



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Paulo Roberto Pizarro Fragomeni

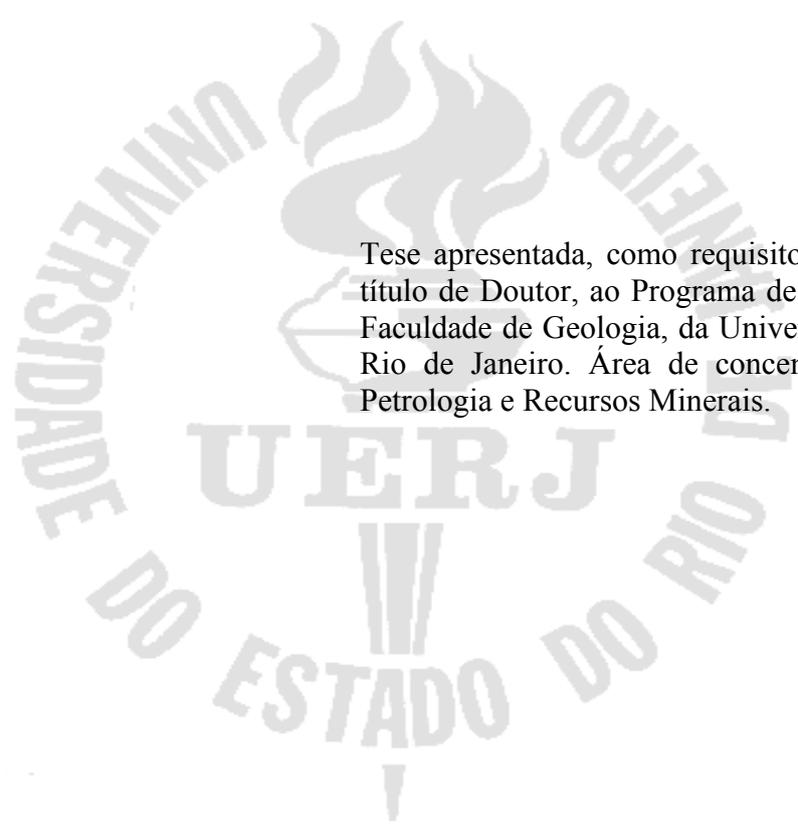
Levantamento e estudo das ocorrências de grafita do Distrito Grafítífero Aracoiába-
Baturité, CE

Rio de Janeiro

2011

Paulo Roberto Pizarro Fragomeni

Levantamento e estudo das ocorrências de grafita do Distrito Grafítífero Aracoiába-
Baturité, CE



Tese apresentada, como requisito para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Geologia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Mello Pereira

Rio de Janeiro

2011

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

F811 Fragomeni, Paulo Roberto Pizarro.
Levantamento e estudo das ocorrências de grafita do
Distrito Grafítico Aracoiába- Baturité, CE / Paulo Roberto
Pizarro Fragomeni. – 2011.
114 f.

Orientador: Ronaldo Mello Pereira.
Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Geologia econômica – Baturité (CE) - Teses. 2. Grafita –
Baturité (CE) – Teses. 3. Prospecção – Teses. 4.
Termogravimetria – Teses. I. Pereira, Ronaldo Mello. II.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de
Geologia. III. Título.

CDU 553(813.1)

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese.

Assinatura

Data

Paulo Roberto Pizarro Fragomeni

Levantamento e estudo das ocorrências de grafita do Distrito Grafítífero Aracoiába-
Baturité, CE

Aprovado em 23 de março de 2011

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ronaldo Mello Pereira
Faculdade de Geologia da UERJ

Prof. Dr. Ciro Alexandre Ávila
Departamento de Geologia e Paleontologia do Museu Nacional-UFRJ

Prof. Dr. José Carlos Sicoli Seoane
Instituto de Geociências da UFRJ

Prof. Dr. Paulo de Tarso Luiz Menezes
Faculdade de Geologia da UERJ

Prof. Dr. Francisco José da Silva
Departamento de Geociências da UFRRJ

Rio de Janeiro

2011

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ronaldo Mello Pereira, pelos ensinamentos geológicos, paciência, dedicação e conselhos sempre úteis e precisos com que, sabiamente, orientou este trabalho.

Ao Prof. Ciro Alexandre Ávila pela especial atenção na leitura crítica e importantes sugestões, dispensadas desde a fase de qualificação até o final desta tese.

Ao amigo Andre Prudente, cuja contribuição na confecção dos mapas e figuras foi de fundamental importância nesta tese.

Ao Prof. Rene Rodrigues, sempre solícito, pela orientação e auxílio na utilização do laboratório da UERJ.

Ao meu irmão geólogo Luiz Francisco P. Fragomeni, pelas proveitosas discussões e agradáveis trabalhos de campo que dividimos.

À Barbara S. Jardim e Moira de Toledo pela carinhosa ajuda na revisão e organização do texto.

Aos meus professores Cláudio de M. Valeriano, Jorge C. Della Fávera, Miguel Mane, Monica da C. L. Heilbron, Paulo de Tarso L. Menezes e Sérgio de C. Valente, que proporcionaram a atualização dos meus conhecimentos geológicos.

À minha família, pela compreensão e incentivo para que eu levasse este trabalho até o fim.

RESUMO

FRAGOMENI, Paulo Roberto Pizarro. *Levantamento e estudo das ocorrências de grafita do Distrito Grafítico Aracoiába-Baturité, CE*. 2011. 97 f. Tese (Doutorado em Geologia) Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

O Distrito Grafítico Aracoiába-Baturité apresenta depósitos do tipo gnaiss grafitoso (minério disseminado) e veio (minério maciço) com diferentes origens genéticas e com características físicas e ambientes geológicos de formação próprios. O minério tipo gnaiss grafitoso é de origem sedimentar, singenético, com teores de 1,5 a 8% de C, que se distribuem ao longo de duas extensas faixas paralelas, hospedadas na Subunidade Baturité, que constitui um importante metalotecto regional. A associação de grafita metamórfica disseminada em metassedimentos da Sequência Acarápe constitui um geoindicador de antiga bacia sedimentar neoproterozóica e, também, pode ser considerado como zona de geossutura resultante do subsequente fechamento de um oceano primitivo. As rochas desta subunidade correspondem na paleogeografia da Sequência Acarápe aos fácies de sopé de talude e de planície abissal. O minério tipo veio (“fluido depositado”) é epigenético e, com teores entre 20% e 70% de C, forma corpos tabulares e bolsões, controlados em escala local por estruturas de alívio (falhas, fraturas, zonas de contato, eixos de dobras etc.) que permitiram a percolação de soluções penumatolíticas relacionadas ao corpo plutônico de Pedra Aguda. As variações dos valores das relações entre isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) na grafita do minério disseminado são de **-26,72‰** a **-23,52‰** e do minério maciço de **-27,03‰** a **-20,83‰**, revelando sinal de atividades biológicas (bioassinaturas) e permitem afirmar que a grafita das amostras acima são derivadas de matéria orgânica. Foram apresentados os principais guias de prospecção para grafita e testados os seguintes métodos geofísicos: Eletrorresistividade; GPR - *Ground Penetrating Radar*; Magnetometria; VLF - *Very Low Frequency*; e Polarização Induzida Espectral (IPS) / Resistividade (ER). A conjugação dos métodos de Polarização Induzida Espectral (IPS) e Eletrorresistividade (ER) foi o que demonstrou a melhor eficiência. Com relação à determinação do teor de carbono por termogravimetria (ATG), que é o método mais utilizado para este elemento, verificou-se, que as faixas de queima atribuídas ao carbono no minério do Distrito de Aracoiába-Baturité (340° a 570°C e de 570 a 1050°C) eram diferentes das faixas do minério de Minas Gerais (“350°C a 650°C” e “650°C a 1.050°C”). Esta constatação indica a necessidade de se determinar previamente as faixas de temperatura para cada região pesquisada.

Palavras-chave: Grafita. Bioassinaturas. Sutures de bacias. Grafita singenética. Grafita epigenética. Prospecção. Análise termogravimétrica.

ABSTRACT

FRAGOMENI, Paulo Roberto Pizarro, *Survey and study of graphite occurrences in the Aracoiába-Baturité Graphite-bearing District, CE*. 2011. 97f. Thesis (Doctorate in Geology) Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

The Aracoiába-Baturité Graphite-bearing District has graphitic gneiss deposits (disseminated ore) and vein (solid ore) with different genetic origins and their own physical characteristics and geological environments. The graphite gneiss ore is of sedimentary, syngenetic origin, with 1.5% to 8% C content, which is distributed along two long parallel belts, hosted in the Baturité Sub-unit, which consists of a major regional metallotect. The association of metamorphic graphite disseminated in metasediments of the Acarápe Sequence consists of a geoinicator of an old Neo-Proterozoic sedimentary basin and also can be considered a geosuture zone, the result of the subsequent closing of a primitive ocean. The rocks of this sub-unit correspond in the paleogeography of the Acarápe Sequence to the facies of the bottom of a slope and of an abyssal plain. The vein ore (“deposited fluid”) is epigenetic and, with C contents of between 20% and 70%, forms tabular bodies and pockets, controlled on a local scale by relief structures (faults, fractures, contact zones, fold axes, etc.), which allowed seepage of pneumatolithic solutions relating to the plutonic body of Pedra Aguda. The variations in the values of the ratios between stable carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$) in the graphite of the disseminated ore are **-26.72‰** to **-23.52‰** and of the solid ore **-27.03‰** to **-20.83‰**, showing a sign of biological activities (biosignatures), and it can be said that the graphite of the above samples is derived from organic matter. The main prospecting guides for graphite were presented and the following geophysical methods tested: Electro-resistivity (ER); Ground Penetrating Radar (GPR); Magnetometry; Very Low Frequency (VLF); and Spectral Induced Polarization (SIP) / Electro-resistivity (ER). It was found that the combination of the Spectral Induced Polarization (SIP) and Electro-resistivity (ER) methods proved the most efficient. In relation to determining the carbon content using thermogravimetry (TG), which is the most commonly used method for this element, it was found that the bands of burning attributed to the carbon in the ore in the Aracoiába-Baturité District (340° to 570°C and from 570°C to 1050°C) were different from the bands of the ore in Minas Gerais (“350°C to 650°C” and “650°C to 1050°C”). This finding suggests the need to determine beforehand the temperature ranges for each region studied.

Key words: Graphite. Biosignatures. Basin sutures. Syngenetic graphite. Epigenetic graphite. Research. Thermogravimetric analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Mapa de situação da área de estudo.....	14
Figura 2 -	Equipamento de IDS-Radar RIS Multifrequencial em Aracoiába.....	18
Figura 3 -	Esboço de cenário paleogeográfico do fecho do Ciclo Brasileiro-Pan Africano, mostrando os principais segmentos colidentes (placas, microplacas, terrenos) e os principais tipos de faixas móveis gerados. (Fonte: Almeida et al., 2000).....	30
Figura 4 -	Província Borborema - Fonte: Bizzi et al., 2003.....	31
Figura 5 -	Mapas esquemáticos das divisões da Província da Borborema, com as modificações propostas por Brito Neves et al. (2000) na subdivisão de Santos (1988).....	33
Figura 6 -	Divisão em terrenos tectono-estratigráficos da Subprovíncia Setentrional da Borborema, com base na integração de dados geológicos e geofísicos (Fonte: Campelo, 2009).....	36
Figura 7 -	Mapa Geológico Simplificado dos terrenos Ceará Central e Tauá (Fonte: Arthaud, 2005). Principais zonas de cisalhamento: TBSZ, Sobral-Pedro II/Transbrasiliano; TSZ, Tauá; SISZ, Sabonete-Inharé; SPSP, Senador Pompeu; RGF, Rio Groaíras.....	40
Figura 8 -	Mapa integrado da radiometria (CT) com a geologia da área de tese.....	49
Figuras 9 e 10-	Migmatitos com estruturas dobradas e flebíticas. Embasamento paleoproterozóico na Fazenda da Laje.....	50
Figura 11 -	Fotomicrografia - Enderbitó (metatonalito) Cristais de plagioclásio subeudrais, quartzo interticial e placas de biotita (cores brilhantes) - Amostra 10653, aumento 25X, nicóis cruzados. Embasamento paleoproterozóico. Área da Fazenda da Laje.....	51
Figura 12 -	Fotomicrografia - Metanorito. Cristais de plagioclásio, ortopiroxênio e hornblenda - amostra 10657, aumento 25X, nicóis cruzados - Embasamento paleoproterozóico. Área da Fazenda da Laje.....	51
Figura 13 -	Quartzito da Subunidade Aracoiába - na saída de Capistrano.....	53
Figura 14 -	Gnaiss finamente bandado e quartzito intercalado da Subunidade Aracoiába.....	54
Figura 15 -	Paragneisse com intercalações de quartzito em frente de <i>nappe</i> - Subunidade Aracoiába – Arredores da cidade de Capistrano.....	54
Figura 16 -	Fotomicrografia do plagioclásio-microclina-sillimanita-biotita gnaiss. Bandas de sillimanita (azul) e biotita (marrom) e bandas claras ricas em quartzo e feldspato. Amostra 10654, Nicóis cruzados 25x.....	55
Figura 17 -	Turbidito formado por lentes de quartzito (com feldspato, granada e muscovita), intercaladas em ortoanfibolitos - Subunidade Baturité (Leito do Rio Choró/Itãs).....	56
Figura 18 -	Contato de “não conformidade” da Sequência Acarápe (Neoproterozóica) com gnaiss (metanorito) do Embasamento Paleoproterozóico (Represa da Fazenda da Laje).....	57
Figura 19 -	Pico de Pedra Aguda, de composição granítica, na parte central do Complexo Gabro-Diorítico Anelar de Pedra Aguda.....	59
Figura 20 -	Esboço dos domínios geotectônicos sob o mapa radiométrico.....	59
Figura 21 -	Estrutura S/Z em anfibolito com intercalações de granada quartzito da Subunidade Baturité, no leito do Rio Choro	61

Figura 22 -	Vista nos arredores da cidade de Capistrano da estrutura de <i>nappe</i> colocando em contato estrutural diferentes conjuntos de rochas da Subunidade Aracoiába. O conjunto e domínio de mar raso, com predominância de paragneisses com intercalações de quartzitos e mármore (A) sobre o conjunto de biotita-gnaiss e anfibolitos de domínio de talude (B).....	62
Figura 23 -	Biotita gnaiss grafitoso - minério singenético disseminado (6,54% C) Fazenda Paraibano, Córrego Marzagão.....	64
Figura 24 -	Biotita gnaiss grafitoso - minério singenético disseminado (6,1% C), Alvo Chereco.....	64
Figura 25 -	Mapa geológico do Alvo Chereco.....	65
Figura 26 -	Mapa geológico do Alvo Erom.....	66
Figura 27 -	Fotomicrografia - Grafita <i>flake</i> dobrada, exibindo o pleocroísmo de reflexão (SE da foto) (amostra 1). Luz refletida. Polarizadores paralelos. Objetiva 10x. Granulometria média: cerca de 0,7 mm.....	67
Figura 28 -	Fotomicrografia - Grafita <i>flake</i> orientada segundo a xistosidade geral da rocha (amostra 1). Luz refletida. Polarizadores paralelos. Objetiva 10x. Granulometria: cerca de 1,54 mm.....	67
Figura 29 -	Mapa dos jazimentos de grafita epigenética.....	71
Figura 30 e 31-	Alvo Cava Sul. Veio de Grafita com minério maciço, epigenético (>70% de C), com contato brusco com a rocha encaixante (migmatito) - Fazenda da Laje.....	72
Figura 32 -	Minério fluido depositado - Vênulas de grafita preenchendo fraturas de uma zona brechada, formando uma estrutura de stockwork. Alvo Cava Sul.....	74
Figura 33 -	Veio de feldspato e quartzo, cortando o corpo de minério de grafita maciço no entorno do plúton granítico Pedra Aguda - Alvo Cava Sul, Fazenda da Laje de Pedra.....	74
Figura 34 -	Mapa do corpo de minério maciço Norte-Sul.....	75
Figura 35 -	Localização dos alvos de pesquisa - Distrito Grafítico Aracoiába-Baturité.....	76
Figura 36 -	Mapa geológico e de serviços da Fazenda Riacho das Lajes.....	79
Figura 37 e 38-	Poços rasos na Fazenda da Laje de Pedra para identificação da litologia subjacente.....	80
Figura 39 e 40-	Abertura mecanizada e manual de trincheiras, no alvo Cava Sul.....	81
Figura 41 e 42-	Levantamentos de GPR realizados na Fazenda da Laje com Sistemas Ramac e com GPR IDS-Radar RIS Multifrequencial.....	82
Figura 43 e 44-	Levantamento de SIP/ER no alvo Erom.....	83
Figura 45 e 46-	Sondagem rotativa do alvo Erom, com o método <i>wire line</i>	85
Figura 47 -	Seção geológica auxiliar utilizada na cubagem da reserva, com topografia e mostrando a projeção dos furos de sondagem (FCC 14, FCC 15 e FCC17) e o perfil final da lavra em vermelho.....	89
Figura 48 -	Mapa de cargabilidade (IPS) do alvo Chereco.....	92
Figura 49 -	Mapa de resistividade (ER) do alvo Chereco.....	93
Figura 50 -	Mapa de cargabilidade (IPS) do alvo Erom.....	95
Figura 51 -	Mapa de resistividade (ER) do alvo Erom.....	96
Figura 52 -	Mapa geológico do alvo Madalena Sul.....	98
Figura 53 -	Mapa geológico do alvo Extensão Nordeste.....	99
Figura 54 -	Foto da Cava Sul na fazenda Laje de Pedra.....	100
Figura 55 -	Mapa geológico do alvo Cava Sul.....	101

Figura 56 -	Mapa geológico do alvo Norte-Sul.....	102
Figura 57 -	Mapa geológico do alvo Juamirim.....	104
Figura 58 -	Mapa de cargabilidade (IPS) do alvo Juamirim.....	105
Figura 59 -	Mapa de resistividade (ER) do alvo Juamirim.....	106
Figura 60 -	Bolsão de minério maciço de grafite, encaixado em granada biotita gnaisse. Alvo Juamirim, Fazenda Florêncio.....	107
Figura 61 -	Mapa geológico do alvo Madalena Norte.....	108
Figura 62 -	Mapa de cargabilidade (IPS) do alvo Madalena Norte.....	109
Figura 63 -	Mapa de resistividade (ER) do alvo Madalena Norte.....	110
Figura 64 -	Faixa das ocorrências de ortoanfibolito e grafita singenética.....	113
Figura 65 -	Seção hipotética representando a zona de mar raso onde sedimentou a subunidade Aracoiába e a zona de mar profundo com a sedimentação das subunidades Baturité I e II.....	116
Figura 66 -	Curvas de análise térmica da amostra AP.150/15N.....	122
Figura 67 -	Equipamento integrado de Magnetometria e VLF (Pedra Branca).....	125
Figura 68 -	Levantamento de IPS/ER na picada 150 do alvo Erom.....	125
Figura 69 -	Perfil de cargabilidade e resistividade da linha 100S do alvo Erom.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Quadro comparativo das relações $\delta^{13}\text{C}$ em grafitas de diferentes origens (matéria orgânica sedimentar, magmática e de reações minerais com carbonato).....	27
Tabela 2 -	Divisões da Província da Borborema, Santos (1988) e Brito Neves et al. (2000).....	34
Tabela 3 -	Análise modal de amostras de minério grafitoso do tipo disseminado.....	68
Tabela 4 -	Estimativa volumétrica dos teores de grafita por faixa granulométrica.....	68
Tabela 5 -	Teores médios do minério epigenético.....	72
Tabela 6 -	Composição mineralógica do minério do tipo epigenético.....	73
Tabela 7 -	Picadas abertas nos alvos de pesquisa.....	78
Tabela 8 -	Poços rasos abertos nos alvos de pesquisa.....	80
Tabela 9 -	Trincheiras abertas nos alvos de pesquisa.....	81
Tabela 10 -	Teores de carbono determinados nas mesmas amostras por laboratórios do CETEM e do CDTN.....	86
Tabela 11 -	Reservas de grafita dos depósitos de Pedra Branca, Aracoiába.....	89
Tabela 12 -	Diferentes assinaturas isotópicas do C.....	119
Tabela 13 -	Relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de amostras de grafita do Distrito Grafítífero Aracoiába-Baturité.....	119
Tabela 14 -	Comparação da relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ entre amostras de grafita do Distrito Grafítífero Aracoiába-Baturité e de diferentes origens genéticas.....	120
Tabela 15 -	Amostra de campo analisada em 4 (quatro) diferentes laboratórios por termogravimetria.....	121
Tabela 16 -	Quadro comparativo das faixas de queima adotadas para os minérios do norte de Minas Gerais e do Distrito Grafítífero Aracoiába-Baturité.....	122

