



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

KÁTIA DOS SANTOS SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO MINERAL, EVOLUÇÃO GEODINÂMICA E
POTENCIALIDADES TECNOLÓGICAS DE GRAFITAS DO DOMÍNIO CEARÁ
CENTRAL, PROVÍNCIA BORBOREMA, NE DO BRASIL**

FORTALEZA

2022

KÁTIA DOS SANTOS SOUZA

CARACTERIZAÇÃO MINERAL, EVOLUÇÃO GEODINÂMICA E POTENCIALIDADES
TECNOLOGICAS DE GRAFITAS DO DOMÍNIO CEARÁ CENTRAL, PROVÍNCIA
BORBOREMA, NE DO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dra. Lucilene dos Santos.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S238c Souza, Kátia dos Santos.
Caracterização mineral, evolução geodinâmica e potencialidades tecnológicas de grafitas do domínio Ceará central, província Borborema, NE do Brasil / Kátia dos Santos Souza. – 2022.
61 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2022.
Orientação: Profa. Dra. Lucilene dos Santos.
1. Raman. 2. Grafitas. 3. Caracterização mineral. I. Título.

CDD 551

KÁTIA DOS SANTOS SOUZA

CARACTERIZAÇÃO MINERAL, EVOLUÇÃO GEODINÂMICA E POTENCIALIDADES
TECNOLOGICAS DE GRAFITAS DO DOMÍNIO CEARÁ CENTRAL, PROVÍNCIA
BORBOREMA, NE DO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Geologia. Área de concentração: Recursos minerais e geodinâmica.

Aprovada em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Lucilene Santos (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Christiano Magini
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Débora Macêdo do Nascimento Freire
Membro Externo

A Deus.

A minha querida e amada família.

AGRADECIMENTOS

À Instituição FUNCAP, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Agradeço à professora Dra. Lucilene dos Santos por ter aceitado o desafio de me orientar.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr. Christiano Magini e Dra. Débora Macêdo do Nascimento Freire pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos laboratórios de Raios-X e de Cristalografia Estrutural da UFC (laboratório microscopia Raman), por terem realizado minhas análises de Raman e DRX.

Aos professores do departamento de geologia da UFC, em especial ao professor Dr. Clovis Parente e o professor Dr. Sérgio Bacelar, por eles eu tenho uma grande admiração e respeito.

Agradeço ainda a Funcap que financiou a minha bolsa de mestrado.

As minhas amigas da Paleontologia, Luciene, Janiele, Adriana, e Dayse, a elas o meu muito obrigada por terem segurado a barra comigo.

A grande amiga que a geologia da UFC me deu, a geóloga e mestra Jaqueline Mesquita, tenho uma admiração enorme por essa mulher.

Ao meu grande amigo e excelente geólogo Willian Alexandre que me deu vários conselhos e ensinamentos aos longos dessa árdua trajetória.

Ao meu grande parceiro e amigo, o geólogo Pedro Rohlfs que passou a maior parte do tempo dessa jornada, me dando apoio e ótimos conselhos para que eu não desanimasse.

“A persistência é o melhor caminho para o
êxito.” (Chales Chaplin)

RESUMO

Esta pesquisa se desenvolveu por meio da caracterização das ocorrências de grafitas associadas a três zonas de cisalhamento no Domínio Ceará Central da Província Borborema a saber: Senador Pompeu, Orós e Vazantes. De modo a investigar a aplicabilidade tecnológica destas ocorrências de grafita para a indústria do grafeno. As grafitas ocorrem em rochas metacarbonáticas carbonosas e em xistos grafitosos dos complexos Independência e Nenelândia, respectivamente. As grafitas ocorrem tanto disseminadas na matriz dos xistos e dos mármore, como na forma de lentes em contato discordante com o xisto grafitoso. Uma associação mineral composta por calcita, quartzo, plagioclásio, flogopita e grafita foi observada nas rochas metacarbonáticas, enquanto nos xistos foi observada uma paragênese mineral composta por actinolita-tremolita, quartzo, plagioclásio, biotita, muscovita e grafita. A grafita ocorre disseminada, em todas as amostras estudadas, com forma anedral. Pontualmente, ocorrem com hábito hexagonal e na forma flake. A caracterização mineral permitiu a identificação espectroscópica dos picos característicos da grafita com ângulo 2θ de 31.5° e d -spacing de 3.35 angstroms. A identificação dos picos G nas três amostras analisadas, em 1577cm^{-1} , sugere altos graus de ordenamento na estrutura cristalina, bem como sugerem uma boa condição cristalográfica para aplicação na indústria para grafeno. Entretanto, a presença dos picos D1 (ca. 1315cm^{-1}) e D2 (ca. 1610cm^{-1}) nos espectros Raman em todas as amostras ainda sugerem defeitos na estrutura cristalina das grafitas analisadas. A partir dos espectros Raman sugere-se valores de temperatura de pico metamórfico para a grafita entre 585 e 513°C nas amostras dos mármore grafitosos de Sobral e Senador Pompeu (DCD-03 e SEP-01), sugerindo condições na fácies anfíbolito. Os valores obtidos estão de acordo com a paragênese mineral que também sugere condições na fácies anfíbolito. Esta inferência contribui para a evolução regional do Domínio Ceará Central durante a Orogênese Brasileira (ca. 630-580Ma). Por fim, sugere-se uma origem organossedimentar para as grafitas da região de Orós e sedimentar-hidrotermal para as grafitas de Sobral e Canindé.

Palavras-chave: chaves: grafitas; caracterização mineral; espectroscopia Raman; zonas de cisalhamento; domínio Ceará central.

ABSTRACT

This research was developed through the characterization of graphite occurrences associated with three shear zones in the Ceará Central Domain of Borborema Province, namely: Senador Pompeu, Orós, and vazantes. In order to investigate the industrial applicability of these graphite occurrences for the graphene industry. Graphites occur in carbonaceous metacarbonate rocks and in graphite shales of the Independédica Complex. Graphites occur both disseminated in the matrix of shales and marbles, and in the form of lenses in discordant contact with carbonaceous shale. A mineral association composed of calcite, quartz, plagioclase, phlogopite and graphite was observed in metacarbonate rocks, while in shales a mineral paragenesis composed of actinolite-tremolite, quartz, plagioclase, biotite, muscovite and graphite was observed. Graphite occurs disseminated, in all the samples studied, with an anhedral shape. Occasionally, they occur with a hexagonal habit and flake shape. The mineral characterization allowed the spectroscopic identification of the characteristic peaks of graphite with a 2θ angle of 31.5° and d-spacing of 3.35 angstroms. The identification of G peaks in the three analyzed samples, at 1577cm^{-1} , suggests high degrees of ordering in the crystalline structure, as well as suggesting a good crystallographic condition for application in the industry for graphene. However, the presence of D1 (ca. 1315cm^{-1}) and D2 (ca. 1610cm^{-1}) peaks in the Raman spectra in all samples still suggests defects in the crystalline structure of the analyzed graphites. From the Raman spectra, metamorphic peak temperature values for graphite between 585 and 513°C are suggested in the samples of carbonaceous marbles from Sobral and Senador Pompeu (DCD-03 and SEP-01), suggesting conditions in the amphibolite facies. The values obtained are in agreement with the mineral paragenesis which also suggests conditions in the amphibolite facies. This inference contributes to the regional evolution of the Ceará Central Domain during the brasiliano orogeny (ca. $630\text{-}580\text{Ma}$). Finally, an organosedimentary origin is suggested for the graphites of the Orós region and a sedimentary-hydrothermal origin for the graphites of Sobral and Canindé.

Keywords: graphites; mineral characterization; shear zones; Ceará central domain.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Desenho mostrando as diferenças estruturais da molécula de C.....	13
Figura 2 — Representação dos diferentes alótropos de carbono.....	14
Figura 3 — Ilustração que mostra a transformação da grafita para grafeno.....	14
Figura 4 — Mapa de localização das áreas de estudo.....	17
Figura 5 — Amostras de mão das rochas hospedeiras da grafita.....	18
Figura 6 — Difractometria de raio-X.....	21
Figura 7 — Microscópio Raman.....	22
Figura 8 — Mapa do pré-drift dos terrenos Brazilianos e Pan – Africanos.....	24
Figura 9 — Mapa da divisão da BP, segundo a classificação de Van Schmus et al.....	25
Figura 10 — Mapa que mostra as subdivisões crustais no domínio tectônico da PB.....	27
Figura 11 — Mapa de compartimentação da PB.....	37
Figura 12 — Mapa geológico de Senador Pompeu.....	41
Figura 13 — Mapa geológico de Canindé.....	42
Figura 14 — Feições dos afloramentos estudados.....	43
Figura 15 — Fotomicrografias dos mámore grafitos da região de Canindé.....	45
Figura 16 — Fotomicrografias dos xistos grafitosos.....	47
Figura 17 — Difratoformas das amostras de grafitas.....	49
Figura 18 — Espectros Raman das amostras estudadas.....	51

LISTAS DAS TEBELAS

Tabela 1 — Principais depósitos de grafitas no mundo.....	34
Tabela 2 — Discriminação das amostras coletadas.....	38
Tabela 3 — Valores de d002(A) e picos característicos da espectroscopia Raman...	50
Tabela 4 — Paragênese mineral e proposta da evolução metamórfica.....	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	JUSTIFICATIVA	16
3	OBJETIVOS GERAIS	16
3.1	<i>Objetivos Específicos</i>	17
4	MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1	<i>Localização da Área de Estudo</i>	17
4.2	<i>Trabalhos de Campo</i>	18
4.3	<i>Petrografia</i>	20
4.4	<i>Difratometria de Raios-X e Espectroscopia Raman</i>	20
5	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	24
5.1	<i>Província Borborema</i>	24
5.2	<i>Sub-Província Norte da Borborema</i>	27
5.3	<i>Embasamento Arqueano</i>	29
5.4	<i>Terrenos Acrescionários do Paleoproterozoico</i>	29
5.5	<i>Unidades Neoproterozoica</i>	29
5.6	<i>Complexo Tamboril-Santa Quitéria</i>	30
6	RESULTADOS	31
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	59
	REFERÊNCIAS	60

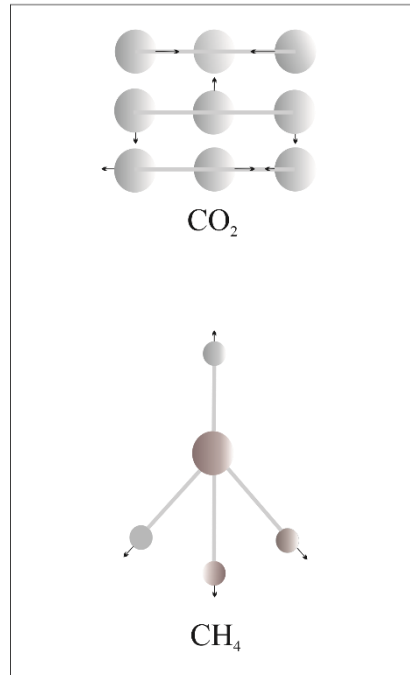
1 INTRODUÇÃO

A quarta revolução industrial ou indústria 4.0 vem se estabelecendo no mundo diante de novos desafios tecnológicos e científicos. Esta revolução se dá a partir da aplicação de matérias primas de alto valor agregado, ou *supercommodities*. Neste sentido se dá o uso de minerais ricos em Elementos Terras Raras, lítio, nióbio e grafita, este último, matéria-prima do grafeno. Estes materiais são essenciais na produção de semicondutores, baterias de última geração, telas ultrafinas, entre outros. Neste sentido, a investigação geológica contribui para o desenvolvimento de áreas de interesse para mineração de matérias primas utilizadas nesta fronteira tecnológica. Seja na identificação de áreas para mineração e na caracterização mineral e tecnológica.

