-bacias homônimas. Essas sub-bacias são preenchidas por sedimentos siliciclásticos de idade cretácica, agrupadas em três formações que integram o Grupo Rio do Peixe sendo, segundo Albuquerque (1970), as formações Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas. De acordo com Córdoba *et al.* (2007), com base em seções sísmicas, dados gravimétricos e critérios de campo, essas formações do Grupo Rio do Peixe ocorrem interdigitadas. Esta interdigitação é composta pelas formações Antenor Navarro, compondo a porção basal, Sousa como intermediária e Rio Piranhas como unidade de topo (figura 2.2).

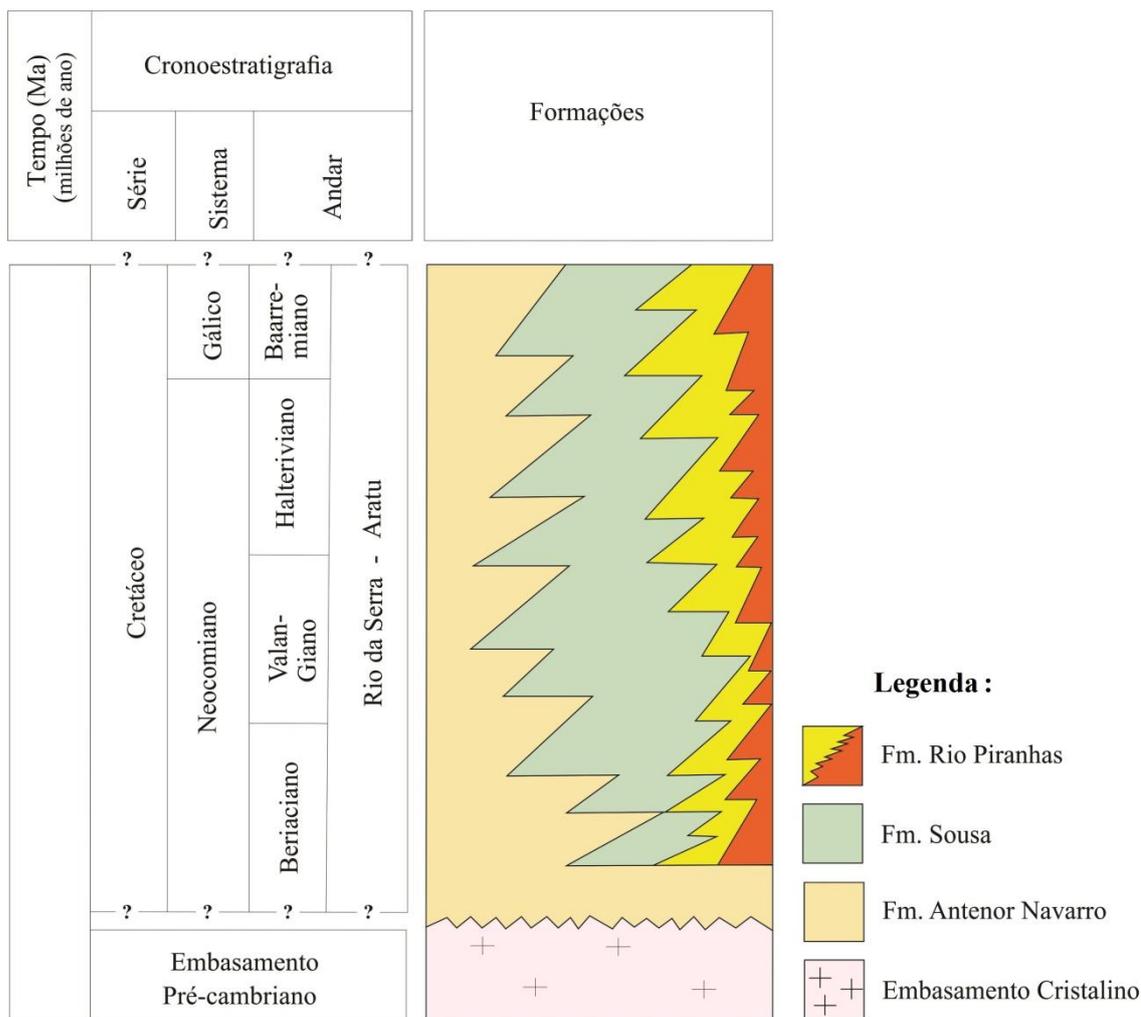


Figura 2.2: Coluna estratigráfica da Bacia do Rio do Peixe proposta por Silva (2009), e modificada neste trabalho, com ênfase nas relações de interdigitação entre suas formações.

A Formação Antenor Navarro encontra-se diretamente em contato com o embasamento, na forma de uma não conformidade (Sénant e Popoff, 1991). Córdoba *et al.* (2007) descrevem essa formação como conglomerados e arenitos conglomeráticos desorganizados e matriz-suportados, e principalmente arenitos conglomeráticos com estratificações cruzadas tabulares e acanaladas. Esses arenitos foram correlacionados com um sistema de leques aluviais, fluviais entrelaçados grossos ou fluviais distributários, desenvolvidos nas margens flexurais ou em rampas direcionais. As paleocorrentes medidas por esses autores apontam principalmente para SE e S, com variações para E e W-SW, caracterizando assim as áreas fontes nas bordas não falhadas da bacia. Esta formação Antenor Navarro está presente em todas as sub-bacias próximo às bordas flexurais (figura 2.3).

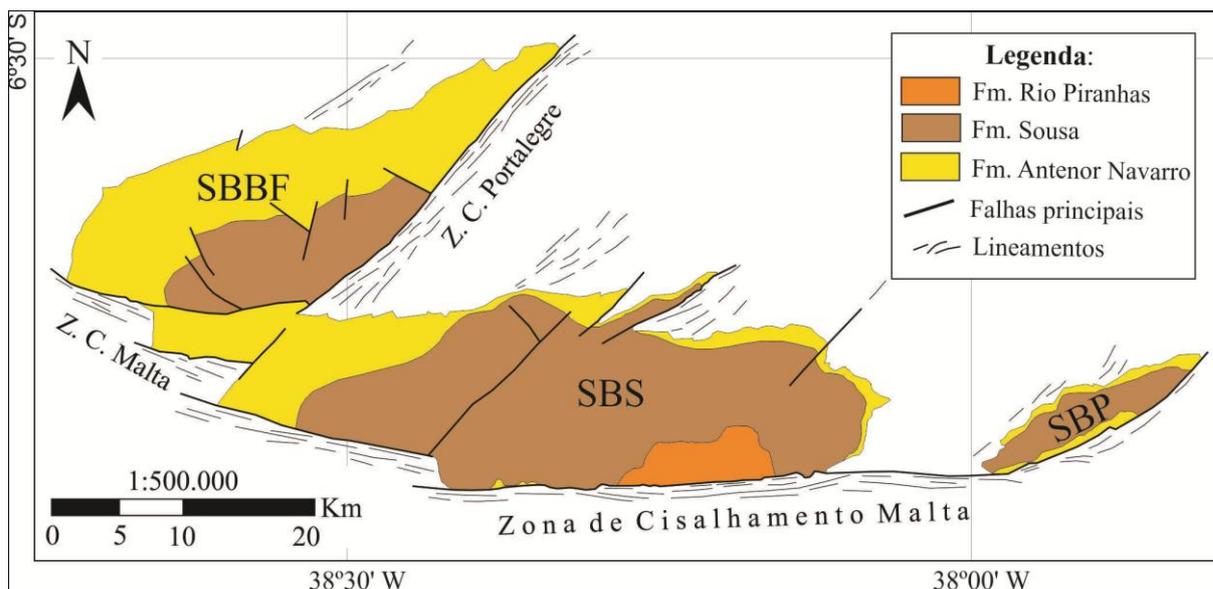


Figura 2.3: Mapa geológico da Bacia do Rio do Peixe, com seus falhamentos principais e sub-bacias. Adaptado de Nogueira *et al.* (2015) e Françaolin *et al.* (1994). SBBF: Sub-bacia Brejo das Freiras; SBS: Sub-bacia Sousa; SBP: Sub-bacia Pombal.

A Formação Sousa é a formação intermediária do Grupo Rio do Peixe. De acordo com Srivastava & Carvalho (2004), essa formação se caracteriza pela predominância de folhelhos e siltitos avermelhados, localmente acimentados, e arenitos que exibem marcas onduladas, laminações plano-paralelas e cruzadas até gretas de contração, além de calcretes. Lima Filho (1991) sugere que a deposição dessa unidade se deu em águas calmas, em ambiente lacustre raso ou de planície de inundação, com influência fluvial (Figura 2.3).

A Formação Rio Piranhas ocorre no topo do Grupo Rio do Peixe, sendo localizada ao longo das bordas falhadas da bacia (Figura 2.3). Essa formação é caracterizada por conglomerados, brechas e arenitos grossos conglomeráticos, feldspáticos e líticos, mal selecionados, de colorações amarela a cinza clara intercalados com pelitos (Costa, 2010). Córdoba *et al.* (2007) sugerem que a deposição dessa formação se deu em leques aluviais de margem falhada associados a sistemas fluviais entrelaçados. Esses autores afirmam que as paleocorrentes dessa unidade apresentam direção N ou NW, confirmando que a área fonte de seus sedimentos foi as ombreiras dos semi-grábens.

2.3. Estado da Arte

Este subitem tem como objetivo apresentar conceitos fundamentais sobre bandas de deformação, bem como os princípios operacionais e utilizações do *martelo de Schmidt*, *Scanline* e algumas propriedades petrofísicas em rochas afetadas por bandas de deformação.

2.3.1. Bandas de deformação

Quando rochas não porosas ou pouco porosas estão sob regime de deformação rúptil, que ocorre comumente em crosta rasa, com baixas pressões e temperaturas, são formadas fraturas e falhas, que são descontinuidades mecânicas de fraqueza e estão sujeitas a reativações durante novas acumulações de esforços. Em rochas sedimentares com porosidade igual ou superior a 15%, a deformação rúptil é expressa por estruturas deformacionais diferentes, que são denominadas de bandas de deformação (Fossen et al., 2007).

As bandas de deformação (BD) foram descritas inicialmente por Aydin (1978) e Aydin & Johnson (1978), que definiram essas estruturas como pequenas falhas que ocorrem com cerca de alguns milímetros de espessura, onde há colapso dos poros e fraturamento dos grãos de areia, ao longo das quais há deslocamentos na ordem de alguns milímetros a centímetros. Essas estruturas foram mais bem detalhadas por Antonellini *et al.* (1994), que chegaram a uma classificação das bandas de deformação a partir de análises de critérios cinemáticos e microtexturais.

Conforme Fossen *et al.* (2007) existem características importantes para a distinção entre BD e falhas ou fraturas convencionais:

- i) A formação e evolução de BD, que pode ocorrer tanto em rochas porosas como em sedimentos, envolve rotação e translação de grãos que acarreta em quebra ou apenas rotação e deslizamento friccional nos limites dos grãos. Esses processos necessitam do espaço proveniente da porosidade, mas caso não haja serão geradas fraturas, estilólitos ou superfícies de deslizamento.
- ii) BD não representam superfícies de deslizamento. Contudo, em um estágio mais avançado, ao longo de zonas de bandas de deformação essas estruturas podem se desenvolver.
- iii) Comumente BD ocorrem seguindo um padrão de formação: primeiro são formadas bandas de deformação individuais, em seguida zona de bandas de deformação e em um estágio mais tardio, superfícies de deslizamento.
- iv) BD individuais raramente apresentam *offsets* maiores que alguns centímetros, mesmo quando apresentam vários metros de comprimento.

Outra importante característica das BD é que são mais espessas e exibem menor *offset* que falhas de mesmo comprimento. Além disso, tendem a manter ou até aumentar a coesão da

rocha, enquanto que falhas em rochas pouco ou não porosas tendem sempre a diminuir a coesão da rocha.

2.3.1.1. Fatores condicionantes das bandas de deformação

As bandas de deformação ocasionam grande variação nas propriedades de sua rocha hospedeira e conseqüentemente em reservatórios, podendo atuar como barreira ou conduto para fluxo de fluidos, aumento da coesão, variação na porosidade e permeabilidade, entre outros.

Para assimilar as mudanças nas propriedades físicas das rochas é necessário compreender os fatores que controlam sua formação, que são: pressão confinante (profundidade de soterramento), ambiente tectônico (figura 2.4), pressão de fluido dos poros, grau de litificação da rocha hospedeira, mineralogia da rocha hospedeira, tamanho, formato e selecionamento do grão (Fossen et al., 2007).

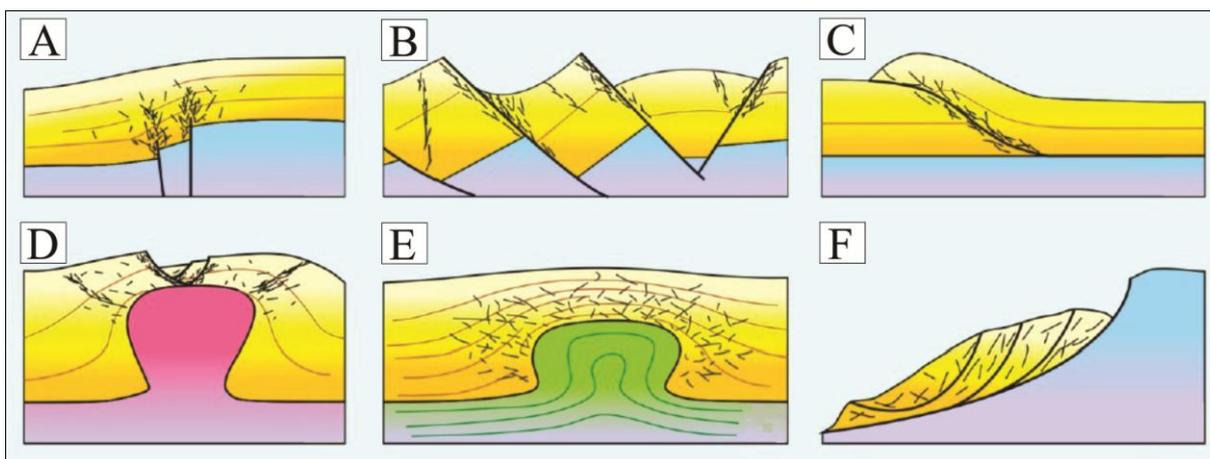


Figura 2.4: Ambientes tectônicos propícios a formação de BD, segundo Araujo Netto (2011). Em (A) soerguimento vertical; (B) rifteamento; (C) falhas de empurrão; (D) halocinese; (E) lutocinese; (F) áreas de ocorrência de colapso vertical.

Uma pequena variação em uma dessas propriedades pode resultar em um tipo de banda de deformação diferente. Fatores como porosidade, permeabilidade, pressão confinante, estado de tensões e cimentação comumente variam com o tempo.

A seqüência temporal de estruturas deformacionais é uma importante assinatura geológica que reflete nas mudanças físicas durante soterramento, litificação e soerguimento. De acordo com Fossen *et al.* (2007), há uma seqüência na formação dos tipos de bandas, onde os primeiros tipos a se formarem são tipicamente bandas de desagregação, podendo avançar

para bandas filossiláticas ou cataclásticas, de acordo com a variação na profundidade e conteúdo de argila do ambiente (Figura 2.5).

As bandas de desagregação se formam em baixas pressões confinantes, quando as forças atuantes entre os grãos são baixas. Essas bandas são formadas em estágios iniciais sendo relacionadas a processo de deformação local, não-tectônica, controlado pela gravidade, tais como diapirismo local de folhelhos, movimentos profundos de evaporitos, deslizamentos gravitacionais e glacioteclônica.

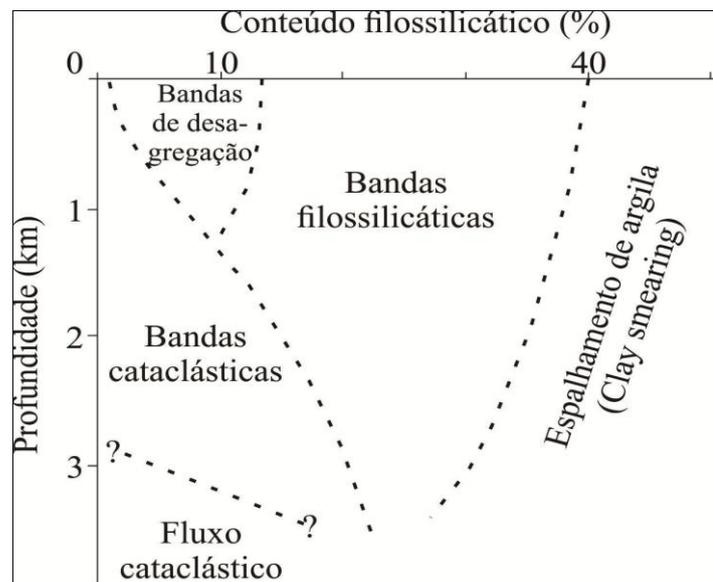


Figura 2.5: Diagrama esquemático relacionando os diferentes tipos de bandas de deformação com o conteúdo filossilático vs. Profundidade. Adaptado de Fossen *et al.* (2007).

Em um estado de maior tensão, com profundidades variando de 1,5 a 3 km, são formadas bandas de deformação cataclásticas, podendo ocorrer também em profundidades abaixo de 1 km em arenitos pouco consolidados (Fossen, 2010). Dentre os fatores que facilitam a cataclase sob pequeno soterramento, podemos citar as pequenas áreas em contato entre os grãos (quando bem selecionados e arredondados), a presença de feldspatos e outros minerais não placóides, com clivagem e dureza menor que a do quartzo. Em níveis mais profundos, um maior grau de cataclase é favorecido pelos esforços maiores nos contatos entre os grãos. Já as bandas filossiláticas ocorrem em profundidades diversas, mas apenas com uma quantidade de argila entre 10 a 40% de filossilatos presentes.

2.3.1.2. Classificação das bandas de deformação

Desde o início dos estudos das BD foram propostas algumas classificações para essas estruturas. Aydin & Johnson (1978) foram quem primeiro classificaram essas bandas, em uma

classificação gradual, em bandas de deformação individuais (*singles*), conjunto/agrupamento de bandas de deformação (*clusters*) e superfícies de deslizamento (*slip surfaces*). Antonellini *et al.* (1994) foram os primeiros a definir as bandas segundo análises cinemáticas, definindo-as em bandas de deformação sem cataclase, com cataclase e com *clay smear*. Mais recentemente Fossen *et al.* (2007) e Fossen (2010) revisaram essas classificações e refinaram esses conceitos, além de propor uma classificação baseada nos mecanismos de formação.