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO.....	13
1	APRESENTAÇÃO.....	13
1.1	Histórico.....	13
1.2	Localização e vias de acesso.....	14
1.3	Metodologia e atividades desenvolvidas.....	15
1.3.1	<u>Levantamento e análise da bibliografia.....</u>	15
1.3.2	<u>Mapeamento geológico.....</u>	15
1.3.3	<u>Levantamento de campo e cadastramento das mineralizações.....</u>	16
1.3.4	<u>Geofísica.....</u>	16
1.3.4.1	Eletrorresistividade (ER).....	17
1.3.4.2	GPR - <i>Ground Penetrating Radar</i>	17
1.3.4.3	Polarização Induzida Espectral (IPS) - Eletrorresistividade (ER).....	18
1.3.4.4	Magnetometria e VLF - <i>Very Low Frequency</i>	19
1.3.5	<u>Sondagens rotativas.....</u>	19
1.3.6	<u>Análises laboratoriais.....</u>	19
1.3.6.1	Teor de carbono do minério grafitoso.....	19
1.3.6.2	Isótopos de carbono.....	20
1.3.7	<u>Trabalhos de escritório e laboratório.....</u>	20
2	MINERALIZAÇÕES DE GRAFITA (Estado da Arte).....	21
2.1	Origem dos depósitos de grafita.....	21
2.1.1	<u>Desidrogenização progressiva da matéria orgânica durante o metamorfismo de rochas sedimentares.....</u>	21
2.1.2	<u>Fonte magmática, onde a precipitação da grafita ocorre devido às soluções (fluidos magmáticos e/ou gases vulcânicos) ricas em carbono que infiltram CO₂ nas rochas.....</u>	21
2.1.3	<u>Grafita originada por reações de minerais carbonáticos.....</u>	22
2.2	Classificação genética dos depósitos de grafita.....	22
2.2.1	<u>Depósitos de grafita singenéticos.....</u>	23
2.2.2	<u>Depósitos de grafita epigenéticos.....</u>	23
2.2.3	<u>Metamorfismo de contato de carvão (carvão grafitizado).....</u>	24
2.3	Isótopos estáveis de carbono.....	24
2.4	Grafita biogênica - geotermômetro e geoindicador.....	27
2.4.1	<u>Variação secular na geoquímica dos carbonatos sedimentares.....</u>	28
3	CONTEXTO GEOLÓGICO DA PROVÍNCIA BORBOREMA.....	29
3.1	Histórico do conhecimento geológico.....	29
3.2	Província Borborema (Estado da Arte).....	29
3.2.1	<u>Divisão da Província Borborema.....</u>	32
3.2.1.1	Subprovíncias da Borborema.....	36
3.2.1.1.1	Subprovíncia Setentrional.....	37
3.2.1.1.2	Subprovíncia da Zona Transversal.....	37
3.2.1.1.3	Subprovíncia Externa ou Meridional.....	37

3.2.2	<u>Terreno Ceará Central</u>	38
3.2.2.1	Grupamentos Tectônicos do TCC.....	39
3.2.2.1.1	Núcleo Arqueano.....	41
3.2.2.1.2	Terrenos Acrescionários do Paleoproterozóico.....	41
3.2.2.1.3	Sequência Supracrustal Neoproterozóica (Grupo Ceará).....	43
3.2.2.1.4	Complexo Tamboril - Santa Quitéria.....	45
3.2.2.1.5	Granitos Brasileiros - Plutonismo granítico.....	46
4	GEOLOGIA DA ÁREA DO PROJETO: DISTRITO GRAFITÍFERO ARACOIÁBA-BATURITÉ	47
4.1	Complexo Cruzeta / Unidade Mombaça	47
4.2	Terrenos Acrescionários do Paleoproterozóico	47
4.3	Grupo Ceará	52
4.3.1	<u>Sequência Acarápe - Subunidade Aracoiába</u>	53
4.3.2	<u>Sequência Acarápe - Subunidade Baturité I</u>	54
4.3.3	<u>Sequência Acarápe - Subunidade Baturité II</u>	56
4.3.4	<u>Contato da Sequência Acarápe / Embasamento paleoproterozóico</u>	57
4.4	Granitóides cinzentos da Supersuíte Granitóide Tardi a Pós-Orogênica	57
4.5	Complexo Gabro-Diorítico da Suíte Gabróide Pós-Orogênica	58
4.6	Geologia Estrutural	59
4.6.1	<u>Contato entre unidades da Sequência Acarápe através de estrutura de <i>nappe</i></u>	61
5	GEOLOGIA DAS MINERALIZAÇÕES	63
5.1	Mineralizações de grafita do Distrito Aracoiába-Baturité	63
5.1.1	<u>Minério disseminado do tipo gnaiss grafitoso</u>	63
5.1.1.1	Faixas de ocorrência de gnaiss grafitoso na área do projeto.....	69
5.1.1.1.1	Faixa de gnaiss grafitoso Chereco - Erom (I).....	69
5.1.1.1.2	Faixa de gnaiss grafitoso Fazenda Alvorada - Itans (II).....	69
5.1.2	<u>Minério maciço do tipo “veio”</u>	70
5.2	Trabalhos de prospecção e pesquisa geológico-tecnológica	76
5.2.1	<u>Mapeamento geológico e cadastramento de ocorrências</u>	77
5.2.2	<u>Mapeamento de detalhe</u>	78
5.2.3	<u>Implantação de malhas de pesquisa</u>	78
5.2.4	<u>Abertura de poços e trincheiras</u>	78
5.2.5	<u>Levantamentos geofísicos</u>	82
5.2.5.1	Eletrorresistividade (ER).....	82
5.2.5.2	GPR - <i>Ground Penetrating Radar</i>	82
5.2.5.3	Polarização induzida espectral e eletro-resistividade.....	83
5.2.5.4	Magnetometria e VLF - <i>Very Low Frequency</i>	84
5.2.6	<u>Sondagem rotativa</u>	84
5.2.7	<u>Análises químicas e caracterização do minério</u>	85
5.2.8	<u>Cálculo de reservas</u>	87
5.2.9	<u>Testes de beneficiamento mineral</u>	90
5.2.10	<u>Características dos alvos de minério disseminado</u>	91
5.2.10.1	Alvo Chereco.....	91
5.2.10.2	Alvo Erom.....	94

5.2.10.3	Alvo Madalena Sul.....	94
5.2.10.4	Alvo Extensão Nordeste.....	97
5.2.11	<u>Características dos alvos de minério maciço</u>	97
5.2.11.1	Alvo Cava Sul.....	97
5.2.11.2	Alvo Norte-Sul.....	100
5.2.11.3	Alvo Juamirim.....	103
5.2.11.4	Alvo Madalena Norte.....	107
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
6.1	Contexto geológico	111
6.2	Controle das mineralizações do Distrito Aracoiába-Baturité	115
6.2.1	<u>Controle paleogeográfico - geotectônico</u>	115
6.2.2	Controles regionais e locais das ocorrências de grafita do Distrito de Aracoiába-Baturité.....	117
6.3	Comentários sobre as mineralizações de grafita	118
6.3.1	Origem do carbono das grafitas dos depósitos do Distrito Aracoiába-Baturité.....	118
6.4	Considerações sobre a determinação dos teores de carbono	120
6.4.1	<u>Método analítico</u>	120
6.5	Guias de prospecção e pesquisa	123
6.5.1	<u>Considerações sobre a prospecção geofísica realizada</u>	124
7	CONCLUSÕES	128
	REFERÊNCIAS	130
	ANEXO A - Mapa geológico da área de estudo	

INTRODUÇÃO

1 APRESENTAÇÃO

O presente trabalho constitui o resultado do estudo das ocorrências de grafita no nordeste do estado do Ceará, especialmente nos municípios de Aracoiába e Baturité, com o objetivo de apresentar as características e as gêneses destas mineralizações e sugerir um modelo metalogênico-geotectônico.

Neste estudo também são abordados os resultados dos trabalhos de prospecção da grafita na região, com destaque para certos parâmetros geológicos e geofísicos, que podem balizar futuros trabalhos de pesquisa deste bem mineral.

A relevância deste tema deve-se principalmente à atual importância da grafita na indústria mundial, com o enorme crescimento de sua utilização em segmentos nobres, como: baterias para telefones celulares e outros eletro-eletrônicos portáteis; na produção de automóveis híbridos; e em “célula a combustível” (*fuel cells*) para o revolucionário uso do hidrogênio como combustível.

1.1 Histórico

As ocorrências de grafita desta região são conhecidas deste a década de 40, período da Segunda Grande Guerra, quando houve uma procura intensiva deste bem mineral para a indústria bélica, principalmente como lubrificante de esteiras (lagartas) de tanques de guerra e carros de combate.

Na Fazenda da Laje, localidade de Pedra Branca, ainda há vestígios de escavações em depósitos de minério maciço de grafita e de uma planta rudimentar de beneficiamento, construída pelos pesquisadores ingleses. Como curiosidade, registra-se o fato de que o proprietário desta fazenda possui uma caderneta de campo e um mapa, de um antigo geólogo inglês, com o registro das escavações realizadas no ano de 1945.

Após a Segunda Grande Guerra, por décadas, essas ocorrências não suscitaram interesse das empresas mineradoras e somente no ano de 2004 é que foram identificados jazimentos de grande porte de minério disseminado, através de pesquisas sistemáticas realizadas por empresas de mineração. Os trabalhos de pesquisa mineral efetuados foram capitaneados pelo autor desta tese e permitiram bloquear reservas superiores a 1,8 milhões de toneladas de grafita neste distrito grafitífero.

1.2 Localização e vias de acesso

O distrito grafitífero situa-se na mesoregião Norte Cearense, a 90 km a SSW da cidade de Fortaleza, abrangendo os municípios de Aracoiába, Baturité, Capistrano e Itapiúna.

A área selecionada para o mapeamento cobriu a zona de influência das mineralizações, bem como as principais estruturas e unidades geológicas relacionadas (Figura 1) e corresponde a uma superfície de 1.000 km² definida por um retângulo de 25 km x 40 km.

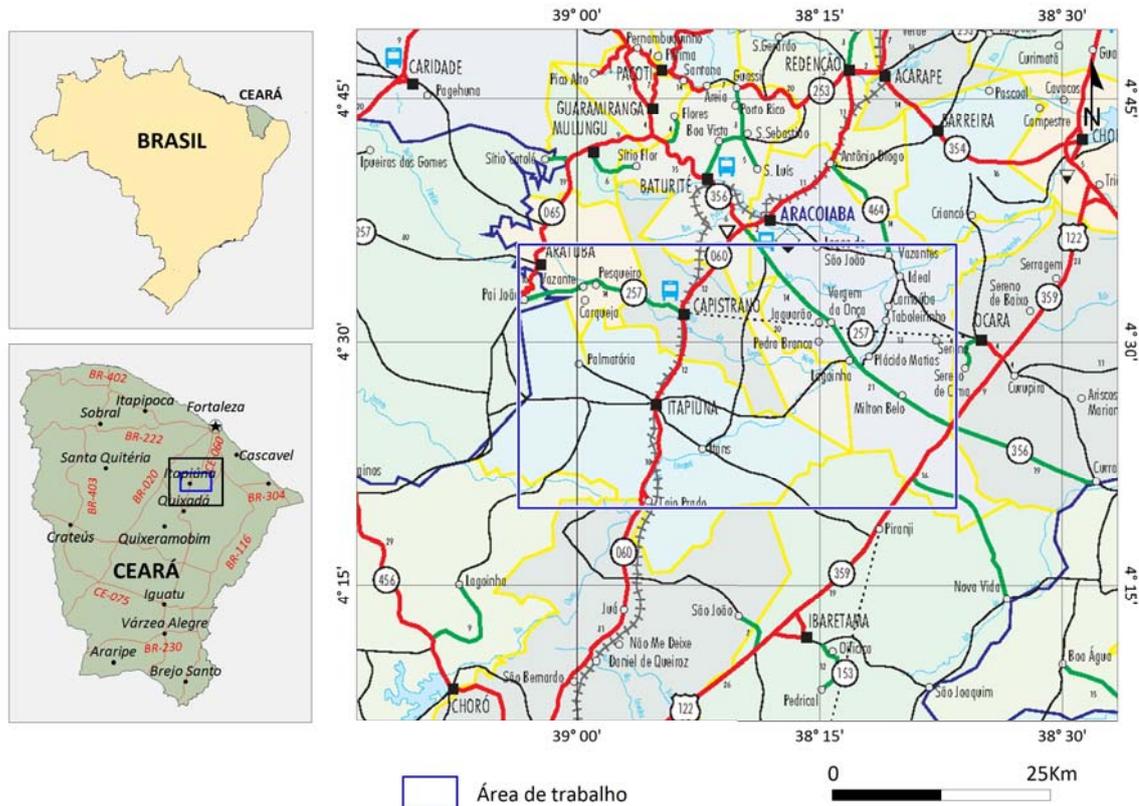


Figura 1 – Mapa de situação da área de estudo

O acesso pode ser feito de Fortaleza pela rodovia asfaltada CE-060, percorrendo-se 76 km a partir do Anel Viário da Pajuçara, em direção à sede do Município de Aracoiába. Da cidade de Aracoiába, segue-se no rumo sul para o povoado de Pedra Branca por um percurso de 18 km, em estrada macadamizada.

1.3 Metodologia e atividades desenvolvidas

Os trabalhos consistiram inicialmente na obtenção da maior quantidade possível de informações sobre a área e sobre o tipo de minério em questão e, a seguir, foi confeccionado um mapa geológico preliminar. Este mapa, que serviu de base para os primeiros trabalhos, evoluiu para o mapa geológico final a partir do incremento dos novos dados de trabalhos de campo efetuados.

Foram de grande valia para o presente projeto as informações disponibilizadas pela empresa Expresso Leão Empreendimento e Participações Ltda. (ELEP), que realizou pesquisa mineral na região. Mesmo sem cunho científico estes dados facilitaram e orientaram os trabalhos de campo.

1.3.1 Levantamento e análise da bibliografia

O trabalho teve início com o levantamento e a análise de bibliografia disponível sobre a área e sobre mineralizações de grafita em geral. Foram analisados também os dados do Projeto Grafita Pedra Branca, disponibilizados pela mineradora ELEP, incluindo testemunhos de sondagem, análises químicas, levantamentos geofísicos e mapas.

O levantamento da cartografia disponível incluiu: mapas geológicos básicos; imagens dos satélites Landsat (imagens em *pseudo color*, *virtual color* e 2000) e Adeos (*Advanced Earth Observing Satellite* – Embrapa); e levantamento aerogeofísico de magnetometria e gamaespectrometria realizado pela LASA a serviço da Nuclebras em 1977 (altura do voo 150m; espaçamento das linhas de voo 500m).

Todas as informações bibliográficas reunidas foram organizadas para consulta e os dados de imagem (mapas, levantamentos geofísicos e imagens de satélite) foram dispostos em um banco de imagens informatizado em *MapInfo Professional*. Este aplicativo de mapeamento é baseado na plataforma *Microsoft Windows*, e possibilita visualizar facilmente e integrar diferentes imagens e dados de campo.

1.3.2 Mapeamento geológico

Para facilitar a compreensão do contexto geológico em que as mineralizações estão inseridas e considerando a carência de informações sobre a geologia local, foi elaborado um Mapa Geológico na escala 1:100.000, ressaltando os aspectos de interesse da pesquisa (Anexo A). Este mapa foi feito a partir de dados de campo, com interpretação de imagens

de satélite (Landsat 2000, Landsat VC, Landsat PC), e de plantas aerogeofísicas (radiometria e magnetometria), apoiado também pelas informações bibliográficas.

O levantamento aerogeofísico utilizado foi o do Projeto N° 2027 da CPRM, de magnetometria e gamaespectometria (intervalo AM de 1s; altura de vôo 150m; espaçamento LV de 500m) realizado pela LASA – Engenharia e Prospecções S.A. para as Empresas Nucleares Brasileiras S. A. – Nuclebras, no ano de 1977.

A base cartográfica utilizada (anexo I) foi extraída dos mapas topográficos na escala 1:100.000, executados pelo DSG em 1970: Folha de Baturité – SB.24-X-A-I e Folha de Itapiúna – SB.24-X-A-VI. A área selecionada para o mapeamento cobriu a zona de influência das mineralizações, bem como as principais estruturas e unidades geológicas relacionadas, e corresponde a uma superfície de 1.000 km², definida por um retângulo de 25 km x 40 km com os seguintes vértices:

Vértice	Latitude (S)	Longitude (W)
NW	04° 25' 17,6"	38° 58' 15,3"
NE	04° 25' 17,6"	38° 36' 36,6"
SW	04° 38' 46,1"	38° 58' 15,3"
SE	04° 38' 46,1"	38° 36' 36,6"

1.3.3 Levantamento de campo e cadastramento das mineralizações

Durante o período de elaboração do presente estudo foram realizadas 5 (cinco) etapas de campo para reconhecimento da geologia e, principalmente, de visita a todos os corpos mineralizados conhecidos. Foram inspecionadas as amostras e os testemunhos de sondagem da mineradora ELEP, e todas as informações foram registradas em planilha Excell que permite a integração com o banco de imagens em Mapinfo.

Para melhor entendimento do contexto geológico, foram realizadas 15 (quinze) descrições petrográficas em seções delgadas com luz transmitida e refletida. Também, foram feitas estimativas volumétricas dos teores de grafita por faixa granulométrica em amostras de minério, desagregadas com o devido cuidado para que não houvesse cominuição dos cristais de grafita. Em 6 (seis) amostras de minério, foram realizadas determinações de isótopos de carbono, com o objetivo de identificação da origem da mesma.

1.3.4 Geofísica

Em função da escassa informação disponível sobre aplicações de geofísica em prospecção de grafita foram testados diferentes métodos, cujas respectivas metodologias serão

apresentas a seguir. Todos os levantamentos geofísicos apresentados foram realizados por técnicos especializados, ficando as interpretações a cargo de geólogos-geofísicos que atuavam em diversas empresas ou instituições.

O presente autor acompanhou todos os levantamentos de campo e teve participação direta nas interpretações dos dados geofísicos, adequando as informações aos dados geológicos levantados em cada área estudada.

1.3.4.1 Eletrorresistividade (ER)

O estudo geofísico por eletrorresistividade (ER) das rochas foi realizado em malha de campo implantada na área da Fazenda Laje de Pedra, tendo utilizado para coleta dos dados de campo os dispositivos de arranjo dos eletrodos pelos métodos Schullumberger e Wenner.