O carbono não é o elemento mais abundante da natureza e, mesmo assim, é amplamente encontrado, a diversidade de matérias que esse elemento pode formar é enorme, isso acontece por ele ter diversos alótropos. O carbono pode estar nas grafitas na forma reduzida (C, CH₄, matéria orgânica) e no diamante na forma oxidada (CO, CO₂) (FIGURA 1). O grafite e o diamante são as formas alotrópicas até então mais conhecidas, além de carvão amorfo, carvão vítreo serem outras formas encontradas na natureza para o carbono (ZARBIN et al., 2013).

O grafite pode ser aplicado na indústria metalúrgica, química, energia nuclear, dentre outras (Ab et al., 2018). Na natureza, os principais depósitos de grafita estão relacionados a diversas origens, tais como I) a partir do metamorfismo regional de rochas com conteúdo de matéria orgânica, que foram depositados no ambiente e que sofreram processos metamórficos, podendo estar associado a condições hipometamórficas e epimetamórficas. II) Através do metamorfismo de contato oriundo de intrusões ígneas em corpos ricos em matéria orgânica como o carvão, e em processos de pegmatitização e recristalização do carbono durante processos de fusão. III) Depositados por fluidos hidrotermais ricos em C-H-O-N (Dill, 2010).

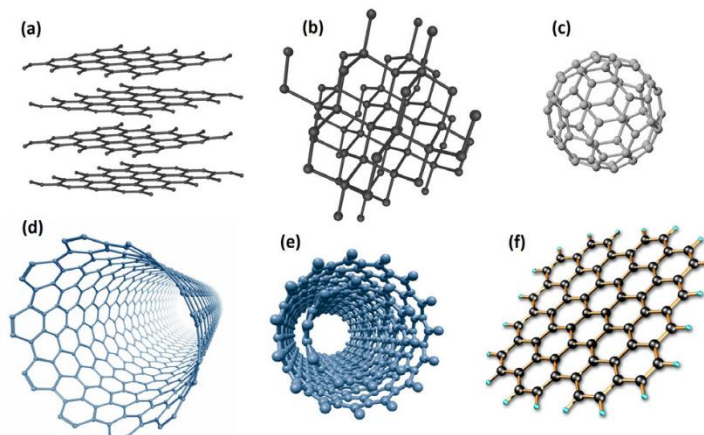
Figura 1 – Diferenças estruturais das moléculas de C, na forma oxidada CO_2 e reduzida CH_4 , as setas indicam os vetores de vibrações emitidos por essas moléculas.



Fonte: Extraído de Segundo & Vilar (2016)

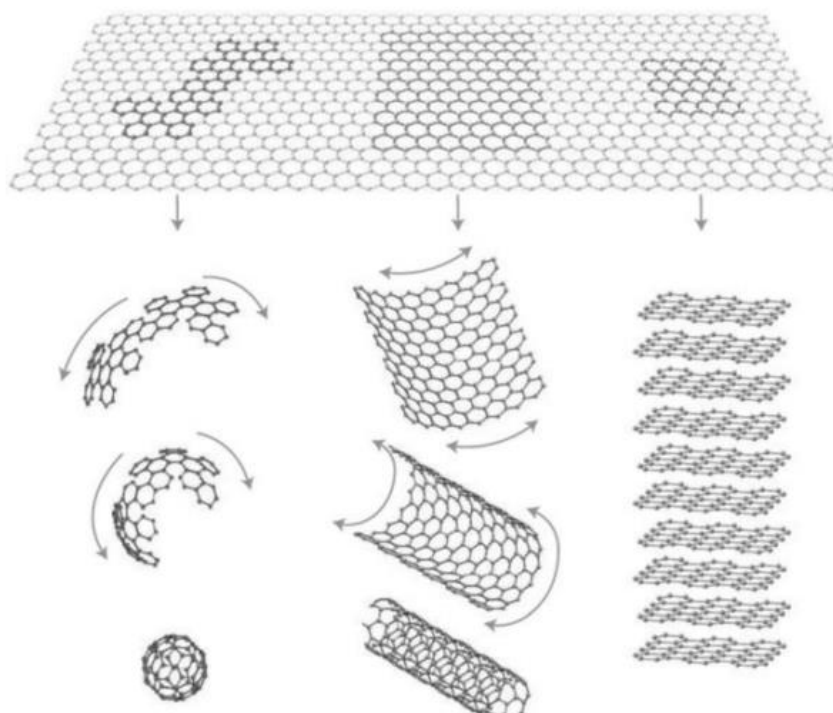
A grafita é o mineral de minério para a produção de grafite e grafeno. O grafite possui estrutura atômica lamelar, onde cada átomo de carbono está ligado a outros três átomos de carbono formando uma estrutura parecida com folhas (FIGURA 2a). O grafeno consiste em uma camada plana de átomos de carbono, disposto em formato hexagonal resultando em um elétron livre por átomo de carbono (FIGURA 2f). Suas principais características são: maleabilidade, resistência (maior que a do aço), condutor de calor e eletricidade (Segundo & Vilar, 2016). Sua aplicação na indústria se dá em microprocessadores, sensores, membranas de dessalinizadores, tintas, dentre outros. O grafeno foi descoberto em 2004 por pesquisadores da Universidade de Manchester, até então era considerado um material teórico, pois se acreditava que era uma forma instável. A figura 3 mostra a transformação em 2D partindo do grafite para o grafeno, fulereno e nanotubos (Segundo & Vilar, 2016). O grafeno pode ser fabricado em laboratório a partir da matéria carbonosa ou do mineral grafita (CASTRO NETO et al., 2009), (STOLLER et al., 2008), (MAFRA et al., 2012).

Figura 2 – Representação esquemática de diferentes alótropos de carbono: a) grafite; b) diamante; c) fulereno; d) nanotubo de carbono parede simples; e) nanotubo de carbono parede múltipla; f) grafeno



Fonte: Extraído de Zarbin & Oliveira (2013)

Figura 3 – Figura ilustrativa mostrando a transformação a partir de estrutura do grafite para o grafeno, fulereno e nanotubos.



Fonte: Extraído de Segundo & Vilar (2016)

Além de ter importância na indústria. O estudo mineral da grafita tem sua importância

para evolução geológica e geodinâmica de antigos orógenos. A grafitização da matéria carbonosa está diretamente ligada ao grau metamórfico, ou seja, ela aumenta à medida que a temperatura e pressão aumentam, (WADA et al., 1994) e, uma vez que o grau máximo de grafitização é atingido, este processo não pode ser reversível, outra característica importante é que a grafitização é acelerada na presença de calcita (NODA; KAMIYA; INAGAKI, 1968), essas características, tornam a grafita um ótimo geotermômetro e geobarômetro. Segundo Landis (1971) a grafita verdadeira é formada em temperaturas maiores que 400°C.

O pico metamórfico das grafitas pode ser analisado através das análises de DRX e espectroscopia Raman. WOPENKA; PASTERIS, (1993) defendem que a microscopia Raman, é a ferramenta mais adequada para caracterizar a grafita pois, ele possui uma alta resolução, o tempo que é levado para a aquisição dos dados é curto, podendo-se obter uma quantidade razoável de informações por amostras e, por fim, esse é o método que melhor exhibe a evolução do grau metamórfico na matéria orgânica, esses métodos fornecem dados da estrutura cristalina do mineral que pode ser romboédrica a baixas temperaturas (cristalizam a baixo de 300 °C) e hexagonal em altas (cristalizam cima de 600 °C).

2 JUSTIFICATIVA

A necessidade cada vez maior de se descobrir áreas exploratórias de minerais estratégicos para a indústria 4.0, bem como a caracterização mineral, aplicando ferramentas de microscopia cada vez mais desenvolvidas no meio científico faz desta dissertação importante contribuição para a sociedade e a indústria.

3 OBJETIVOS GERAIS

Obter parâmetros importantes (petrológicos/termodinâmicos e metalogenéticos) em escala de cristal pela caracterização cristaloquímica e cristalográfica, que possam contribuir para a compreensão dos mecanismos da deformação e do progresso das zonas de cisalhamento, dando suporte também à interpretação da evolução geodinâmica da Província Borborema.

Responder às perguntas tais - Como se deu a evolução de complexas zonas de cisalhamento, a partir das informações em diversas escalas de análises tectônico-estruturais

na Província Borborema, e quais relações entre as transcorrências e a presença de grafita? E ainda, qual o possível modelo metalogenético/tipo de depósito?