2.3.1.3. Classificação hierárquica

O termo classificação hierárquica foi inicialmente utilizado por Aydin & Johnson (1978) para classificar os três tipos de falhas, que ocorrem em arenitos porosos deformados sob baixas temperaturas, seguindo sua ordem de ocorrência.

A primeira estrutura a se formar, BD individuais (*singles*) (Figura 2.6 A), são estruturas tabulares, com espessura milimétrica e rejeitos na ordem de centímetros, ao longo dos quais o deslocamento é acomodado, mas não representam necessariamente uma descontinuidade e nem sempre são associados a um *strain softening* (Antonellini *et al.*, 1994). O agrupamento de bandas de deformação individuais produz uma estrutura visivelmente mais larga, denominada de aglomerado ou *cluster* (Figura 2.6 C), que por sua vez apresenta rejeitos dessimétricos, que são decorrentes do acúmulo dos rejeitos dos *singles* que a compõe, além de algumas vezes possuírem pequenas fraturas cisalhantes em seu núcleo (Araújo Netto, 2011). Segundo Aydin & Johnson (1978), os grupos de BD, com a progressão da deformação, podem evoluir para superfícies de deslizamento, denominadas de *slipsurfaces* (figura 2.6 D) ou fraturas cisalhantes com comprimento considerável, onde nesse caso as bandas de deformação são as estruturas precursoras em arenitos porosos. A superfície de deslizamento é gerada pela movimentação com fricção e abrasão entre os blocos que pode formar planos de falha com superfícies polidas (*slicken sides*) e estrias e/ou sulcos (*slicken lines*).

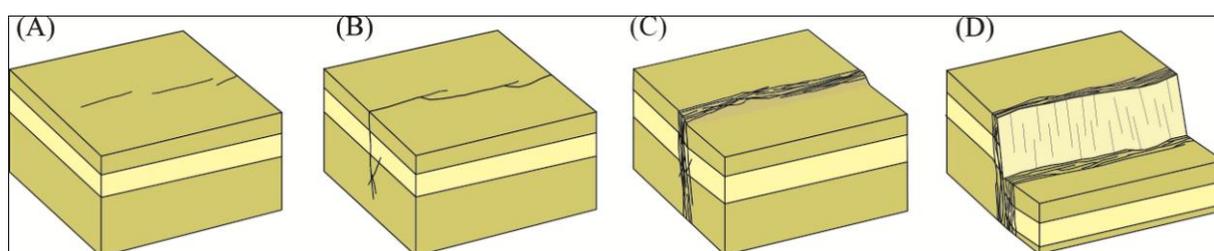


Figura 2.6: Sequência hierárquica na formação das BD. Em (A) *singles*; (B) *singles* conectados; (C) *cluster*; (D) *slip surface*. Adaptado de Fossen *et al.* (2007).

2.3.1.4. Classificação Cinemática

Caso seja levada em consideração a cinemática atuante em sua formação, as BD podem ser classificadas em bandas de dilatação, bandas de cisalhamento, bandas de compactação ou um híbrido entre dois desses três tipos Aydin *et al.* (2006), variando de acordo com o componente cinemático principal (Figura 2.7).

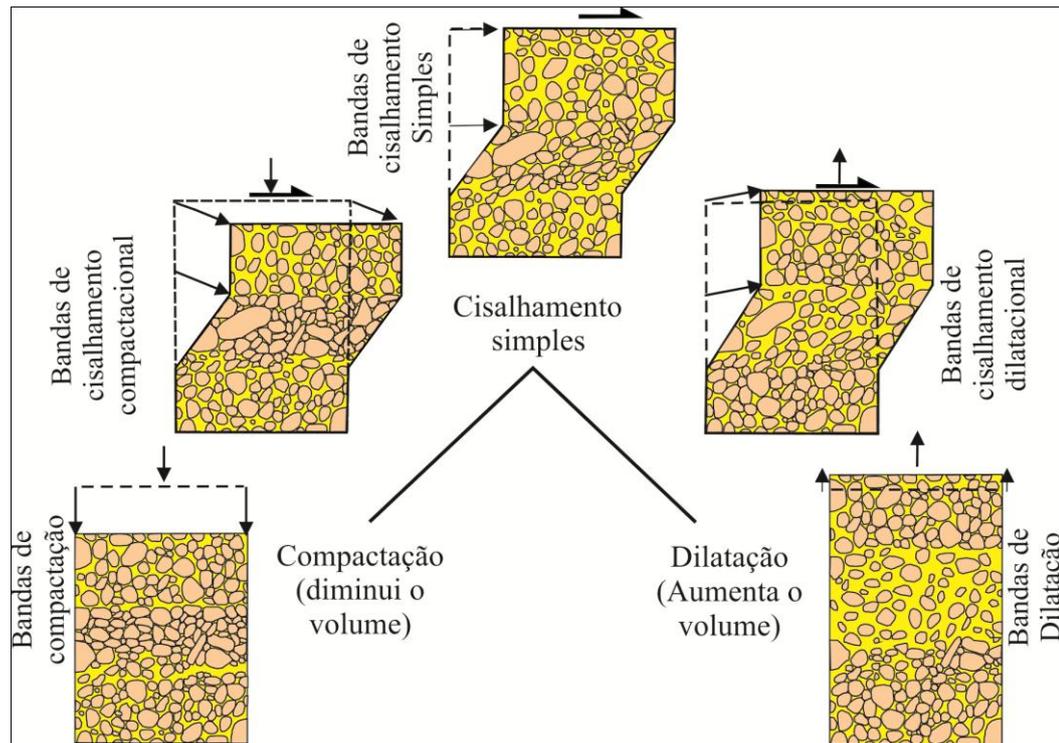


Figura 2.7: Bandas de deformação classificadas de acordo com sua cinemática, segundo Fossen *et al.* (2007).

Na literatura geológica a maioria das BD descritas são classificadas como bandas de cisalhamento com compactação, causadas por reorganização dos grãos com ou sem cataclase. Essa componente de compactação contribui diretamente para o *strain hardening* e a criação de canais de banda ou zonas que precedem o falhamento (Schultz e Balasko, 2003). Todavia, todos os tipos possíveis já foram descritos e analisados tanto em campo como em laboratório (Antonellini *et al.*, 1994; Borja e Aydin, 2004; Fossen *et al.*, 2007; Issen e Rudnicki, 2001; Olsson, 1999).

2.3.1.5. Classificação baseada nos mecanismos de deformação

Essa classificação proposta por Fossen *et al.* (2007) faz associação ao mecanismo de deformação predominante durante a formação das BD. Esses mecanismos dependem de fatores tanto internos como externos, tais como mineralogia da rocha hospedeira, tamanho dos grãos, formato, selecionamento, porosidade, cimentação e estado de tensões. A variação

nesses fatores resultará em mecanismos diferentes e conseqüentemente tipos de BD diferentes. Desta forma, visto que bandas diferentes possuem propriedades petrofísicas diferentes, essa classificação é especialmente útil quando levada em consideração a permeabilidade e o fluxo de fluido.

Os mecanismos de deformação dominantes são, segundo Fossen *et al.* (2007), fluxo granular (deslizamento e rotação de grãos), fluxo cataclástico (fraturamento e moagem do grão), lubrificação filossilicática e dissolução e cimentação, que são correlacionados respectivamente com bandas de desagregação, bandas cataclásticas, bandas filossilicáticas e bandas de dissolução e cimentação.

As bandas de desagregação são desenvolvidas por processos relacionados ao mecanismo de fluxo granular (Rawling e Goodwin, 2003), que geram rotação e deslizamentos nas bordas dos grãos e pela ruptura do cimento que une os grãos. Essas bandas são difíceis de serem observadas em arenitos maciços, mas são facilmente detectadas quando cortam e deslocam camadas (Fossen, 2010). Possuem rejeitos de poucos centímetros e espessura variável de acordo com a granulometria.

As bandas cataclásticas são as primeiras bandas de que se têm registros, descritas por Aydin (1978). Essa banda se desenvolve quando a fragmentação mecânica do grão for o mecanismo predominante. Essas bandas consistem em um núcleo central cataclástico, envolto por um volume de rocha compactada (Fossen *et al.*, 2007). Esse núcleo é caracterizado por redução no tamanho de grãos, grãos angulares e colapso significativo no tamanho dos poros. Essa quebra de grãos e diminuição significativa dos poros promove um travamento dos grãos, de tal maneira que se impossibilite algum movimento, e conseqüentemente um endurecimento, ao qual são atribuídos os pequenos rejeitos desse tipo de banda (na ordem de 3 a 4 cm).

As bandas filossilicáticas ocorrem quando a quantidade de minerais de forma lamelar (argilas, micas, etc.) for maior que 10-15%. De acordo com Fossen *et al.* (2007), essas bandas são consideradas um tipo particular de banda de desagregação, onde há um deslizamento/lubrificação entre os grãos causado pelo alinhamento dos minerais lamelares e placóides, o que confere a esse tipo de BD rejeito maior que as demais. Se a argila for o mineral lamelar predominante, essa banda apresentará coloração marrom/avermelhada proveniente da injeção e alinhamento das próprias argilas no interior da banda. Caso a

quantidade de argila seja alta (em torno de 40%), ocorrerá um processo denominado *Clay smearing*, que é classificado não mais como BD e sim como superfície de deslizamento.

As bandas de dissolução e cimentação podem ocorrer durante ou após a deformação. O termo bandas de dissolução será utilizado quando a compactação química for mais atuante durante a formação da BD. Essas bandas apresentam forte empacotamento e grãos menores que a matriz, com pouca evidência de cataclase. A dissolução é comum em BD formadas em rasas profundidades. Já a cimentação será mais evidente quando os grãos do protólito são revestidos por minerais diagenéticos, como por exemplo, a Ilita (Storvoll et al., 2002). A cimentação pode ocorrer também quando, após a deformação, ocorra precipitação de minerais tais como calcita, anidrita, hidróxidos e quartzo (Fossen et al., 2007).

Todavia é necessário ressaltar que essas classificações utilizam critérios distintos, porém ocorrem de forma conjunta, como por exemplo, uma banda individual (*single*) pode apresentar uma cinemática compactacional gerada a partir de um mecanismo de deformação de moagem e fraturamento do grão.

2.3.1.6. Importância no fluxo de fluidos

A observação de BD em pequena escala (subsísmica) e fraturas vem sendo cada vez mais estudada por geólogos, hidrogeólogos e engenheiros da indústria do petróleo devido a sua importância em reservatórios. Fossen & Hesthammer (1998) definem parâmetros da falha que interferem direta ou indiretamente no entendimento e modelagem do reservatório, como número de estruturas, distribuição, orientação, geometria, deslocamento, comprimento e propriedades petrofísicas.

O potencial de reservatórios areníticos pode ser significativamente afetado por uma compartimentação pós deposicional causada pelos mesmos mecanismos formadores dessas estruturas rúpteis. A BD são uma das feições estruturais mais importantes na influência do fluxo de fluido em rochas sedimentares (Parnell et al., 2004). Segundo Parnell *et al.* (2004) as BD têm o potencial de agir tanto como condutos para o fluido, decorrentes de aumento da permeabilidade por microfraturamento induzido por dilatação, e evidenciado pela presença de inclusões de hidrocarbonetos dentro das bandas de deformação, como defletores e barreiras, devido aumento do potencial selante resultante da cataclase, onde há fraturamento dos grãos acarretando em preenchimento dos poros, aumento da tortuosidade e em potenciais locais para cimentação.

Segundo Parnell *et al.* (2004) as bandas de deformação podem atuar de três formas distintas em relação ao fluxo de fluidos. Quando as BD antecedem a carga de hidrocarbonetos, menores volumes de fluidos percorrerão ao longo das bandas em relação à rocha hospedeira. Caso a carga de hidrocarbonetos ocorra durante a formação das BD, é necessário entender qual o tipo de bandas está sendo formada, tendo em vista que bandas cataclásticas tendem a apresentar uma deformação rúptil mais intensa, podendo gerar cominuição dos grãos e conseqüentemente um aumento da tortuosidade entre os grãos, dificultando assim o fluxo, porém bandas de cimentação podem sofrer dissolução e dessa forma funcionarem como condutos para o reservatório arenítico. Por fim, a última possibilidade é que caso a formação das bandas seja posterior à carga de hidrocarbonetos, a distribuição de hidrocarbonetos seria pouco afetada pela deformação.

Fossen & Bale (2007) afirmam que a presença de BD pode reduzir a permeabilidade em até seis ordens de magnitude, com valores mínimos para bandas tipo *singles* e máximos para os *clusters*. Esses autores afirmam que é necessária uma enorme concentração de BD para que a taxa de produção do reservatório seja afetada, caso contrário a produtividade será minimamente afetada.

2.3.2. Martelo de Schmidt

O martelo de Schmidt (MS) é um equipamento portátil, de simples manuseio e de atributos confiáveis, com popularidade ascendente e expansão de sua aplicação na pesquisa e indústria do petróleo (Aydin, 2009). Desenvolvido em 1948 por Ernst Schmidt como um aparato para testes não destrutivos de concreto *in situ*, teve no início da década de 1960 sua utilização direcionada como um método prático na avaliação de propriedades mecânicas da rocha, estimando principalmente dureza, resistência à compressão uniaxial (UCS, MPa) e a Módulo de Young (E, GPa) dos materiais (Aydin e Basu, 2005). Alikarami *et al.* (2013), chegaram a uma relação empírica, baseados na litologia (arenito) e tipo de martelo (Tipo N), onde é possível correlacionar esses valores:

$$\ln(\text{UCS}) = 0.792 + 0.067 (\text{VR}) \pm 0.231 \quad (\text{R}^2=0.96) \quad (1)$$

$$\ln(\text{E}) = -8.967 + 3.091\ln(\text{VR}) \pm 0.101 \quad (\text{R}^2=0.99) \quad (2)$$

Sendo:

UCS = Resistência a Compressão Uniaxial.

E = Módulo de Young.

VR = Valor de rebote.

Como aplicações é possível destacar conjuntamente a determinação no grau de intemperismo, avaliação de juntas e descontinuidades, controle das paredes de minas, taxa de penetração e resistência à abrasão da rocha, classificação da escavabilidade, etc. (Buyuksagis e Goktan, 2007).

Mesmo com boa precisão, bom custo-benefício e fácil manipulação (Poole e Farmer, 1980) há alguns fatores que podem afetar diretamente na obtenção dos dados, como: não calibração e utilização imprópria do instrumento, superfícies irregulares, intemperismo, proximidade de descontinuidades, presença de umidade, tamanho da amostra, proximidade dos impactos, orientação do martelo, procedimento e tipo de martelo adotado. Devido a isso, é necessário que algumas correções sejam feitas e que sejam seguidos alguns procedimentos. Considerando sua vasta utilização e história, um método padrão para o teste deve ser utilizado para que haja consistência e fidelidade dos dados. Entre os testes mais utilizados se destacam as metodologias desenvolvidas pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM, 1974) e pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM, 2001). Essas metodologias são discutidas no subitem Padronização dos dados.

2.3.2.1 Princípio Operacional

Quando o MS, que consiste em um êmbolo carregado por mola, é pressionado ortogonalmente sobre uma superfície (Aydin e Basu, 2005), o pistão é automaticamente liberado em direção ao êmbolo (Figura 2.8). Parte da energia disparada é consumida por absorção, devido à deformação plástica do material, e transformadas em calor e som. A energia remanescente do impacto representa a resistência à penetração (ou dureza) do material. A distância viajada pelo pistão após o rebote, que é expressa como uma porcentagem da extensão inicial da mola é denominada de *valor de rebote* (VR), que é considerado o índice de dureza da superfície.

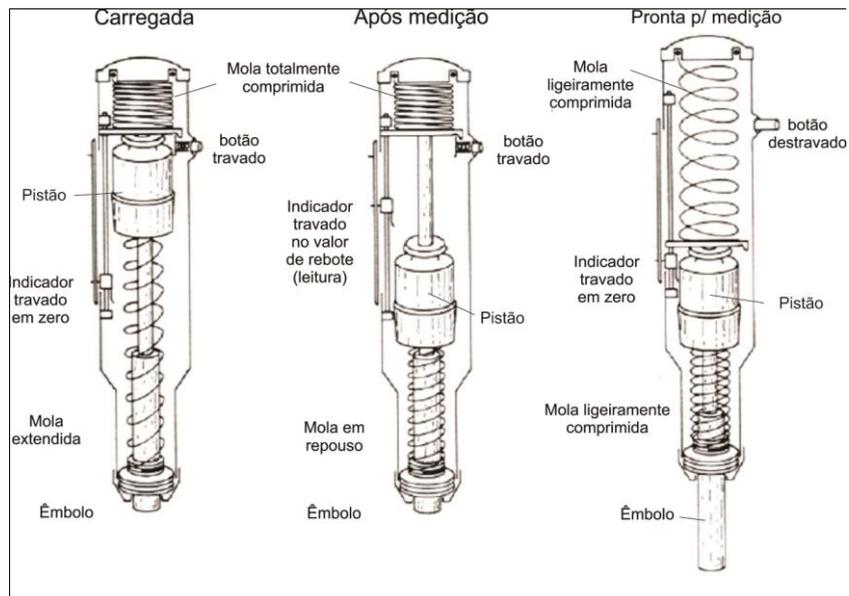


Figura 2.8: Princípio operacional do Martelo de Schmidt. (Adaptado de McCarroll, 1994).

2.3.2.2. Tipos de martelo e calibração

Os modelos de MS são designados em diferentes níveis de energia, sendo os tipos L e N mais comuns para testes de rocha e concreto (Buyuksagis e Goktan, 2007). Os níveis de energia de impacto de tipo L e N são, respectivamente, 0.735 e 2.207 Nm. O martelo tipo L é mais indicado para testes com material mais suave, como rochas porosas e intemperizadas (Aydin, 2009). O martelo tipo N é menos sensível a superfícies irregulares, sendo preferível para aplicações em campo. A utilização de martelos diferentes fornecerá valores diferentes, sendo os valores do martelo tipo N superiores aos do tipo L (Aydin e Basu, 2005), todavia é possível uma correlação entre ambos. Segundo a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM, 1974) este aparato apresenta melhores resultados quando a resistência à compressão uniaxial varia entre 20 – 150 MPa, contudo Aydin & Basu (2005) sugerem que ambos martelos possam ser utilizados para valores de UCS de até 300 MPa. Buyuksagis *et al.* (2007) concluíram que o martelo tipo N apresenta menos dispersão de dados do que o tipo L, e que é mais efetivo quando a resistência à compressão uniaxial varia entre 20 – 290 MPa.