Sondagem elétrica vertical com arranjo Schlumberger – As seções geoelétricas foram obtidas com o arranjo linear quadripolar, AB fixo = 200 m, MN = 20 m e X = 10m. Foram prospectados 122 pontos ao longo das picadas situadas entre as picadas 300S e 50 N.

Mapeamento Elétrico Wenner – As melhores informações foram obtidas com leituras de AB = 30m, a = 10m, x = 5m, com aquisição de dados pontuais à profundidade constante de 5,5 m.

1.3.4.2 GPR - *Ground Penetrating Radar*

O GPR é um método de investigação geofísica, por meio de ondas eletromagnéticas de altas frequências (10-1000 MHz), empregado no estudo em detalhe da subsuperfície. Um pulso de energia de alta frequência é irradiado para o subsolo por intermédio de uma antena transmissora, sofrendo reflexões, refrações e difrações, sendo então captado por uma antena receptora.

Na malha de pesquisa implantada na área da Fazenda da Laje de Pedra foram efetuados 16 perfis de radar, totalizando 2.200 metros levantados lineares. Esta área, onde afloram dois corpos de minério de grafita, foi escolhida para testar os desempenhos dos diferentes métodos geofísicos.

Para definir o melhor desempenho do método para a detecção das camadas de cascalheiros superficiais foram testados dois equipamentos nas mesmas linhas de picada. Inicialmente foi testado o sistema IDS-Radar RIS Multifrequencial: 08 canais com Antenas blindadas de 200 e 600MHz. Este equipamento percorreu a superfície do solo a uma altura inferior a 5 centímetros e, para isso, foi necessária a retirada de qualquer obstáculo (pedras, raízes e etc.) das picadas que pudesse atrapalhar o movimento do equipamento (Figura 2).

De forma a testar o método, foi feito um levantamento das mesmas linhas com um novo equipamento Sistemas Ramac/GPR, com antenas não blindadas.



Figura 2 - Equipamento de IDS-Radar RIS Multifrequencial em Aracoiába

1.3.4.3 Polarização Induzida Espectral e Eletroresistividade

A alta cargabilidade e baixa resistividade do minério de grafita indicaram a experiência conjugada dos métodos de Polarização Induzida Espectral (IPS) e Eletroresistividade (ER), que foram executados pelo Laboratório de Pesquisas Geofísicas Aplicadas da UFPR (STEVANATO et al., 2004).

Foi feita a polarização induzida espectral (SIP - *Spectral Induced Polarization*), utilizando-se o arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento entre os eletrodos de corrente e os de potencial de 20 metros ($AB=MN=20m$).

Os levantamentos de SIP (resistividade, Tau, cargabilidade global e cargabilidade Cole-Cole), no arranjo dipolo-dipolo, empregaram uma disposição eletródica dada por um par de eletrodos de corrente AB e outros seis pares de eletrodos de potencial MN dispostos ao longo de uma linha. Isto permitiu elaborar uma pseudoseção com seis níveis de profundidade de investigação. A profundidade estimada de investigação variou de 4 a 87 metros.

Os levantamentos foram realizados em duas etapas, sendo: a primeira em áreas de ocorrência de minério maciço (Fazenda Laje de Pedra, Madalena Norte e Fazenda Juamirim) e a segunda em áreas de ocorrência de minério disseminado (Fazendas Chereco e Erom).

Os levantamentos foram feitos nas malhas de pesquisa, ao longo das linhas abertas (picadas) na direção E-W, perfazendo mais de 7.000 m lineares.

1.3.4.4 Magnetometria e VLF - *Very Low Frequency*

Depois de concluída a pesquisa no Alvo Chereco foi realizado um sucinto levantamento de Magnetometria e VLF, aplicados concomitantemente, para comparação de seu desempenho em relação ao método IPS/ER. Foram realizados 4 (quatro) perfis ao longo das picadas transversais ao corpo Chereco, com espaçamento entre as leituras de 20 metros.

1.3.5 Sondagens rotativas

Foram feitas duas campanhas de sondagem que ficaram a cargo das empresas Orcioli Geólogos Associados Ltda. e Geosol Geologia e Sondagem Ltda. Ao todo foram efetuados 25 (vinte e cinco) furos assim distribuídos: 7 (sete) furos na Fazenda Laje de Pedra, 12 (doze) no Alvo Chereco e 6 (seis) no Alvo Erom, totalizando 1800 metros de sondagem rotativa com coroa diamantada, com diâmetros NX e BX.

A primeira campanha de sondagem foi realizada com diâmetro BX e pelo método convencional, que consistiu na utilização do conjunto: coroa diamantada, barrilete amostrador, haste e acessórios. Para cada coleta de amostra foi necessária a retirada de todo o ferramental do furo.

Já na segunda campanha utilizou-se o método *Wire Line*, iniciando os furos com o diâmetro NX e depois reduzindo para BX. Nesse sistema, após cada manobra de corte do testemunho, somente o tubo interno do barrilete é alçado à superfície, por meio de cabo de aço tracionado por guincho, passando por dentro das hastes de perfuração.

Todos os testemunhos foram guardados em caixas de madeira, apropriadas, com indicação das respectivas metragens lineares.

1.3.6 Análises laboratoriais

1.3.6.1 Teor de carbono do minério grafitoso

As determinações dos teores de carbono foram realizadas por termogravimetria e termodiferencial, pelos laboratórios do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear /CNEN (CDTN) e do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM).

As análises termogravimétricas foram realizadas em um equipamento TA Instruments - SDT 2960 nas seguintes condições de operação: taxa de aquecimento de 10°C/min até 1200°C, porta amostras de platina, alumina calcinada como referência, atmosfera de ar com vazão de 100 ml/min. O preparo da amostra consistiu da moagem em gral de cerâmica e secagem a 100°C em estufa a vácuo por 12 horas.

Durante a fase de pesquisa mineral as determinações dos teores de carbono seguiram uma rotina padrão destes laboratórios, que distinguia dois tipos de materiais carbonosos, com perda de massa exotérmica (libera calor) respectivamente nas faixas de temperatura “350°C-650°C” e “650°C a 1.050°C”. Sendo a primeira relativa ao carbono de material orgânico superficial e a grafita microcristalina e a segunda correspondendo a grafita cristalizada (flocos) de maior interesse econômico.

Após a fase de pesquisa mineral, foram aferidos com maior precisão os limites dos eventos endotérmicos na curvas de análise térmica do minério de Aracoiába-Baturité. Este estudo foi realizado com o apoio do CETEM.

1.3.6.2 Isótopos de carbono

Para estudo da origem do carbono nos dois tipos de minério de grafita (maciço e disseminado) que ocorrem na área de estudo, foram realizadas análises dos isótopos de carbono em 6 (seis) amostras representativas. Estas análises foram feitas no laboratório da UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, com o instrumental da LECO Corporation (modelo CHN-600), utilizando a norma ASTM-D5373.

As amostras foram moídas a 200 mesh em gral de ágata. Em seguida, foram separadas em alíquotas de 10 gramas e atacadas com HCl e HF, por um período de 24 horas. Após cada ataque ácido, as amostras foram lavadas com H₂O destilada e decantadas por um período de 48 horas.

1.3.7 Trabalhos de escritório e laboratório

Todas as informações obtidas foram reunidas e organizadas para consulta e os dados de imagem (mapas, levantamentos geofísicos e imagens de satélite) foram dispostos em um banco de imagens informatizado em *MapInfo Professional*. Este aplicativo de mapeamento é baseado na plataforma *Microsoft Windows*, e possibilita visualizar facilmente e integrar diferentes imagens e dados de campo.

Com base nos recursos acima descritos, foi possível elaborar um mapa geológico esquemático, onde se pode visualizar a distribuição das mineralizações de grafita na região, definir o contexto geológico regional e estabelecer os controles regionais e locais das mineralizações.

2 MINERALIZAÇÕES DE GRAFITA (Estado da Arte)

2.1 Origem dos depósitos de grafita

A literatura especializada considera que o material grafitoso contido nas rochas pode ser originado basicamente por três processos (SHARMA; KUMAR, 1998):

- Desidrogenização progressiva da matéria orgânica durante o metamorfismo de rochas sedimentares;
- Fonte magmática, onde a precipitação da grafita ocorre devido às soluções (fluidos magmáticos e gases vulcânicos) ricas em carbono que infiltram CO₂ nas rochas;
- Grafitas que se originam das reações de minerais carbonáticos.

2.1.1 Desidrogenização progressiva da matéria orgânica durante o metamorfismo de rochas sedimentares

Constitui a transformação de matéria orgânica de origem biológica em grafita (+ CO₂, CH₄, H₂ e água) através do metamorfismo (ITAYA, 1981). A matéria orgânica de origem biológica foi depositada juntamente com sedimentos em bacias sedimentares, depois foi rapidamente coberta por sedimentos e/ou águas estagnadas em ausência do oxigênio. A seguir, esta matéria orgânica (querogênio) foi transformada em grafita sob metamorfismo em altas pressões e temperaturas.

Os oceanos são considerados como a fonte deste carbono biogênico. Através de estudos do ambiente de deposição das rochas hospedeiras e dos materiais orgânicos, conclui-se que as bactérias e as algas eram as fontes mais prováveis para esta matéria orgânica.

Uma evidência da participação direta de materiais orgânicos associados com as bactérias na formação da grafita diagenética, foi demonstrada por Tazaki et al. (1992). Eles mostram que ocorre grafitização gradual ao longo das pilhas bacterianas, produzindo cristais de forma cilíndrica. Este processo progressivo de mineralização do material orgânico mostrou formas quase perfeitas da grafita.

2.1.2 Fonte magmática, onde a precipitação da grafita ocorre devido às soluções (fluidos magmáticos e/ou gases vulcânicos) ricas em carbono que infiltram CO₂ nas rochas

Neste caso a grafita é formada pelo carbono depositado por fluidos magmáticos e/ou gases vulcânicos, ricos em CO₂ e em CH₄, produzindo grafita + H₂O. O resfriamento das misturas fluidas de C-O-H e/ou a diminuição do seu estado de oxidação também podem causar a precipitação de grafita.

A grafita não é um mineral comum em rochas ígneas e raramente é abundante. Os exemplos de origem magmática de maior destaque na bibliografia são os depósitos de grafita associados a sulfeto nas rochas ultramáficas de Serranía de Ronda (Espanha) e Beni Bousera (Marrocos). Estas ocorrências formam diques, bolsões e *stockworks*, e estão encaixadas em rochas ultramáficas de fácies espinélio-lherzolito. Os veios são compostos por grafita, cromita e sulfetos de Fe-Ni-Cu, sendo que a grafita é bem cristalizada e apresenta assinaturas de isótopos leves de carbono (LUQUE et al., 1992).

As evidências de grafita de origem magmática nos complexos ultramáficos de Stillwater e Bushveld também são consideradas relevantes. Segundo Mathez et al. (1989), a grafita ocorre como mineral acessório em troctolitos e rochas ricas em olivina, e sua frequente associação com cloro-apatita indica que foi gerada através de um enriquecimento na fase de cristalização na presença de fluidos magmáticos ricos em compostos clorados (HCl e CH₃Cl). Nestes complexos as relações petrográficas e a presença da assembléia “forsterita-antigorita-calcita-grafita” demonstram um equilíbrio das fases ricas em carbono durante a serpentinização.

2.1.3 Grafita originada por reações de minerais carbonáticos

Trata-se da origem de material grafitoso pela transformação pós-deposicional de sedimentos carbonáticos, através de percolações de fluidos metamórficos e destruição de minerais carbonáticos. Nestes calcários, precipitados sob condições marinhas, predomina fortemente o carbono inorgânico oxidado, sobre o carbono orgânico reduzido, contido na matéria orgânica.

Como exemplos de ocorrências de material grafitoso, com origem considerada como decorrente da transformação pós-deposicional de sedimentos carbonáticos, temos os seguintes mármores grafiticos: dentro de supracrustais Arqueanas no sudoeste da Índia (SHARMA; KUMAR, 1998) e no Isua Belt -3.8 Ga na Groenlândia Ocidental (LEPLAND et al., 2002); no Complexo Grenville, no flanco leste das Montanhas Adirondack de Nova York; e na sequência pré-cambriana de Mörtersdoff na Austria (WEIS et al., 1981).

2.2 Classificação genética dos depósitos de grafita

Quanto à relação genética com a rocha encaixante, os depósitos de grafita podem ter sido formados em conjunto com a rocha hospedeira (singenéticos) ou introduzidos

posteriormente na rocha (epigenético). Estes dois tipos genéticos apresentam aspectos gerais bastante distintos.

2.2.1 Depósitos de grafita singenéticos

As ocorrências singenéticas de grafita podem ser: estratiformes, dentro de séries calciossilicatadas; disseminadas dentro de sequências terrígenas; e restitos grafitosos dentro de rochas anatéticas. Estes depósitos ocorrem em rochas metassedimentares, como resultado da transformação de matéria orgânica através de metamorfismo, e apresentam as seguintes características:

- Grafita normalmente cristalina, em flocos (*flakes*), ou microcristalina.
- Ocorre disseminada em rochas metassedimentares, mais frequentemente em xistos e gnaisses, podendo ocorrer também em rochas carbonáticas, formações ferríferas e anfíbolitos.
- Os teores desses jazimentos são baixos, inferiores a 12% de C, e normalmente entre 2% e 8% de C.
- Os corpos são estratiformes, geralmente de forma lenticular e de grandes dimensões, podendo apresentar extensões superiores a 1000 m e larguras de dezenas de metros.
- O contato dessas rochas grafitosas com as rochas encaixantes é normalmente gradacional e não costuma ser brusco.
- Mineralogia da ganga - Hospedados em paragneisses: feldspato, quartzo, biotita, clinopiroxênio, granada, sillimanita, cianita, sulfetos, clinozoizita, escapolita; Hospedadas em rochas carbonáticas: calcita, clinopiroxênio, pirita, e outros sulfetos, dolomita, anortita, clorita, clinozoizita, zoizita, granada – (SIMANDL; KENAN, 1997a).

2.2.2 Depósitos de grafita epigenéticos

A grafita epigenética tem sua origem decorrente da precipitação de carbono sólido através de fluidos naturais com carbono, como CO, CO₂ e CH₄. A maioria das grafitas “fluidos depositadas” ocorre em veios, em depósitos de substituição e como disseminações em rochas plutônicas máficas e ultramáficas (LUQUE et al., 1998). Grande parte destes depósitos é formada por fluidos de segregação metamórfica de depósitos singenéticos, com a mobilização do carbono em terrenos metamórficos, sendo frequente a ocorrência de depósitos de grafita epigenético associados a depósitos singenéticos.

As características deste tipo de depósito são as seguintes:

- Grafita normalmente cristalina, em flocos (*flakes*), ou microcristalina.
- Ocorre em veios discordantes, preenchendo fraturas e falhas, e pode também preencher zonas de fraqueza concordantes com a foliação.
- O minério é maciço, com teores elevados de carbono, variando de 20 a 70%.
- Os corpos são normalmente tabulares, de reduzidas dimensões, com larguras que variam de milímetros até poucos metros.
- O contato com as rochas encaixantes é sempre brusco.
- Mineralogia da Ganga - feldspato, quartzo, biotita, pirita e carbonatos.

2.2.3 Metamorfismo de contato de carvão (carvão grafitizado)

Rochas carbonosas podem ser convertidas em grafita microcristalina através de metamorfismo de contato nas auréolas de plutons ígneos. Neste caso já havia um sedimento carbonoso singenético, que foi transformado em grafita pelo metamorfismo termal e pela influência de fluidos magmáticos.

As relações de isótopos indicam que as rochas ígneas não contribuem com carbono adicional para as grafitas de depósitos de carvão grafitizado e que essa transformação se dá principalmente pelo metamorfismo termal (DEGENS, 1969; VINOGRADOV; KROPOTOVA, 1968).

Os melhores exemplos de carvão grafitizado são as ocorrências da Formação Barranca, em Sonora nos Estados Unidos e da Série Ecça na África do Sul.

Um caso especial de sedimentos carbonosos grafitizados através de fluidos magmáticos e metamorfismo termal é a Mina de Borrowdale, situada em Cumberland, Inglaterra. Esta foi a primeira mina comercial de grafite no mundo, descoberta em 1504, e está na parte mais inferior da série vulcânica de Borrowdale, de idade Ordoviciano (OLIVER, 1961; ALFAIATE, 1971 apud WEIS et al., 1981). A grafita ocorre como massas arredondadas irregulares, nódulos, veios e concreções em lavas com alteração hidrotermal, tufos, brechas e rochas intrusivas, na maior parte de composição andesítica (STRENS, 1965).

2.3 **Isótopos estáveis de carbono**

Os primeiros trabalhos visando à utilização de isótopos estáveis de carbono como um sinal de atividades biológicas (bioassinaturas) foram do início da década de 40. Apenas na década de 50 esta teoria foi reforçada devido ao progresso feito nas técnicas analíticas, que

levaram à descoberta de grandes variações nas relações $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ entre os vários materiais orgânicos de carbono e ao avanço nas geociências, que levou à melhor compreensão dos processos biogeoquímicos em ambientes terrestres e marinhos, atuais e antigos.

Os isótopos estáveis de carbono ^{12}C e o ^{13}C são úteis para identificar a origem do carbono porque preservam internamente à distinta assinatura isotópica do seu tempo de formação. A matéria viva (bactérias e plantas) retoma o carbono da atmosfera através do CO_2 , quebrando preferencialmente os laços mais fracos dos isótopos leves, promovendo uma seleção isotópica com o enriquecimento do ^{12}C em relação ao ^{13}C .

A relação entre estes isótopos é expressa em variação de partes por mil ($\pm\text{‰}$), comparando a amostra com o padrão de referência internacional para isótopos de carbono (VPDB -*Vienna Pee Dee Belemnite*):

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{R_{\text{Amostra}} - R_{\text{PDB}}}{R_{\text{PDB}}} \quad \text{onde } R = ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$$

Obs.: O termo VPDB é a abreviatura para *Viena Pee Dee Belemnite*, que foi adotado porque a amostra original de PDB foi de conchas (*Australopithecus shells*) de um organismo extinto chamado um *belemnite*, coletado nas margens do Rio Pee Dee da Carolina do Sul, EUA.

Diversos estudos comparativos das relações $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ em grafitas de diferentes origens (matéria orgânica sedimentar, magmática e de reações minerais com carbonato) permitiram estabelecer as faixas de valores correspondentes para cada tipo genético. Dentre estes estudos, destacam-se Brady et al. (1998), Hoefs; Frey (1976), Ohmoto (1986), Schidlowski (2001), Schoell; Wellmer (1981) e Weis et al. (1981).

<u>Carbono</u>	<u>$\delta^{13}\text{C}$</u>
Biogênico (1):	-30 ‰ a -20 ‰
Sedimentar de carbonatos (2):	-9,7 ‰ a 0 ‰
Magmático CO - (3):	-7,0 ‰ a -5,0 ‰

Legenda: (1) Minérios singenéticos de grafita nos Estados Unidos, Alasca e México (OHMOTO, 1986 e WEIS et al., 1981); (2) Grafita em mármores Arqueanos - Montanhas Ruby Mountains, Montana, U.S.A. (BRADY et al., 1998); (3) Grafita magmática derivada de monóxido de carbono (DOBNER et al., 1978)

A temperatura não influencia no fracionamento isotópico de C, seja durante a deposição ou durante o metamorfismo (KAUFMAN; KNOLL 1995), entretanto, eventos

metamórficos com expressiva circulação de fluidos podem acarretar reequilíbrios isotópicos. Desta forma, o metamorfismo é responsável pela quebra dos compostos orgânicos, originalmente presentes nas rochas, e pela volatilização de compostos de carbono na forma CO, CO₂ e CH₄.