3.1 Objetivos Específicos

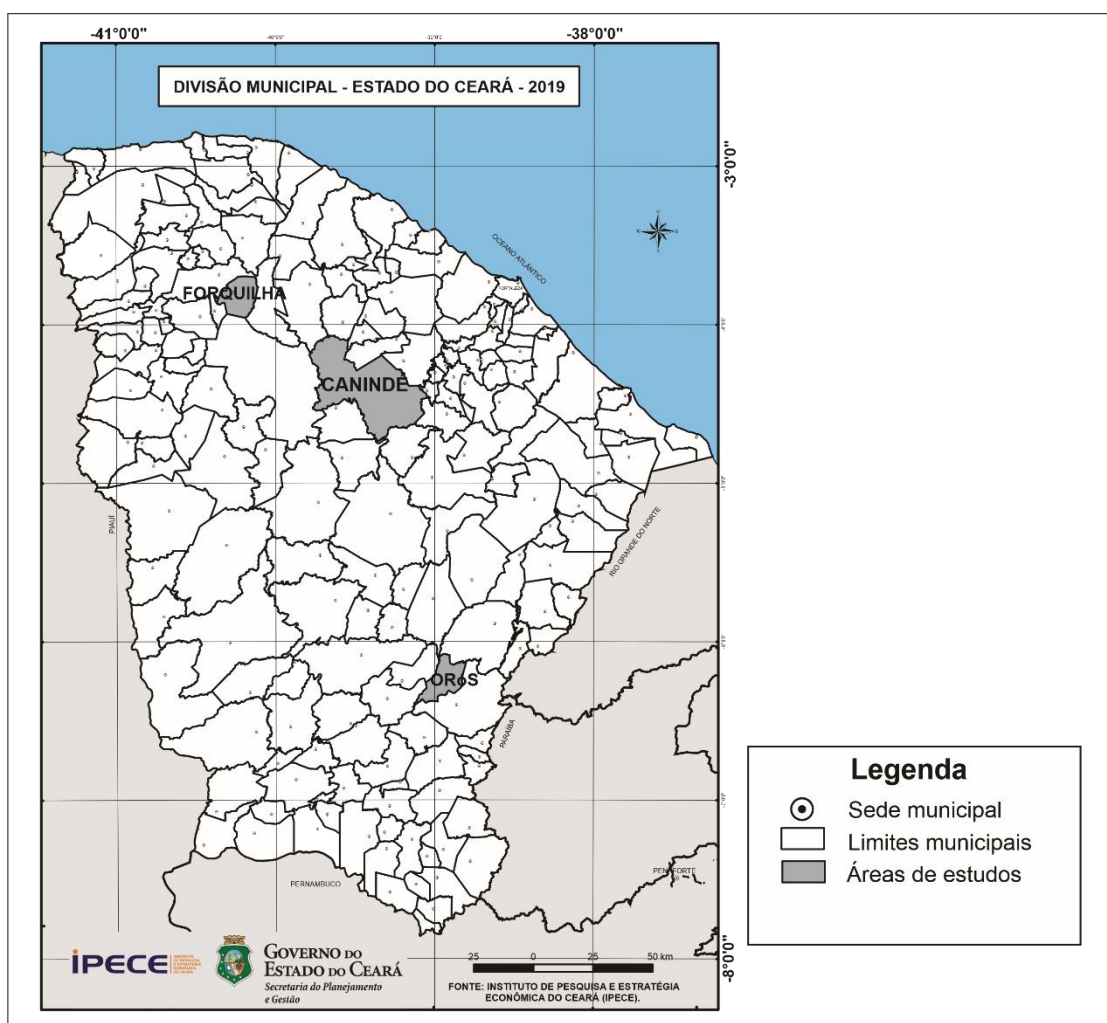
- Executar levantamento lito-estrutural, com análise descritiva e cinemática em escala macro e micrométrica;
- Realizar a confecção de lâminas e interpretação petrográfica-microtectônica dos litotipos presentes na área, para obter feições estruturais sugestivas de zonas compressionais, de alta deformação e as suas paragêneses minerais;
- Separar e caracterizar grafitas, por meio de espectroscopia Raman e difração de raios-X;
- Realizar análise petrológica e modelamento termodinâmico por meio de caracterização cristaloquímica e cristalográfica das grafitas analisadas, a fim de avaliar as suas condições formadoras de pressão e temperatura;
- Mostrar a aplicabilidade de estudos microfísicos na compreensão termobarométrica de processos petrológicos;

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Localização da Área de Estudo

As áreas de estudo encontram-se inseridas nas regiões dos municípios cearenses de Canindé, Sobral e Orós (Figura 4), que dentro de um contexto geológico mais amplo, estão situadas no Complexo Ceará do Domínio Ceará Central. Os principais acessos às áreas, saindo de Fortaleza, podem ser feitos pela BR-222, a qual liga a capital cearense, a Sobral, passando pelos municípios de Caucaia, Itapajé e Forquilha. A partir de Sobral, o acesso a Canindé pode ser feito pelas vias CE-257, depois pegando a via CE-326 chega-se a Cidade, os alvos de estudo podem ser completados percorrendo-se aproximadamente 18 km, através da Rodovia Estadual CE-257. A partir de Canindé o acesso a Orós, pode ser feito através da BR-122 por aproximadamente 165 km, depois seguir pela via CE-060 e CE-74, por mais 74,4 km e, por fim, seguir pela BR-020 por 27,1 km, chegando à cidade.

Figura 4 – Mapa de Localização das áreas de estudo. A figura indica a divisão geográfica dos municípios do Ceará. São destacadas em cinza as cidades onde foram coletadas as amostras utilizadas nesta pesquisa.



Fonte: IPECE, modificado pela autora.

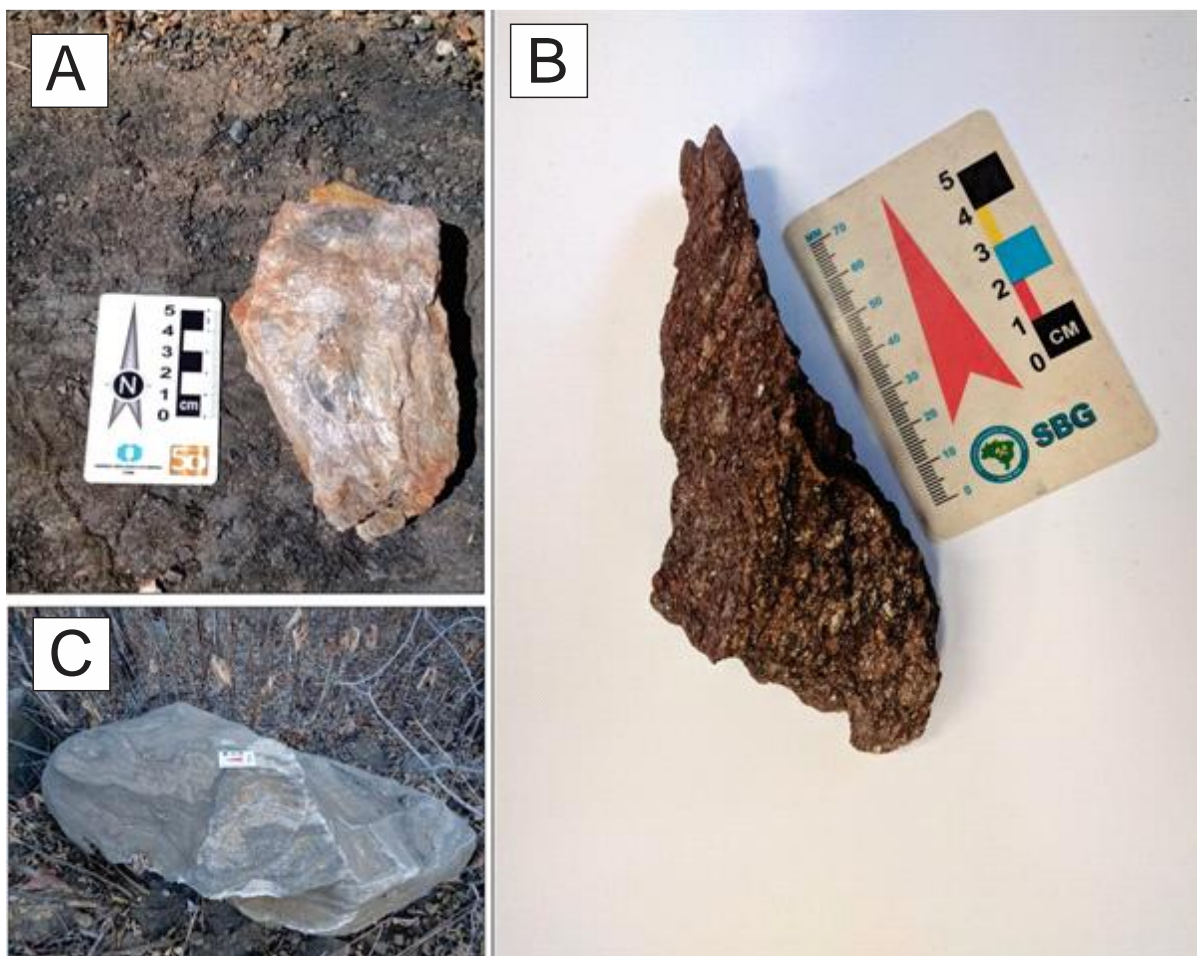
4.2 Trabalhos de Campo

O trabalho de campo se deu a partir do levantamento geológico-estrutural, para reconhecimento de contatos, feições estruturais e litotipos presentes na área de pesquisa.

Preteritamente a etapa de campo uma extensa revisão bibliográfica foi realizada, bem como o reconhecimento de feições estruturais regionais foi observado com o auxílio de mapas geológicos e geofísicos.

A etapa de campo se deu em colaboração com os trabalhos de mapeamento geológico de final de graduação. Durante a etapa de campo foi realizada a amostragem das rochas com grafita. Foram selecionadas amostras de rochas frescas, que foram destinadas à confecção de lâminas delgadas e polidas, para análise petrográfica, e separação de grafitas para caracterização mineral por DRX e espectroscopia Raman. quatro amostras, de quatro diferentes afloramentos e zonas de cisalhamento, foram consideradas representativas neste estudo. Estas são compostas pelos litotipos grafita xisto e mármore grafitoso (Figura 5).

Figura 5 – Amostras de mão representativas coletadas durante esta pesquisa e utilizadas para as investigações químicas e minerais. A) Grafita Xisto coletada na região de Orós-CE. B) grafita xisto coletada ao longo da Zona de Cisalhamento Senador Pompeu. C) Mármore grafitoso coletado no município de Canindé-CE.



Fonte: A autora

As técnicas de levantamento de informações mineralógicas, litológicas, texturais e estruturais foram implementadas conforme informações presentes em Klein & Hurlbut (1998), Arthaud (1989), Davis & Reynolds (1996), Passchier *et al.* (1993), Barnes (1995), Fry (1984), Thorpe & Brown (1985) e Tucker (1996).

4.3 Petrografia

A análise petrográfica se deu para a identificação da paragênese mineral, alterações hidrotermais e identificação de minerais metálicos associados presentes nas amostras analisadas. A petrografia também serviu como suporte para a caracterização mineral por DRX e espectroscopia Raman.

Para a identificação mineralógica foram utilizadas técnicas de identificação de minerais ao microscópio petrográfico descritas em Deer *et al.* (1966), Heinrich (1970), Fujimori & Ferreira (1987), atlas petrográficos (e.g. Mackenzie & Guilford, 1980). Além da caracterização mineralógica, foram estimadas as proporções dos minerais, admitindo um erro em torno de $\pm 5\%$. A identificação dos diferentes tipos de rocha foi baseada de acordo com a literatura especializada: Wilson (1989), Best (2003) e Wernick (2004) Best (2003), Yardley (2004) e Bucher & Grapes (2011) Arthaud (1989), Davis & Reynolds (1996), Vernon (2004), Passchier & Trouw (2005) e Fossen (2012). As lâminas petrográficas foram confeccionadas no Laboratório de Laminação da UFPE. Já as descrições petrográficas se deram em um microscópio de luz transmitida e refletida com câmera acoplada da marca NIKON LEICA DM 50 P® pertencente ao Laboratório de Microscopia Óptica da UFC.