O MS é fornecido com uma bigorna para calibração, que possui um guia de impacto vertical, com um ponto exato de impacto de diâmetro superior ao do êmbolo. A verificação e calibração do martelo são necessárias para manter um bom padrão entre os valores de rebote. A Proceq, empresa desenvolvedora desse equipamento, sugere que execute a verificação de desempenho toda vez antes de usar o equipamento, no entanto, no mínimo a cada mil

impactos ou a cada três meses, esperando que o valor de rebote seja o mesmo já estipulado pelo fabricante.

2.3.2.3. Requisitos da amostra e do teste

As amostras devem ser intactas (consistentes), petrograficamente uniformes e representativas de toda a rocha a ser caracterizada, identificando sempre se em testemunhos, blocos ou afloramentos. As superfícies, especificamente no ponto de impacto, devem ser suavizadas e livres de poeira e partículas. Pode ser utilizada uma fina camada de areia para isso, especialmente quando houver marcas de serragem ou perfuração (Aydin, 2009).

Para teste em testemunho é recomendado que o tamanho mínimo seja NX ($\geq 54,7$ mm) para martelo tipo-L e de tamanho T2 (≥ 84 mm) para o tipo-N. Amostras de bloco devem ter no mínimo 100mm (Aydin, 2009). O ponto de impacto deve ser no centro da amostra para evitar dispersão de energia ou quebra da amostra.

Outra observação é a direção relativa do impacto. Özbek (2009) concluiu que quando são realizadas medidas paralelas ao acamamento, foliação ou feições semelhantes, a energia tende a se dissipar e conseqüentemente serão obtidos valores errôneos, sendo recomendadas sempre medições perpendiculares a essas estruturas. Complementarmente a isso, Aydin (2009) recomenda que seja utilizado um tubo guia para que a leitura seja perfeitamente ortogonal à superfície, e que não haja variação maior que $\pm 5^\circ$. Caso não seja possível, é necessária uma normatização do VR.

2.3.2.4. Normatização do valor de rebote (VR)

O valor de rebote obtido ao longo de impactos não horizontais são influenciados pelas forças gravitacionais. Para anular esses efeitos, os valores de VR não horizontais devem ser corrigidos, tendo como base a direção horizontal. Tanto a ISRM (1974) quanto ASTM (2001) estipulam que os valores de rebote podem ser normatizados utilizando curvas de correção estipuladas pelo fabricante. Basu & Aydin (2004) desenvolveram uma tabela com quatro direções de impacto (figura 2.9), com valores respectivos de +90, +45, -45, -90, sendo os valores positivos para posições ascendentes e negativas para posições de medição descendentes.

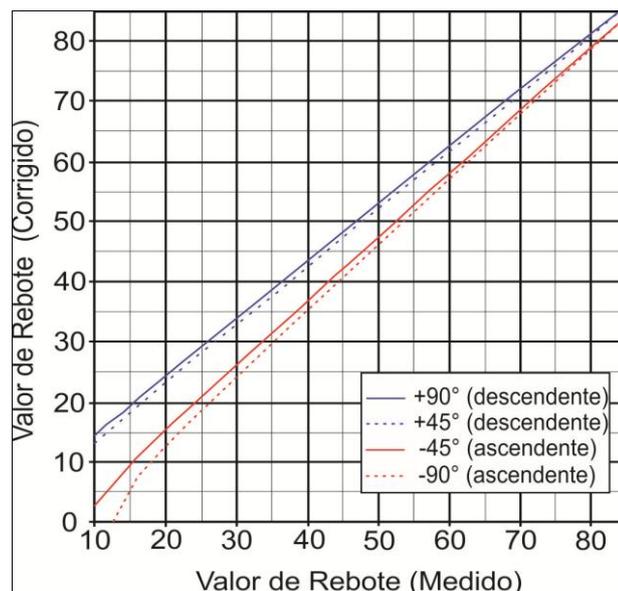


Figura 2.9: Ábaco para correção dos valores de rebote (VR) não horizontais. Adaptado de Basu & Aydin, 2004.

2.3.2.5. Padronização dos dados

Atualmente ainda não existe uma padronização sobre quantas leituras são necessárias para definir precisamente a dureza da rocha. Buyuksagis & Goktan (2007) reuniram alguns procedimentos (Figura 2.10), sendo os procedimentos mais indicados o da ISRM e ASTM.

Instituição/ Autor	Procedimento do teste:
ISRM	Realizar 20 medidas seguidas, com no mínimo um êmbolo de distância entre os pontos, e fazer uma média com os 10 maiores valores.
ASTM	Realizar, no mínimo, 10 medidas descartando aqueles que diferem em mais de 7 unidades da média. Por fim, calcular a média aritmética dos valores remanescentes.
Poole & Farmer	Selecionar o pico de VR de cinco impactos contínuos em um mesmo ponto. Fazer a média dos picos de três conjuntos diferentes conduzidos em três locais diferentes.
Goktan & Ayday	Realizar 20 medidas seguidas, com no mínimo um êmbolo de distância entre os pontos. Descartar os valores com base no critério de Chauvenet e realizar uma média com os valores remanescentes.

Figura 2.10: Diferentes procedimentos para o teste de Martelo de Schmidt. Modificado de Buyuksagis *et al.* 2007.

A ISRM recomenda que sejam executadas vinte (20) leituras e que seja feita uma média com os 10 maiores valores, sendo que caso haja quatro (4) medidas com variação menor que dois (2) o teste pode ser encerrado. Por sua vez a ASTM (2001) sugere dez (10) impactos simples e que seja realizada uma média com esses valores, posteriormente serão

descartados aqueles valores de rebote com diferença de sete (7) unidades para mais ou menos dessa média obtida e um novo valor será calculado para representar aquele ponto. Ambos concordam que a distância entre os impactos seja de no mínimo o diâmetro do êmbolo. Outros autores defendem que não se deve descartar nenhuma leitura, pois isso é justificado pela heterogeneidade da rocha.

2.3.2.6. Propriedades influenciadoras

É necessário cautela durante a aquisição de dados com MS, tendo em vista que alguns fatores influenciam diretamente no VR. Um desses fatores é a força relativa de grãos e matriz. Caso o tamanho dos grãos seja maior que o êmbolo, erros consideráveis podem ocorrer, sendo imprescindível uma média que o representará. Nessas situações é necessário analisar a matriz e grãos separadamente.

Outros fatores consideráveis são o intemperismo e umidade presentes. O intemperismo atua fortemente nos valores de rebote, causando diferenças cristalinas e variação na escala de grão, sendo imprescindível uma descrição detalhada da litologia. Segundo Aydin (2009) uma superfície intemperizada tem em sua primeira leitura valor maior que as seguintes, devido ao dano causado na rocha após o impacto. No caso de umidade, o VR é afetado principalmente em rochas porosas e/ou cimentadas sendo preferível o teste a seco. O erro causado por umidade ocorre devido ao fluido gerar uma pressão de poros após o impacto.

Em caso de rochas laminadas, xistosas ou acamadadas, os valores de UCS e E são radicalmente reduzidos quando o rebote é paralelo aos planos, sendo mais confiáveis medidas oblíquas (Özbek, 2009).

O local de obtenção dos dados também apresenta variações. Em campo devem ser evitadas descontinuidades abaixo do ponto de impacto, deformações verticais e vibração de algumas interfaces, camadas laminadas e folheadas, intemperizadas, rochas fraturadas. Rochas como carvão, pelitos e ardósias são indicadas para esses testes devido à superfície suavizada das mesmas. Normalmente em campo os valores médios são maiores e mais confiáveis que medidas em laboratório. Isso ocorre devido à mudança na geometria da rocha e dispersão da energia devido ao não confinamento lateral. Todavia, seguindo as recomendações de aquisição e correções esses erros são reduzidos.

2.3.3. Propriedades petrofísicas

2.3.3.1. Porosidade

A porosidade é uma propriedade fundamental na engenharia de reservatórios, já que mede a capacidade de armazenamento de fluidos e influencia algumas outras propriedades físicas da rocha, tais como velocidade de ondas elástica, densidade total e resistividade. A porosidade é definida como sendo a relação entre o volume de vazios de uma rocha e o volume total da mesma, ou seja:

$$\Phi = V_p = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_t - V_g}{V_t} \quad (3)$$

onde V_p é a porosidade, V_v o volume de vazios, V_g o volume de grãos e V_t o volume total. O volume de vazios é normalmente denominado volume poroso da rocha e representado pelo símbolo Φ (Schön, 2011).

Há dois tipos de porosidade, a absoluta e a efetiva. A porosidade absoluta é a relação entre o volume total de vazios de uma rocha e o volume total da mesma, enquanto a porosidade efetiva é a relação entre os espaços vazios interconectados de uma rocha e o volume total da mesma. Do ponto de vista da engenharia de reservatórios, a porosidade efetiva é o valor que se deseja quantificar, pois representa o espaço ocupado por fluidos que podem ser deslocados do meio poroso. Rochas com materiais intergranulares, pobre a moderadamente cimentados, apresentam valores aproximadamente iguais de porosidades absoluta e efetiva. Já rochas altamente cimentadas, como calcários, podem apresentar valores diferentes para essas duas porosidades (Rosa et al., 2006).

Geralmente os reservatórios apresentam dois tipos de sistemas de porosidades distintos: porosidade primária, aquela que se desenvolveu durante a deposição do material sedimentar, representada pela porosidade intergranular dos arenitos e porosidade secundária, resultante de alguns processos geológicos subsequentes à conversão dos sedimentos em rochas, como as redes de fraturas interligadas encontradas em arenitos, por onde acontece o fluxo dos fluidos (Ahmed e Meehan, 2012).

2.3.3.2. Módulos de Young, Incompressibilidade e Razão de Poisson

A mecânica das rochas é definida por Tiab & Donaldson (2004) como o campo de estudos desenvolvido para o entendimento básico de processos de deformação da rocha com

alta significância tecnológica, sendo extremamente importante para engenheiros de petróleo. O entendimento do comportamento mecânico auxilia no entendimento de formação geológicas da subsuperfície e é chave para evitar instabilidades do poço durante sua produção. Entre essas propriedades podemos destacar o módulo de Young, incompressibilidade e a razão de Poisson.

O módulo de Young, também conhecido como módulo de elasticidade, é a medida da propriedade da rocha de resistir à deformação em um único eixo. Por outro lado o módulo de incompressibilidade calcula a capacidade da rocha de resistir à deformação em três eixos (deformação hidrostática). Ambos seguem a Lei de Hooke, onde:

$$\delta = C. \varepsilon \quad (4)$$

Sendo δ a tensão aplicada, C uma constante e ε a deformação. Para o módulo de Young essa deformação é decomposta em $L_0 - L / L_0$, sendo L_0 o comprimento inicial do corpo e L o comprimento final. Para o módulo de incompressibilidade, por não se tratar de um único eixo e sim de variação de volume, a ε é dada por $V_0 - V / V_0$, onde V_0 é o volume inicial antes da deformação e V o volume final.

Quando há compressão sobre um único eixo de um corpo, espera-se que o eixo ortogonal à compressão tenha acréscimo em seu volume. A razão entre a deformação transversal e a longitudinal é conhecida como Razão de Poisson. A razão de Poisson (ν) é dada por:

$$\nu = \frac{-\varepsilon_{lat}}{\varepsilon_{axial}} = \frac{\Delta \frac{d}{d_0}}{\Delta \frac{l}{l_0}} \quad (5)$$

Onde $(-\varepsilon_{lat})$ é a deformação lateral e (ε_{axial}) a deformação axial. Essa razão corresponde ao caráter rúptil – dúctil da rocha, onde valores próximos a 0 indicam um caráter rúptil da rocha, aumentando a influência do seu caráter dúctil à medida que se aproxime de 1.

Capítulo 3 Materiais e métodos

Os procedimentos metodológicos aplicados ao estudo de bandas de deformação foram divididos em: revisão bibliográfica, aquisição e processamento de dados, interpretação integrada e elaboração da dissertação. Este capítulo irá detalhar como tais etapas foram realizadas e os métodos empregados para a realização do trabalho (Figura 3.1).

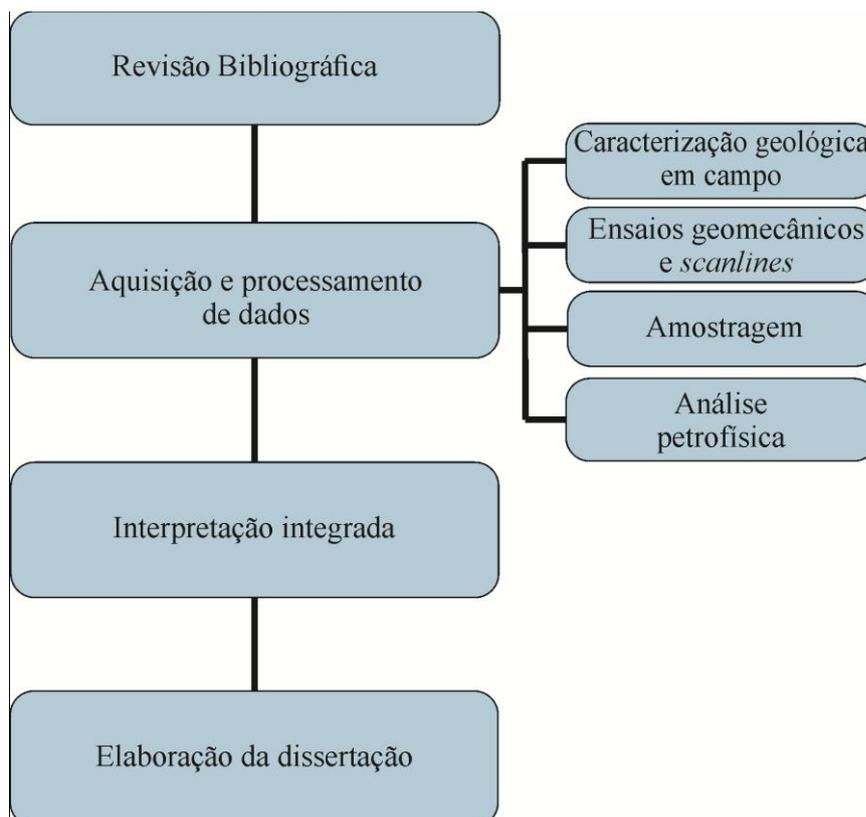


Figura 3.1: Fluxograma das atividades desenvolvidas durante o trabalho proposto.

3.1. Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica corresponde à etapa inicial desse trabalho e desenvolvida até seu fim, sendo utilizadas dissertações, monografias, artigos, periódicos, livros e demais textos científicos relacionados com a Bacia do Rio do Peixe, com foco nos aspectos geológicos e metodológicos a serem utilizados ao longo do trabalho. Esta etapa tem como objetivo o enriquecimento do conhecimento na área de estudo, fundamentação teórica em relação ao estudo de BD, além do conjunto de técnicas de análises aplicadas para o desenvolvimento deste trabalho.

3.2. Aquisição e processamento de dados

Esta etapa consiste em quatro sub-etapas, sendo consecutivamente a caracterização geológica, realização de ensaios geomecânicos *in situ*, com auxílio do martelo de Schmidt, e *scanlines*, amostragem de plugues para posterior análise petrofísica em laboratório. Buscou-se nessa etapa focar em três afloramentos, cada um desses representativos dos elementos arquiteturais presentes em uma zona de falha, que foram divididos com base em seu padrão deformacional em: protólito não deformado, zona de dano e núcleo da falha, localizados na sub-bacia Brejo das Freiras (figura 3.2).

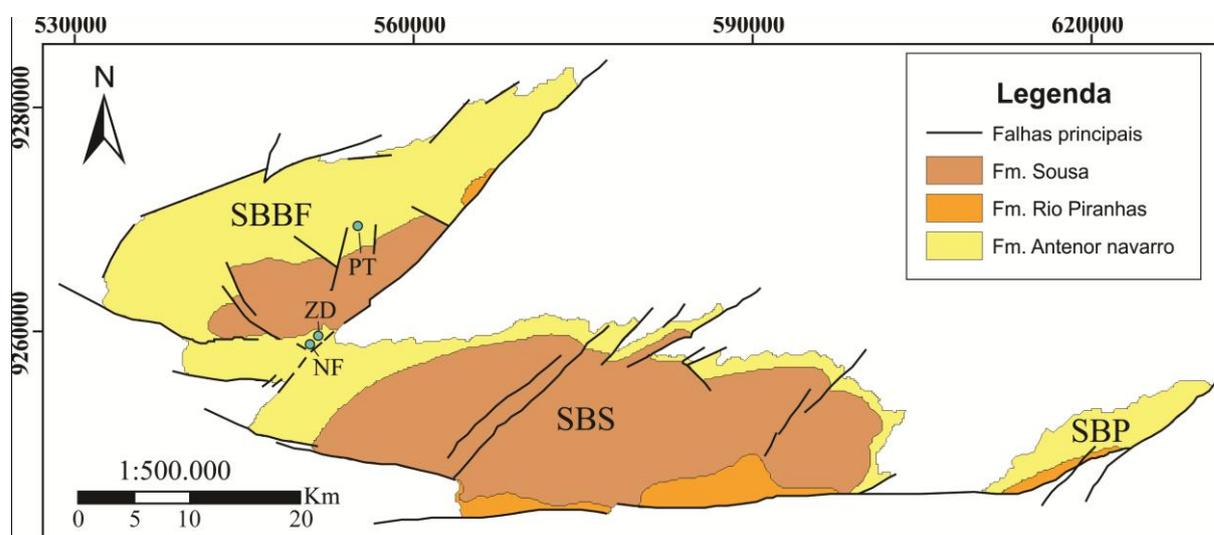


Figura 3.2: Mapa geológico da Bacia do Rio do Peixe com a localização dos afloramentos estudados. Os elementos arquiteturais estão representados por PT – Protólito não deformado, ZD – Zona de dano e NF – Núcleo da falha, com a individualização das três sub-bacias que compõem a Bacia Rio do Peixe, sub-bacia Brejo das Freiras (SBBF), sub-bacia Sousa (SBS) e sub-bacia Pombal (SBP).

3.2.1. Caracterização geológica em campo

A caracterização geológica consistiu inicialmente em uma descrição macroscópica da rocha (litologia, granulometria, mineralogia, arredondamento, esfericidade, coloração, estruturas, grau de seleção, etc.), a fim de correlacionar as fácies sedimentares com as estruturas deformacionais presentes. Concomitante a isto foi realizada a coleta de dados estruturais, com ênfase em BD, medida de planos de falha, *slikenlines*, paleocorrentes, fraturas, tipo e espessura de BD e indicadores cinemáticos.