No caso da grafita epigenética, precipitada de um fluido metamórfico, a sua assinatura isotópica depende de diversos fatores, incluindo as razões isotópicas do material fonte (matéria orgânica, gases mantélicos e carbonatos), ou da interação entre diferentes fontes, do tempo de duração das reações e das condições de pressão e temperatura (WEIS et al., 1981).

As grafitas singenéticas derivadas apenas de uma fonte (matéria orgânica) apresentam normalmente a $\delta^{13}\text{C}$ de -30 ‰ a -20 ‰, enquanto a relação $\delta^{13}\text{C}$ de grafitas epigenéticas, normalmente derivadas de mais de uma fonte, apresenta valores superiores, ou seja, intermediários entre as diferentes fontes.

	<u>Singenético ($\delta^{13}\text{C}$)</u>	<u>Epigenético ($\delta^{13}\text{C}$)</u>
Sierra de Aracena-Espanha (1):	-31.6 ‰ -21.4 ‰	-18.30 ‰ -17.70 ‰
New Jersey Highlands (2):	-26,0 ‰ -22,0 ‰	-15,0 ‰

Legenda: (1) RODAS et al. (2000); (2) VOLKERT et al.(2000)

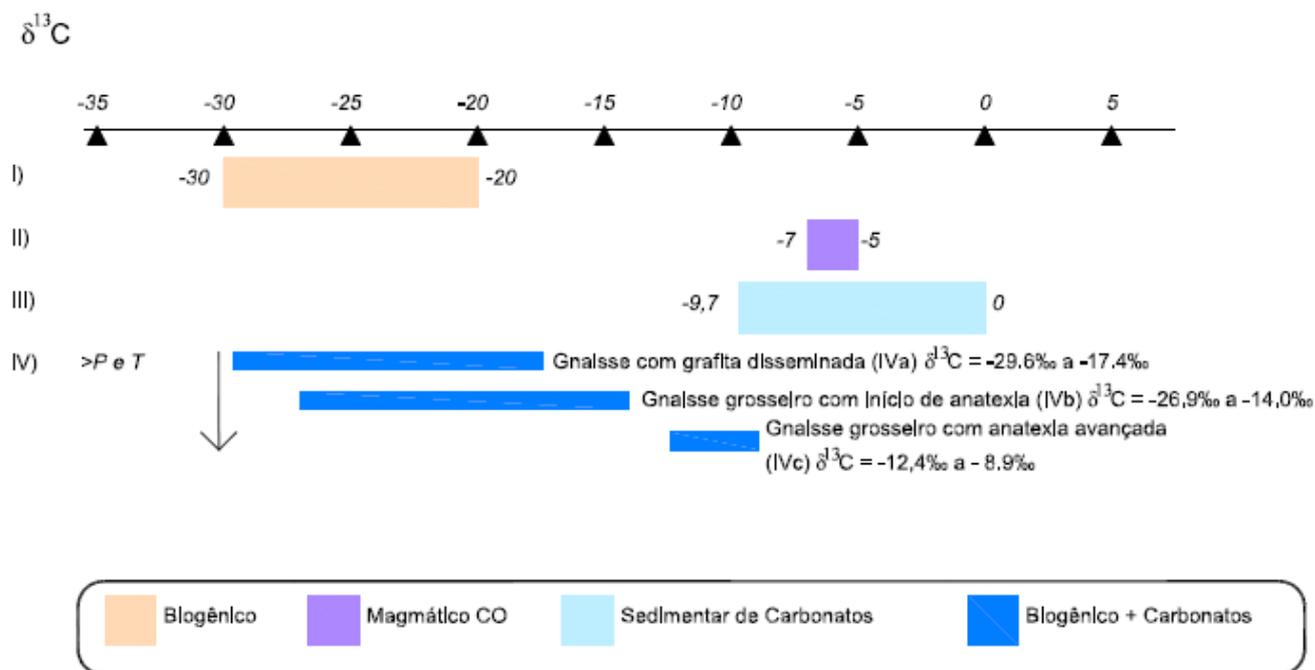
Nos exemplos (1) e (2) acima, onde as diferenças de valores de $\delta^{13}\text{C}$ das grafitas singenética e epigenética de um mesmo distrito grafitífero não são muito expressivas, tem sido interpretado como decorrente de processo de devolatilização durante o metamorfismo, envolvendo fluidos ricos de CO₂. A degradação térmica de compostos orgânicos promove a perda de hidrocarbonetos resultando na remoção preferencial de ¹²C (HOEFS; FREY 1976), e o material carbonoso residual torna-se enriquecido em ¹³C se comparado aos compostos volatilizados.

Quando há mistura de carbono, de um reservatório de carbono reduzido com carbono de carbonato, os valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ e a sua faixa de variação são maiores.

Este caso é demonstrado na tabela 1, no exemplo (IVa, IVb e IVc), onde estão representadas as faixas de valores de $\delta^{13}\text{C}$, das rochas da sequência Honey Brook Upland de Franklin Pierce, EUA, formada por intercalações de gnaisses grafitosos (Pickering gnaisses) com mármore (Mármore Franklin). Este exemplo mostra também a variação progressiva do $\delta^{13}\text{C}$ com o grau de metamorfismo (WILLIAM; VALLEY, 1990).

Gnaissse com grafita disseminada (IVa)	$\delta^{13}\text{C} = -29.6\text{‰}$ a -17.4‰
Gnaissse grosso com início de anatexia (IVb)	$\delta^{13}\text{C} = -26.9\text{‰}$ a -14.0‰
Gnaissse grosso com anatexia avançada (IVc)	$\delta^{13}\text{C} = -12.4\text{‰}$ a -8.9‰

Tabela 1 – Quadro comparativo das relações $\delta^{13}\text{C}$ em grafitas de diferentes origens (matéria orgânica sedimentar, magmática e de reações minerais com carbonato)



2.4 Grafita biogênica - geotermômetro e geoindicador

A grafita biogênica tem sido usada cada vez mais como geotermômetro e geoindicador da sedimentação, devido às suas características especiais e de poder ser facilmente reconhecida (DISSANAYAKE et al., 2000). O fato de mostrar diferentes graus de cristalinidade refletindo o grau de metamorfismo a que foi submetida, e de não retornar a um estado inferior, mesmo sob condições metamórficas retrogradadas, faz com que se torne um bom geotermômetro. Por ocorrer apenas em ambientes geológicos específicos, ela tem sido muito útil como um marcador de limite de bacias sedimentares antigas, bem como das geossuturas resultantes dos subseqüentes fechamentos desses oceanos.

Bons exemplos desta característica são os terrenos Pan-Africanos de fragmentos crustais do Gondwana, que mostram as suturas do Moçambique Belt, passando pela África Oriental, Madagascar, Sri Lanka e Antártica (PRADEEPKUMAR; KRISHNANATH 2000).

Outro exemplo importante está no Grupo Mashan da China Oriental, que é considerado como o maior produtor de grafita do mundo (DISSANAYAKE et al., 2000).

No estado do Ceará, a faixa de ocorrência de grafita, que se estende desde o município de Aracoiába até Itapiúna, é adjacente e paralela à Zona de Cisalhamento Senador Pompeu, que tem sido considerada como uma faixa de geossutura. Esta zona de cisalhamento transcorrente possui *trend* NE, cerca de 350 km de comprimento e 10-15 km de largura, e prolonga-se na África com a denominação de Zona de Cisalhamento Ile-Ife (CABY et al., 1991).

2.4.1 Variação secular na geoquímica dos carbonatos sedimentares

Com o uso do mecanismo da geoquímica isotópica do carbono, constatou-se que periodicamente os valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{TDC}}$ (TDC=*total dissolved carbon*) variam conforme diferentes razões entre o C orgânico e o C carbonático dos sedimentos, o que configura os *trends* de variação secular do $\delta^{13}\text{C}$. Por exemplo, o aumento do carbono orgânico precipitado, geralmente rico em ^{12}C , resulta na diminuição de $\delta^{13}\text{C}$. Ao contrário, se houver predominância de deposição de carbono carbonático enriquecido em ^{13}C , resultará num registro de $\delta^{13}\text{C}$ cada vez mais positivo (SANTOS, 2000).

É importante ressaltar que a curva de variação secular do $\delta^{13}\text{C}$ é correlata com a curva de variação do nível global do mar, ou seja, calcários com $\delta^{13}\text{C}$ mais negativos são relacionados a níveis mais elevados, enquanto os mais positivos são atribuídos aos níveis mais baixos do mar (VEIZER et al., 1980).

São frequentes as anomalias isotópicas ao longo do tempo geológico no total de carbonatos precipitados de água do mar. Estas flutuações são denominadas “excursões” ou “perturbações” e podem ser positivas ou negativas.

Excursões fortemente positivas podem ser percebidas em várias seções, no limite entre o Pré-cambriano e o Cambriano, atribuídas ao aumento de produtividade orgânica e à razão de soterramento de material orgânico (HOFFMAN et al., 1998).

O Ciclo orogenético Pan-Africano/Brasiliano (final do Pré-cambriano e início do Paleozóico) é considerado um dos períodos de maior formação de crosta da história da Terra (DISSANAYAKEL et al., 2000) e é muito significativo nos estudos de reconstrução do Gondwana. Sua existência foi reconhecida em todos os fragmentos crustais do Gondwana, demarcando as antigas bacias sedimentares e zonas de geossuturas nos locais de fechamento dos oceanos, que são de particular importância neste estudo.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO DA PROVÍNCIA BORBOREMA

3.1 Histórico do conhecimento geológico

Essa região foi mapeada originalmente na década de 70 pelo Projeto Fortaleza (BRAGA et al., 1977) na escala 1:250.000, através do programa de mapeamento básico da CPRM/DNPM. A partir desta época foram feitos importantes estudos geológicos, dentre os quais se destacam os realizados pela equipe da CPRM (ALVES, 1984; BIZZI et al., 2001; BRANDÃO, 1995; GOMES et al., 1981). Em 2003, a equipe da CPRM publicou o Mapa Geológico do Estado do Ceará (CAVALCANTE et al., 2003), que constou de uma atualização do mapeamento básico original feito na década de 70.

Os trabalhos mais recentes realizados na região foram os de Torres et al. (2005), Torres et al. (2006) e Arthaud (2007), e tiveram grande importância no presente estudo em função dos conhecimentos mais atualizados:

- O trabalho de Torres et al. (2006) foi realizado em uma área vizinha do presente projeto e apresenta importantes dados geocronológicos e descrições das feições geológicas e estruturais da sequência supracrustal neoproterozóica. Esta sequência, denominada por eles de Sequência Acarápe, é hospedeira das mineralizações de grafita.

Por sua vez, Arthaud (2007), em sua tese de doutoramento mapeou uma área de 5.200 km² na região central do Estado do Ceará, e desenvolveu estudos sobre a evolução neoproterozóica do Grupo Ceará, desde a sedimentação até a colisão continental brasileira.

3.2 Província Borborema (Estado da Arte)

A área de interesse deste projeto está inserida na porção norte da Província Tectônica Neoproterozóica Borborema, mais especificamente no Domínio Central do Ceará (ARTHAUD, 2007; FETTER et al., 2003).

O termo Província da Borborema foi originalmente usado em Almeida et al. (1977) para definir a região oriental da plataforma Sul Americana, formada por um complexo mosaico de cinturões de dobramentos, em domínios independentes separados por extensas zonas de cisalhamento crustais. Esta província sofreu uma evolução geológica policíclica complexa, sendo o resultado cumulativo de uma sucessão de orogênias continentais, iniciada no Arqueano e encerrada no final do Neoproterozóico (Figura 3).

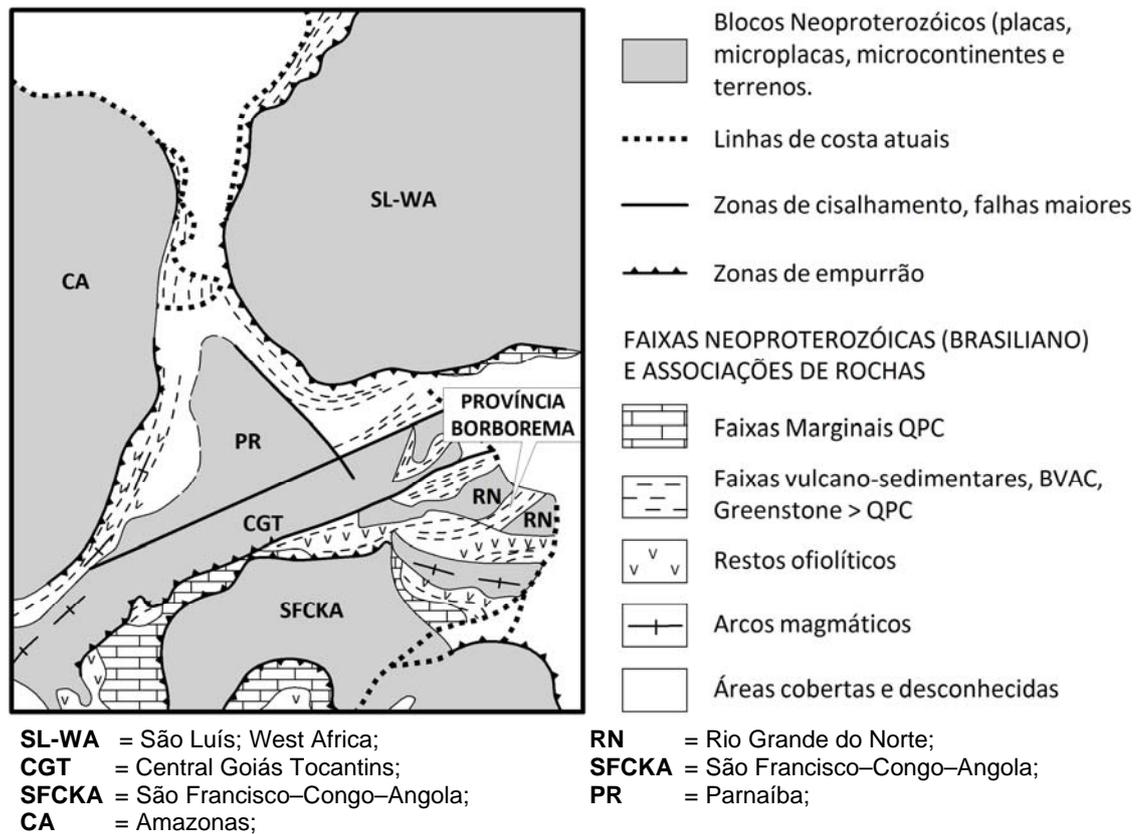


Figura 3 - Esboço de cenário paleogeográfico do fecho do Ciclo Brasiliano-Pan Africano, mostrando os principais segmentos colidentes (placas, microplacas, terrenos) e os principais tipos de faixas móveis gerados. (Fonte: Almeida et al., 2000)

Na configuração atual da província se destaca um feixe de lineamentos regionais, subverticais, observados em rochas supracrustais e do embasamento, e por uma rede em escala continental de zonas transcorrentes dúcteis (Figura 4). Esta configuração foi formada no final da orogenia Brasiliana/Panafricana (entre 660 e 570 Ma), dentro de uma placa continental para acomodar a deformação imposta pela colisão final dos cratons de “São Luís - Oeste da África” e “São Francisco”, no contexto de amalgamação do Gondwana Ocidental (ARTHAUD, 2007).

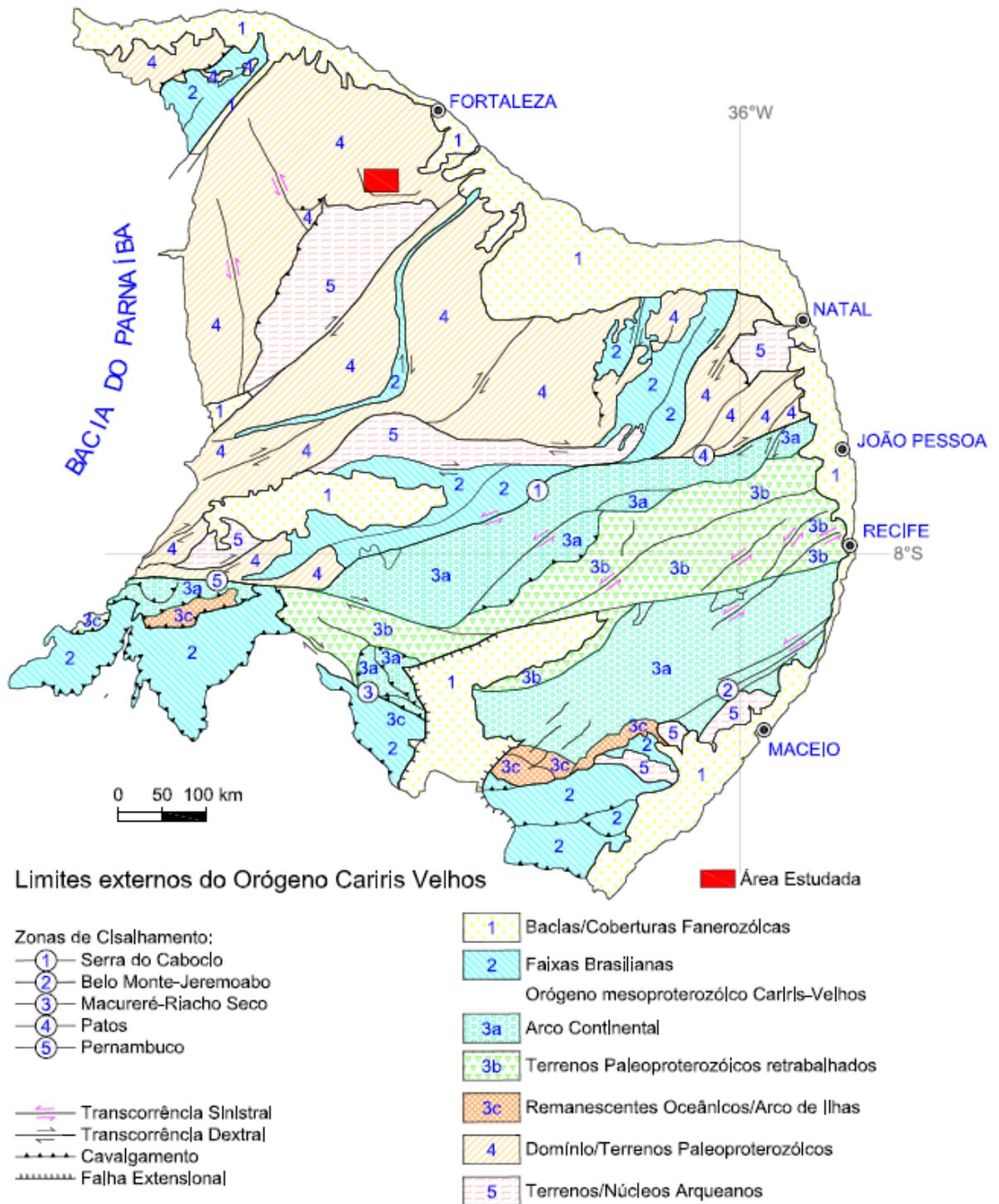


Figura 4 - Província Borborema - Fonte: Bizzi et al. (2003)

3.2.1 Divisão da Província Borborema

Os primeiros estudos geológicos regionais que começaram a desvendar o arcabouço geotectônico da Província da Borborema foram os da década de 70, quando tiveram início os primeiros mapeamentos geológicos básicos executados pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM. Na década de 80, os estudos evoluíram e alguns autores já propuseram a divisão da Província da Borborema em sistemas de dobramentos, maciços, domínios e faixas - Brito Neves (1975 e 1983); Jardim de Sá et al. (1988); Santos (1988) e Brito Neves (1984) dentre outros.