4.4 Difratomia de Raios-X e Espectroscopia Raman

As análises por difratometria de Raios-X (DRX) baseiam-se a partir da emissão de raios X primários que incidem sobre a amostra gerando raios X secundários, através do fenômeno da difração. A difração é um fenômeno característico do movimento ondulatório, e pode ser observada quando uma onda é deformada por um obstáculo de dimensões próximas ao seu comprimento de onda. A unidade de medida utilizada para comprimentos de onda de Raios-X é o angstrom (\AA). A emissão de raios X secundários gera espalhamento em direções

específicas. Este espalhamento segue de acordo com a Lei de Bragg. A lei de Bragg que relaciona os parâmetros do cristal e da radiação incidente é dada pela fórmula:

$$2d \sin\theta = n \lambda$$

Sendo:

d – Distância entre os planos de rede;

θ – Ângulo de difração e complementar do ângulo de incidência.

n – Número inteiro chamado de ordem de difração;

λ – Comprimento de onda do raio incidente.

O padrão de difração resultante leva ao conhecimento do tamanho, forma e orientação da célula unitária. É uma técnica usada para determinar a estrutura mineral de cristais e fases minerais em uma amostra.

Esta etapa se deu no Laboratório de Difração de Raios-X do Departamento de Física da UFC. Nesta etapa foi utilizado um difratômetro da marca Pananalytical® (2kW de potência; Figura 5) equipado com um tubo de emissão de radiação Co-K α . As amostras foram pulverizadas até a fração argila (método do pó) e foram colocadas no receptáculo das amostras de modo randômico. Durante os ensaios foram utilizadas as seguintes condições analíticas: o ângulo de varredura 2θ foi de 0-100°, voltagem de 40Kv, corrente de 20mA e um tempo de 2 min em cada ângulo 2θ , garantindo o realce dos picos no difratograma.

A interpretação dos picos se deu consultando bibliografias e banco de dados (mindat.com e webmineral.com) através da comparação do espaço inter cristalino (d) dos difratogramas obtidos com os materiais de referência existentes nestes bancos de dados.

As análises por espectroscopia Raman foram realizadas diretamente sobre grafitas, previamente separadas e identificadas na etapa de petrografia. A microscopia Raman é uma técnica baseada no espalhamento inelástico da luz, com incidência de fótons sobre moléculas, interação que provoca deslocamento no comprimento de onda, ocorrendo dispersão dos fótons ao contatar a superfície de um objeto, tendo-se uma diferenciação de energia entre a luz emitida e a luz espalhada, determinando assim a estrutura da molécula. O espalhamento é usado para definir a composição do material analisado, no estudo de inclusões em minerais, na identificação e caracterização estrutural de um mineral.

Figura 6 – Difratômetro Panalytical® do Laboratório de Difractometria de Raios-X da UFC.



Fonte: Laboratório de Raios-X da UFC

A análise por espectroscopia Raman foi realizada no Laboratório de Espectroscopia Vibracional do Departamento de Física da UFC. Este ensaio é realizado em um microscópio tipo Witec alpha300 (Figura 6) com capacidade para realização de análises micro-raman e de microscopia confocal. Este microscópio possui resolução nominal de 200-300nm. Um espectrômetro de grade tripla Jobin Yvon T64000 com laser de Ar-ion com 514.5 nm de radiação, equipado com um CCD (dispositivo de carga acoplada). Os espectros foram detectados, aplicando um laser de diodo com comprimento de onda de 785 nm. Para focalizar o laser na superfície da amostra foi usado um microscópio da marca Olympus com uma objetiva de aumento 60x, a lente utilizada tinha distância focal de 20,5 mm e 0,35 de abertura numérica. Como fonte de excitação foi utilizado o laser Verdi/V-5 operando na linha 2400 nm, a potência utilizada foi de 90 mW. Os espectros foram gerados a partir de 3 acumulações de 100 segundos cada.

Figura 7 – Exemplo de Microscópio Raman Witec Alpha 300 similar ao do Laboratório de Espectroscopia Vibracional do Departamento de Física da UFC.



Fonte: Oxford Instruments.

A interpretação dos picos e a quantificação das áreas dos picos se deu utilizando o website mggrapheno.com.br, de acesso gratuito e pertencente a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Foram identificados os principais picos D1, G e D2. O cálculo termobarométrico se deu através dos procedimentos descritos em Beysac et al. (2002) através das fórmulas:

$$R2 = D1/(D1+G+D2)$$

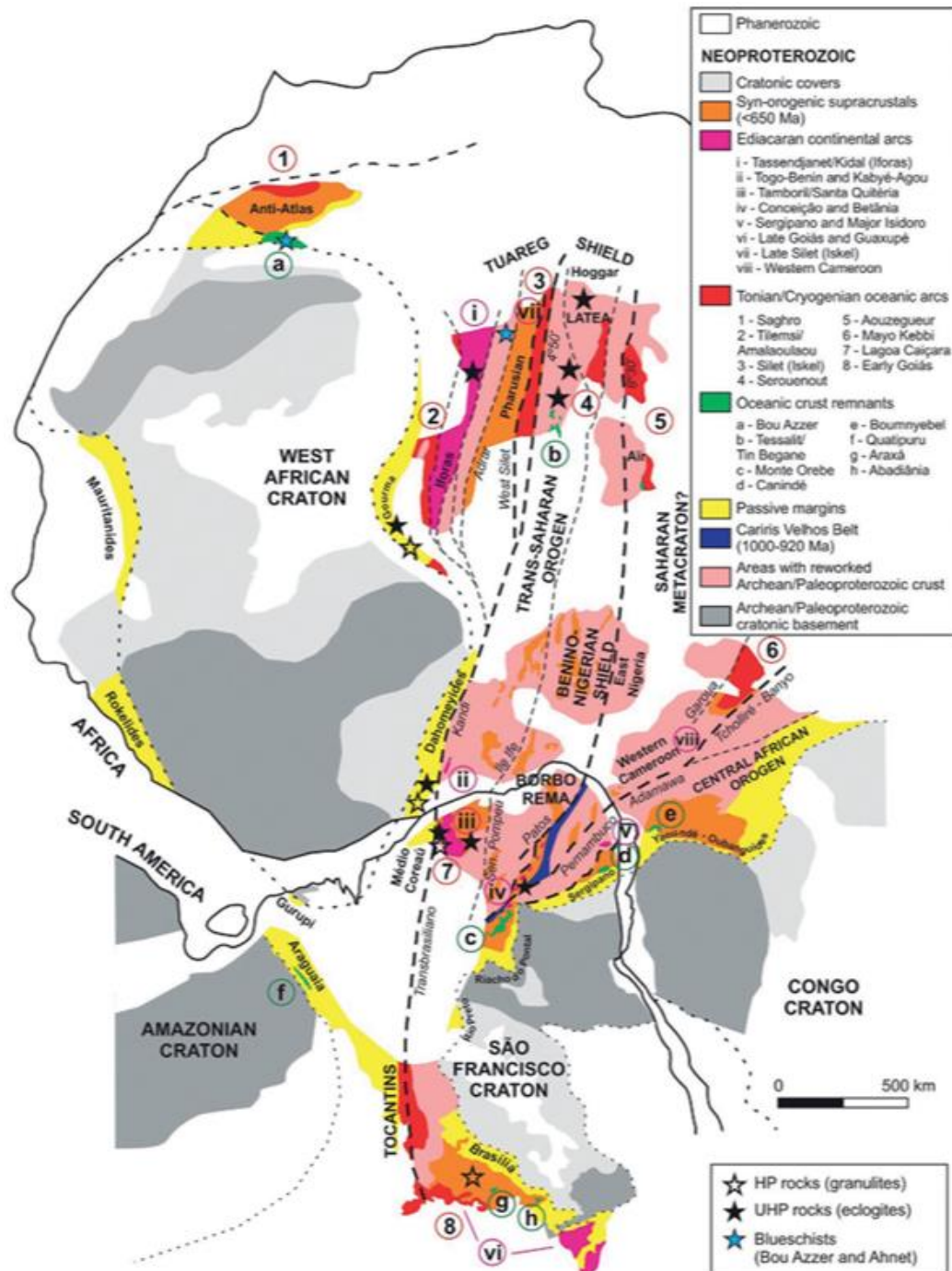
$$T^{\circ}C = (-445^{\circ} \times R2) + 641^{\circ}$$

5. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

5.1 Província Borborema

A Província Borborema (Figura 8) corresponde a um importante cinturão orogênico que é o resultado da amalgamação do oeste de Gondwana durante o Pré-cambriano na transição do Ediacarano-Cambriano, num evento denominado de Brasileiro (Almeida et al., 1977; Brito Neves, 1983, De Wit et al., 1998; Caxito et al., 2020). A província Borborema possui uma área de 450.000 km², que se estende no nordeste brasileiro, nos estados de Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Piauí e Ceará. Esta província está limitada a sul pelo Cráton São Francisco, a leste e norte pelas bacias costeiras fanerozoicas, e a oeste pela Bacia do Parnaíba, correspondendo a região nordeste do Brasil. É adjacente a cinturões Pan-africanos e terrenos cratônicos no oeste da África e tem sua origem associada a convergência e colisão entre os crátons do Oeste da África, Congo-São Francisco e Amazônico, a cerca de 630 Ma, (Caby et al., 1981, 1989; Jardim de Sá, 1984; Brito Neves & Cordani, 1991; Castaing et al., 1993; Trompette, 1997; Brito Neves et al., 2002; Neves, 2003).

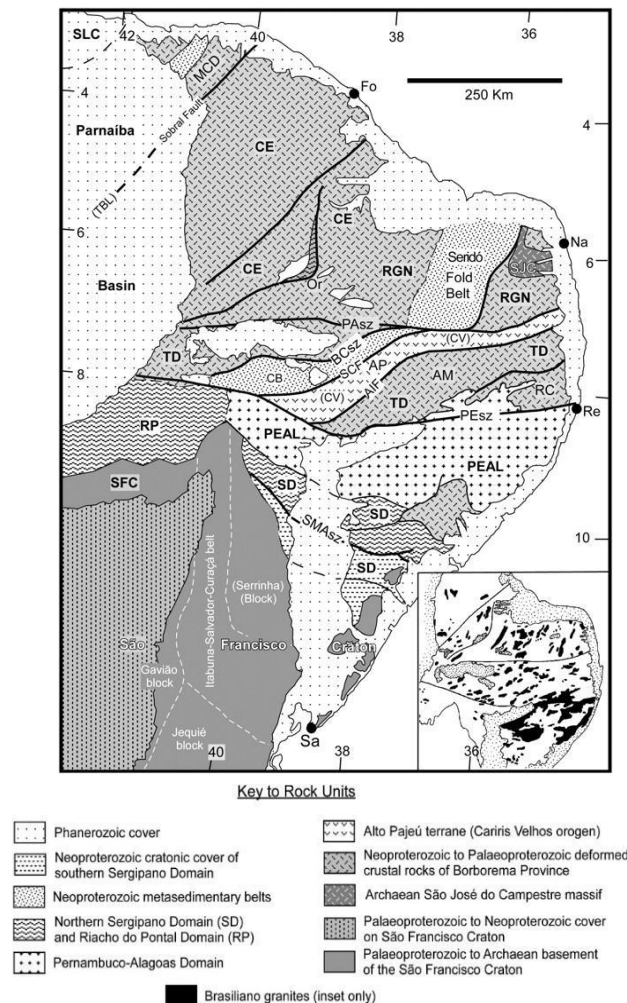
Figura 8 - Reconstrução pré-drift dos terrenos Brasilianos e Pan-Africanos. A figura reconstrói a colisão dos crátons Amazônico, Oeste Africano São Francisco e Congo e a formação do orógeno Borborema. Na figura ainda está indicada a correlação da Província Borborema com outras Províncias africanas.