3.2.2. Ensaios geomecânicos e *scanlines*

Os ensaios geomecânicos correspondem na elaboração de perfis ao longo de uma mesma BD ou cruzando as zonas de *singles* e *clusters* (figura 3.3 A), a fim de identificar

variações no valor de resistência à compressão uniaxial entre essas duas zonas, medidos ao longo de uma direção pré-definida, com o auxílio de um martelo de Schmidt. Foram realizados perfis geomecânicos, sempre buscando medições dentro e fora da BD, seguindo a metodologia proposta pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM, 2001), onde para cada ponto foram realizadas 10 medidas de valores de rebote e por fim foi feita uma média dessas medidas que representará o ponto de coleta. Os valores que variam em sete unidades da média são descartados e o cálculo da média será realizado novamente descartando esses valores dispersos. Com o valor médio e o auxílio do ábaco de Müller (Vallejo et al., 2002) para correção do valor de rebote, é possível estimar a resistência à compressão uniaxial da rocha.

As *scanlines* foram realizados em conjunto com a perfilagem geomecânica (figura 3.3 B). Para a realização destes inicialmente é estendida uma trena métrica para que sejam identificados cada centímetro da *scanline*. São descritos macroscopicamente o tipo de banda, podendo ser filossilicática, cataclástica, de dissolução e cimentação ou de desagregação, qual a direção desta banda e em quantos metros a banda cruza o *scanline*, espessura das BD, a distância entre as bandas e frequência em que as mesmas ocorrem. Para isso foi utilizado régua métrica para medição da espessura de cada BD e distância entre essas estruturas. A medição da direção e mergulho das BD é feita com auxílio de uma bússola.



Figura 3.3: Metodologias aplicadas. (A) Perfil geomecânico iniciado em zona de *single*, atravessando um *cluster* marcado pela maior resistência ao intemperismo e conseqüentemente relevo positivo (B) Medição do valor de rebote do Martelo de Schmidt.

3.2.3. Amostragem

A amostragem foi realizada tanto em forma de plugues como em amostras de mão, para análise laboratorial. As amostras de mão foram retiradas com o auxílio do martelo e picareta, enquanto a amostragem de plugues foi realizada por meio de uma plugadeira manual (figura 3.4 A), em alvos identificados e devidamente orientados (Figura 3.4 B). Posteriormente os plugues são catalogados (Figura 3.4 C) e embalados para preparação em laboratório para análise petrofísica e petrográfica. Porém é importante ressaltar que nos afloramentos representativos de zona de dano e protólito não deformado não foi possível à coleta de plugue devido baixa coesão das rochas, sendo nesses pontos a porosidade calculada por meio de fotomicrografias em seções delgadas.

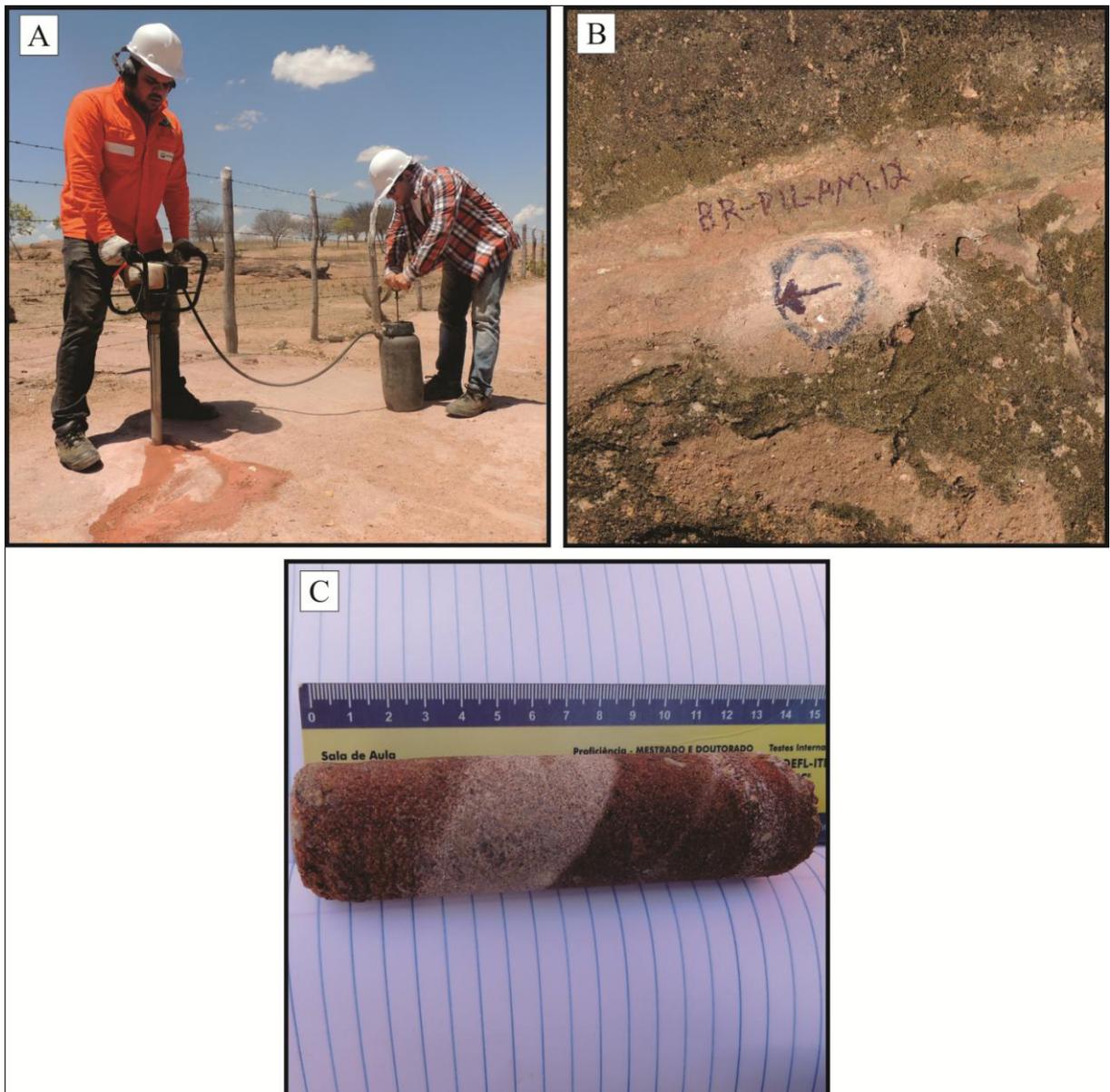


Figura 3.4: (A) Plugadeira manual utilizada para retirada em plugues. (B) Localização do ponto de coleta

orientada de um plugue, com indicação do norte geográfico para orientação das seções delgadas. (C) Exemplo de plugue coletado para análises em laboratório.

3.2.4. Análise petrofísica

As amostras foram coletadas com o auxílio de uma plugadeira manual (figura 3.4 A) e em blocos de rocha. Após isso foi realizada a descrição petrográfica dos plugues e posteriormente preparados para análise petrofísica ou preparação da seção delgada. A etapa inicial da preparação dos plugues consiste na serragem com o auxílio de uma serra de disco diamantado (figura 3.5 A), para que o plugue se adeque às dimensões específicas de análise, que varia de 2,5 a 7 cm. Após a adequação de seu tamanho, as extremidades são retificadas para que fiquem paralelas, com o auxílio de uma retificadora (figura 3.5 B), e só após esta etapa as amostras são destinadas à análise.

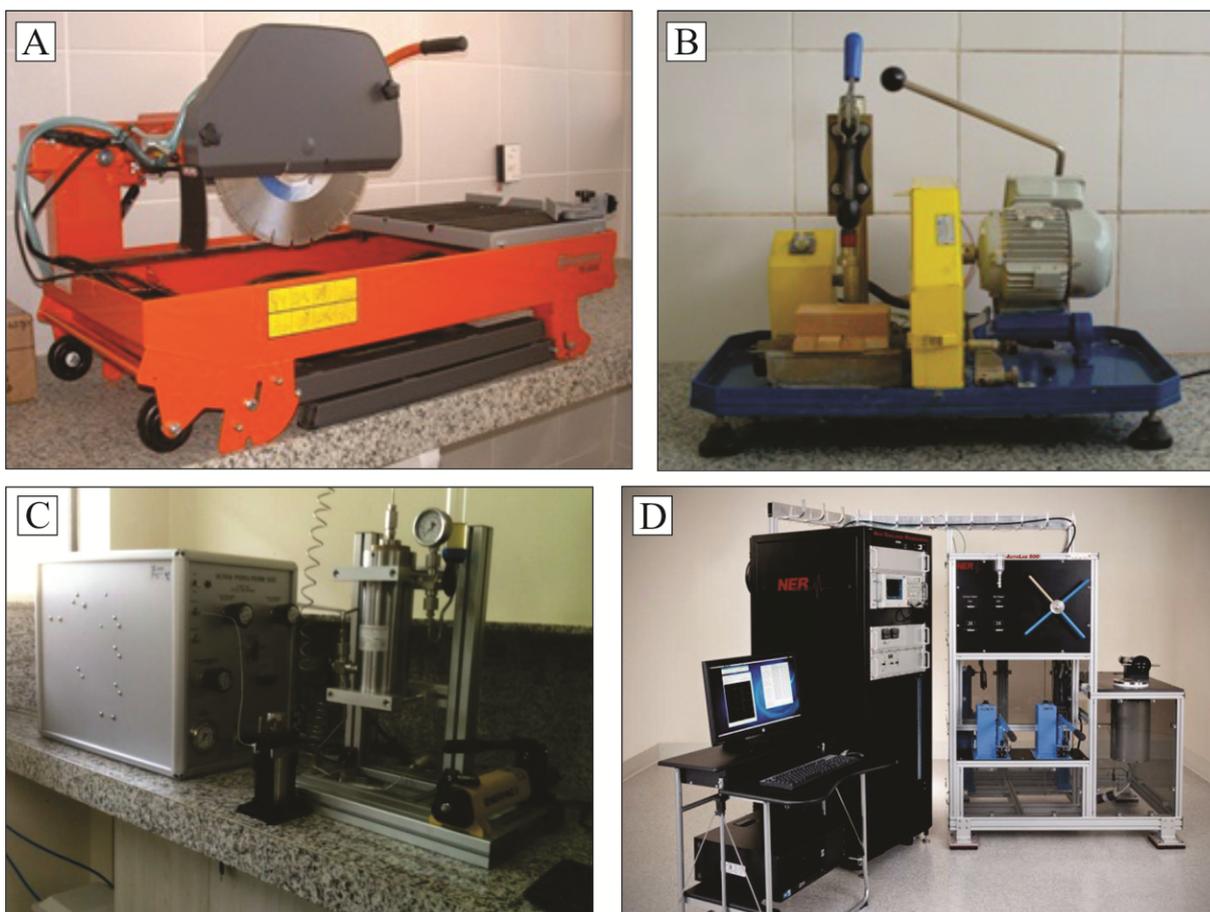


Figura 3.5: Equipamentos para preparação e análise de plugues. (A) Serra com disco diamantado utilizado para adequação do tamanho dos plugues. (B) Retificadora de plugues. (C) Equipamento de análise de porosidade e permeabilidade Ultra-Poro/Perm-500, com copo matriz e *Core holder*. (D) Equipamento Autolab 500 para medição de velocidade de onda compressional e cisalhante e compressibilidade da rocha.

As análises ocorreram no Laboratório de Petrofísica da UFCG, com o equipamento UltraPoroPerm 500[®], para medição da porosidade (figura 3.5 C) e medições de velocidade de onda com o equipamento Autolab 500[®] (figura 3.5 D) onde através de relações da teoria geral da elasticidade são calculados os módulo de Young, incompressibilidade e razão de Poisson.

3.3. Interpretação integrada

Os dados obtidos em campo foram processados e interpretados através de *softwares* de análise geodinâmica, como Tectonics FP e Stereonet, para a separação por grupos de falhas e fraturas, análise de paleotensões e tratamento de atributos estruturais, como direção, mergulho e cinemática das BD. Os gráficos de *scanline*, UCS, porosidade, módulos de Young, incompressibilidade e razão de Poisson foram elaborados com auxílio do *software* Grapher 7[®].

3.4. Elaboração da dissertação

A elaboração da dissertação tem início na pesquisa bibliográfica onde busca-se aprimorar o conhecimento com base em trabalhos prévios sobre BD com ênfase em sua influência geomecânica e petrofísica, bem como encontrar hiatos científicos presentes nessa área. Ao passo em que resultados foram obtidos, a partir da integração dos dados estruturais, geomecânicos e petrofísicos, a dissertação recebeu seu caráter único, com objetivo de preencher lacunas científicas encontradas durante a fase de pesquisa bibliográfica. Esta dissertação faz parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral para a obtenção do título de mestre neste programa.

Capítulo 4. Propriedades físicas de arenitos afetados por bandas de deformação nos diferentes elementos arquiteturais de uma zona de falha.

1 INTRODUCTION

Deformation bands (DB) are tabular structures that occur in porous rocks (Aydin, 1978; Aydin & Johnson, 1978; Fossen et al., 2007). These structures were initially described as small faults which occur about a few millimeters of thickness, with metric length. DB have characteristics such as pore collapse and grain fracturing, with displacements occurring in the order of a few millimeters to centimeters (Aydin, 1978).

Actually researches recognize that DB can act as hydraulic barriers (Ballas et al., 2014; Fossen & Bale, 2007; Soliva et al., 2016) or conduits for flow fluid, depending of the mechanisms of deformation and factors such as confinement pressure working during the formation and structural evolution. (Parnell et al., 2004; Torabi, 2014; Wibberley et al., 2007). Such behavior has stimulated researches on the geomechanical, petrophysical and fault distribution properties in order to predict the behavior of the fluid flow during the development and depletion of the oil reservoirs by such structures. The concise and detailed description of such flow properties has a fundamental importance when one wishes to analyze the fluid migration pattern and the rock storage properties.

It is recognized that DBs directly affect the petrophysical properties of the rock, such porosity and permeability (Jourde et al., 2002) as well as the geomechanical properties as uniaxial compression strength (UCS) and Young's modulus (Ylmaz & Sendir, 2002). These structures can act in different ways in the reservoir. The cataclastic bands, which have mechanical fracture of the grains as the main mechanism, usually present reduction of permeability and porosity in relation to the host rock, while UCS and Young's modulus tend to increase relative to their host rock (Torabi, 2014). On the other hand, disaggregation bands, from granular flow as main mechanism, tend to present an increase of porosity and a decrease in UCS and Yong's modulus (Torabi & Fossen, 2009).

The intensity of occurrence of DB, the geomechanical characteristics and the petrophysical properties of the rock are parameters that are closely related and influence directly the behavior of the reservoir. The analysis of these in different deformation scenarios and the comprehension of their variation are fundamental in the understanding of the compartmentalization of oil reservoirs. However, even with perceptible advances on the influence of DB on reservoirs, there is no understanding of the variations of UCS, porosity,

Young's and incompressibility modulus and Poisson's ratio in the different deformational scenarios (protolith, damage zone and fault core) present in the fault zone, nor on internal variations of these parameters in a same scenario affected by DB (Figure 4.1).

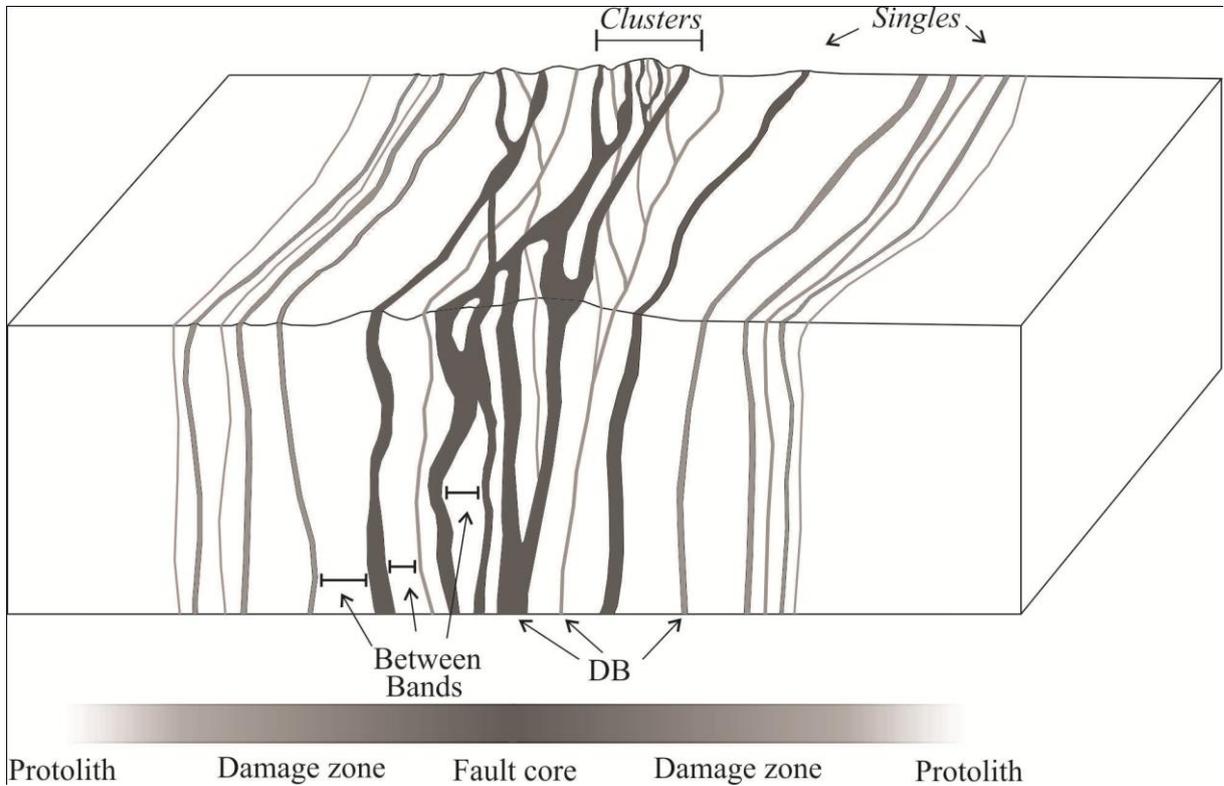


Figure 4.1: Architectural elements of fault zone. DB – Deformation Bands.

The aim of the present study was to identify the influence of DBs on the physical properties of rocks, such as porosity, Young's modulus, incompressibility modulus, Poisson's ratio and UCS. These properties are addressed in different architectural components of a fault zone (Figure 4.2B), called (1) Protolith, (2) damage zone and (3) fault core in siliciclastic rocks. The specific aim was the geological-structural characterization and analysis of the relation between frequency of DBs, fault zone architectures and petrophysical properties. The study area is located in Rio do Peixe Basin, northeast of Brazil (Figure 4.2 A).