No entanto, a grande evolução do conhecimento do arcabouço tectônico e dos eventos que atuaram na Província Borborema deu-se a partir da década de 90, com o início das datações geocronológicas (U-Pb e Sm-Nd) e dos levantamentos aerogeofísicos. Dentre estes trabalhos destacam-se: Arthaud et al. (1998a), Brito Neves et al. (1995), Campos Neto et al. (1994), Dantas et al. (1998), Fetter (1999), Jardim de Sá et al. (1992), Jardim de Sá (1994), Santos (1996 e 1988), Santos; Medeiros (1998) e Van Schmus et al. (1995).

Posteriormente, Brito Neves et al. (2000) sintetizaram a essência do conhecimento através de uma revisão dos artigos anteriores, considerando principalmente os novos dados geocronológicos disponíveis. Nesta revisão foram individualizados três segmentos tectônicos fundamentais, identificados como subprovíncias, os quais foram subdivididos em domínios, terrenos ou faixas, com base no patrimônio litoestratigráfico, feições estruturais, dados geocronológicos e assinaturas geofísicas. As principais modificações sugeridas podem ser observadas na figura 5 e na tabela 2, através da comparação com a compartimentação da Província da Borborema proposta por Santos (1988).

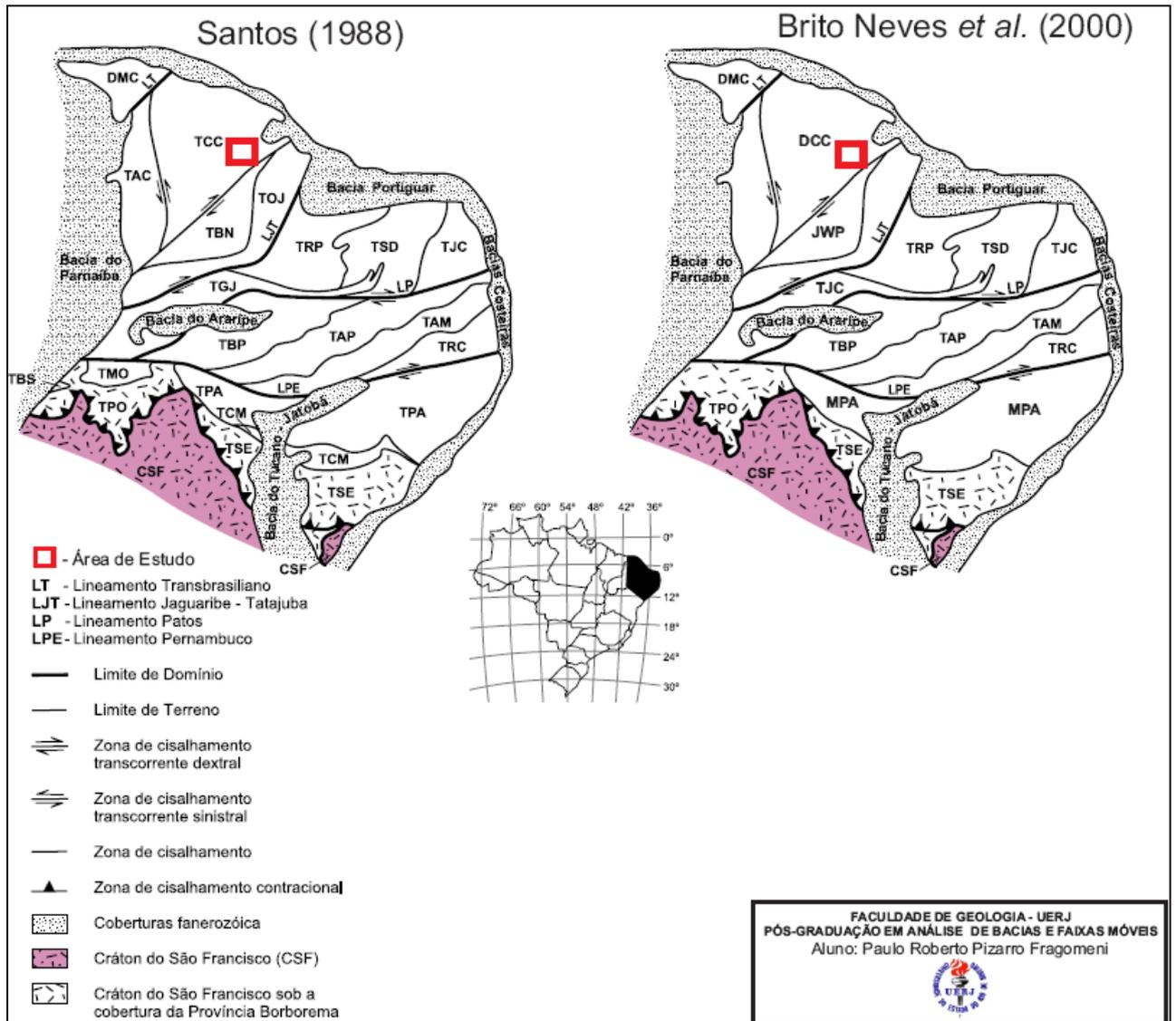


Figura 5 – Mapas esquemáticos das divisões da Província da Borborema, com as modificações propostas por Brito Neves et al. (2000) na subdivisão de Santos (1988)

As principais alterações introduzidas por Brito Neves et al. (2000), comparando com a subdivisão proposta por Santos (1988), estão expostas na figura 5 e são as seguintes:

Domínio Ceará Central

- Foi criado o Domínio Ceará Central na área correspondente aos terrenos Acaraú (TAC) e Ceará Central (TCC) de Santos (1988);

Domínio Rio Grande do Norte

- Denominou-se Faixa Jaguaribe-W Potiguar (JWP) a área dos terrenos Banabuiú (TBN) e Orós-Jaguaribe (TOJ), passando a ser incluída no Domínio Rio Grande do Norte;

- O Terreno S. José Campestre (TJC) passou a incluir também a área que era considerada como Terreno Granjeiro (TGJ).

Domínio Externo ou Meridional

- Adotou-se a denominação de Maciço Pernambuco-Alagoas ao invés de “Terreno” Pernambuco-Alagoas;
- Os terrenos Brejo Seco (TBS) - Monte Orebe (TMO) - Canindé-Marancó (TCM) foram englobados no Terreno Pontal (TPO);
- A Província da Borborema foi estendida para sul, passando a incluir o Terreno Rio Preto (TRP) na Subprovíncia Externa.

Tabela 2 – Divisões da Província da Borborema, Santos (1988) e Brito Neves et al. (2000)

Santos (1988)	Brito Neves <i>et al.</i> (2000)	
Domínio Médio Coreau (DMC) (terrenos não individualizados)	Domínio Médio Coreau (DMC) (terrenos não individualizados)	Subprovíncia Setentrional
Domínio Cearense TAC -Terreno Acaraú TCC -Terreno Ceará Central	Domínio Ceará Central - DCC	
TBN -Terreno Banabuiú TOJ -Terreno Orós-Jaguaribe	Domínio Rio Grande do Norte JWP - Faixa Jaguaribe-W Potiguar	
Domínio Rio Grande do Norte TRP -Terreno Rio Piranhas TSD -Terreno Seridó TJC -Terreno S. José Campestre TGJ -Terreno Granjeiro	TRP -Terreno Rio Piranhas TSD -Terreno Seridó TJC -Terreno S. José Campestre	
Domínio da Zona Transversal TPB -Terreno Piancó-Alto Brígida TAP -Terreno Alto Pajeú TAM -Terreno Alto Moxotó TRC -Terreno Rio Capibaribe	Domínio da Zona Transversal TPB -Terreno Piancó-Alto Brígida TAP -Terreno Alto Pajeú TAM -Terreno Alto Moxotó TRC -Terreno Rio Capibaribe	
Domínio Externo TPA -Terreno Pernambuco-Alagoas TPO -Terreno Riacho do Pontal TMO - Terreno Monte Orebe TBS -Terreno Brejo Seco TCM -Terreno Canindé-Marancó TSE -Terreno Sergipano	Domínio Externo MPA - Maciço Pernambuco-Alagoas TPO -Terreno Riacho do Pontal TSE -Terreno Sergipano / Terreno Rio Preto	Subprovíncia Externa ou Meridional

LT - Lineamento Transbrazilianno / Kandi
LSP - Lineamento Senado Ponpeu / Ile lfe
LJT - Lineamento Jaguaribe-Tatajuba

LP - Lineamento Patos
LPE - Lineamento Pernambuco
CSF - Craton São Francisco

Foi proposta por Campelo (2009) a divisão dos limites de terrenos tectono-estratigráficos da Subprovíncia Setentrional da Borborema com base na integração de recentes

dados geológicos e gravimétricos. Esta subdivisão adotou o conceito de “terrenos”, ao invés de “domínios”.

A subdivisão proposta por Campelo (2009), para Subprovíncia Setentrional da Borborema, resultou da investigação dos possíveis limites de terrenos tectono-estratigráficos, com base em zonas de cisalhamento. Dentre estas, foram destacadas as seguintes: Zona de Cisalhamento Patos (ZCP), Zona de Cisalhamento Sobral-Pedro II(ZCSPII), Zona de Cisalhamento Picuí-João Câmara (ZCPJ), Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos (ZCRP), Zona de Cisalhamento Senador Pompeu (ZCSP), Zona de Cisalhamento Tauá (ZCT) e Zona de Cisalhamento Portalegre (ZCPA). A partir destas zonas foram definidos os seguintes terrenos, de oeste para leste: Terreno Noroeste do Ceará, Terreno Ceará Central, Terreno Tauá, Terreno Orós-Jaguaribe, Terreno Seridó e Terreno São José do Campestre (Figura 6).

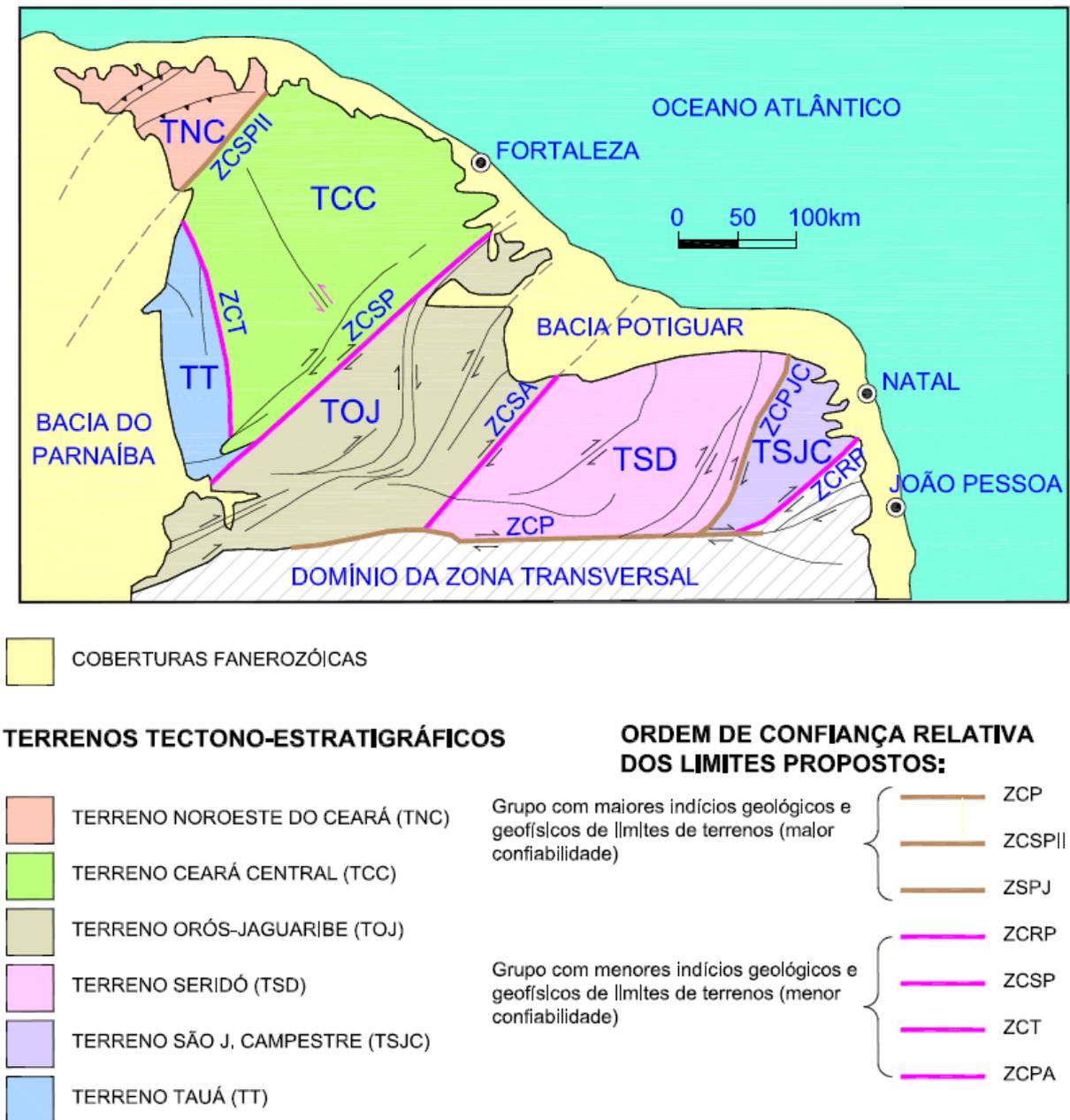


Figura 6 - Divisão em terrenos tectono-estratigráficos da Subprovincia Setentrional da Borborema, com base na integração de dados geológicos e geofísicos (Fonte: Campelo, 2009)

Neste trabalho de tese adotamos também o conceito de “terrenos”, abandonado a terminologia informal de “domínio”, tendo em vista a divisão tectono-estratigráfica adotada e a revisão conceitual sobre a análise de terrenos e sua aplicação à Província Borborema, que apresentamos a seguir (item 6.1).

3.2.1.1 Subprovincias da Borborema

Foram individualizados três segmentos tectônicos fundamentais na Província da Borborema, identificados como subprovincias. Estas são limitadas por duas importantes zonas

de cisalhamento brasileiras: Pernambuco (LPE) e Patos (LP), de direção E-W e dextrais, que se destacam pelas suas grandes dimensões, com mais de 500 quilômetros de comprimento e 2 quilômetros de largura.

3.2.1.1.1 Subprovíncia Setentrional

Compreende a porção da Província Borborema situada a norte do Lineamento Patos e limitada a norte pela borda retrabalhada do Cráton de São Luís. Brito Neves et al. (2000) subdividiu, de NW para SE, nos domínios Médio Coreá, Ceará Central e Rio Grande do Norte. Contudo, mais recentemente, Campelo (2009) abandonou o termo “domínio” e dividiu esta subprovíncia nos seguintes “terrenos”: Terreno Noroeste do Ceará, Terreno Ceará Central, Terreno Tauá, Terreno Orós-Jaguaribe, Terreno Seridó e Terreno São José do Campestre.

O Lineamento Patos é considerado um dos principais limites litosféricos, pois separa a Província da Borborema em um setor norte, onde ocorrem importantes conjuntos de rochas arqueanas, paleoproterozóicas e neoproterozóicas, e um setor sul no qual também ocorrem terrenos mesoproterozóicos (SCHOBENHAUS et al., 1975).

3.2.1.1.2 Subprovíncia da Zona Transversal

Trata-se de um segmento crustal de direção E-W, limitado a norte pelo Lineamento Patos, a sul pelo Lineamento Pernambuco, a oeste pela Bacia do Parnaíba e a leste pelas bacias costeiras. Configura-se, estruturalmente, como um sistema anastomosado de zonas de cisalhamento transcorrente dextrais de direção E-W e sinistrais preferencialmente de direção NE-SW.

Compõe-se, de NW para SE, pelos terrenos Piancó-Alto Brígida, Alto Pajeú, Alto Moxotó e Rio Capibaribe, os quais foram amalgamados durante os eventos orogênicos Cariris-Velhos (1,0 a 0,95 Ga) e Brasiliano (750 a 520 Ma).

3.2.1.1.3 Subprovíncia Externa ou Meridional

Compreende a porção da Província Borborema situada ao sul do Lineamento Pernambuco e ao norte da borda do Cráton de São Francisco. Esta subprovíncia estende-se para leste no Continente Africano ao norte do Cráton do Congo.

A Subprovíncia Externa encerra o Maciço Pernambuco-Alagoas mesoproterozóico, e as faixas neoproterozóicas Riacho do Pontal e Sergipana.

3.2.2 Terreno Ceará Central

O Distrito Grafítico Aracoiába-Baturité está inserido na Subprovíncia Setentrional da Borborema, mais especificamente no Terreno Ceará Central de Campelo (2009). Este terreno é limitado a noroeste pelo Lineamento Transbrasiliano-Kandi, que o separa do Terreno Noroeste do Ceará; a noroeste, pela Província Costeira; a oeste, pelo Terreno Tauá e pela Província Sedimentar do Parnaíba; e a sudeste pelo Lineamento Senador Pompeu-Ile Ife (Figura 7).

Este terreno constitui-se, sobretudo, de um embasamento paleoproterozóico com núcleo arqueano (Maciço Tróia-Pedra Branca) e uma extensa cobertura neoproterozóica. A tectônica predominante neste terreno é tangencial, materializada por um empilhamento complexo de *nappes* de idades variadas, seguida por uma intensa tectônica transcorrente. Como registros estruturais desta tectônica destacam-se 4 (quatro) zonas de cisalhamento de grande porte: Z.C. Sobral-Pedro II; Z.C. Senador Pompeu; Z.C. Tauá; e Z.C. Rio Groaíras.

Z.C. Sobral-Pedro II – Consiste em uma zona de cisalhamento de cinemática dextral, com orientação N40°E e espessura que pode chegar a 10 km. É considerado como um importante segmento do Lineamento Transbrasiliano (SCHOBENHAUS et al., 1975) que se estende por cerca de 2700 km, do SW ao NE do Brasil, e cujo prolongamento na África é conhecido como Lineamento Kandi (ARTHAUD et al., 1998b; BRITO NEVES et al., 2000; e VAUCHEZ et al., 1995).

Z.C. Senador Pompeu – Cisalhamento transcorrente dextral, de *trend* NE, com aproximadamente 350 km de comprimento por 10-15 km de largura. Controla a colocação de alguns corpos graníticos, a exemplo do batólito granítico de Quixadá-Quixeramobim e prolonga-se na África com a denominação de Zona de Cisalhamento Ile-Ife (CABY et al., 1991).

Z.C. Tauá – Constitui uma faixa milonítica subvertical, com cerca de 4 a 6 km de largura, que se estende por mais de 300 km na direção N10°W na porção sudeste do TCC. Apresenta uma movimentação sinistral, com um rejeito estimado em 30 a 35 km (NEVES, 1991).

Z.C. Rio Groaíras – É uma estrutura de quase 100 km de comprimento, com *trend* N35°W, com movimentação sinistral, de idade pós-ordoviciana, conforme evidencia o

deslocamento da ordem de 15 km do Granito do Pajé (ARTHAUD, 2007), sendo que este apresenta uma idade de cristalização (U-Pb em zircão) de 460 Ma (TEIXEIRA, 2005).

3.2.2.1 Grupamentos Tectônicos do TCC

Os terrenos pré-cambrianos estão expostos em mais de 85% do Terreno Ceará Central, consistindo em um embasamento paleoproterozóico com núcleo arqueano e uma extensa cobertura neoproterozóica. As demais áreas apresentam coberturas sedimentares de idades fanerozóica até o recente, sendo: sedimentos cenozóicos, na Província Costeira; e sedimentos paleozóicos da Bacia da Sedimentar do Parnaíba (Grupo Serra Grande), no limite oeste.