Extraído de Caxito et al. (2020)

A compartimentação tectônica da Província Borborema (Figura 8) foi proposta por vários autores, entre eles Brito Neves et al. (2000), que subdividiram a Província da Borborema em seis domínios tectônicos, de sul para norte: Domínio Sul, Domínio Central ou Zona Transversal, Domínio Rio Grande do Norte, Domínio Ceará Central, Domínio Médio Coreá e o Maciço Pernambuco-Alagoas. Posteriormente, a divisão da Província Borborema foi proposta na forma de três sub-províncias (Van Schmus et al., 2008, 2011) norte, transversal ou central e sul. Cada domínio possui características litológicas, deformacionais, estruturais e isotópicas próprias. A divisão da Província Borborema vem sendo realizada tendo as extensas zonas de cisalhamento como limites geográficos. A área de estudo deste trabalho está situada na parte norte da Província Borborema, seguindo a classificação de Van Schmus et al. (2011), precisamente no Domínio Ceará Central (Figura 9) segundo a classificação de Brito Neves et al. (2000).

Figura 9 - Divisão da Província Borborema, de acordo com a classificação de Van Schmus et al. (2011). O mapa auxiliar indica a ocorrência dos plútons Neoproterozoicos formados no ciclo Brasileiro.



Fonte: Van Schmus et al. (2011)

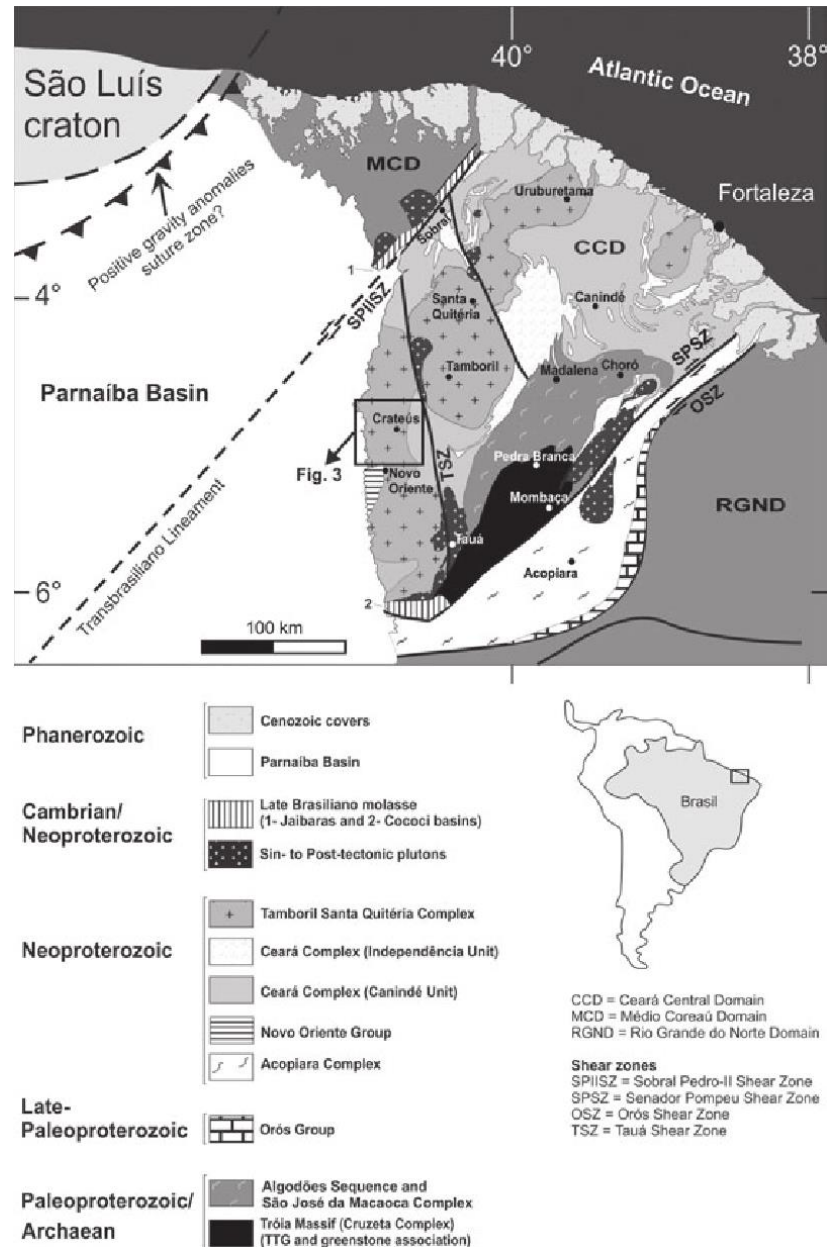
LEGENDA: Domínio Médio Coreaú (MCD); Domínio Ceará (CE) e cinturão Orós (Or); Domínio Rio Grande do Norte (RGN) e núcleo Arqueano São José do Campestre (SJC); Domínio Transversal (TD) e terrenos Alto Pajeú (AP), Alto Moxotó (AM), Rio Capibaribe (RC), Cinturões Cachoeirinha (CB) e Cariris Velhos (CV); Domínio Pernambuco-Alagoas (PE-AL); Domínio Riacho do pontal (RP); Domínio Sergipano (DS); Crátons: Crátons São Francisco (SFC) e São Luís (SLC); Falhas e zonas de cisalhamento: Falha Afogados da Ingazeira (AIF); Zona de cisalhamento Boqueirão dos Conchos (BCsz); Zona de cisalhamento Patos (PAzc); Zona de cisalhamento Pernambuco (PEsz); Falha Serra do Caboclo (SCF); Zona de cisalhamento São Miguel do Aleixo (SMAsz); Lineamento Transbrasiliano (TBL);

5.2 Sub-Província Norte da Borborema

Essa porção da Província Borborema está limitada geograficamente a sul pelo Lineamentos Patos, e a norte pelo lineamento Transbrasiliano (Zona de Cisalhamento Sobral-Pedro II), ambas estruturas de direção NW-SE (Figura 9). Existem mais de uma divisão descrita na literatura, aqui será adotada a denominação de FETTER et al. (2000) que dividiu a sub-província em três Domínios: Domínio Noroeste Ceará ou Médio Coreaú, Domínio Ceará Central e Domínio Rio Grande do Norte, (Figura 10).

O Domínio Noroeste do Ceará é composto por rochas tonalíticas migmatizadas a ortognaisses de composição granodiorítica, esses compreendem a maior parte do embasamento, que são acompanhados da ocorrência de rochas de composição charnockíticas, kinzigitos e hedenbergitos (Nogueira et al 1990). O domínio Rio grande do Norte possui embasamento composto essencialmente por paragnaisses e xistos, contudo existem localmente alguns ortognaisses com porções migmatizadas com composição variando entre tonalitos a granodioritos.

Figura 10 - Mapa esquemático mostrando a subdivisão dos principais blocos crustais no domínio tectônico do norte da província de Borborema, especificamente do Domínio Ceará Central.



Fonte Extraído de Costa et al. (2013)

O Domínio Ceará central (DCC), possui embasamento Arqueano-Paleoproterozoico composto predominantemente por ortognaisses félsicos de alto grau e migmatitos de composição tonalítica a granodiorítica, intercalados com rochas metassedimentares pelíticas, formações ferríferas bandadas, e rochas calcisilicáticas. Autores como (Caby & Arthaud 1986) defendem que os protólitos gnáissicos desse domínio eram de idade Arqueana, porém dados geocronológicos reportados por FETTER et al. (2000) a concluíram que essa idade (Arqueana) estava restrita ao maciço de Tróia e a pequenos núcleos intercalados com rochas de idade Paleoproterozoica. Seis idades de

zircão U-Pb (cinco deste estudo de Fetter et al. (2000) e um de Martins et al. (1998)) obtidos em ortognaisses que confirmam um idades de cristalização Paleoproterozoica com valores entre 2.15 e 2.25 Ga para o embasamento do DCC. O mapeamento desses núcleos arqueanos é extremamente dificultoso devido à intensa deformação brasileira no DCC. Neste trabalho será utilizada a divisão de Fetter et al. (2000) onde o autor enumera as unidades em quatro sendo elas: i) embasamento arqueano, ii) terrenos acrescionários do Paleoproterozoicos, iii) coberturas Neoproterozoicas, iv) o complexo magmático Tamboril-Santa Quitéria.

Embasamento Arqueano

É representado por ortognaisses, gnaisses, granodioritos e tonalitos em geral limitados por zonas de cisalhamento (Caby & Arthaud, 1989). Pertencem a essa unidade o maciço de Tróia, os blocos Tróia-Pedra Branca e Mombaça, que são separados pela zona de cisalhamento Sabonete-Inharé. (Fetter et al., 1999) definiu a idade U-Pb em zircão de $2,776 \pm 0,65\text{Ga}$ e uma idade modelo (TDM) de $2,81\text{Ga}$. com $\epsilon\text{Nd}(t)$ de $+2,1$ este interpretado como extração de magma de uma crosta juvenil.

Terrenos Acrescionários do Paleoproterozoico

São constituídos em grande parte por rochas metassedimentares, com quartzitos basais seguidos de xistos, orto e paragnaisses e carbonatos. Durante o paleoproterozoico houve grandes eventos extensionais no DCC, nos arredores da cidade de Quixeramobim, nas rochas da sequência supracrustais e nas metaígneas, esses eventos estão registrados. Próximo a porção oriental do lineamento Transbrasiliiano, ocorrem ortognaisses dos quais (Fetter et al., 1999) reporta dezoito idades modelos de Nd (TDM) com valores entre 2,22 Ga. e 2,44 Ga. quatro idades U-Pb em cristais de zircão no intervalo de 2,10 Ga. a 2,14 Ga. e valores de $\epsilon\text{Nd}(t)$ de $+1,9$ a $+0,6$.