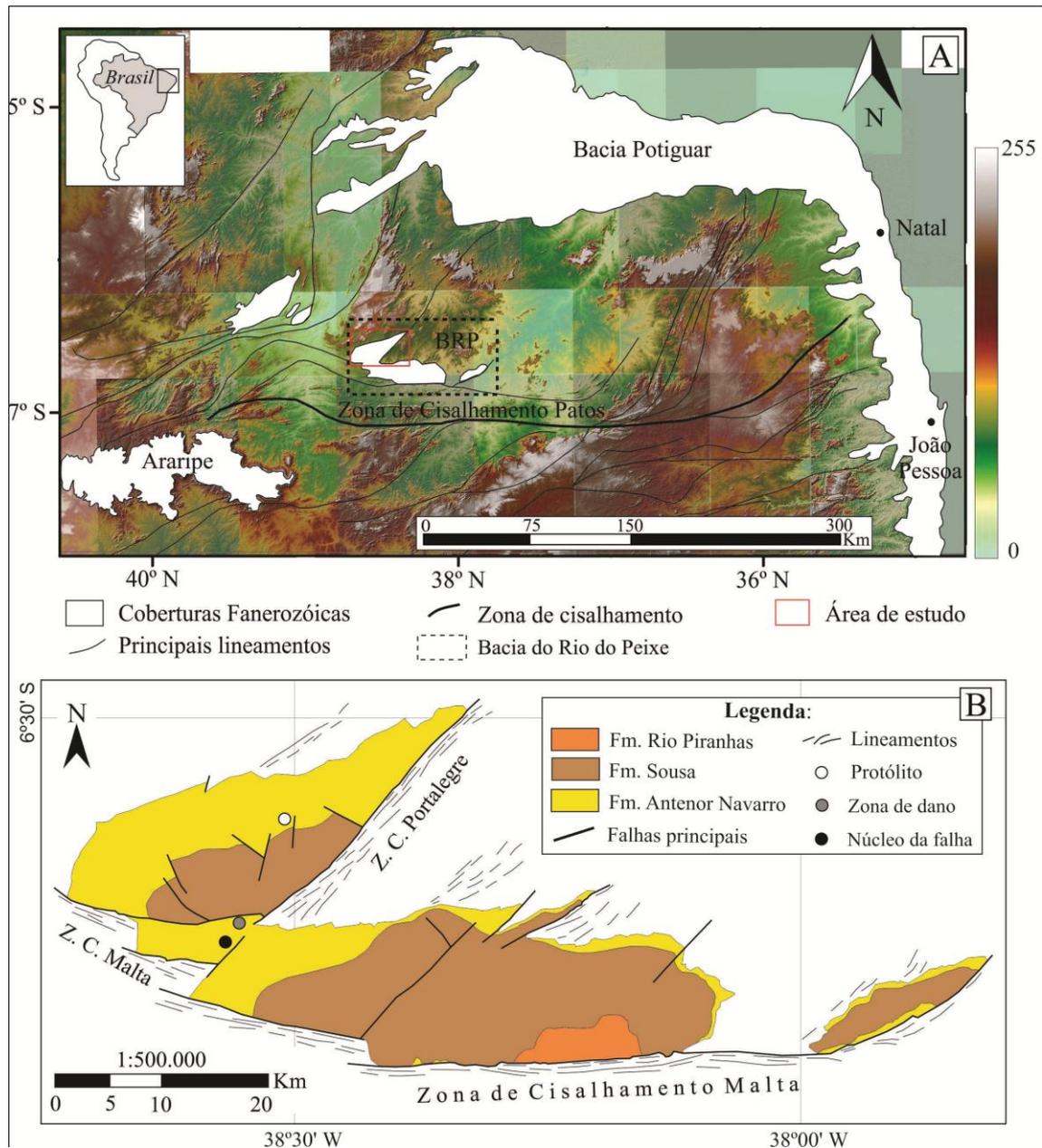


Figure 4.2: (A) Localization of Rio do Peixe Basin and study area. (B) Geological map of RPB featured to main faults that affect the basin. Modified by Françolin et al. (1994) and Medeiros et al. (2005), with the localization of outcrops representing the fault core, damage zone and protolith.

In this research, the attributes of the DBs were collected along continuous sweep lines (scanlines), localized in order to intercept the largest number of structures (Dershowitz & Herda, 1992; Marrett et al., 1999; Ortega et al., 2006; Miranda et al., 2014; Sanderson & Nixon, 2015).

UCS values were obtained using the Schmidt Hammer. The porosity values were obtained from plugs using the permoporosimeter, as well as by digital analysis of photomicrographs of thin sections representative of each deformational scenario, using Avizo Fire 8.1 software.

It was possible to observe that the fault core presents higher frequency of bands, higher UCS values and lower porosity, representing a region with higher resistance and lower fluids volume. For the damage zone were measure intermediate values, for the protolith lower UCS values and higher porosity, which facilitate the drilling and accumulation of fluids.

2 GEOLOGICAL SETTINGS

The Rio do Peixe Basin (RPB) is part of a sedimentary basins set that had their origin from the filling of intracontinental depressions associated with the rifting and separation of the African - South American continents, between Neocomian to Barremian (Nogueira et al., 2015). The RPB includes three sub-basins, representing three half-grabens homonyms called, from west to east, sub-basin Brejo das Feiras, Sousa and Pombal (Ponte et al., 1991) (Figure 4.2 B), separated by heights of basement. The main faults that affect the RPB limit the sub-basins are called Portalegre, Malta and Rio Piranhas faults (Françolin et al., 1994) (Figure 4.2 B).

The evolution of these sub-basins has been attributed to the brittle reactivation of these Precambrian ductile shear zones. Sénant & Popoff (1991) and Françolin et al. (1994) detailed the faults that affected the basin, but only the first work quotes the presence of DB, defining them as domains of whitish faults or zones of failure anastomosed in a millimeter scale. The kinematics of these DB were described by Nogueira et al. (2015).

The sedimentary fill of RPB if formed by deposits of Early Cretaceous age (Sénant & Popoff, 1991), which comprise three main formations: Antenor Navarro, Sousa and Rio Piranhas (Braun, 1969). The Antenor Navarro Formation directly overlies the basement, such as a nonconformity that is evidenced along flexural margins of the half-grabens (Sénant & Popoff, 1991). Nogueira et al. (2015) described this formation as conglomerates and immature sandstones at the base and fine sandstones that interfinger with shales at the top, deposited under alluvial plain and alluvial fan systems. The Sousa Formation is the intermediate formation characterized by the predominance of shales and reddish silts deposited by a lacustrine system. The Rio Piranhas Formation corresponds to conglomerates and coarse sandstones deposited by alluvial fan systems (De Castro et al., 2007).

3 METHODS

The techniques applied in this work were divided into field procedures and laboratory analyzes for three outcrops, each representative of an architectural element of the fault zone proposed in this work (Figure 4.1 and 4.2). These elements were classified as protolith, damage zone and core fault (Caine et al., 1996), in the same facies: conglomerate sandstone of fine to clay matrix. (Figure 4.3).

The field activities included the realization of *in situ* geomechanical profiles, with the use of the Schmidt Hammer (type L), analysis of the structural elements, with the application of scanline technique developed by Ortega *et al.* (2006), plug sampling for petrophysical analysis and confection of thin sections. The laboratory analysis consisted of measuring the porosity from thin sections and when possible the analysis of plugs using the UltraPoroPerm 500 and Autolab 500 equipment, as well as the calculation of the Young's and incompressibility modulus and Poisson's ratio using velocity relations.



Figure 4.3: Photos corresponding to (A) conglomerate sandstone of fine to clay matrix affected by DB and (B) plug representative of conglomerate sandstone unit of fine to clay matrix

All outcrops studied correspond to the Antenor Navarro Formation, such as outcrop 1 (Figure 4.4A) that corresponds to the non-deformed protolith, showing no deformation pattern and preservation of sedimentary structures. Outcrops 2 and 3 present DB as main structures, as well as spaced bands (singles), as well as agglomerated bands under anastomosed pattern (clusters), with different degrees of deformation. The outcrop 2 has a moderate degree of deformation and cohesion, containing DB of NE and E-W directions and a few clusters, being considered as a representative outcrop of the damage zone (Figure 4.4 B). The outcrop 3, representative of core fault (Figure 4.4 C) has a high degree of deformation and high cohesion, high number of DB in the NE, NW, E-W and N-S directions and massive presence of clusters.

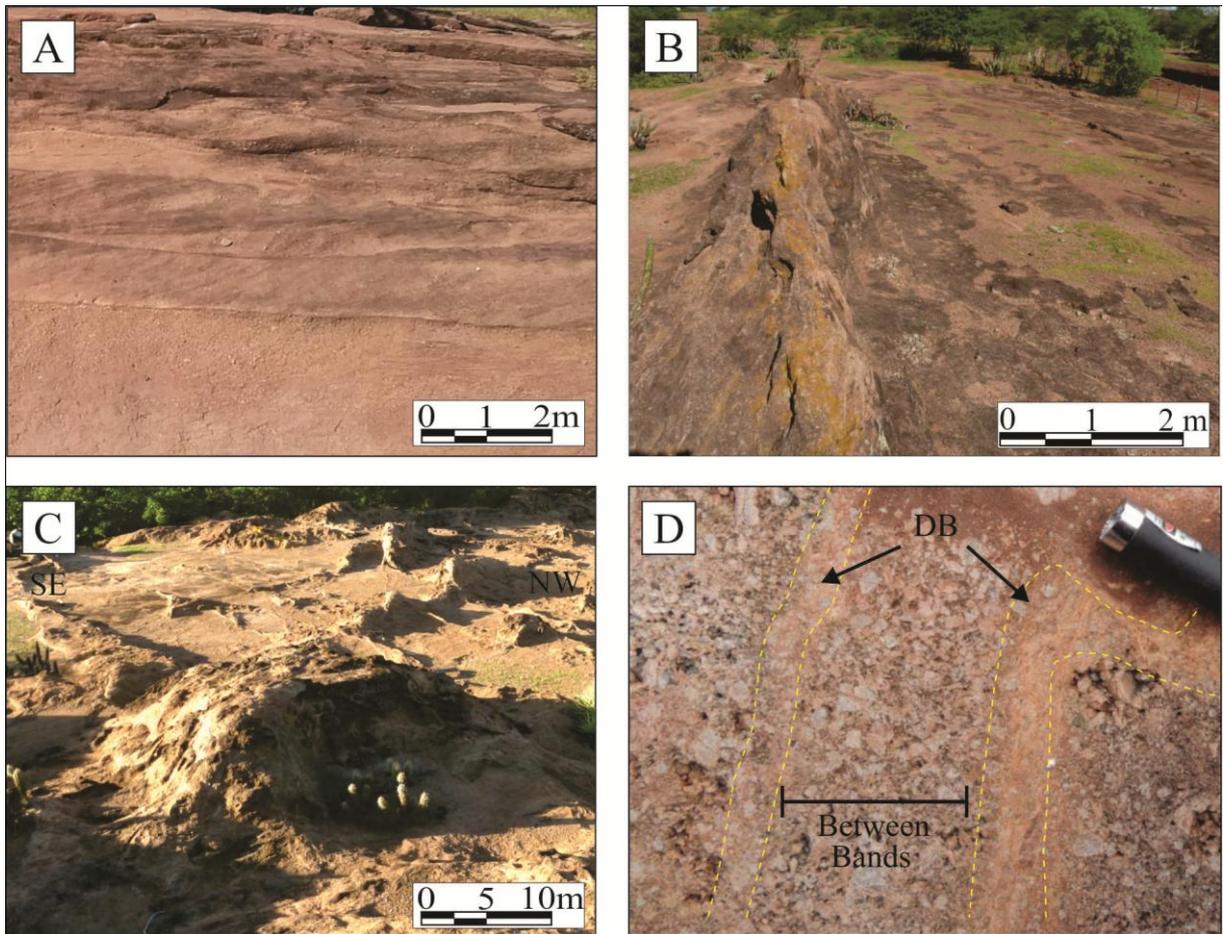


Figure 4.4: Outcrops in (A) protolith, (B) damage zone, (C) fault core and (D) variation between DB and zone spacing between bands present in the same architectural element of fault zone.

3.1 Geomechanical analysis

Geomechanical profiles were performed in situ using Schmidt Hammer, type L, in order to detect rebound value variations between the three architectural elements of fault zone. In the damage zone and fault core area, the analyzes were carried out punctually on the DB and in points between bands (Figure 4.4 D). This technique was important for understanding the effect of the band on both the same architectural element and the between different elements of the fault zone.

The positioning (direction and extension) of the profiles were defined in order to intercept the largest possible number of structures, covering the whole extent of the outcrop, both in singles zones and in clusters zone. The methodology adopted for the collect of geomechanical data follows the standards of the American Society for Testing and Materials

(ASTM, 2001) which for each point 10 measures of rebound value were carried out and finally an average of these measures was executed.

In the outcrop correspondent to the protolith 21 measurements were made, in the damage zone 62 measurements were performed, 35 of which correspond to measurements in the DB and the other 27 between these bands. In the fault core were performed 36 measurements, 15 of which correspond to values obtained in the DB and the other 21 in zones between bands.

3.2 Scanline

In this research was realized linear sweeps (scanlines) essentially perpendicular to the DBs. Along the scanlines it was possible to collect some attributes of the structures, such as: spacing between bands, band thickness, orientation, morphology, intersection relation and fill characteristics (Marrett et al., 1999; Ortega et al., 2006; Guerriero et al., 2010; Solum et al., 2010; Hooker et al.; 2013).

Firstly, the structural data was collected from the DBs that occur in the different outcrops of the sandstones of the Antenor Navarro Formation. In the study area were identified DB in the four different directions: a) NE-SW; b) E-W; c) NW-SE e d) N-S. In the region corresponding to the protolith the scanline technique was not applied because this rock had no structures.

Five scanlines were performed in order to obtain the attributes of the DB in the different architectural elements: damage zone and fault core. In the damage zone were carried out two scanlines (SC-1 and SC-2) with direction N-S, with extension of 28 and 6 m, where identified 50 DBs. In the core fault were realized three scanlines (SC-3, SC-4 and SC-5) with approximately 20 m extension each. In this architectural element 231 bands were identified along scanlines SC-3 and SC-4, direction NW-SE.

The SC-5 scanline was positioned in the NE-SW direction and intercepted 46 bands. The variation in the direction of the scanlines was performed aiming the perpendicular positioning according to the sets of the structures identified in the outcrops.

The regularity of the spacing of the DBs in damage zone and fault core was quantified by the coefficient of variation (CV) of the population of the spacing between fractures, $CV = \sigma/\mu$, where σ is the standard deviation of the spacing population and μ is the arithmetic mean. For a random distribution of fractures $CV = 1$. Then, if $CV > 1$ the fractures are more clustered than random; when $CV < 1$, the distribution of fractures presents less clustered, and

there is a greater regularity in the spatial organization of the same ones. (Gillespie et al., 2001; Hooker et al., 2013).

3.3 Petrophysical analysis

Samples were collected in the representative outcrops of the three fault structural elements, aiming the estimation of porosity. However, the plug sampling was possible only in the outcrop corresponding to the fault core, where the rock presents higher degree of cohesion and high rates of deformation. In this work, the porosity values were obtained through two methods: thin section image analysis and plugs analysis using the permoporosimeter gas expansion. From the thin sections were made photomosaic and with the help of the software Avizo Fire 8.1 it was possible to estimate the porosity of the entire length of the thin section.

Other deformation parameters were measured with the Autolab 500® equipment, such as Young's and incompressibility modulus and Poisson's ratio. The Young's modulus, also known as modulus of elasticity, has provided information about the rock's ability to withstand uniaxial deformation, while the incompressibility modulus measures the rock's ability to withstand triaxial compression (Tiab & Donaldson, 2004). The Poisson's ratio made reference to the ratio between elastic and axial deformation, bringing information about the rheology of the rock.

4 RESULTS

The results obtained in the three architectural elements of a fault zone are described below, being (i) the fault core, with a high degree of deformation, a greater number of bands, several clusters with positive relief marking greater resistance to weathering; (ii) damage zone, with moderate degree of deformation marked by more spaced bands, a few clusters of bands; and (iii) protolith without DB (rock matrix). The analyzes were performed punctually on the DBs, as well as on points between these DBs, with the exception of the outcrop corresponding to the nondeformed protolith, as it did not present such structures. Thus, the data obtained in this work correspond to the fault core, damage zone with BDs and spacing between BDs, and protolith. It is important to note that in both the structural elements corresponding to the fault core and the damage zone, there are regularly spaced and less thick

BDs that were called singles. The BD's that occur as agglomerates with anastomosed and thicker pattern were denominated clusters (Fossen *et al.* 2007).

4.1 Uniaxial Compressive Strength (UCS)

The distribution of the estimated values of the UCS in the different architectural elements of the fault zone are shown in figure 5. The profiles were performed aiming to acquire data along the three architectural elements of the fault zone. In the non-deformed rock, which presents low cohesion, the lowest UCS values were recorded among all the elements that make up the fault zone, varying between 6,5 and 12 MPa, with an average value of 10 MPa (Figure 4.5).

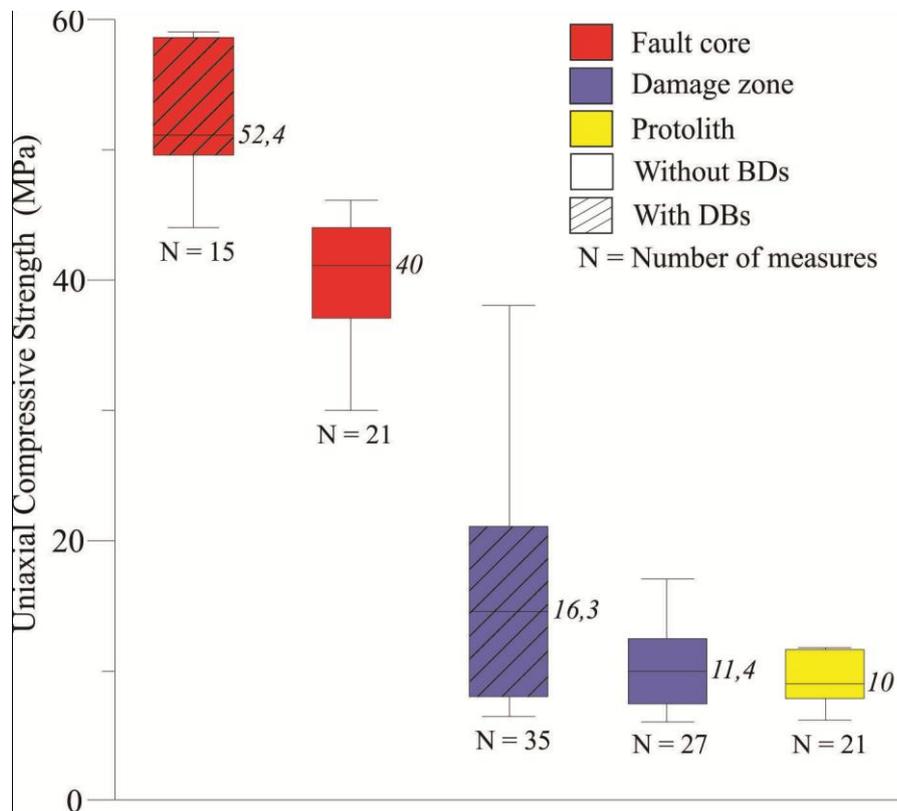


Figure 4.5: Uniaxial compressive strength values in each architectural elements of fault zone.