A ocorrência de sedimentos do Grupo Rio Jucá, da bacia molássica eopaleozóica tafrogênica do Cococi, situa-se dentro dos limites geográficos do Terreno Tauá, adjacente ao TCC (Figuras 4 e 7). Alguns autores e mesmo o mapa geológico do Estado do Ceará (BIZZI et al., 2003) consideram a Bacia Cococi como pertencente ao Terreno Orós-Jaguaribe.

O quadro evolutivo destes terrenos pré-cambrianos tem sido amplamente estudado (CASTRO et al., 2003; CASTRO, 2004; FETTER, 1999; FETTER et al., 2000, 2003; SANTOS et al., 2003, 2004). Fetter (1999) realizou diversas análises geocronológicas sistemáticas pelos métodos Sm-Nd em rocha total e U-Pb em zircão por todo o Estado do Ceará, subdividindo o TCC em quatro agrupamentos tectônicos, além dos Plutons Graníticos Brasileiros:

- Núcleo Arqueano
- Terrenos Acrescionários do Paleoproterozóico
- Sequência Supracrustal Neoproterozóica (Grupo Ceará)
- Complexo Tamboril - Santa Quitéria
- Granitos Brasileiros

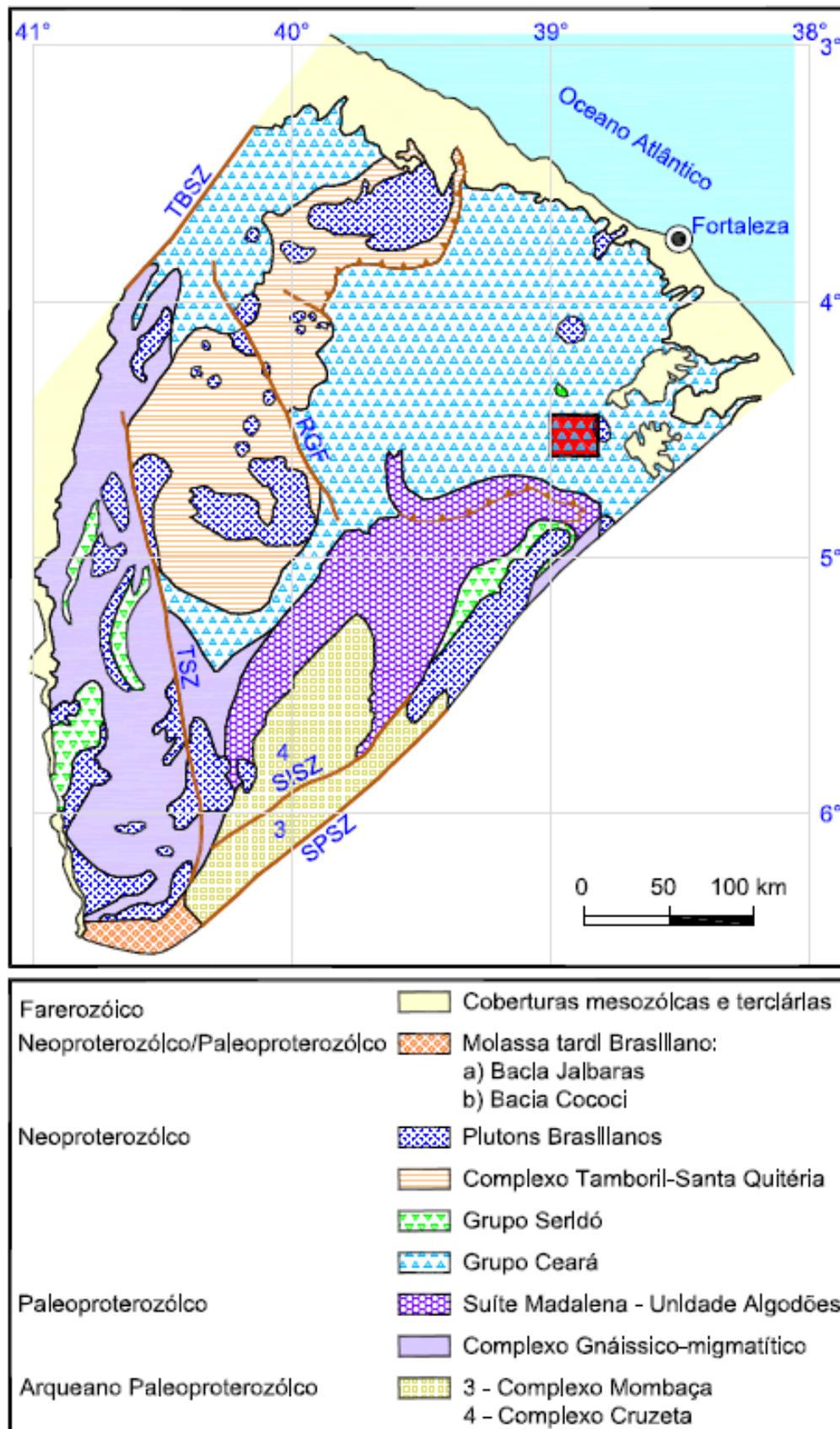


Figura 7 – Mapa Geológico Simplificado dos terrenos Ceará Central e Tauá (Fonte: Arthaud, 2005). Principais zonas de cisalhamento: TBSZ, Sobral-Pedro II/Transbrasiliiano; TSZ, Tauá; SISZ, Sabonete-Inharé; SPSZ, Senador Pompeu; RGF, Rio Groaíras

3.2.2.1.1 Núcleo Arqueano

Corresponde a um remanescente de crosta arqueana e consiste de um terreno do tipo granito-*greenstone*, denominado Complexo Cruzeta, o qual foi definido por Oliveira; Cavalcanti (1993) e corresponde ao Maciço Tróia - Pedra Branca de Brito Neves (1975). Este complexo distribui-se na porção sul do Terreno Ceará Central e é formado pelas unidades Tróia, Pedra Branca e Mombaça.

Esta unidade tem sido considerada como neoarqueana com base nos estudos geocronológicos (U-Pb convencional e Sm-Nd) realizados por Fetter (1999) que atribuem idade de cristalização de ortognaisses TTG entre 2680 e 2860 Ma (neoarqueanas) e de ortognaisses da Unidade Mombaça em 2150. No entanto, foram identificados remanescentes de crosta paleoarqueana (ca. 3270 MA) relacionados ao Complexo Cruzeta no Ceará (SILVA et al., 1997).

Unidade Tróia - Trata-se de um terreno do tipo granito-*greenstone belt*, formado por rochas metavulcânicas básicas, metagabros, metadacitos e metariolitos intercamadados com metassedimentos, representados por quartzitos, metacalcários, metachertes e formações ferríferas bandadas. É considerado como um terreno juvenil desenvolvido em domínio oceânico. As rochas metaultramáficas presentes nessa unidade constituem lentes boudinadas, formadas principalmente por serpentinitos, clorita-talco xistos, clorititos, tremolititos e piroxenitos.

Unidade Pedra Branca - Esta unidade ocorre intimamente associada à sequência anterior e é constituída basicamente por ortognaisses TTGs primitivos (metaplutônicas calcisódicas), típicos de crosta juvenil gerada em ambiente de arco magmático.

Unidade Mombaça - Formada principalmente por ortognaisses graníticos a granodioríticos, gnaisses diversos migmatitos, geralmente cinzentos, restos de paraderivadas (metacalcários e rochas calcossilicáticas).

3.2.2.1.2 Terrenos Acrescionários do Paleoproterozóico

São representados por quatro grandes assembléias de rochas de idade paleoproterozóica, denominados: (a) Complexo Gnáissico-migmatítico; (b) Suíte Madalena; (c) Unidade Algodões (MARTINS et al., 1998); e (d) Faixa Orós-Jaguaribe (ARTHAUD, 2007).

Complexo Gnáissico–migmatítico - recobre grandes extensões na parte norte do Estado do Ceará, sendo formada basicamente por ortognaisses tonalíticos a granodioríticos, geralmente metamorfizados sob altas temperaturas, no fácies anfibolito com variáveis graus de migmatização. Fetter et al. (2000) baseados em dados geocronológicos que apontaram idades modelo TDM entre 2.42 e 2.48 Ga, com valores positivos de $\epsilon\text{Nd}(t)$, sugerem sua evolução no Terreno Ceará Central como de uma acreção de crosta juvenil paleoproterozóica.

Suíte Madalena - Constitui um conjunto de corpos de composição tonalítica (quartzo diorito e diques de micro-diorito) intrusivos nos complexos Cruzeta e Gnáissico-migmatítico. Apresentam idade U-Pb de ca. 2.200 Ma (CASTRO, 2004; FETTER, 1999; MARTINS et al., 1998; MARTINS, 2000;) e idades modelo TDM compreendidas entre 2.300 e 2.450Ma, com $\epsilon\text{Nd}(t)$ geralmente pouco negativo ou positivo (CASTRO, 2004; MARTINS, 2000), indicando que se trata de rochas juvenis com leve contaminação crustal.

Unidade Algodões - Trata-se de uma unidade supracrustal que se distribui em torno do Complexo Cruzeta, representando uma cobertura. É constituída essencialmente por monótonas alternâncias de rochas anfibolíticas com leucognaisses, que podem representar rochas tufáceas, quartzitos micáceos, às vezes conglomeráticos, metagrauvas e metarcósios, além de raras rochas calcissilicáticas. Pacotes espessos e descontínuos de metariolitos são comuns na parte superior da unidade. A Unidade Algodões foi submetida a condições de fácies anfibolito de alta temperatura (zona da sillimanita) sem fusão parcial.

Suíte Metamórfica Algodões-Choró (SMAC) - agrega um conjunto de rochas metamórficas de natureza paraderivada e ortoderivada, aflorante nos municípios de Quixeramobim, Quixadá e Choró. Esta suíte é composta pelas seguintes unidades:

(a) Anfibolito Algodões: unidade composta essencialmente pelas rochas anfibolíticas, com ou sem granada, de granulação diversa, formando camadas de espessura métrica a decamétrica e extensão quilométrica, encontradas no distrito homônimo, no município de Quixeramobim. Entre os anfibolitos, são encontradas camadas de hornblenditos de granulação grossa, de extensão e espessura métricas.

(b) Metassedimentos Choró: um conjunto de rochas paraderivadas composto essencialmente por biotita-gnaisses de granulação fina e coloração creme a cinza com intercalações decamétricas de micaxistos com sillimanita e cianita, biotita-hornblenda gnaisses com bandas quartzo-feldspáticas e micáceas, rochas cálcio-silicáticas, quartzitos finos a grossos e metaconglomerados polimíticos e monomíticos.

(c) Ortognaisses Cipó: corpos intrusivos nas unidades anteriores como stocks, diques e folhas alinhadas na direção NE-SO (*e.g.*, Serras do Veríssimo, da Conceição, Aguda, Picos, Cipó, etc).

Os dados geocronológicos e isotópicos relativos à SMAC obtidos por Martins et al. (1998) revelaram idades de 2.131 Ma (U-Pb) e 2.123 Ma (Pb-Pb evaporação) em mono-zircões dos ortognaisses tonalíticos, de 2.172 Ma (U-Pb) e 2.183 Ma (Pb-Pb evaporação) em mono-zircões dos ortognaisses graníticos, e de 2.054 Ma (U-Pb) em diques de composição granítica.

3.2.2.1.3 Sequência Supracrustal Neoproterozóica (Grupo Ceará)

No TCC, esta sequência recobre tectonicamente as rochas mais deformadas e metamorfizadas do Palaeoproterozóico. É formada principalmente por uma espessa sequência de rochas paraderivadas - quartzito-pelito-carbonáticas (sequência QPC) - com intercalações de metavulcânicas, metamorfizadas em alto grau e, comumente, migmatizadas. Predominam metapelitos, com intercalações de estreitas camadas de quartzitos, mármore e rochas calcio-silicáticas. São frequentes também as intercalações de rochas metabásicas, representadas principalmente por anfíbolitos.

Esta sequência sofreu diferentes divisões em unidades, feitas por diferentes autores e adotando critérios não muito claros, que ainda causam certa confusão na nomenclatura. Isso se deve principalmente à dificuldade de se decifrar a evolução do contexto geológico regional através dos registros em rochas que sofreram diferentes eventos tectônicos e metamorfismo em alto grau. A seguir estão resumidas as principais divisões:

- a) Martins (2000) considerou as sequências supracrustais neoproterozóicas compostas por associações do tipo QPC (Grupo Ceará, Grupo Itatiaia e Grupo/Complexo Independência);

b) Cavalcante et al. (2003), no mais recente mapa geológico do Estado do Ceará, dividiram o Grupo Ceará em 4 (quatro) unidades informais: Arneiroz, Quixeramobim, Canindé e Independência.

c) Fetter et al. (2003) reconhecem no TCC um arco magmático continental neoproterozóico (Arco magmático Santa Quitéria) e identificam:

- Sequência de retro-arco (SE do arco) - Grupo Independência;
- Sequências de frente-arco (NW do arco) - Grupo Martinópole.

d) Arthaud (2007) só reconhece na área de sua tese a Unidade Independência do Grupo Ceará e a divide em 5 (cinco) subunidades denominadas do topo para a base:

- Itatira, que compreende basicamente metapelitos ricos em granada;
- Ematuba, que consiste de biotita gnaiss fortemente migmatizado;
- Guia, formada por metapelito, quartzito, carbonatos, com anfibolitos derivados de *sills* ou derrames basálticos;
- Lázaro, representada por gnaiss migmatítico;
- São José dos Guerra, moscovita biotita gnaisses com feições migmatíticas *lit-par-lit*.

e) Torres et al. (2006) descreveram no setor nordeste do TCC, nas proximidades da área da presente tese, as feições geológicas e estruturais da sequência supracrustal neoproterozóica, que denominaram de Sequência Acarápe. Nesta sequência, eles descreveram dois subdomínios de rochas metassedimentares, com algumas ocorrências de rochas metavulcânicas intercaladas:

- Subunidade Baturité - rochas metassedimentares terrígenas, caracterizadas por metapelitos dominantes com alternâncias centimétricas de metapsamitos (metarritmitos) contendo intercalações de leitos de dimensões decimétricas a decamétricas de quartzitos, anfibolitos, metagabros e metapiroxenitos. Representa o fácies mais profundo na paleogeografia da Sequência Acarápe.
- Subunidade Aracoiába - envolve xistos e paragnaisses com intercalações lenticulares de mármore, quartzitos, rochas

metapelíticas, calciossilicáticas, metadacíticas e metatraquiandesíticas subordinadas, geradas em ambiente plataformar marinho raso.

Torres et al. (2006) não consideram as duas subunidades descritas como sequências litoestratigráficas distintas, pois não apresentam discordância significativa, quer erosiva ou tectonometamórfica. Sugerem que as subunidades Baturité e Aracoiába sejam originalmente uma única sequência estratigráfica, com distintos tratos de sistemas deposicionais: a primeira, dominada por rochas metassedimentares aluminosas, em parte com características de turbiditos, pode materializar tratos de sistemas transgressivos; a segunda é marcada pela ocorrência de rochas carbonáticas, indicaria tratos de sistemas de mar alto. No detalhe, os segmentos da Subunidade Baturité, caracterizados pelo domínio das rochas metapelíticas, poderiam representar o fácies mais profundo na paleogeografia da sequência Acarápe, enquanto o segmento dominado por carbonatos, com prováveis contribuições evaporíticas, corresponderia a um sistema complexo de sabkha-plataformar marcado por sucessão de ambientes de submaré a supramaré, representaria o fácies mais raso.

O contato entre o Grupo Ceará e o substrato Paleoproterozóico é considerado tectônico, em função da ocorrência de “sola” milonítica e do contraste de grau metamórfico entre suas rochas. Esse contato se dá por cavalgamento de baixo ângulo (*nappes* tectônicas) do ciclo Brasileiro (CABY; ARTHAUD, 1986).

Recente estudo geocronológico realizado por Torres et al. (2006), próximo da área de estudo nas rochas metassedimentares da Sequência Acarápe, cujos TDM variam entre 2,21 e 0,94 Ga aponta para fontes com proveniências distintas, uma paleoproterozóica e outra neoproterozóica. Tal comportamento indica que a Sequência Acarápe deva ter sua origem ao final do Pré-cambriano, visto acolher material neoproterozóico erodido por ocasião do preenchimento da bacia.

Um metarriolito intercalado em metapelito com idade U–Pb em zircão de $0,77 \pm 0,03$ Ga foi interpretado por Fetter (1999) como um possível representante do *rift* precursor formado antes da abertura da bacia oceânica e subsequentemente fechado durante a orogenia Brasileira.

3.2.2.1.4 Complexo Tamboril - Santa Quitéria

Constitui uma associação de rochas ortoderivadas de composição tonalítica a granítica, gnaissificada ou não, tendo como característica mais marcante uma intensa migmatização,

com presença de anateixitos em vários graus de fusão. Apresenta com frequência enclaves de anfíbolitos e rochas calciossilicáticas.

Fetter et al. (2003), com base em dados de campo e análises geocronológicas, interpretaram este complexo como um arco magmático continental neoproterozóico, formado a partir da subducção de crosta oceânica durante convergência entre os blocos São Luís-Oeste Africano e NW do Ceará.

As rochas dioríticas, granodioríticas e migmatíticas do Complexo Tamboril - Santa Quitéria revelam idade U-Pb entre 665 e 614 Ma (FETTER et al., 2003).

3.2.2.1.5 Granitos Brasileiros - Plutonismo granítico

A orogenia Brasileira é caracterizada na Província Borborema por importantes eventos de plutonismo granítico associados a uma sucessão de pulsos magmáticos (ARTHAUD, 2007):

Granitos cedo-colisionais apresentam idades de cristalização U-Pb em zircão geralmente situadas entre ca. 630 e 620 Ma, sendo que o mais antigo datado no arco magmático apresenta uma idade de cristalização de ca 660Ma (BRITO NEVES et al., 2003).

Granitos sin-cinemáticos se dividem em dois grupos:

(a) granitos anatóxicos aluminosos contemporâneos ao espessamento crustal, cuja idade de cristalização é a mesma do metamorfismo brasileiro, em torno de 610/600 Ma.

(b) granitos sin-fase transcorrente, que apresentam idades de cristalização U-Pb compreendidas entre ca. 580 e 590 Ma (NOGUEIRA, 2004). O Complexo Quixadá-Quixeramobim pode ser considerado um exemplo deste tipo no TCC.

Granitos tardi-tectônicos apresentam idades em torno de 580 Ma (BRITO NEVES et al., 2003; FETTER, 1999) e granitos pós-orogênicos associados às molassas tardi-brasileiras têm idade de ca. 530 Ma (FETTER, 1999).

As intrusões mais jovens presentes no TCC caracterizam-se por formas semicirculares a circulares de apenas alguns quilômetros de extensão, tipicamente pós-orogênicas, dentre os quais se destacam Complexos Anelares de Tapera e Pedra Aguda. Granitos pós-orogênicos de idade ordoviciana foram descritos recentemente com idades de cerca de 470 Ma (CASTRO, 2004) e 460 Ma (TEIXEIRA, 2005).

4 **GEOLOGIA DA ÁREA DO PROJETO: DISTRITO GRAFITÍFERO ARACOIÁBA-BATURITÉ**

A área abordada neste projeto foi selecionada para ser mapeada geologicamente tendo em vista a pouca informação atualizada existente, já que o seu mapeamento básico (escala 1:250.000) foi feito na década de 70 pelo Projeto Fortaleza (BRAGA et al., 1977). Este mapeamento visou não só cobrir as mineralizações conhecidas de grafita, mas também as principais estruturas regionais e unidades a elas relacionadas.

Ela corresponde a uma superfície de 1.000 km² definida por um retângulo de 25 km x 40 km, conforme mostra o mapa geológico na escala de 1:100.000, apresentado no anexo A.