Unidades Neoproterozoica

De acordo com Mendonça et al. (1984) são um pacote de rochas psamítico-pelítico-carbonáticas organizadas em diferentes arranjos lito-estratigráficos, interpretadas e

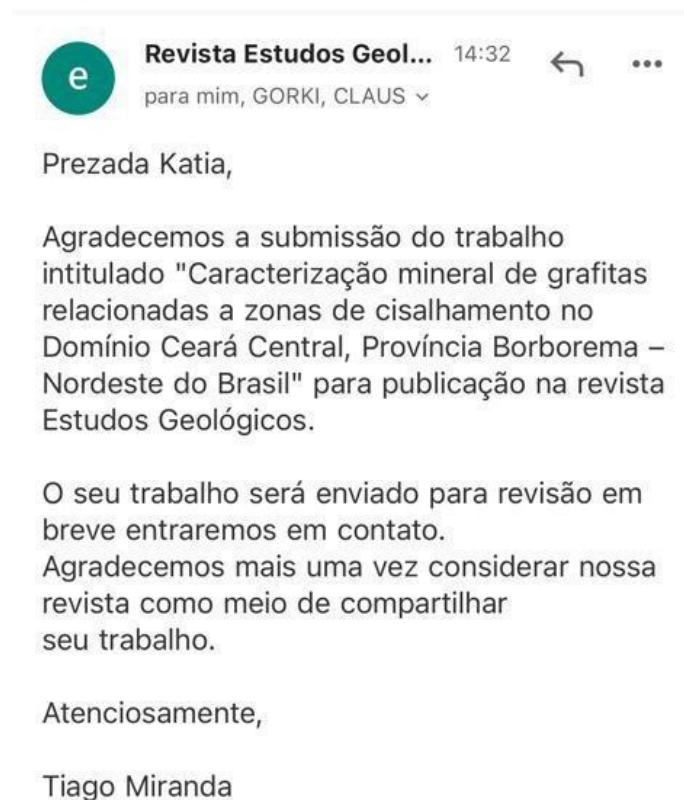
descritas como coberturas do tipo plataforma continental, essas sequências apresentam idades muito variadas indicando que existiu mais de um tipo de área-fonte para a sedimentação. Porém acredita-se que a época de deposição ocorreu no Neoproterozoico (Santos, 2003). As idades U-Pb, de 772 ± 31 Ma. em zircão de metariolitos e idade modelo TDM de 1,09 Ga. (Fetter, 1999 e Van Schmus, 1998) convergem para a deposição dessas rochas em um ambiente de rift (Grupo Independência) e proveniência dos sedimentos de uma fonte mais jovem que os litotipos do embasamento Paleoproterozoico. Trabalhos realizados por Castro (2004) e (Santos et al., 2003) obtiveram idades modelo TDM em torno de 2,4 Ga e 2,256 Ga respectivamente, indicando que as rochas Paleoproterozoicas, são em sua maioria, a fonte dos sedimentos das rochas metassedimentares dessa região.

Complexo Tamboril-Santa Quitéria

Esse complexo é constituído por rochas graníticas migmatizadas, com composição tonalítica a granodiorítica migmatizadas, situado a leste da zona de cisalhamento Sobral - Pedro II e recobre cerca de 20% da área do Domínio Ceará Central. Fetter (1999) e Fetter et al. (2003) obtiveram, em tonalitos e granodioritos migmatizados, idades U-Pb em zircões de 622 Ma e idades modelo TDM variando entre 0,9 à 1,16 Ga. Esses dados sugerem que o Complexo Tamboril-Santa Quitéria teria se formado a partir de uma mistura entre materiais provenientes de um embasamento Paleoproterozoico e materiais juvenis. O complexo Tamboril-Santa Quitéria foi interpretado como uma associação anatética caracterizada por inúmeros pulsos de cristalização e alojamento de magmas que ocorreram entre 0.65-0.61Ga. Caby & Arthaud (1986) relacionam este complexo a uma tectônica de nappes. Fetter et al. (2003) interpreta o Complexo Tamboril-Santa Quitéria como um arco magmático continental. Já Araújo et al. (2010) sugere uma formação em ambiente colisional continente-continente.

6 RESULTADOS

Os resultados desta pesquisa estão organizados na forma de um artigo científico. Nele são abordados a caracterização petrográfica, e mineral das grafitas estudadas nesta pesquisa. O presente artigo, encontra-se submetido a Revista “Estudos Geológicos” ISSN 1980-8208. A carta de submissão encontra-se abaixo:



Caracterização mineral e Aplicabilidade Tecnológica de grafitas relacionadas a zonas de cisalhamento no Domínio Ceará Central, Província Borborema – Nordeste do Brasil

Katia Souza^{1*}

Lucilene Santos²

¹ Programa de Pós-graduação em Geologia – Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Rua Parquelândia, Fortaleza - CE, 60020-181. E-mail: katialemossouza@gmail.com

² Departamento de Geologia– Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici

RESUMO

Esta pesquisa se desenvolveu por meio da caracterização das ocorrências de grafitas associadas a três zonas de cisalhamento no Domínio Ceará Central da Província Borborema a saber: Senador Pompeu, Orós e Vazantes. As grafitas ocorrem em rochas metacarbonáticas carbonosas e em xistos grafitosos dos complexos Independência e Nenelândia. A grafita ocorre tanto disseminada na matriz dos xistos e dos mármore, como na forma de lente em contato discordante com o xisto carbonoso. Uma associação mineral composta por calcita, quartzo, plagioclásio, flogopita e grafita foi observada nas rochas metacarbonáticas, enquanto nos xistos foi observado uma paragênese mineral composta por actinolita-tremolita, quartzo, plagioclásio, biotita, muscovita e grafita. A grafita ocorre disseminada, em todas as amostras estudadas, com forma anedral. Pontualmente, ocorrem com hábito hexagonal e na forma flake. A caracterização mineral permitiu a identificação dos picos característicos da grafita com ângulo 2θ e 31.5° e *d-spacing* of 3.35 angstroms. A identificação dos picos G nas quatro amostras analisadas em 1577cm^{-1} , sugere altos graus de ordenamento na estrutura cristalina, entretanto a presença dos picos D1 (*ca.* 1315cm^{-1}) e D2 (*ca.* 1610cm^{-1}) nos espectros Raman em todas as amostras ainda sugerem defeitos na estrutura cristalina das grafitas analisadas. A partir dos espectros Raman sugere-se valores de temperatura de pico metamórfico entre 585 e 513°C nas amostras da região de Forquilha-Sobral (DCD-03) e Senador Pompeu (SEP-01), sugerindo condições na fácies anfíbolito. Os valores obtidos estão de acordo com a paragênese mineral que também sugere condições na fácies anfíbolito. Por fim, sugere-se uma origem orgânica-sedimentar para geração das grafitas que ocorrem ao longo destas zonas de cisalhamento.

Palavras chave: Grafitas, Caracterização Mineral, Espectroscopia Raman, Zonas de Cisalhamento

ABSTRACT

This research was developed through the characterization of graphite associated with three shear zones in the Ceará Central Domain of Borborema Province, namely as: Senador Pompeu, Orós, and vazantes. The graphites occur in carbonaceous metacarbonate rocks and graphite schists of the Independência and Nenelândia complexes, respectively. The graphite occurs both disseminated in the matrix of schists and marbles, and in the form of lens in discordant contact with the carbonaceous shale. A mineral association composed of calcite, quartz, plagioclase, phlogopite and graphite were observed in metacarbonate rocks, while in schists a mineral association composed of actinolite-tremolite, quartz, plagioclase, biotite, muscovite and graphite were observed. Graphite occurs disseminated, in all the samples studied, with an anhedral in shape. Occasionally, they occur with a hexagonal habit and flake in shape. The mineral characterization allowed the identification of the characteristic peaks of graphite with angle 2θ and 31.5° and d-spacing of 3.35 angstroms. The identification of G peaks in the three samples analyzed at 1577cm^{-1} suggests high degrees of ordering in the crystalline structure, however the presence of peaks D1 (ca. 1315cm^{-1}) and D2 (ca. 1610cm^{-1}) in the Raman spectra in all the samples still suggest defects in the crystalline structure in the analyzed graphites. From the Raman spectra, metamorphic peak temperature values between 585 and 513°C are suggested in samples from the Forquilha-Sobral (DCD-03) and Senador Pompeu (SEP-01) region, suggesting conditions in the amphibolite facies. The values obtained agree with the mineral paragenesis which also suggests conditions in the amphibolite facies. Finally, an organic-sedimentary origin is suggested for the generation of graphite that occurs along these shear zones.

Keywords: Graphites, Mineral Characterization, Shear Zones

1 INTRODUÇÃO

No registro geológico, depósitos e ocorrências grafitas são geralmente reportadas em ambientes metamórficos e hidrotermais, especialmente em orógenos (Simandl et al., 2015). Estes depósitos são interpretados como derivados da evolução térmica de matéria orgânica em rochas carbonosas, que foram transformadas em grafitas devido a evolução térmica e processos metamórficos ao longo do tempo geológico (Beysac et al., 2002).

Outras fontes de grafita são atribuídas a precipitação de fluidos ricos em C-O-H-N, derivados de fontes mantélicas ou pela redução química de carbonatos (Simandl et al., 2015). Grafita, assim como os diamantes são polimorfos de carbono nativo e possuem importância econômica devido a aplicação na indústria como fonte do grafeno (Simandl et al., 2015).

Depósitos de grafita estão relacionados a alguns ambientes geológicos específicos. O aumento das condições metamórficas está diretamente ligado ao aumento da cristalinidade da grafita. Dill (2010) sumariza as principais ocorrências e tipos de depósitos associados. A tabela 1 sintetiza os principais tipos de depósito relacionados a grafita. No nosso caso de estudo, os depósitos de grafita estão relacionados ao metamorfismo regional de rochas proto-sedimentares (carbonatos e folhelhos).

Tabela 1. Principais depósitos de grafita no Mundo. Modificada de Dill (2010).

Depósitos de grafita	Ambiente	Principais localidades
Relacionados a processos magmáticos	• Pegmatitos de grafita	Hackman Valley, Rússia
	• Sienitos com nefelina e grafita	Itge Naidvar, Mongólia
Relacionados a	• Grafita residual	Tamatave–Marovintsy, Madagascar

processos sedimentares		
Relacionados e processos metamórficos	<ul style="list-style-type: none"> • Skarns ricos em grafita 	Sri-Lanka
	<ul style="list-style-type: none"> • Grafita em rochas metassedimentares relacionados a metamorfismo regional e de contato 	Eastern Europe, USA and Canadá
Relacionados a estruturas	<ul style="list-style-type: none"> • Veios e vênulas de grafita 	Sri-Lanka

O processo de grafitização é dependente somente da temperatura e é influenciado pela fugacidade de oxigênio (Tagiri and Oba, 1986). Desta forma, grafitas são utilizadas como um proxy para entender a evolução térmica de rochas metassedimentares (e.g. Fragomeni et al., 2011, Rezende et al., 2021). Bem como podem ser aplicadas à evolução térmica de zonas de cisalhamento.