In the outcrop representing the damage zone, the UCS values vary between 6,5 and 38 MPa, with an average value of 16,3 MPa. In the spacing between the DBs the values vary between 6,0 and 25 MPa, with an average value of 11.4 MPa (Figure 4.5). When each architectural element is observed individually, the BDs behave as zones of intense deformation, whereas in the area between the band spacing it presents lower rates of deformation (Figure 5). Such behavior is observed both in the outcrop representing the damage zone and in that representing the fault core, where the points with DBs present higher resistance values than the zones without DBs.

However, when the UCS values for the three architectural elements were analyzed together, the geomechanical profiles corresponding to the damage zone (Figure 4.6A), even with BD presence, presented a lower resistance value when compared to the fault core (Figure 4.5). In the outcrop corresponding to the fault core (Figure 4.6 B) the resistance values obtained within the deformed zones with bands vary between 44 to 59 MPa, with an average value of 52,4 MPa, whereas in measurements made in the zones between bands vary between 30 and at most 45 MPa, with an average of 40 MPa (Figure 4.5).

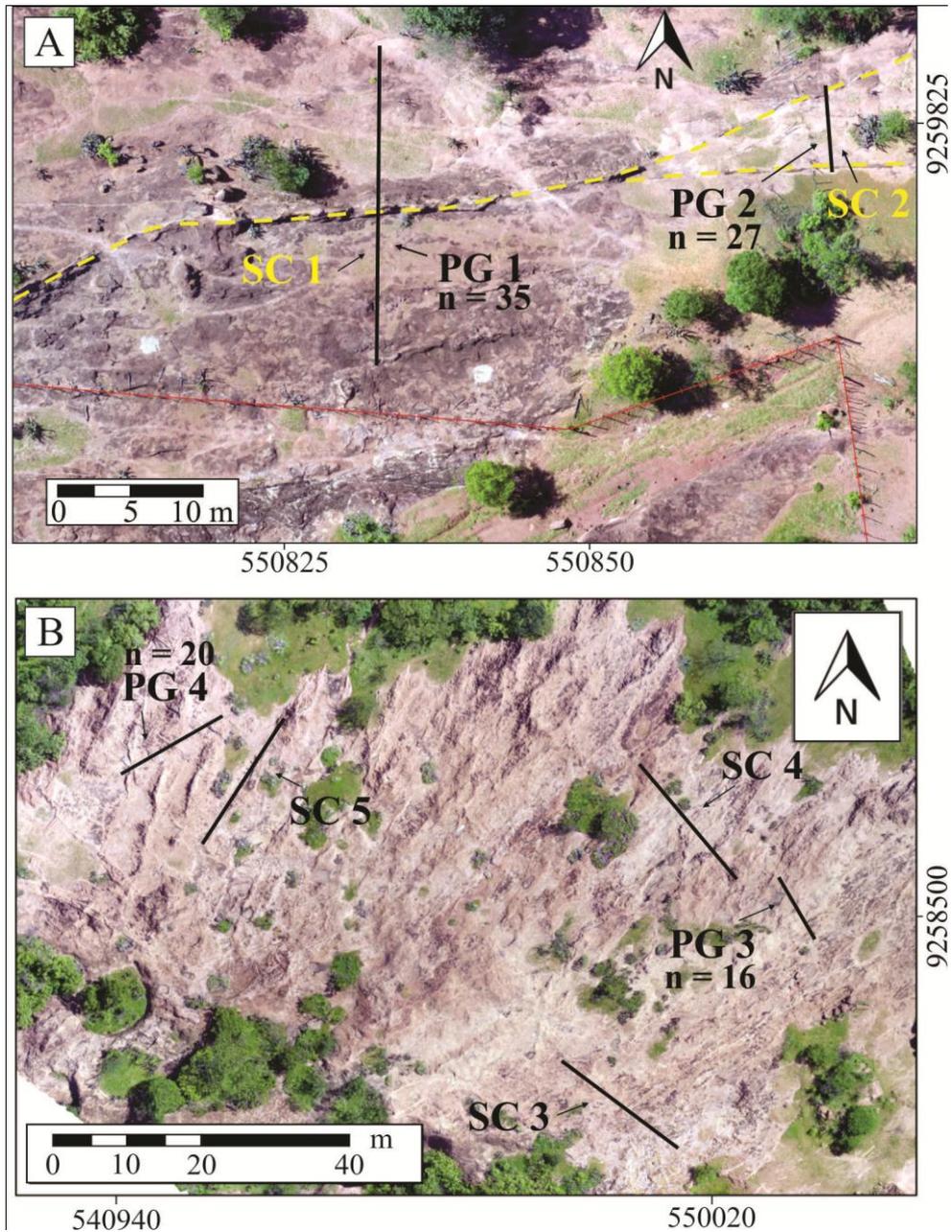


Figure 4.6: Position of geomechanical profile (PG) and scanlines (SC) performed in damage zone (Figure 6 A) and fault core (Figure 6 B). n – numbers of samples; yellow lines – main cluster of damage zone; red line – fence.

Even if it is an intensely deformed zone, the resistance values in BD are 25% higher than in points between these structures. However, the UCS values obtained between these structures are also high. The possible explanation for this has already been presented in previous studies (Faulkner et al., 2010; Fossen & Bale, 2007), where a zone inserted in the fault core, with greater degree of compaction, gave similar results due to the higher rates of deformation during its evolutionary history.

The fault core is the scenario with the greatest deformation among the three observed. This fact can be evidenced by factors such as intense cataclasis marked by the comminution of grains inside the BDs, greater number of bands of single type as clusters and, in some situations, with the presence of slipsurfaces, which occur only at a final stage of the bands development, probably at more advanced stages of deformation, as observed by Fossen & Bale (2007).

4.2 Scanlines

The scanlines SC-01 and SC-02, performed in the outcrop corresponding to the damage zone, both of the N-S direction (Figure 4.6 A), have spatial destruction with tendency to cluster. The coefficient of variation (CV) values of the band spacing were: SC-01 presented $CV = 1.86$ and scanline SC-02 had CV of 2.1. The cumulative frequency of DBs with a thickness of 4.6 and 1.9 mm is 0.5 to 1.3 bands per meter, SC-01 and SC-02, respectively. The power laws (F) obtained in the log-log graph of SC-01 and SC-02 scanlines were $0,7021b^{-0,694}$ and $1,6201b^{-0,808}$, respectively (Figure 4.7 A and B). Probably scanline SC-02 shows a higher frequency of bands per meter because the sweep line has been concentrated in a location near a cluster of bands, which presents a larger number of structures, greater thickness and smaller spacing.

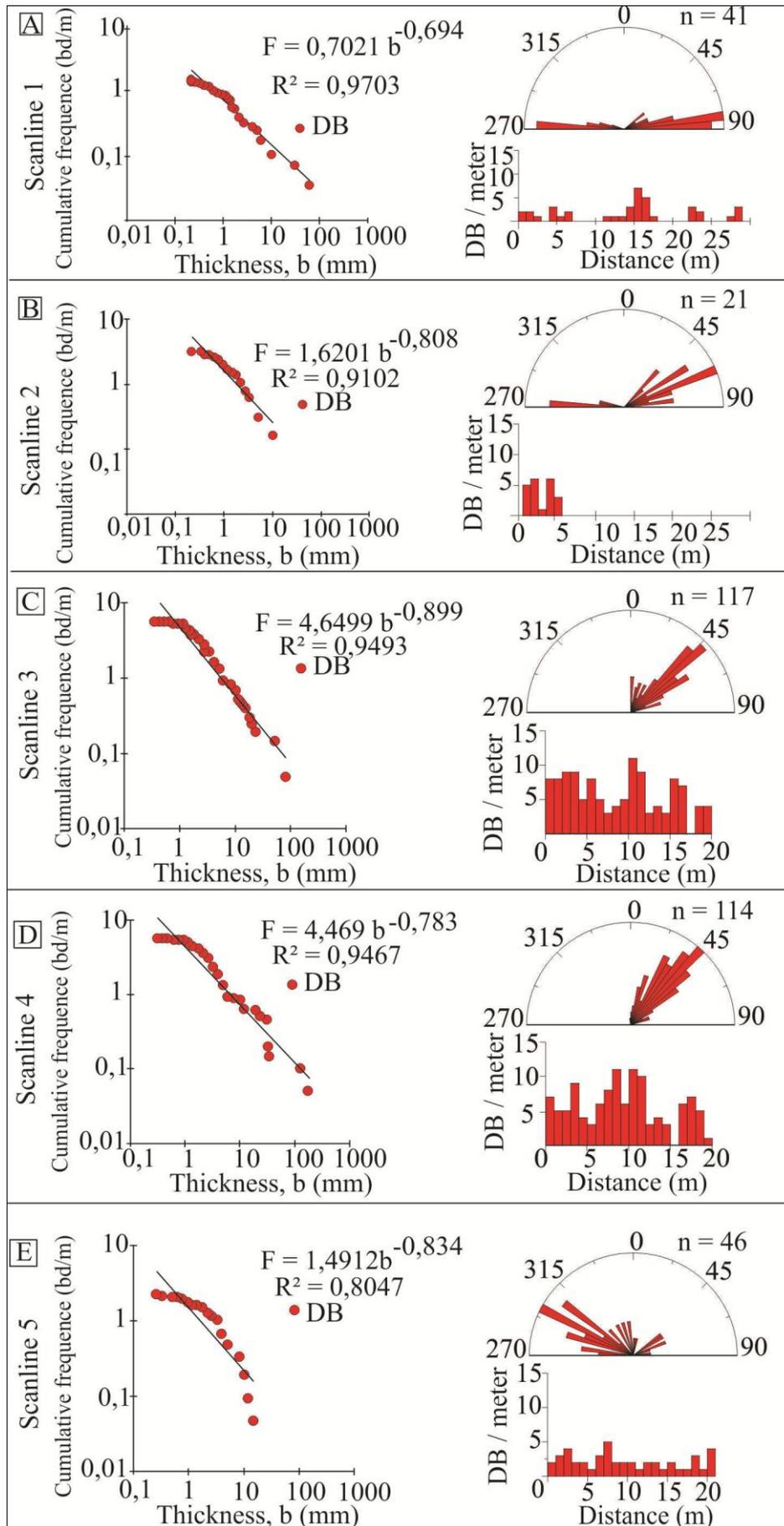


Figure 4.7: Scanlines performed in (A, B) damage zone and (C, D, E) fault core.

In the core fault region were performed the scanlines SC-3 and SC-4, NW-SE, and scanline SC-5, direction NE-SW (Figure 4.6 B). The SC-3 and SC-4 lines intercepted structures with NE-SW, N-S and E-W direction. The log-log chart of the SC-03 scanline shows power law, $F = 4,6499 b^{-0,899}$. Along this line the bands with an average thickness of 5 mm have an intensity of approximately 1.5 bands per meter. The CV of the spacing between bands occurring along SC-03 was 1.0. The scanline SC-04 shows power law $F = 4,469 b^{-0,783}$ and cumulative frequency of 0,9 bands per meter, for structures with an average thickness of 7.7 mm. This sweepline presented spacing with CV = 5.3. The scanline SC-5 (Figure 4.6 B) has NE-SW direction and intercepted NW, NS and EW direction structures, and presented power law $(F) = 1,4912 b^{-0,834}$. The DBs with an average thickness of 3.4 mm occur approximately every meter (Figure 4.7 E). The direction bands observed in line SC-05 have spatial distribution with CV = 0.6. The values obtained in scanline SC-05 are more similar to the damage zone than to the fault core, possibly because they do not intercept the NE structures that have the highest deformation intensity.

The fault core has a frequency of bands per meter up to four times greater than the damage zone. In addition, the bands of greater average thickness range from 5 to 7.5 mm in the fault core and 1.9 to 4.6 mm in the damage zone. Moreover, the fault core has a band spacing 2.5 times smaller than the damage zone, where the significantly larger presence of a cluster of bands in the more deformed portion directly influences this increase of frequency in this zone.

4.3 Porosity

The porosity values measured on thin sections (Table 1) show higher porosity in the region of the non-deformed protolith, followed by the zone of damage and finally the fault core with the lowest values of porosity. The protolith has an average porosity of 10.3%, grains with loose packing, point and floating contacts and absence of DB, which are structures responsible for grain comminution (Figure 4.8 A and B). The damage zone (Figure 4.8 C and D) shows higher comminution of grains in the zones closer to the BD, but the number of bands in this scenario is lower than that seen in the fault core. The average porosity at this point is 8.9%, which is around 10% lower than that calculated on the protolith. Even with DBs, in this scenario these structures were not as active and do not occur in large quantity, conferring a low reduction in porosity when compared to the fault core.

Seção delgada	Elemento arquitetural	Porosidade (%)
SSF4-B	Protolith	7,7
SSF4-C	Protolith	18,61
SSF2-A	Protolith	5,38
SSF2-B	Protolith	9,77
TAM8	Damage zone	5,27
UFAM-4	Damage zone	11,17
UFAM-12	Damage zone	10,33
MEL-NE-05-A-II	Fault core	4,39
MEL-EW-04-C3	Fault core	0,2
MEL-EW-02-B1	Fault core	1,49
MEL-NO-03-B	Fault core	2,64
FMM-4C	Fault core	0,95
BDM-4-NS	Fault core	1,97
BDM-9	Fault core	4,55
LAM2A-BOM-II	Fault core	3,29

Tabel 1: Porosity values measured in thin sections.

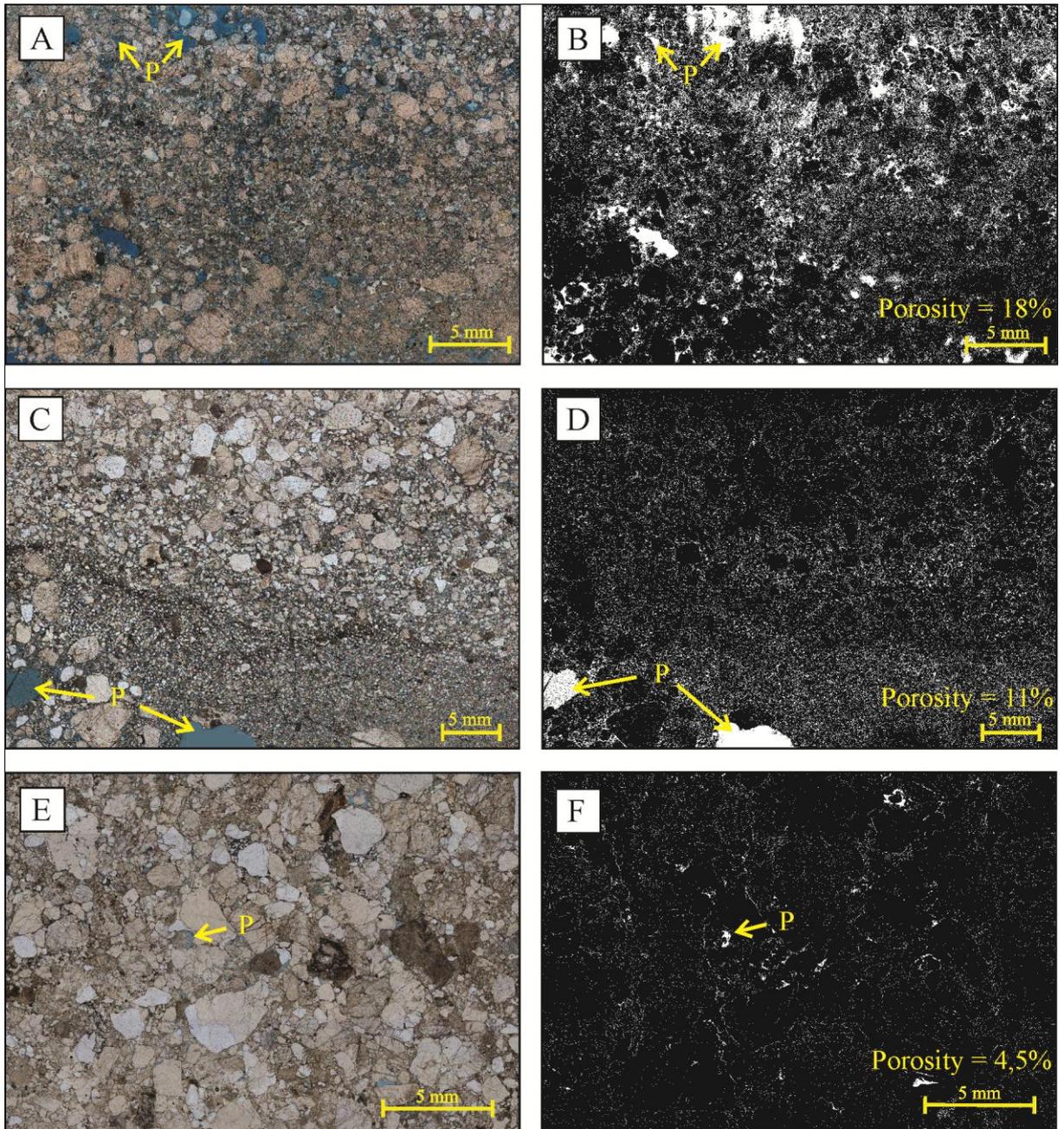


Figure 4.8: Photomicrography of the three architectural elements present in the fault zone and their counterparts processed by the Imago software. (A, B) protolith, (C, D) damage zone and (E, F) fault core. P = Porosity.