Esta área situa-se no canto nordeste do Terreno Ceará Central e a sua geologia é composta basicamente por 5 (cinco) unidades litoestratigráficas:

- Complexo Cruzeta / Unidade Mombaça;
- Embasamento Paleoproterozóico;
- Sequência supracrustal metavulcano-sedimentar neoproterozóica;
- Granitóides cinzentos da Supersuite Granitóide Tardi a Pós-Orogênica (Neoproterozóico Tardio);
- Complexo Gabro-Diorítico da Suíte Gabróide Pós-Orogênica.

4.1 **Complexo Cruzeta / Unidade Mombaça**

Esta unidade ocupa uma pequena porção da área, no canto sudoeste, representada por ortognaisses graníticos a granodioríticos, gnaisses migmatíticos, geralmente cinzentos.

Verificou-se nesta unidade a ocorrência de gnaisses com intercalações centimétricas de quartzitos, indicando uma origem paraderivada (WP 50 - SAD69; Zona 24M; 501819E 9482124N).

O Complexo Cruzeta na área é bordejado por rochas metassedimentares do Complexo Ceará. Na bibliografia há referência às ocorrências de metacalcários e rochas calciossilicáticas, como restos de rochas paraderivadas, contudo, não foram encontradas estas litologias na área do projeto.

4.2 **Terrenos Acrescionários do Paleoproterozóico**

Esta unidade ocorre na área do projeto como corpos isolados, que afloram em “janelas” erosivas no Grupo Ceará, distribuindo-se preferencialmente em uma faixa de direção ENE. Na área do projeto esta unidade é constituída por ortognaisses, migmatitos,

metanoritos, corpos básicos xistificados e granulitos (enderbitos). Estruturalmente posiciona-se em zonas antiformes, geralmente associados a zonas de falhamentos de empurrão e apresentam estruturação complexa, com figuras de interferência tipo “domo-e-bacia” e bumerangue. Essas figuras de interferência são muito nítidas no mapa radiométrico (Projeto geofísico N° 2027 CPRM-1977), onde os ortognaisses se destacam pela alta intensidade radiométrica (Figura 8).

Os migmatitos ocorrem de forma predominante nesta unidade, sendo em geral do tipo homogêneo com um amplo domínio do neossoma sobre o paleossoma, e apresentam de uma maneira geral fácies de metatexitos, guardando como característica os elementos planares, exibindo estruturas dobradas, flebítica, estromatolítica, e “*schollen*” como dominantes. Bons afloramentos desta unidade estão expostos no leito do Riacho das Lajes de Pedras, próximo à barragem do povoado de Pedra Branca (Figuras 9 e 10).



CONTRASTE RADIOMETRIA - GEOLOGIA

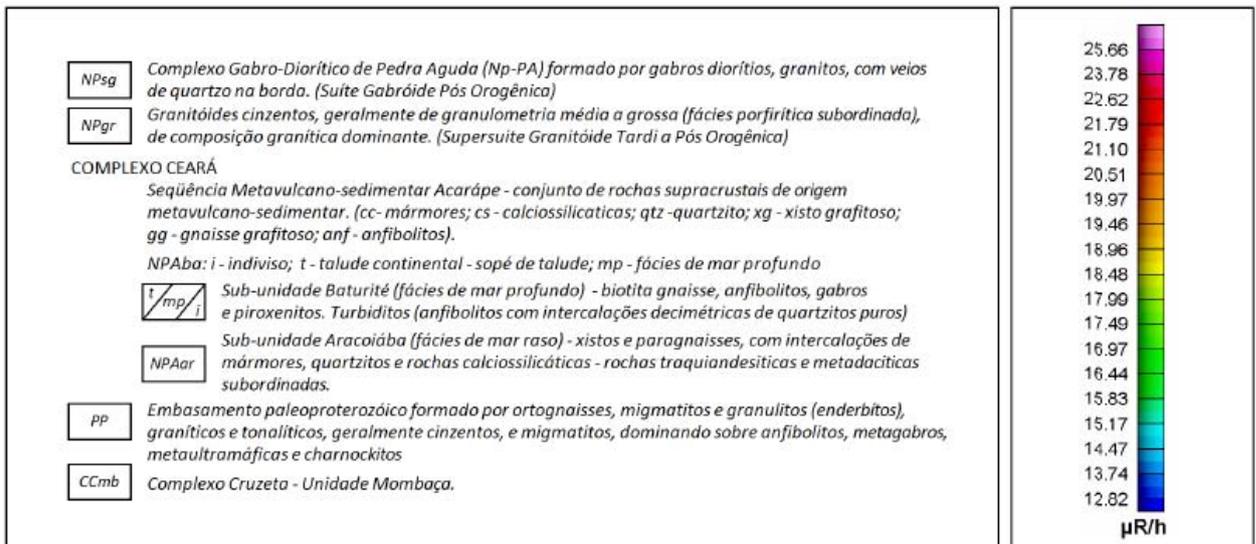
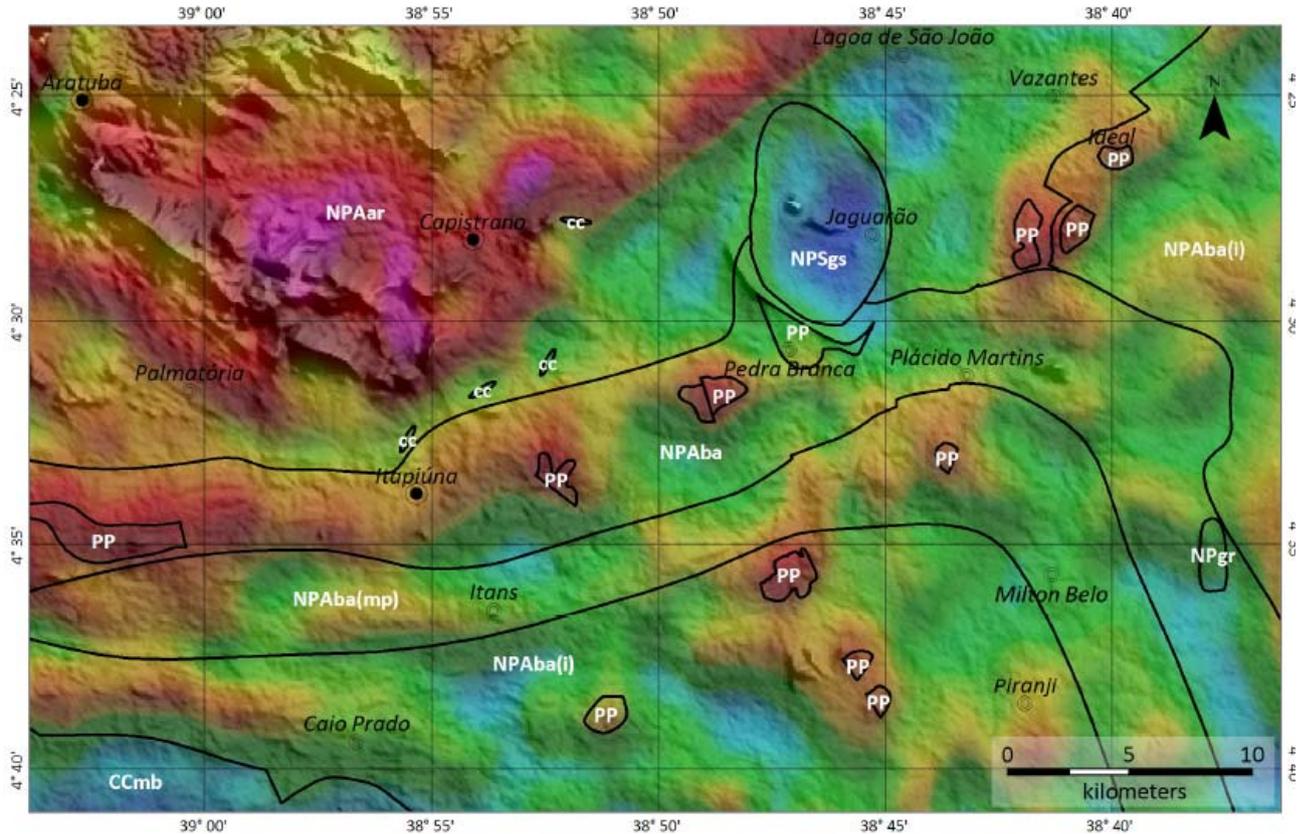


Figura 8 - Mapa integrado da radiometria (CT) com a geologia da área de tese



Figuras 9 e 10 - Migmatitos com estruturas dobradas e flebíticas. Embasamento paleoproterozóico na Fazenda da Laje (WP - 137)

Geralmente são leucocráticos, de coloração cinza-clara, com granulação fina a média, e estrutura gnáissica fina e localmente granular orientada. A predominância do neossoma é muito grande sobre o paleossoma, e tem composição granítica, granodiorítica, localmente grossa, pegmatítica e mais raramente quartzosa e aplítica. O paleossoma ocorre sob a forma de finos leitões, manchas ou vênulas, exibindo composição mineralógica diorítica, anfíbolítica ou simplesmente biotítica. Os paleossomas são geralmente xistosos (biotítico ou anfíbolítico) ou de anfíbio biotita gnaisse. Na estrada da sede da Fazenda da Laje, próximo a Pedra Branca, pode-se observar uma boa exposição de paleossoma constituído por granada biotita gnaisse, mesocrático, granulação média, com estrutura gnáissica bandada.

Na Fazenda da Laje e arredores do povoado de Pedra Branca, as rochas dominantes nesta unidade foram classificadas como enderbito e metanorito e nesta região a direção geral da foliação é 50-60° NW.

O enderbito corresponde a uma rocha de cor cinza escura, granulação média, bandada, caracterizada pela alternância de lâminas (1 a 5 mm) claras e descontínuas, constituídas por plagioclásio e quartzo, e as camadas escuras também descontínuas formadas por biotita, piroxênio e minerais opacos. Microscopicamente, o seu padrão textural é granolepidoblástico (Figura 11), com mega cristais de plagioclásio rodeados por feixes de lamelas de biotitas cuja orientação confere a rocha uma xistosidade em domínios. A composição mineralógica é a seguinte: plagioclásio (54%) é oligoclásio-andesina; biotita (15%) apresenta cor avermelhada, rica em Ti; quartzo (20%) é muitas vezes formado por aglomerados de quartzo; piroxênios (10%) é anedral a subeudral, sendo que o ortopiroxênio é o hiperstênio; os minerais acessórios (1%) são compostos por cristais de zircão, minerais óxidos de ferro e titânio.

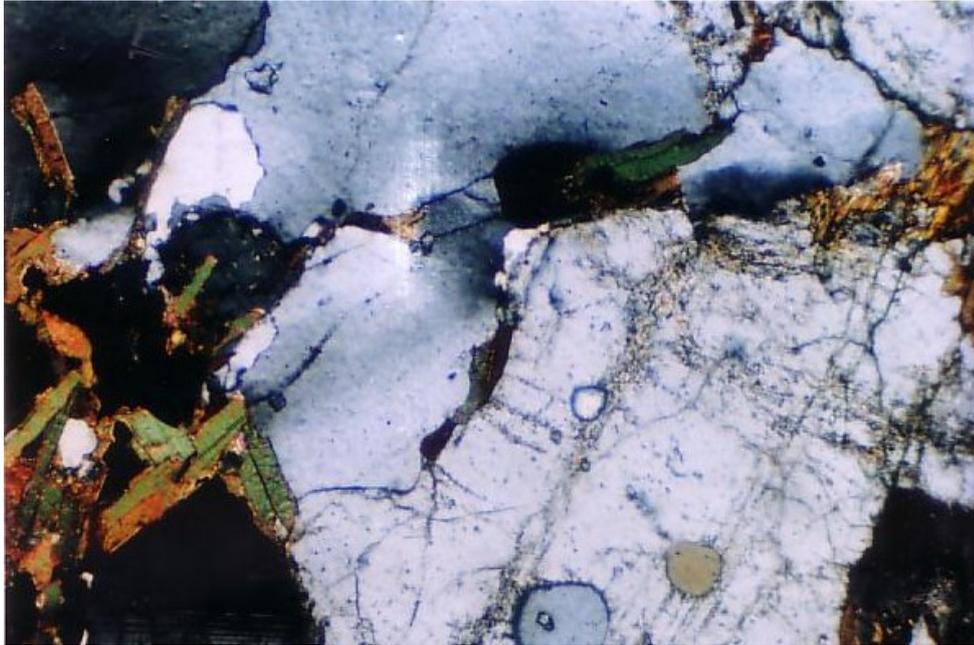


Figura 11 - Fotomicrografia - Enderbit (metatonalito) Cristais de plagioclásio subeudrais, quartzo intersticial e placas de biotita (cores brilhantes) - Amostra 10653, aumento 25X, nicóis cruzados. Embasamento paleoproterozóico. Área da Fazenda da Laje (WP - 137)

O metanorito tem cor marrom escura, grã fina, foliado, não magnético, mostrando cristais de plagioclásio esbranquiçados a amarelados, cristais de hornblenda marrom escuro a pretos, ortopiroxênio e plaquetas marrom avermelhadas de biotita (Figura 12). Mineralogicamente é constituído por: plagioclásio (55%); ortopiroxênio (8%); hornblenda (20%); biotita (14%); granada (2%); minerais opacos (1%), apatita e quartzo em quantidades traço.

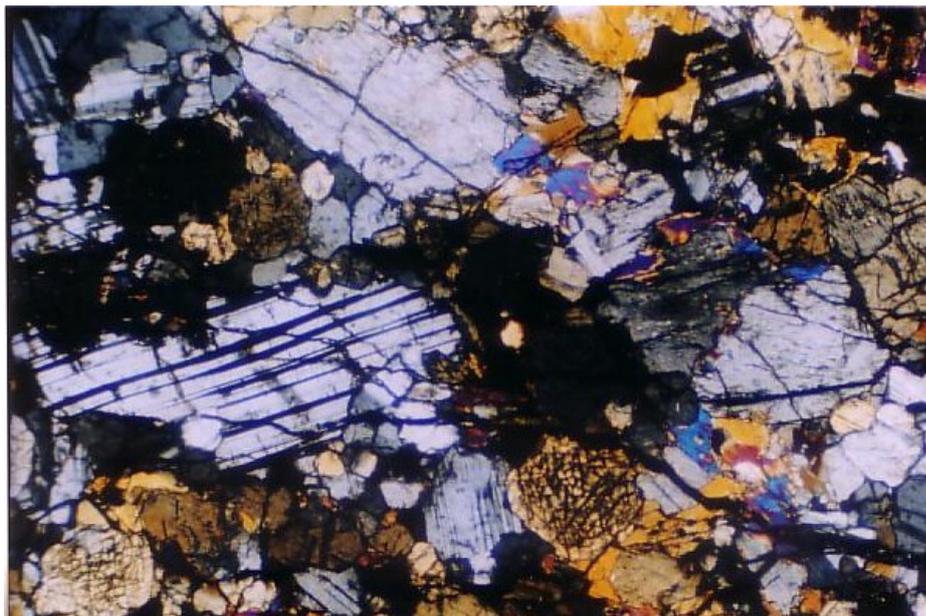


Figura 12 - Fotomicrografia - Metanorito. Cristais de plagioclásio, ortopiroxênio e hornblenda - amostra 10657, aumento 25X, nicóis cruzados - Embasamento paleoproterozóico. Área da Fazenda da Laje (WP - 137).

Os ortognaisses são leucocráticos, de coloração cinza clara, granulação média, bem foliados, cuja orientação é dada pela biotita. Exibem resquícios de estruturas planares dos tipos “schlieren”, nebulítica, bem como a cataclástica nas zonas de falhamento. A textura é granolepidoblástica, onde o K-feldspato ocorre em percentagem equivalente ao plagioclásio (oligoclásio), associado a quartzo xenomorfo, biotita em pequenas palhetas e hornblenda. Como minerais acessórios ocorrem muscovita, sericita, zircão, apatita, clorita e titanita.

Esta unidade é considerada como paleoproterozóica com base em datações geocronológicas descritas no item 3.2.2.1.2 deste trabalho.

4.3 Grupo Ceará

No item 3.2.2.1.3 são apresentadas as características e subdivisões do Grupo Ceará, (Sequência Supracrustal Metavulcano-Sedimentar, neoproterozóica) por diferentes autores, em suas respectivas áreas de estudo. Os conhecimentos geológicos no Terreno Central do Ceará estão evoluindo no sentido de integrar estas diferentes subdivisões e correlacionar os conjuntos litológicos com os paleo-ambientes e o contexto geotectônico.

Nos estudos da geologia na área do projeto, verificou-se que a subdivisão do Grupo Ceará adotada por Torres et al. (2006), em área adjacente à da presente tese, podia perfeitamente ser estendida para a área de estudo. Eles descreveram as feições geológicas e estruturais desta sequência supracrustal neoproterozóica e a denominaram de Sequência Acarápe. Nesta sequência, eles descreveram dois subdomínios de rochas metassedimentares, que constituem uma mesma sequência estratigráfica, com distintos tratos de sistemas deposicionais: Subunidade Aracoiába, com rochas carbonáticas, com prováveis contribuições evaporíticas, representaria o fácies mais raso; e a Subunidade Baturité, caracterizada pelo domínio das rochas metapelíticas e turbidíticas, poderia representar o fácies mais profundo.

Arthaud (2007) na sua área de tese, limítrofe a do presente trabalho, também interpreta a sedimentação do Grupo Ceará como de ambiente plataformal de margem passiva. E, destaca-se aqui, a notável semelhança das características geológicas entre a sua Subunidade Guia e a Sequência Acarápe da área de estudo, bem como a proximidade física das duas unidades, sugerindo tratar-se do mesmo contexto geológico.

Na área do presente estudo, adjacente às áreas de Arthaud (2007) e Torres et al. (2006), também foram identificados na Sequência Acarápe conjuntos litológicos que mostram nitidamente a deposição em ambiente plataformal de margem do tipo passiva. Estes conjuntos estão distribuídos segundo faixas paralelas de direção aproximada ENE, interpretados como diferentes fácies na paleogeografia desta sequência (Anexo A).

Esta mudança de paleoambientes, de norte para sul, tem início com a Subunidade Aracoiába (*NPAar*), de fácies de mar raso, passando por uma zona de talude continental (*NPAbat*) e depois para um ambiente de mar profundo (*NPAbamp*), sendo estes últimos considerados da Subunidade Baturité.

4.3.1 Sequência Acarápe - Subunidade Aracoiába

A Subunidade Aracoiába (*NPAar*) na área se destaca pela presença de mármore, quartzitos e biotita ganisses bandados.

Os mármore em geral são puros, dolomíticos, de cor branca, grã fina a média e formam lentes de espessuras métricas, que se estendem por dezenas de metros.

Os quartzitos ocorrem em forma de lentes, com espessuras variáveis decimétricas, laminados, de cor bege clara, puros, com raros cristais de muscovita. No quilômetro 2 da estrada que parte da cidade de Capistrano para o Povoado de Pedra Branca aflora uma camada de 40 cm de espessura (Figura 13), intensamente dobrada, com diversas repetições no leito da estrada.



Figura 13 - Quartzito da Subunidade Aracoiába - na saída de Capistrano (WP24 - Zona 24M; 507843E; 9488562N)

Os gnaisses são finamente bandados, com leitos claros (1 a 5 cm) quartzo-feldspáticos, constituídos basicamente por quartzo, biotita, feldspato, granada e sillimanita. No km 4,4 da estrada de Aracoiába - Pedra Branca, há bons afloramentos deste paragneisse (Figura 14 - do WP 64 - Zona 24M; 521833E; 9512500N). Nos arredores de Capistrano, estes gnaisses ocorrem intensamente deformados, com intercalações centimétricas de quartzito, com dobras

isoclinais de plano axial sub-horizontal, correspondendo a frentes de *nappes* (Figura 15 - WP 34 - Zona 24M; 513753E; 9491171N).