Neste trabalho, foi aplicado petrografia, difração de raios-X e espectroscopia Raman para caracterizar as ocorrências de grafita ao longo de zonas de cisalhamento do Domínio Ceará central, norte da Província Borborema a saber: zonas de cisalhamento Senador Pompeu, Vazante e Orós, em ordem para entender as características mineralógicas, bem como o ambiente geológico relacionado. De modo a contribuir para o conhecimento da evolução das zonas de cisalhamento e do Domínio Ceará central da Província Borborema.

2 GEOLOGIA REGIONAL

A Província Borborema (PB) está localizada geograficamente no nordeste brasileiro. Esta província inicialmente definida por Almeida et al. (1981) corresponde a uma importante

província geológica brasileira. A PB é o resultado da intensa deformação de três grandes crátons (São Francisco-Congo, São Luís, Amazonas) durante o Ciclo Brasileiro no Criogeniano-Ediacarano (680-540Ma) (Van Schmus et al., 2011; Neves, 2016; Neves et al., 2021; Caby et al., 1986; Trompette, 1997; Brito Neves et al., 2002; Neves, 2003). A geologia da Província Borborema é composta por rochas gnáissicas/migmatíticas, rochas supracrustais metamorfizadas, um intenso magmatismo granítico e extensas zonas de cisalhamento (Figura 11). Ainda são reportadas rochas metamáficas e metaultramáficas, rochas anfibolíticas e metassedimentares (Neves, 2003).

Van Schmus et al. (2011) definiu e compartimentaliza a Província Borborema em três grandes sub-províncias: Norte, Central ou Transversal e Sul. A sub-província norte corresponde aos domínios Médio Coreaú, Ceará Central e Rio Grande do Norte, estando delimitada a sul pela Zona de Cisalhamento Patos e a norte pela Bacia do Parnaíba (Fetter et al., 2000). A área de estudo está inserida no Domínio Ceará Central.

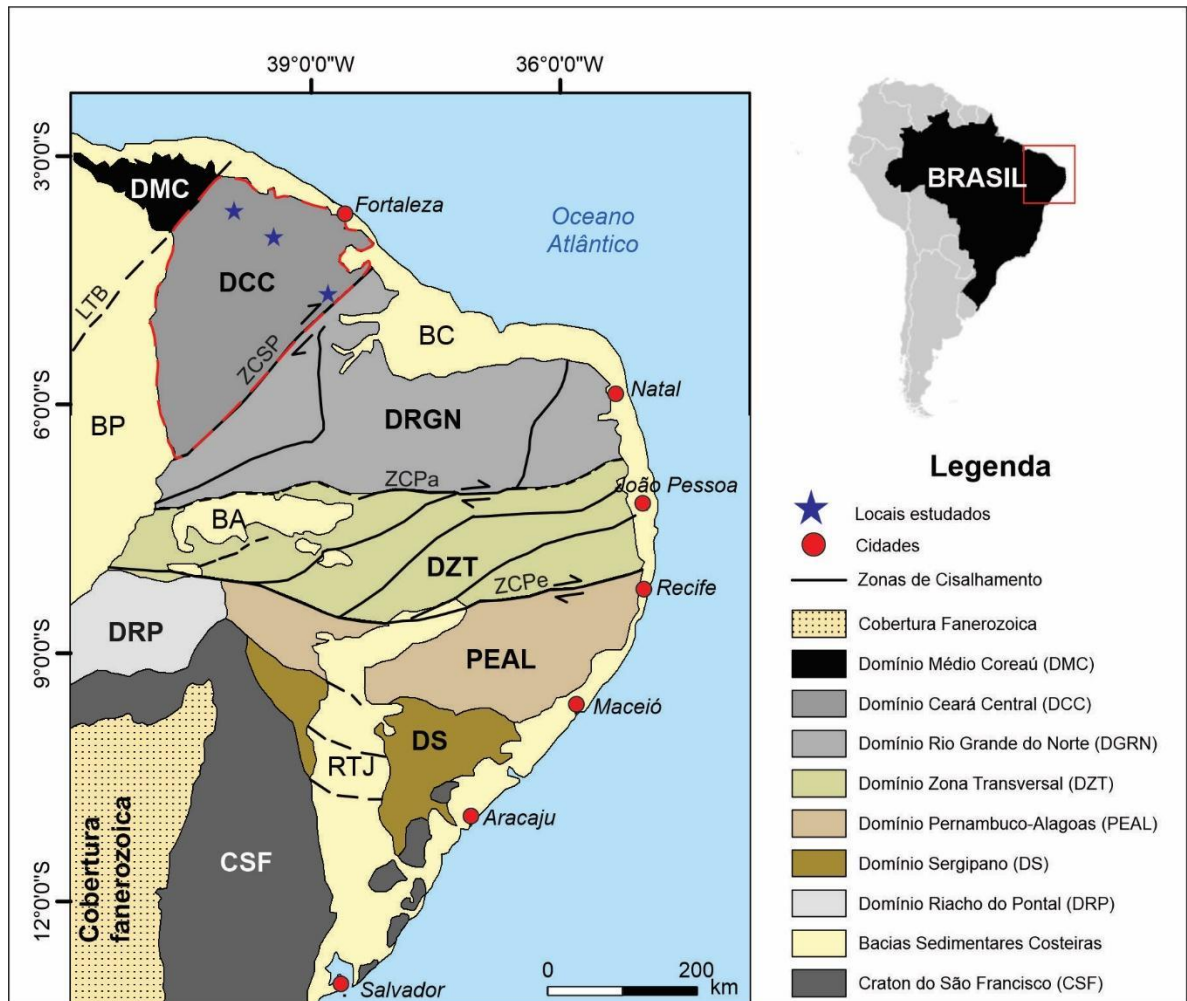


Figura 11. Mapa de compartimentação da Província Borborema de acordo com a classificação de domínios estruturais, modificado de Van Schmus et al. (2011). O mapa está indicando a localização dos afloramentos estudados, no Domínio Ceará Central.

O Domínio Ceará Central está delimitado pela Zona de Cisalhamento Senador Pompeu a sul e a norte pelo Lineamento Transbrasiliano (Figura 11). O Domínio Ceará Central é formado por migmatitos, gnaisses deformados durante a orogênese Riacciana-Orosiriana (Transamazônico) no Paleoproterozoico, com relictos de terrenos arqueanos (Tróia-Tauá), sequências supracrustais Neoproterozoicas e magmatismo granítico de alto potássio, interpretado como um arco magmático durante o Neoproterozoico (Fetter, 1999; Fetter et al., 2000).

As rochas de idade Paleoproterozoica são reportadas e defendidas por Fetter et al. (2000) através de idades U-Pb de zircão detrítico obtido a partir da rede circundante de ortognaisses confirmando a idade Paleoproterozoica para este embasamento. As rochas de idade Arqueana estão restritas ao Terreno Tróia-Tauá com idades U-Pb em cristais de zircão no intervalo de 2,10 Ga. a 2,14 Ga (Fetter et al., 2000). O terreno Tróia-Tauá é formado por metagranitos, rochas tipo *greenstone*, e migmatitos com idades U-Pb em zircão de $2,7 \pm 0.65$ Ga.

As unidades Neoproterozoicas são formadas por paragnaisses, micaxistos, mármores e rochas calcissilicáticas. São unidades de associação mineral marcadas pela presença de muscovita, granada e sillimanita. Os mármores ocorrem na forma de lentes, são bandados e/ou maciços de composição calcítica e com dolomita subordinada.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionadas quatro amostras representativas de mármores grafitosos com ocorrência de grafita para caracterização por petrografia, difração de raios-X (DRX) e espectroscopia Raman. A localização das amostras coletadas está discriminada na tabela 2. Para DRX três amostras foram concentradas para obtenção de picos referentes a grafita realçados. As análises por Raman foram feitas pontualmente nos cristais de grafita existentes nas seções delgadas.

Tabela 2. Discriminação das amostras coletadas neste estudo.

Local	Coordenada X	Coordenada Y	Descrição litológica	Análise realizada
Orós (ORD-02)	505322.0m E	9367710.0 m S	Xisto grafitoso	Petrografia, DRX e Raman
Senador	484654.00 m E	9519284.00 m S	Xisto grafitoso	Raman

Pompeu (SEP)				
Sobral- Forquilha (DCD-03)	375768.00 m E	9580462.00 m S	Mármore grafitoso	Petrografia, DRX e Raman
Canindé (ELD)	481826.00 m E	9515290.00 m S	Mármore grafitoso	Petrografia, DRX e Raman

As seções delgadas foram preparadas no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). As descrições petrográficas foram realizadas no Laboratório de Mineralogia Ótica da UFC. Para isto, foi utilizado um microscópio petrográfico binocular tipo LEIKA® com câmera acoplada, com luz transmitida e refletida.

As análises de DRX foram realizadas no Laboratório de Raios-X do Departamento de Física da UFC. Foi utilizado o método do pó. As amostras foram condicionadas no amostrador randomicamente. Nesta etapa, foi utilizado um difratômetro Xpertpro MPD da Pananalytical® equipado com tubo de radiação Co-K α , energia de 40Kv, corrente de 20mA e *stepsize* de 2° por minuto. As amostras de DRX foram orientadas randomicamente pelo método do pó. O ângulo 2 θ foi de 0 and 100°. Foi utilizado o espaçamento intercrystalino (d°) para interpretação dos picos dos minerais. Além disso, foram comparados com banco de dados mineralógicos (www.mindat.com e www.webmineral.com) e difratogramas padrão referentes ao Centro Internacional de Dados de Difração (ICDD).

A espectroscopia Raman foi conduzida no Laboratório de Espectroscopia Vibracional do Departamento de Física da UFC. Foi utilizado um microscópio Witec alpha300 com capacidade de obtenção de dados de micro-Raman (que suas análises Raman foram feitas foi

o espectrômetro Raman, modelo Labram HR (HORIBA Jobin Yvon), equipado com um dispositivo de carga acoplada (charge coupled device – CCD) resfriada por nitrogênio líquido) e microscopia confocal. Este sistema permite a obtenção de dados pontuais, bem como de imagens. Foi utilizada uma resolução nominal de 200-300nm, uma objetiva com aumento de 60x e *extended working* de 0,3mm e abertura nominal de 0.8.