At the fault core there is a great comminution of grains by the large number of DBs, giving zones of almost null porosity (Figure 4. 8 E and F). The average porosity value in this architectural element is 2.5%, i.e. a reduction of more than 75% in porosity when compared to undeformed rock. This reduction of porosity is in agreement with what has been described in the literature, where some bands present decrease in porosity and permeability of up to six orders of magnitude when compared with the host rock, as seen by Fossen & Bale (2007).

Only the outcrop corresponding to the fault core showed enough cohesion for the removal of the plugs, allowing both conventional porosity analysis and the calculation of Young's modulus, incompressibility and Poisson's ratio. To be treated, all the plugs have a certain level of deformation. However, for comparison, the results were divided into samples with DBs and samples without DB.

The average value of porosity by conventional method for samples containing DBs is 13.2%, while for samples with no band this value is 19.8% (Figure 4.9 A). The presence of DBs in this case entails a reduction over than 30% in porosity.

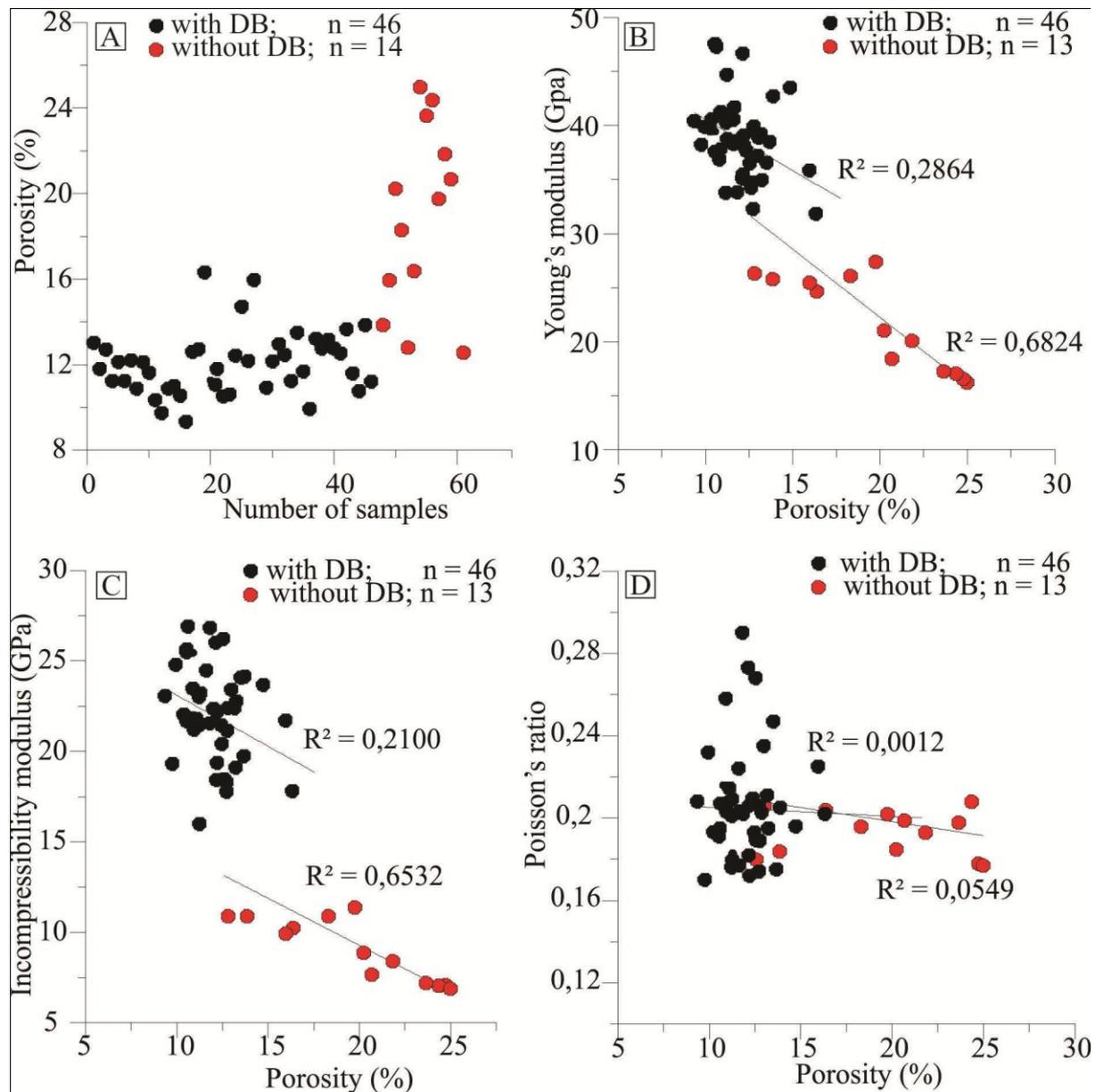


Figure 4.9: (A) Porosity vs. Number of samples. (B) Young's modulus vs. Porosity, (C) Incompressibility modulus vs. Porosity and (D) Poisson's ratio vs. Porosity.

4.4 Young's modulus, incompressibility modulus and Poisson's ratio.

Young's modulus values for the rock with no DB varied between 15 and 27 MPa, whereas those values range from 31 to 47 MPa for the rocks with DBs (Figure 4.9 B). In addition, the higher the Young's modulus the smaller the porosity values. Thus, the samples with smaller Young's modulus are those with less resistance to deformation. These values in laboratory analysis corroborate with the UCS values obtained in the field, where the DBs present higher values of resistance (Figure 4.5). Higher values of Young's modulus and UCS can be attributed to the analyzed DBs, which possibly may have led to an increase in the cohesion of the rock.

Higher incompressibility values, because of the hydrostatic deformation, confer greater resistance to triaxial deformation for these rocks. The incompressibility modulus (Figure 4.9C) shows values between 8 and 15 MPa for the samples between DBs, while rocks with DB have values between 16 and 27 MPa. Besides that, the samples without DBs have higher porosity, which contributes to a lower incompressibility modulus than the samples with DBs, considering that the pores present less resistance than the mineral matrix.

From figure 9 D we can infer that both the samples with presence of DBs and the samples obtained between bands have a behavior that is marked by low values of Poisson's ratio ranging from 0.204 to 0.199, respectively. However, it is necessary to emphasize that these rocks, even presenting similar brittle behavior, have different porosities.

5 DISCUSSIONS

The concept of fault zone employed here differs from the classical standard, where the deformation was described as homogeneously concentrated in the fault core and progressively decreased as it moved away from it. The concept proposed by Faulkner et al. (2003) is the closest to what was observed for the study area, where there is the presence of multiple core of deformation. However, these authors propose this pattern of multiple cores for fractures, and here we observe the same behavior applied to DB. This pattern occurs in all outcrops with the presence of bands, varying in their number of bands and deformation rate, depending on which architectural element of the fault zone is found. It is important to note that even with the presence of multiple cores, the zone described as the fault core continues to have higher deformation rates than the damage zone.

According to Alikarami et al. (2013), the values of resistance and permeability of the rock vary according to the quantity and type of structures present. The DBs studied by these authors presented cementation, which conferred reduction of permeability and an increase in resistance and Young's modulus. The bands studied in this paper have high rates of deformation, marked by intense cataclasis and have a behavior similar to DBs with high degree of cementation observed by Alikarami et al. (2013). For our case DB are present there will be an increase in the values of UCS, reduction in porosity values and an increase in Young's modulus. The increase of the UCS, according to the density of DB, is evident when observed the different architectural elements of the fault zone, with the fault core presenting a greater number of bands and greater resistances than the damage zone.

In recent years there have been significant advances in the understanding of DB and its influence on petrophysical properties. In relation to the porosity, Mollema & Antonellini (1996) observed a reduction of up to 25% in relation to the host rock, while Ballas et al. (2013) observed ~10% of reduction in porosity. Here, the calculated values for the rock in the fault core, with presence of DBs have 75% less porosity than the undeformed rock. In addition, important petrophysical properties such as incompressibility modulus and Poisson's ratio were also calculated, concluding that the presence of DBs increases the resistance of the rock and maintains its brittle character.

With the use of the scanline technique applied the characterization of DBs it was possible to quantify the clustering of these structures and obtain a scalar law (power law). These attributes can be used to develop discrete fracture models and construct scenarios for numerical simulation (Miranda *et al.*, 2016). Fossen et al. (2007) and Solum et al. (2010) analyzed DBs from compressive and distentional environments and concluded that there is a reduction in the permeability values with the increase in the number of bands. Here, this technique was applied to bands from the same tectonic context in different architectural elements with the purpose of observing the variation of several petrophysical properties. We observed that the larger the number of DBs and the greater their thickness, the more significant the reduction of porosity.

6 CONCLUSIONS

The present paper analyzed the variation of petrophysical and geomechanical properties in the Rio do Peixe Basin, in outcrops that represent sandstones as undeformed protolith, damage zone and fault core.

UCS values are higher in BDs than between bands in the same outcrop. This increase in resistance is associated with the cataclasis generated by the BDs during its formation. However, the rocks present in the deformation nucleus, even at the points between bands, showed values of UCS higher than the rocks found in the damage zone and protolith, respectively. It is concluded that even though DB generates up to 40% increase in the UCS values, the deformational scenario where the rock is located is what controls the rock resistance.

It was observed that the fault core has a DB frequency four times higher than in other architectural elements. The fault core also presents bands with higher average thickness and greater clustering of bands in relation to the damage zone. These data contribute to the characterization of both architectural elements, considering that a high degree of deformation will produce a greater number of bands, with thicker bands and more clusters.

The porosities calculated from the photomicrographs analysis showed an average value of 10.3% for the representative rock of the undeformed protolith, 8.9% for the damage zone and 2.4% in the fault core. In fact, because it is a zone with intense deformation, the fault core will present an average value up to 75% smaller than the undeformed rock, being the presence of DB the cause of this reduction. We conclude that the larger the number of DBs, the lower the porosity values in the architectural elements of the fault zone.

The presence of bands, besides causing reduction of porosity and increase of UCS, as seen in the architectural elements present in the fault zone, is effective in increasing Young's and incompressibility modules. For both modules, the rock with DBs presents a value of 40% greater than the rock without bands. Considering that the pores have less resistance to deformation than the matrix, it is expected that the areas with DBs, which have a significant reduction in porosity, present higher values of these modules. On the other hand, the Poisson's Ratio values are similar, around 0.199 to 0.204. This value evidences a brittle behavior of both the fault core with DBs, and in the areas between BDs.

The results of this work showed that the DBs directly influence the compartmentalization and behavior of the geomechanical and hydraulic properties of the reservoir. Regardless of whether it is at the fault core or damage zone, the higher the

deformation rate the higher is the UCS values, the lower the porosity values, the greater the number and thickness of bands and the greater the Young and incompressibility modules.

The multi - scale approach of this work, using the upscaling technique to observe the deformation started from a regional scale with the observation of the main brittle structures of the basin, mesoscale with geomechanical analysis and collect of structural attributes in outcropping, micro scale with petrophysical measurements plug scale and thin sections contributed to the simulation of the fluid flow and estimation of the behavior of the reservoir during its production and depletion.

Capítulo 5. Integração dos resultados e conclusões

A par dos resultados supracitados é possível realizar algumas conclusões a respeito da influência de bandas de deformação nas propriedades de resistência à compressão uniaxial, porosidade, módulo de Young, módulo de incompressibilidade, razão de Poisson, assim como a frequência e espessura de bandas nos diferentes elementos arquiteturais de uma zona de falha, localizada próxima à borda da sub-bacia de Brejo das Freiras, borda esta controlada pela zona de cisalhamento Portalegre.

É importante ressaltar que todas as análises expostas nesse trabalho foram realizadas em uma mesma fácies sedimentar, compondo a Formação Antenor Navarro, composta por arenitos conglomeráticos de matriz fina a argilosa. Foi importante manter as análises em uma mesma fácies, pois como observado em campo, a variação na litologia acarretará em respostas diferentes na formação das bandas de deformação. Foi observado que arenitos conglomeráticos tendem a formar bandas de deformação de maior espessura, porém formam um menor número de bandas que os arenitos argilosos (ANEXO 1). Tal comportamento é explicado pelo fato que o grau de deformação necessário para a formação de uma banda em conglomerados será maior, devido o maior tamanho de grãos e posteriormente maior energia para a quebra e rotação desses grãos, acarretando bandas de espessura superior às observadas em rochas argilosas, além da maior porosidade, provindo assim mais espaço para formação de BD. Porém, mesmo com comportamento variado para a formação de bandas, os valores de UCS são semelhantes (Anexo 2).

Em relação à distribuição e quantificação de bandas nos elementos arquiteturais que apresentam tais estruturas, zona de dano e núcleo da falha, é possível observar variações na ocorrência das mesmas. Na zona de dano as bandas de deformação ocorrem com maior espaçamento entre bandas, menor espessura média e direções NE e E-W. Além disso, são observados em campo poucos *clusters* na zona de dano em relação ao núcleo da falha (Anexo 3), o que evidencia um menor grau de deformação. O núcleo da falha apresenta menor espaçamento entre BD, maior espessura média e bandas nas direções NE, E-W, NW e N-S, com presença maciça de *clusters*, principalmente na direção NE. A maior ocorrência de BD, de maior espessura e desenvolvidas em várias direções são evidências de uma deformação mais intensa, bem como a presença de superfícies de deslizamento que ocorrem apenas em estágio final na evolução de BDs (Anexo 4).

Uma propriedade estritamente relacionada ao grau de deformação é a resistência à compressão uniaxial. Neste trabalho quanto maior o grau de deformação, maior foi a cataclase sofrida pela rocha gerando uma maior compactação e coesão, podendo ser expresso na resistência da rocha. O protólito não deformado é o elemento arquitetural que apresenta menores valores, com valor médio de 10 MPa. A zona de dano e núcleo da falha foram divididas em zonas com banda e entre bandas. Para a zona de dano entre bandas o valor de UCS médio é de 11,4 MPa, enquanto que a zona de dano com banda possui valor médio de 16,3 MPa. O núcleo da falha sem bandas apresenta valor médio de 40 MPa e a zona com bandas de 52,4 MPa. Isso comprova que as bandas de deformação influenciam diretamente na resistência da rocha e reforça a divisão proposta em campo, com o núcleo da falha sendo a zona de maior deformação apresentando os maiores valores de UCS, seguido pela zona de dano e protólito não deformado. Além disso, foi observado o comportamento de bandas em outros afloramentos, onde também foi detectado que as BDs, tanto na fácies arenito como arenito conglomerático causam aumento da UCS (Anexo 5).

Outra propriedade inteiramente relacionada à variação de deformação, ocorrência de bandas e resistência da rocha é a porosidade. A porosidade em todos os cenários foi calculada por meio de seções delgadas, onde o protólito não deformado preservou os poros da rocha, possuindo os maiores valores de porosidade dentre os três cenários, com valor médio de 10,3%, enquanto que a zona de dano possui uma porosidade de 8,9% e o núcleo da falha, com maior deformação dentre os demais cenários, com valor médio de 2,5%. Assim, conclui-se que no núcleo da falha, com maior número de BD e maior resistência, menores são os valores de porosidade da rocha, tendo em vista que as BD, para o nosso caso, foram formadas por meio de quebra e cominuição de grãos que preencheram os poros pré-existentes (Anexo 6). A porosidade também foi calculada por meio de um permoporosímetro a gás exclusivamente no núcleo da falha, que foi o único elemento arquitetural que demonstra coesão suficiente para a retirada de plugues. Nesse caso as amostras foram divididas em: amostras com bandas e amostras sem banda. Os resultados reforçam o que foi observado em lâmina onde a presença de bandas influencia diretamente na diminuição da porosidade, nesse caso com redução de aproximadamente 33%.

A retirada de plugues proporcionou também a possibilidade de analisar outros parâmetros petrofísicos como módulo de Young, módulo de incompressibilidade e razão de Poisson. Os resultados de módulo de Young comprovam que as BD tendem a aumentar a

resistência da rocha, onde os plugues com BD apresentam valor médio de 38,2 GPa e as amostras sem banda de 23,1 GPa. O módulo de incompressibilidade, que se refere à resistência hidrostática, possui resultados semelhantes, com valor médio de 21,7 GPa para amostra com banda e 12,9 GPa para as amostras sem banda. Concomitante a isso a razão de Poisson se mantém semelhante para ambos os grupos de amostras, com valores baixos em torno de 0,2, o que revela que a deformação se manteve em um caráter rúptil. Assim sendo, esses dados comprovam de forma concisa a influência de BD na resistência da rocha, seja ela de caráter uniaxial ou triaxial, e que possivelmente essa deformação ocorreu em baixas profundidades, marcada pela natureza rúptil da rocha.