Figura 14 - Gnaiss finamente bandado e quartzito intercalado da Subunidade Aracoiába (WP 64 - Zona 24M; 521833E; 9512500N)



Figura 15 - Paragnaisse com intercalações de quartzito em frente de *nappe* - Subunidade Aracoiába - Arredores da cidade de Capistrano (WP34 - Zona 24M; 513753E; 9491171N)

4.3.2 Sequência Acarápe - Subunidade Baturité I

Esta subunidade foi individualizada a partir da identificação de uma faixa com características próprias, onde já não aparecem rochas carbonáticas e quartzitos, típicos do fácies de mar raso, e nem ortoanfibolitos e turbiditos, que são do fácies de mar profundo. Esta faixa apresenta um alinhamento de ocorrências de corpos do embasamento paleoproterozóico, aflorando em “janelas” erosivas, que indicam uma quebra na paleogeografia da bacia Acarápe e, também, se caracteriza pela presença de sillimanita gnaisses, indicando metamorfismo de alta pressão. Estes elementos permitiram a separação desta faixa e sua interpretação como uma faixa de talude continental, que serviu de contraforte no evento compressional de fechamento da bacia Acarápe.

As ocorrências de gnaiss grafitoso do cinturão “Chereco-Eron” situam-se nesta unidade, mais especificamente nas proximidades do limite com a Subunidade Aracoiába (fácies de mar raso), conforme se pode observar no mapa geológico (Anexo A).

As litologias mais comuns nesta unidade são: granada biotita grafito xisto, granada biotita gnaisses, biotita quartzo xisto (metapelitos) e plagioclásio-microclina-sillimanita-biotita gnaiss.

O granada biotita gnaiss, que é a rocha predominante nesta unidade, tem as seguintes características: de cor cinza escuro, granulação média, bandada, apresentando alternância de finas lâminas claras (5 a 10 mm) descontínuas, constituídas por plagioclásio e quartzo, e leitos escuros, também descontínuos de biotita, granada e minerais opacos. Em microscopia observa-se um padrão textural granolepidoblástico, com mega cristais de plagioclásio, rodeados por feixes de lamelas de biotita cuja orientação confere à rocha uma xistosidade em domínios. Mega cristais de granada associados ao plagioclásio, quartzo e biotita. Os cristais de quartzo ocupam juntamente com as biotitas os espaços intersticiais deixados pelos plagioclásios. K-Feldspatos são raros, mas presentes. A composição mineralógica resume-se em: (40%) plagioclásio, (30%) biotita; (15%) granada; (14%) quartzo; e (1%) de minerais acessórios que são compostos por cristais de zircão, óxidos de ferro, titânio e grafite.

O plagioclásio-microclina-sillimanita-biotita gnaiss, que ocorre no alvo Erom, é cinza esbranquiçado, de grã média a fina, foliado, não magnético, formado por intercalações de bandas claras, compostas de quartzo e feldspato e bandas escuras de biotita, cristais fibrosos de sillimanita e palhetas de grafita (Figura 16). A composição mineralógica é a seguinte: quartzo (40%); biotita (20%); sillimanita (17%); microclina (15%); plagioclásio (5%); minerais opacos (3%); muscovita (tr); zircão (tr).

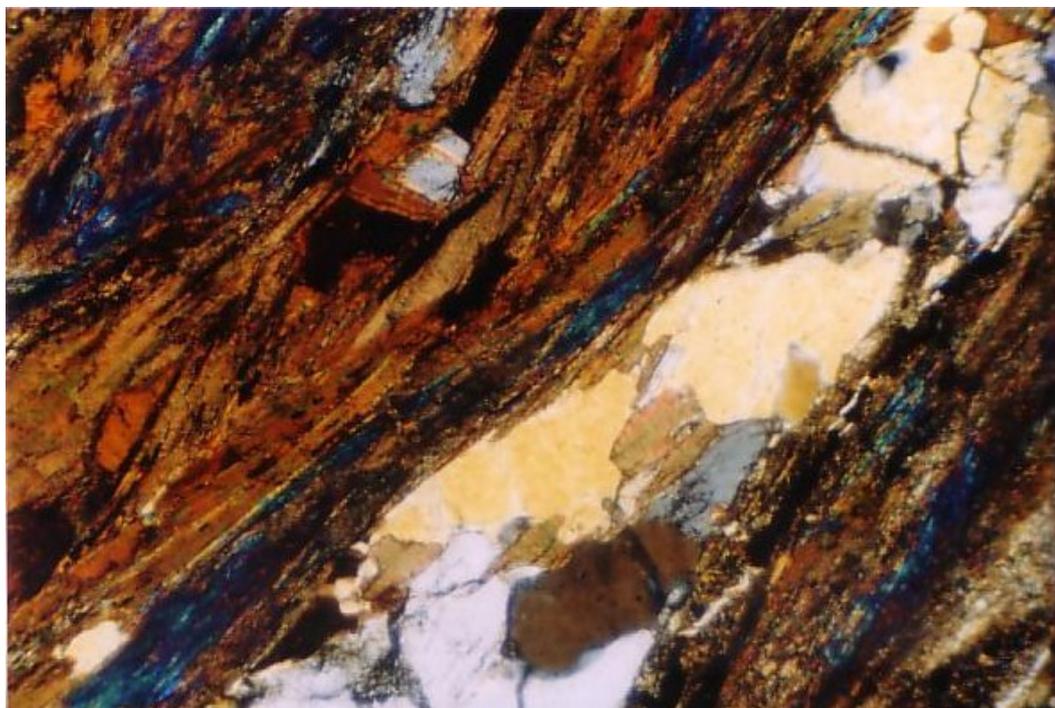


Figura 16 - Fotomicrografia do plagioclásio-microclina-sillimanita-biotita gnaiss. Bandas de sillimanita (azul) e biotita (marrom) e bandas claras ricas em quartzo e feldspato. Amostra 10654, Nicóis cruzados 25X

4.3.3 Sequência Acarápe - Subunidade Baturité II

Esta subunidade cobre uma faixa com cerca de 4 km de largura que se estende a partir do leste da área em direção oeste, fletindo para sul nos arredores da cidade de Jaguarão. Ela distribui-se adjacente e ao sul da zona considerada como de talude continental.

As rochas dominantes neste fácies da subunidade Baturité são biotita granada gnaisses, biotita granada grafita gnaisses, ortoanfibolitos e granada quartzitos (turbiditos).

Os anfibolitos amostrados na Fazenda Alvorada (WP 25: 24M; 527117E; 9497702N), próximo do Povoado Lagoinha, revelam tratar-se de metagabros (ortoanfibolito), com textura nematoblástica, exibindo cristais de hornblenda iso-orientados, em cujos espaços intersticiais são observados cristais de plagioclásio. A composição mineralogia é formada por anfibólio (hornblenda) 80%; plagioclásios (15%); ortopiroxênio (5%); titano-biotita, rutilo e minerais opacos completam a mineralogia.

Um destaque neste conjunto de rochas de fácies de mar profundo constitui a presença de turbiditos no leito do rio Choró, próximo do Povoado de Itãs, (WP27: Zona 24M; 514326E; 9491881N), constituídos por intercalações centimétricas e decimétricas de quartzitos branco, com granada e muscovita, intercalados em ortoanfibolitos (Figura 17).



Figura 17 - Turbidito formado por lentes de quartzito (com feldspato, granada e muscovita), intercaladas em ortoanfibolitos - Subunidade Baturité (Leito do Rio Choró/Itãs -WP-27)

4.3.4 Contato da Sequência Acarápe / Embasamento paleoproterozóico

Na represa da Fazenda da Laje (WP-137: Zona 24M; 523039E; 9502281N) pode-se observar um raro afloramento do contato de “não conformidade” entre a Sequência Acarápe (Supracrustal Metavulcano-Sedimentar Neoproterozóica) e o Embasamento (Terrenos Acrescionários do Paleoproterozóico), cuja figura 18 (foto) mostra com muita evidência.

O gnaiss bandado sub-horizontalizado, com intercalações centimétricas de quartzito feldspático e de lâminas grafitosas, pertencentes à Subunidade Aracoiába da Sequência Acarápe, repousa sobre rochas gnáissicas (metanorito), subverticalizadas e com atitude N75W.



Figura 18 - Contato de “não conformidade” da Sequência Acarápe (Neoproterozóica) com gnaiss (metanorito) do Embasamento Paleoproterozóico (Represa da Fazenda da Laje)

4.4 **Granitóides cinzentos da Supersuite Granitóide Tardi a Pós-Orogênica**

O único corpo considerado na área do projeto como sendo desta Supersuite Granitóide situa-se no sudeste da área, próximo da localidade de Milton Belo. Apresenta forma alongada

de direção N-S e dimensões aproximadas de 1 km x 3,5 km e constitui-se essencialmente de biotita-granito, de coloração cinza clara, granulação média a fina, composto por microclina, quartzo, plagioclásio e biotita.

No mais recente Mapa Geológico do Estado de Ceará (CAVALCANTE et al., 2003), foram mapeados na área do projeto 5 (cinco) corpos plutônicos, considerados da unidade Supersuite Granitóide Tardi a Pós-Orogênica, constituídos por biotita-granitos, monzogranitos, sienitos, quartzomonzonitos e granitos porfiríticos. No entanto, durante esta primeira fase do projeto verificou-se que apenas um desses corpos seria pertencente a essa unidade e os outros constituiriam ortognaisses e granitos pertencentes ao embasamento paleoproterozóico. No levantamento radiométrico (Figura 8), pode-se observar a relação entre a faixa de embasamento paleoproterozóica, com alta intensidade radiométrica, e os corpos não considerados como pertencentes ao plutonismo gerado no Ciclo Orogênico Brasileiro.

4.5 Complexo Gabro-Diorítico da Suíte Gabróide Pós-Orogênica

Esta unidade está representada pelo Complexo Gabro-Diorítico Anelar de Pedra Aguda, localizado na parte norte da área do projeto, que apresenta forma elipsoidal, com eixo maior medindo cerca de 10 km, orientado segundo a direção norte-sul. O contato com as encaixantes é verticalizado, brusco e apresenta veios anelares de quartzo leitoso. Observam-se grandes xenólitos de rocha migmatítica, provavelmente da unidade paleoproterozóica, na ponta sul do complexo, nas proximidades do povoado de Pedra Branca.

Este complexo apresenta na sua zona de borda litologias de composição básica a intermediária, representadas por gabros e dioritos, enquanto que a parte central é predominantemente de composição granítica. O pico da Pedra Aguda, situado na parte central do complexo (Figura 19), é formado por um granito de coloração cinza clara, grã média, com a biotita orientada. Composto essencialmente por microclina, quartzo, plagioclásio e biotita, e tendo como constituintes acessórios minerais opacos, epidoto e rutilo.

Souza et al. (1984) correlacionaram o Complexo Anelar de Pedra Aguda com outros corpos intrusivos anelares do Ceará, principalmente com o de Taparuaba cuja idade isócrona Rb/Sr foi de 540 ± 13 Ma, com razão inicial Sr^{87}/Sr^{86} de 0,705 (HADAD, 1981), semelhante aos complexos anelares da Província Nigéria-Niger, no oeste da África.

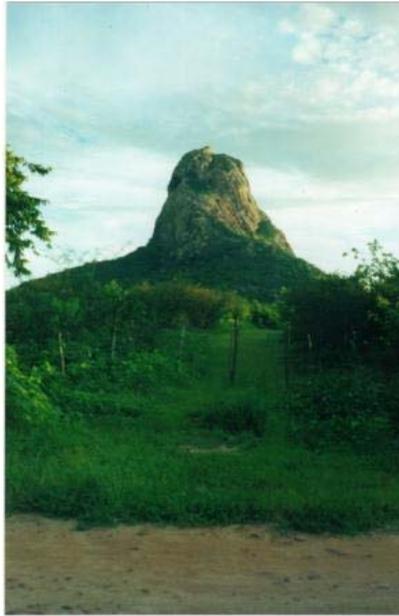


Figura 19 - Pico de Pedra Aguda, de composição granítica, na parte central do Complexo Gabro-Diorítico Anelar de Pedra Aguda

4.6 Geologia Estrutural

A geologia estrutural da área foi interpretada na presente tese como condicionada a um contexto geotectônico, que pode ser resumido em duas plataformas de comportamento cratônico, uma a norte e outra a sul, separadas por um cinturão de dobramentos de direção geral ENE de estruturação mais complexa. A figura 20 mostra o esboço destes domínios, tendo ao fundo o mapa radiométrico que ressalta os respectivos limites.

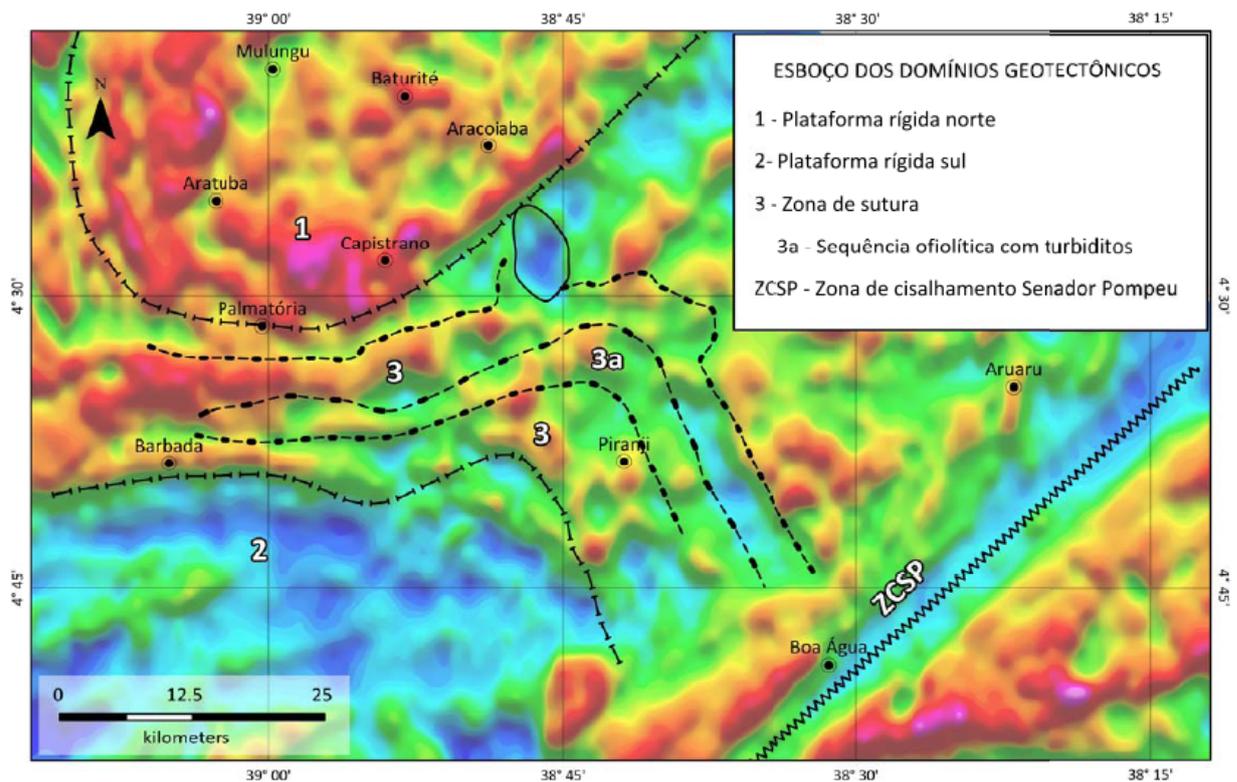


Figura 20 - Esboço dos domínios geotectônicos sob o mapa radiométrico

Os domínios de comportamento rígido, com estruturação relativamente simples, são recobertos basicamente pela unidade plataformal de mar raso da Sequência Acarápe (Subunidade Aracoiába), sendo que na porção sudoeste do domínio sul aflora também o embasamento arqueano (Complexo Cruzeta).

O Complexo Cruzeta, no domínio cratônico sudoeste, é constituído principalmente por gnaisses bandados ortoderivados, com intercalações de *boudins* de rochas básicas. Suas rochas são intensamente deformadas, apresentando bandamento gnáissico e clivagem de fratura, com atitude variando de N80° W a N60° E e mergulho em torno de 40° para sul.

Nas áreas de ocorrência da Sequência Acarápe, dentro do domínio cratônico, predominam paragneisses com intercalações de mármore e quartzitos, com estruturas geradas em deformação progressiva de natureza dúctil, com dobras intrafoliais e meso-dobras apertadas e abertas, pouco inclinadas. Nos dois domínios a foliação em geral é paralela aos contatos litológicos, suas direções acompanham os limites da borda da zona rígida e os mergulhos variam de 30 a 45° para sul.

A faixa central da área do projeto, situada entre as zonas cratônicas, expressa uma tectônica compressional, recortada por extensas *nappes* que envolvem a superposição de rochas metassedimentares da cobertura neoproterozóica em rochas ortogneisses do embasamento paleoproterozóico. Os anfíbolitos e gnaisses são marcados por dobras intrafoliais, apertadas a recumbentes e estruturas S/Z centimétricas a milimétricas, marcadas principalmente em anfíbolitos e gnaisses (Figura 21). O estilo de dobramento dominante é isoclinal, com dobras de escala quilométrica, com planos axiais de baixo mergulho para ENE, associadas à fase principal de transporte das *nappes*. Nesta zona de dobramentos são frequentes também as falhas transcorrentes, perpendiculares as direções das *nappes*, com duas direções principais, de N20°-30° W e N15°-25° E.



Figura 21 - Estrutura S/Z em anfibolito com intercalações de granada quartzito da Subunidade Baturité, no leito do Rio Choro

No canto nordeste da área ocorrem duas extensas fraturas subverticais, de direções N45°W e N55°W, respectivamente, discordantes das direções regionais de fraturamento, sendo que a segunda se estende por mais 30 quilômetros e corta o Complexo Gabro-Diorítico Anelar de Pedra Aguda.

4.6.1 Contato entre unidades da Sequência Acarápe através de estrutura de *nappe*

Ao sul da faixa de fácies de mar profundo da Subunidade Baturité (Anexo A), ocorre uma zona de intensa deformação, com grandes estruturas de *rods*, *mullions*, empilhamento de *nappes* e falhamentos de empurrão com vergência sul-norte. Este quadro tectônico resultou de um regime de esforços compressivos, com direção do eixo sudeste-noroeste, certamente responsável pelo fechamento da bacia sedimentar neoproterozóica Acarápe.

As estruturações do embasamento e das unidades alóctones diferem totalmente, pois, a foliação regional do primeiro mergulha, em média, suavemente para SE, enquanto as das *nappes*, também de baixo ângulo, mergulham para NW e as lineações de estiramento (NNE-SSW no embasamento e NW-SE nas *nappes*) são quase perpendiculares (ARTAHUD, 2007).

A figura 22, a seguir, mostra uma estrutura de *nappe*, ao sul da cidade de Capistrano, que coloca um pacote de gnaisses com intercalações quartzíticas de fácies plataformal (ao sul) sobre as rochas de fácies de mar profundo (ao norte). Esta foto foi tirada na entrada da cidade de Capistrano, olhando de sul para norte.



Figura 22 - Vista nos arredores da cidade de Capistrano da estrutura de *nappe* colocando em contato estrutural diferentes conjuntos de rochas da Subunidade Aracoiába. O conjunto e domínio de mar raso, com predominância de paragnaisses com intercalações de quartzitos e mármores (**A**) sobre o conjunto de biotita-gnaiss e anfíbolitos de domínio de talude (**B**).