Referências Bibliográficas:

- Ahmed, T.H., Meehan, D.N., 2012. Advanced reservoir management and engineering. Gulf Professional Pub.
- Albuquerque, J.P.T., 1970. Inventário hidrogeológico básico do Nordeste: Folhas nº 15 – Jaguaribe – Ceará. Recife.
- Alikarami, R., Torabi, A., Kolyukhin, D., Skurtveit, E., 2013. Geostatistical relationships between mechanical and petrophysical properties of deformed sandstone. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 63, 27–38. doi:10.1016/j.ijrmms.2013.06.002
- Antonellini, M.A., Aydin, A., Pollard, D.D., 1994. Microstructure of deformation bands in porous sandstones at Arches National Park, Utah. *J. Struct. Geol.* 16, 941–959. doi:10.1016/0191-8141(94)90077-9
- Araújo Netto, J.M., 2011. Caracterização multi-escalar de bandas de deformação nas tectono-ssequências paleozóica, pré- e sin-rifte da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- ASTM, 2001. ASTM. Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method. West Conshohocken: ASTM International;
- Aydin, A., 2009. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 46, 627–634. doi:10.1016/j.ijrmms.2008.01.020
- Aydin, A., 1978. Small faults formed as deformation bands in sandstone. *Pure Appl. Geophys. PAGEOPH* 116, 913–930. doi:10.1007/BF00876546
- Aydin, A., Basu, A., 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Eng. Geol.* 81, 1–14. doi:10.1016/j.enggeo.2005.06.006
- Aydin, A., Borja, R.I., Eichhubl, P., 2006. Geological and mathematical framework for failure modes in granular rock. *J. Struct. Geol.* 28, 83–98. doi:10.1016/j.jsg.2005.07.008
- Aydin, A., Johnson, A.M., 1978. Development of faults as zones of deformation bands and as slip surfaces in sandstone. *Pure Appl. Geophys. PAGEOPH* 116, 931–942. doi:10.1007/BF00876547

- Ballas, G., Soliva, R., Benedicto, A., Sizun, J.P., 2014. Control of tectonic setting and large-scale faults on the basin-scale distribution of deformation bands in porous sandstone (Provence, France). *Mar. Pet. Geol.* 55, 142–159. doi:10.1016/j.marpetgeo.2013.12.020
- Ballas, G., Soliva, R., Sizun, J.P., Fossen, H., Benedicto, A., Skurtveit, E., 2013. Shear-enhanced compaction bands formed at shallow burial conditions; implications for fluid flow (Provence, France). *J. Struct. Geol.* 47, 3–15. doi:10.1016/j.jsg.2012.11.008
- Basu, A., Aydin, A., 2004. A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, 1211–1214. doi:10.1016/j.ijrmms.2004.05.001
- Borja, R.I., Aydin, A., 2004. Computational modeling of deformation bands in granular media. I. Geological and mathematical framework. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 193, 2667–2698. doi:10.1016/j.cma.2003.09.019
- Braun, O.P.G., 1969. Geologia da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil, Relatório de Prospecção., Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 4º Distrito do Nordeste, Natal.
- Buyuksagis, I.S., Goktan, R.M., 2007. The effect of Schmidt hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 44, 299–307. doi:10.1016/j.ijrmms.2006.07.008
- Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B., 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology* 24, 1025–1028.
- Córdoba, V.C., Antunes, A.F., Jardim De Sá, E.F., Da Silva, A.N., Do Carmo Sousa, D., Pessoa Lira Lins, F.A., 2007. 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. *Bol. Geociencias da Petrobras* 16, 53–68.
- Costa, A.B.S., 2010. Arquitetura, litofáceis e evolução tectonoestratigráfica da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- de Castro, D.L., Castelo Branco, R.M.G., 1999. Caracterização da arquitetura interna das bacias do Vale do Cariri (NE do Brasil) com base em modelagem gravimétrica 3-D. *Rev. Bras. Geofis.* 17, 130–144. doi:10.1590/S0102-261X1999000200003
- de Castro, D.L., de Oliveira, D.C., Gomes Castelo Branco, R.M., 2007. On the tectonics of

- the Neocomian Rio do Peixe Rift Basin, NE Brazil: Lessons from gravity, magnetics, and radiometric data. *J. South Am. Earth Sci.* 24, 184–202.
doi:10.1016/j.jsames.2007.04.001
- Faulkner, D.R., Jackson, C.A.L., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C.A.J., Withjack, M.O., 2010. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *J. Struct. Geol.* 32, 1557–1575.
doi:10.1016/j.jsg.2010.06.009
- Faulkner, D.R., Lewis, A.C., Rutter, E.H., 2003. On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: Field observations of the Carboneras fault in southeastern Spain. *Tectonophysics* 367, 235–251. doi:10.1016/S0040-1951(03)00134-3
- Fossen, H., 2010. Deformation bands formed during soft-sediment deformation: Observations from SE Utah. *Mar. Pet. Geol.* 27, 215–222. doi:10.1016/j.marpetgeo.2009.06.005
- Fossen, H., Bale, A., 2007. Deformation bands and their influence on fluid flow. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 91, 1685–1700. doi:10.1306/07300706146
- Fossen, H., Hesthammer, J., 1998. Deformation bands and their significance in porous sandstone reservoirs. *First Break* 21–25.
- Fossen, H., Schultz, R.A., Shipton, Z.K., Mair, K., 2007. Deformation bands in sandstone: a review. *J. Geol. Soc. London.* 164, 1–15. doi:10.1144/0016-76492006-036
- Françolin, J.B.L., Cobbold, P.R., Szatmari, P., 1994. Faulting in the Early Cretaceous Rio do Peixe basin (NE Brazil) and its significance for the opening of the Atlantic. *J. Struct. Geol.* 16, 647–661. doi:10.1016/0191-8141(94)90116-3
- ISRM, 1974. INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM) “THE COMPLETE ISRM SUGGESTED METHODS FOR ROCK CHARACTERIZATION, TESTING AND MONITORING: 1974-2006”, 1^o ed. Ankara, Turkey.
- Issen, K.A., Rudnicki, J.W., 2001. Theory of compaction bands in porous rock. *Phys. Chem. Earth, Part A Solid Earth Geod.* 26, 95–100. doi:10.1016/S1464-1895(01)00031-X
- Jourde, H., Flodin, E.A., Aydin, A., Durlofsky, L.J., Wen, X.H., 2002. Computing permeability of fault zones in eolian sandstone from outcrop measurements. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 86, 1187–1200. doi:10.1306/61EEDC4C-173E-11D7-

8645000102C1865D

- Lima Filho, M.L., 1991. Evolução tectono-sedimentar da Bacia do Rio do Peixe – PB. Universidade Federal de Pernambuco.
- McCaroll, D., 1994. The Schmidt hammer as a measure of the degree of rock surface weathering and terrain age. *Dating Expo. Surf. Context.* 29–45.
- Medeiros, V.C., Amaral, C.A., Rocha, D.E.G.A., Santos, R.B., 2005. Programa Geologia do Brasil - PGB. Sousa. Folha SB.24-Z-A. Estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará. Mapa Geológico. Recife: CPRM.
- Mollema, P.N., Antonellini, M.A., 1996. Compaction bands: A structural analog for anti-mode I cracks in aeolian sandstone. *Tectonophysics* 267, 209–228. doi:10.1016/S0040-1951(96)00098-4
- Nogueira, F.C.C., Marques, F.O., Bezerra, F.H.R., de Castro, D.L., Fuck, R.A., 2015. Cretaceous intracontinental rifting and post-rift inversion in NE Brazil: Insights from the Rio do Peixe Basin. *Tectonophysics* 644, 92–107. doi:10.1016/j.tecto.2014.12.016
- Nogueira, F.C.C., Oliveira, M.S. De, Castro, D.L. De, 2004. Estudo Magnético e Gravimétrico do Arcabouço Estrutural da Bacia Rio do Peixe – PB. *Rev. Geol.* 17, 74–87.
- Olsson, A., 1999. Theoretical and experimental investigation of compaction bands in porous rock. *J. Geophys. Res.* 104, 7219–7228.
- Ortega, O.J., Marrett, R.A., Laubach, S.E., 2006. A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 90, 193–208. doi:10.1306/08250505059
- Özbek, A., 2009. Variation of Schmidt hammer values with imbrication direction in clastic sedimentary rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 46, 548–554. doi:10.1016/j.ijrmms.2008.09.003
- Parnell, J., Watt, G.R., Middleton, D., Kelly, J., Baron, M., 2004. Deformation Band Control on Hydrocarbon Migration. *J. Sediment. Res.* 74, 552–560. doi:10.1306/121703740552
- Ponte, F.C., Hashimoto, A.T., Dino, R., 1991. Geologia das bacias mesozoicas do interior do

- Nordeste do Brasil. Petrobrás/CENPES/DIVEX; SEBIPE, Relatório Interno. 278.
- Poole, R.W., Farmer, I.W., 1980. Consistency and repeatability of Schmidt Hammer rebound data during field testing. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 17, 167–171. doi:10.1016/0148-9062(80)91363-7
- Rawling, G.C., Goodwin, L.B., 2003. Cataclasis and particulate flow in faulted, poorly lithified sediments. *J. Struct. Geol.* 25, 317–331. doi:10.1016/S0191-8141(02)00041-X
- Rosa, A.J., Carvalho, R.S., Xavier, J.A.D., 2006. Engenharia de reservatórios de petróleo., 1a. ed.
- Schön, J.H., 2011. Handbook of Petroleum Exploration and Production., 8^o ed. Elsevier.
- Schultz, R.A., Balasko, C.M., 2003. Growth of deformation bands into echelon and ladder geometries. *Geophys. Res. Lett.* 30, 2033. doi:10.1029/2003GL018449
- Sénant, J., Popoff, M., 1991. Early Cretaceous extension in northeast Brazil related to the South Atlantic opening. *Tectonophysics* 198, 35–46. doi:10.1016/0040-1951(91)90129-G
- Silva, A.N. da, 2009. Arquitetura , litofácies e evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Silva, I.T. da, 2014. Evolução diagenética e caracterização da seção Devoniana na Bacia do Rio do Peixe - Nordeste do Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Soliva, R., Ballas, G., Fossen, H., Philit, S., 2016. Tectonic regime controls clustering of deformation bands in porous sandstone. *Geology* 44, 423–426. doi:10.1130/G37585.1
- Solum, J.G., Brandenburg, J.P., Naruk, S.J., Kostenko, O. V., Wilkins, S.J., Schultz, R.A., 2010. Characterization of deformation bands associated with normal and reverse stress states in the Navajo Sandstone, Utah. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 94, 1453–1475. doi:10.1306/01051009137
- Sristava, N.K., Carvalho, I.S., 2004. Bacia do Rio do Peixe. (No. 71). Aracaju - SE.
- Storvoll, V., Bjørlykke, K., Karlsen, D., Saigal, G., 2002. Porosity preservation in reservoir sandstones due to grain-coating illite: A study of the Jurassic Garn Formation from the Kristin and Lavrans fields, offshore Mid-Norway. *Mar. Pet. Geol.* 19, 767–781.

doi:10.1016/S0264-8172(02)00035-1

Tiab, D., Donaldson E. C., 2004. *Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties.*, 2nd ed. ed. Burlington.

Torabi, A., 2014. Cataclastic bands in immature and poorly lithified sandstone, examples from Corsica, France. *Tectonophysics* 630, 91–102. doi:10.1016/j.tecto.2014.05.014

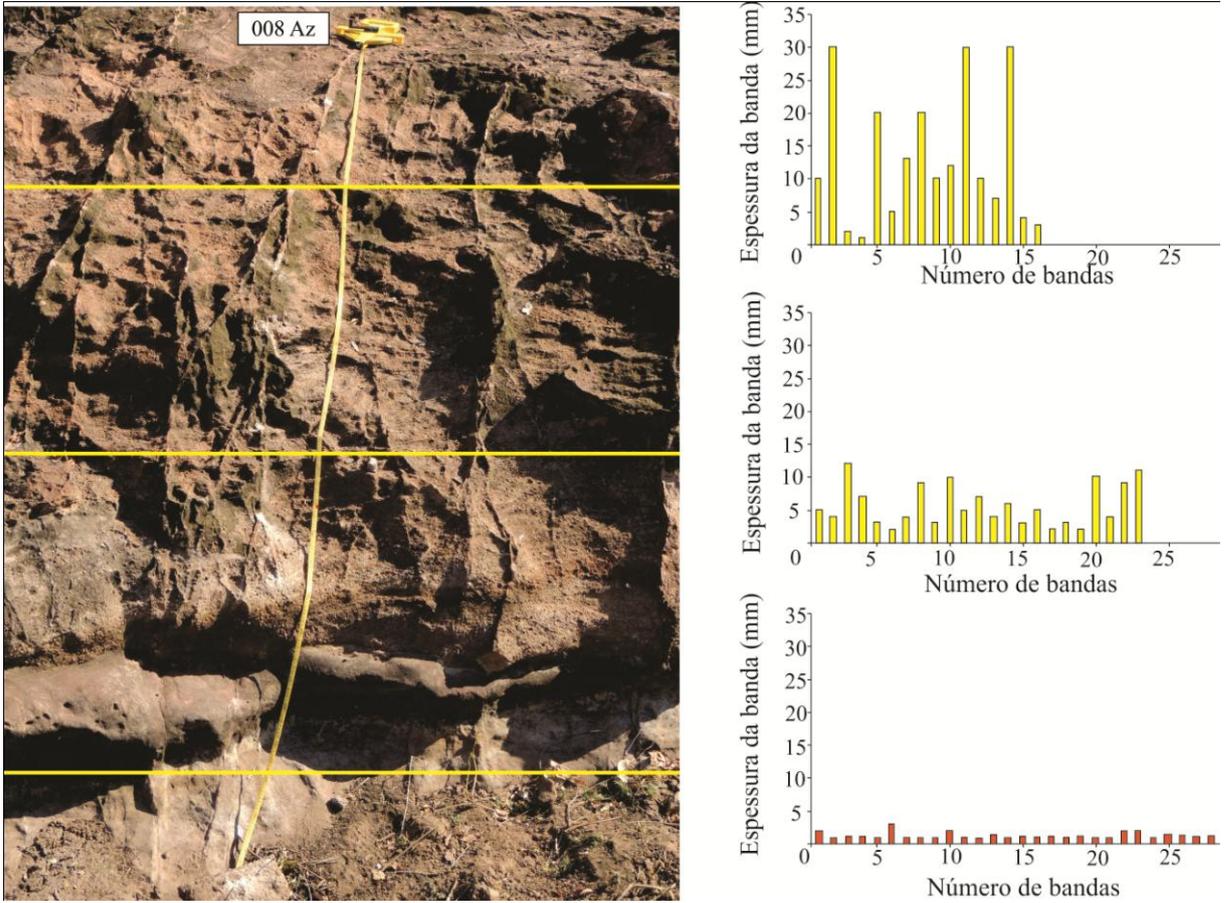
Torabi, A., Fossen, H., 2009. Spatial variation of microstructure and petrophysical properties along deformation bands in reservoir sandstones. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 93, 919–938. doi:10.1306/03270908161

Vallejo, L.G., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., 2002. *Libro Ingenieria Geologica*, 1ra. Ed. ed. Prentice Hall Pearson Educación, Madrid.

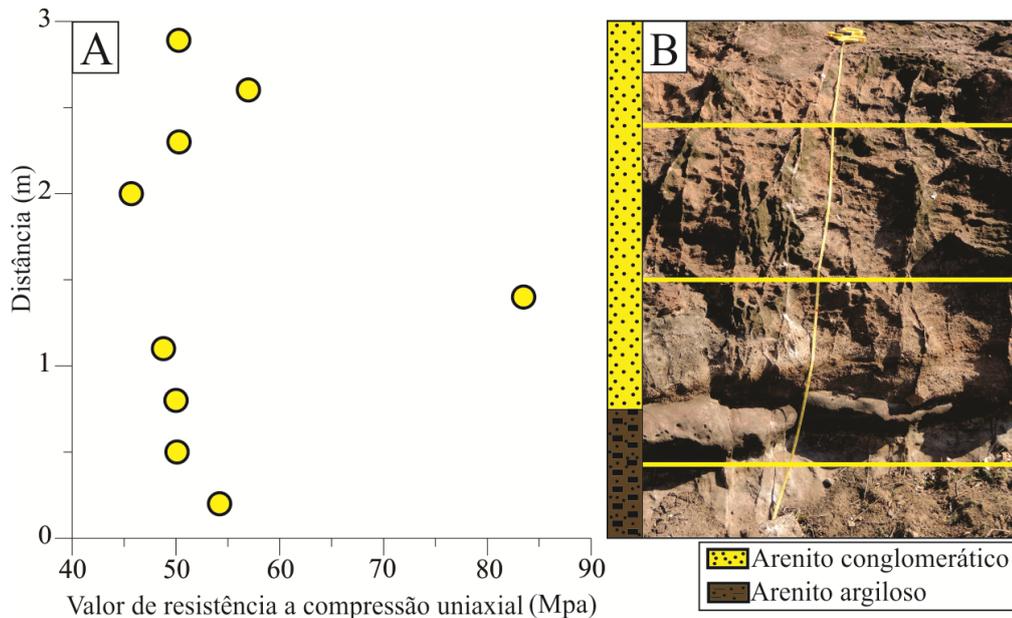
Wibberley, C.A.J., Petit, J.P., Rives, T., 2007. The mechanics of fault distribution and localization in high-porosity sands, Provence, France. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 289, 19–46. doi:10.1144/SP289.3

Ylmaz, I., Sendir, H., 2002. Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey). *Eng. Geol.* 66, 211–219. doi:10.1016/S0013-7952(02)00041-8

ANEXOS:



Anexo 1: Variação no número e espessura de bandas com a mudança de litologia. Em amarelo arenito conglomerático e em vermelho arenito argiloso.



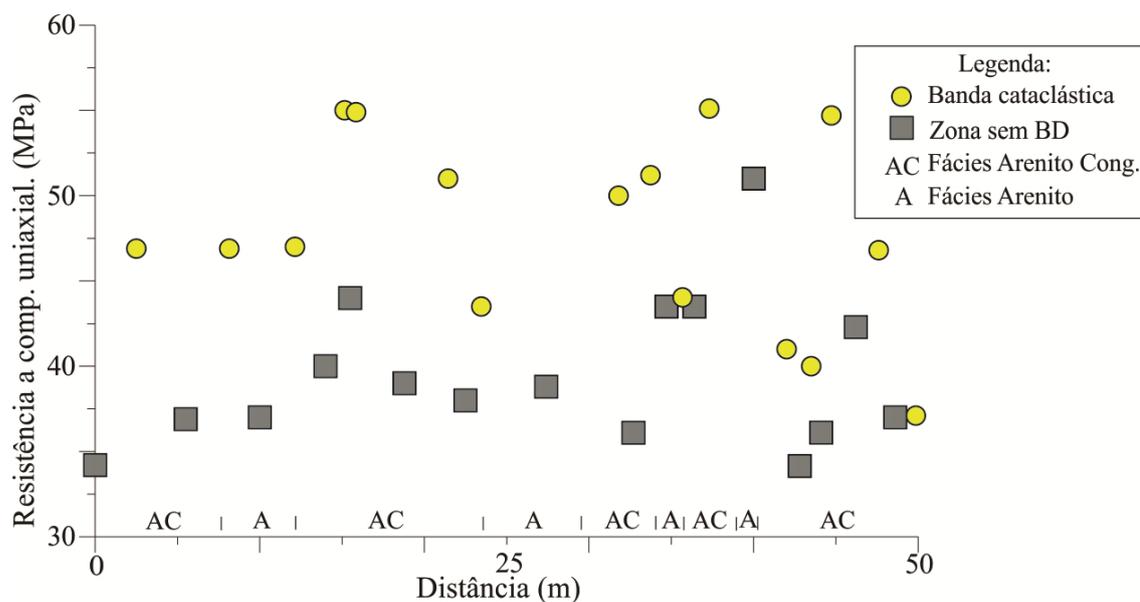
Anexo 2: Valores de UCS na mesma BD em diferentes litologias.



Anexo 3: (A) *Cluster* presente na zona de dano e (B) vários *clusters* no núcleo da falha.



Anexo 4: Superfície de deslizamento presente no elemento arquitetural correspondente ao núcleo da falha.



Anexo 5: Perfil geomecânico realizado na BRP em diferentes fácies para observar a influência de BD na UCS.



Anexo 6: Banda de deformação com intensa catáclase (cominuição e rearranjo de grãos) e consequentemente preenchimento dos poros.