Os dados de temperatura foram calculados a partir da área dos espectros Raman, de acordo com a metodologia proposta por Beyssac et al. (2002). Os procedimentos adotados foram o cálculo de duas equações descritas abaixo: onde a equação 1 é referente ao parâmetro R2 e a partir dele é calculada a temperatura do pico metamórfico em grafitas, usando a equação 2.

$$R2 = D1/(D1+G+D2)$$

Equação 1

$$T^{\circ}C = (-445^{\circ} \times R2) + 641^{\circ}$$

Equação 2

4 RESULTADOS

4.1 Geologia Local

As quatro áreas estudadas apresentam características geológicas particulares. Na área de estudo da região de Orós foram descritos regionalmente metatexitos e diatexitos com flogopita-sillimanita e xistos grafitosos subordinados, e rochas calcisilicáticas do Complexo Neneândia (Figura 12A). Estas unidades foram mapeadas durante trabalhos de campo. Nos metatexitos os leucossomas são compostos por albita granito±granada. Existem texturas porfiroblásticas marcadas por k-feldspatos. Quando em contato com zonas de cisalhamento os metatexitos ocorrem milonitizados. Por outro lado, os mesossomas são compostos por rochas anfíbolíticas. Os diatexitos são formados por cristais de plagioclásio em textura pegmatítica.

As rochas calciosilicáticas ocorrem em contato com os diatexitos. Por outro lado, grafitas maciças ocorrem na forma de lentes em contato discordante com xistos grafitosos (Figura 13C). Estes aparecem como corpos métricos e são finamente bandados (Figura 13D). Os afloramentos de xistos grafitosos ocorrem na área, como afloramentos métricos com grafita disseminada ao longo do plano de foliação (Figura 13E). Os xistos grafitosos possuem foliação paralela a direção da N45E da Zona de Cisalhamento Senador Pompeu, e cinemática dextral.

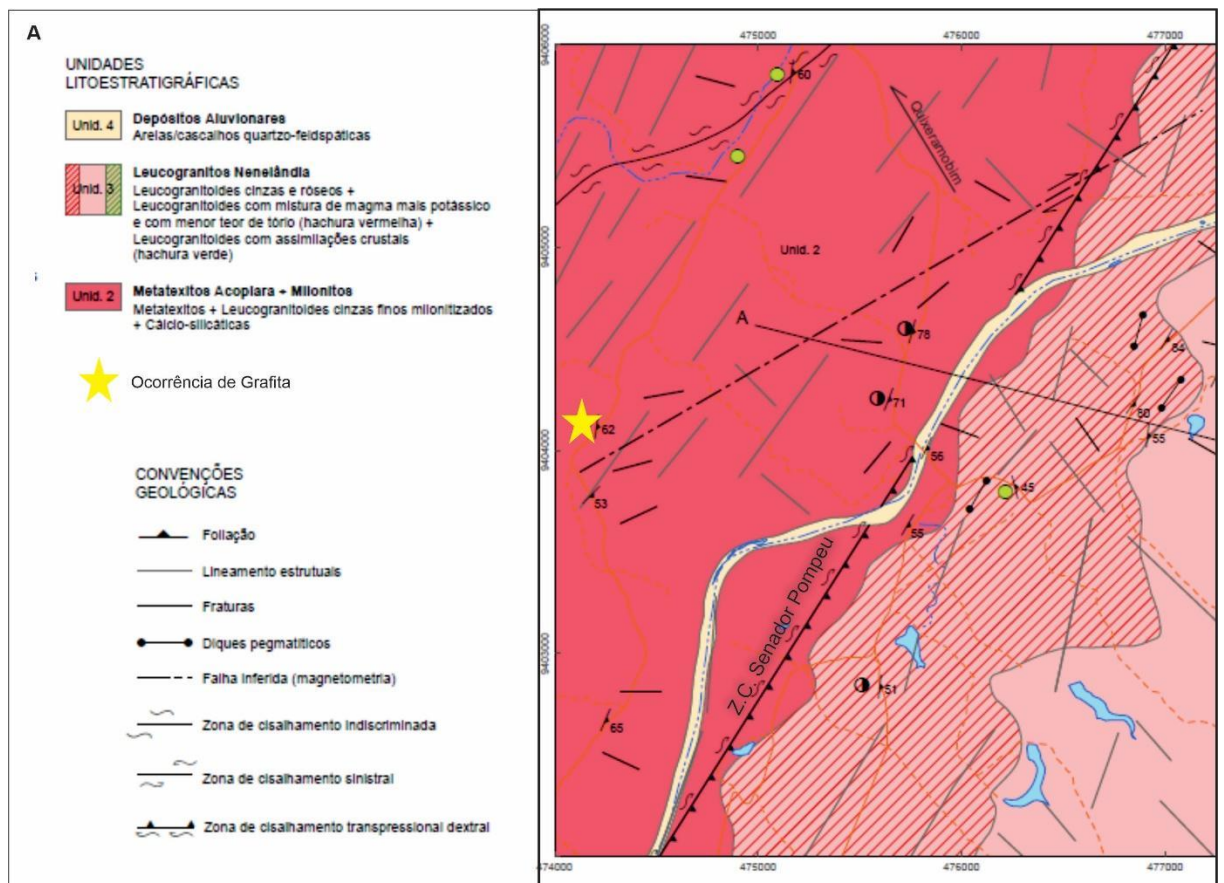


Figura 12A. Mapa geológico da região de Senador Pompeu (amostra e SEP-01). Modificado de Maciel (2018).

Na região de Canindé e Sobral, ocorrem mármores e mármores grafitosos que ocorrem intercalados com metatexitos do Complexo Independência (Figura 12B). Os afloramentos de

mármoreos possuem 0.5 a 1m de espessura, e formam lentes decimétricas a métricas verticalizadas. (Figure 13A). O mapeamento destes corpos revelou que estes estão paralelos à Zona de Cisalhamento Vazantes, de direção N-S Estes afloramentos se caracterizam pela ocorrência de grafitas em forma de bandas escuras, intensamente deformadas (Figura 13B). Em adição, o reconhecimento inicial das grafitas em campo se deu devido a sua baixa dureza e cor do traço.

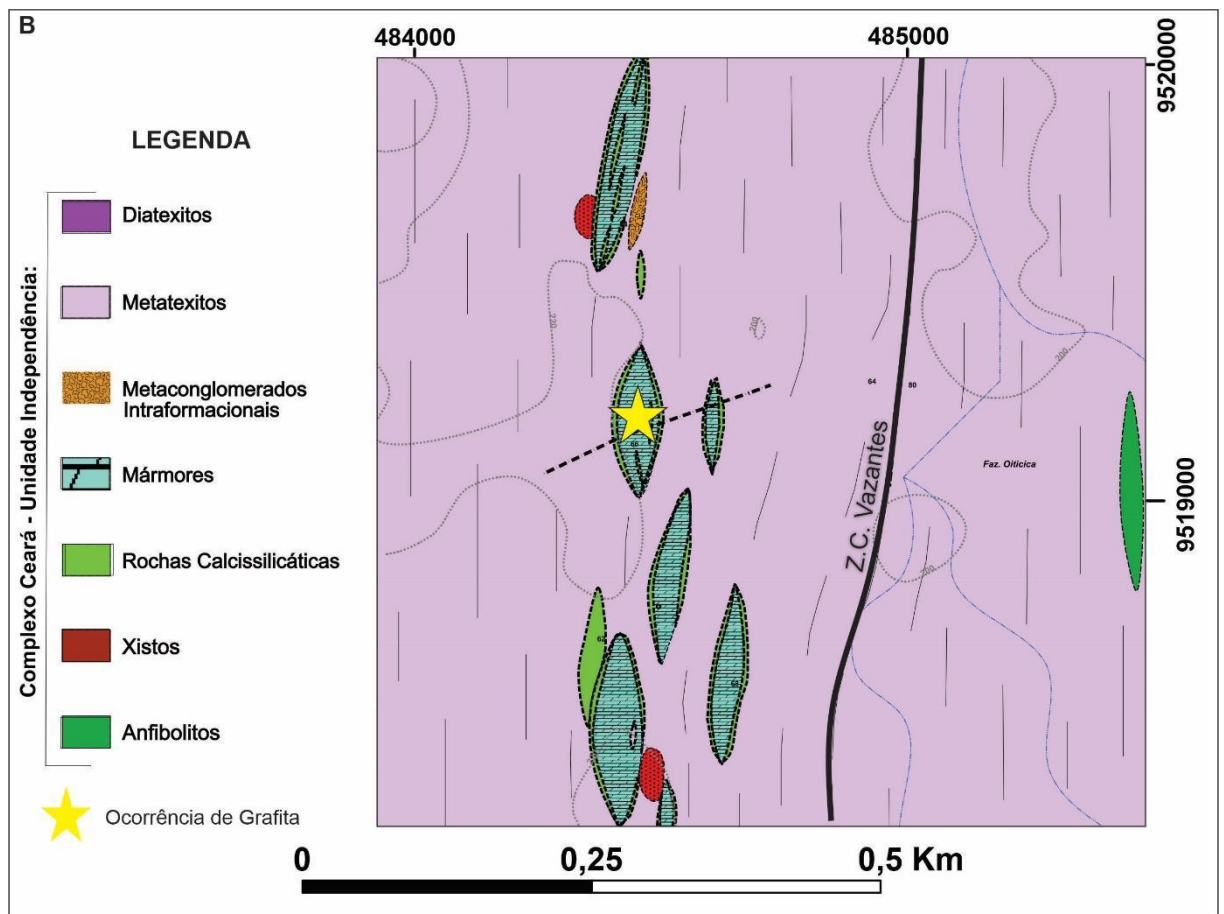


Figura 12B. Mapa geológico da região de Canindé (amostras SEP-01 e DCD-03).

Modificado de Aquino (2018).



Figura 13. Feições de campo dos afloramentos estudados. A) mármore grafítico da região de Canindé. B) Amostra de mármore carbonático da região de Canindé. C) Lente de grafita em contato discordante com xisto grafítico da região de Orós. D, E) Xisto grafítico da região de Orós.

4.2 Petrografia

As seções delgadas dos mármore grafíticos, apresentaram a ocorrência de grafitas disseminadas na calcita, quartzo e plagioclásio (Figuras 14A, B, C). Calcita é o mineral mais abundante na seção delgada (90%). Os outros 10% são formados por quartzo, plagioclásio, biotita e grafita. Os grãos de calcita possuem textura média a grossa e

ocorrem na forma de grãos subedrais, com contato serrilhado com biotita, quartzo e grafita (Figura 4A, B)

Flogopita e biotita ocorrem como grãos lamelares e definem a foliação da rocha. Os grãos são incolores com pleocroísmo róseo com inclusões de zircão ou apatita (Figura 14C). Quartzo e plagioclásio ocorrem como grãos anedrais com baixo relevo. Estes, ocorrem bordejando os grãos de calcita (Figura 14D). O quartzo aparece com extinção ondulante devido ao metamorfismo.

A grafita possui relevo alto e é opaca. A maioria dos grãos ocorre disseminada na calcita, quartzo e plagioclásio. A grafita ocorre como grãos anedrais, algumas grafitas ocorrem na forma de grafita flake, com textura mais grossa e grão em forma subédrica (Figuras 14E, G, H)

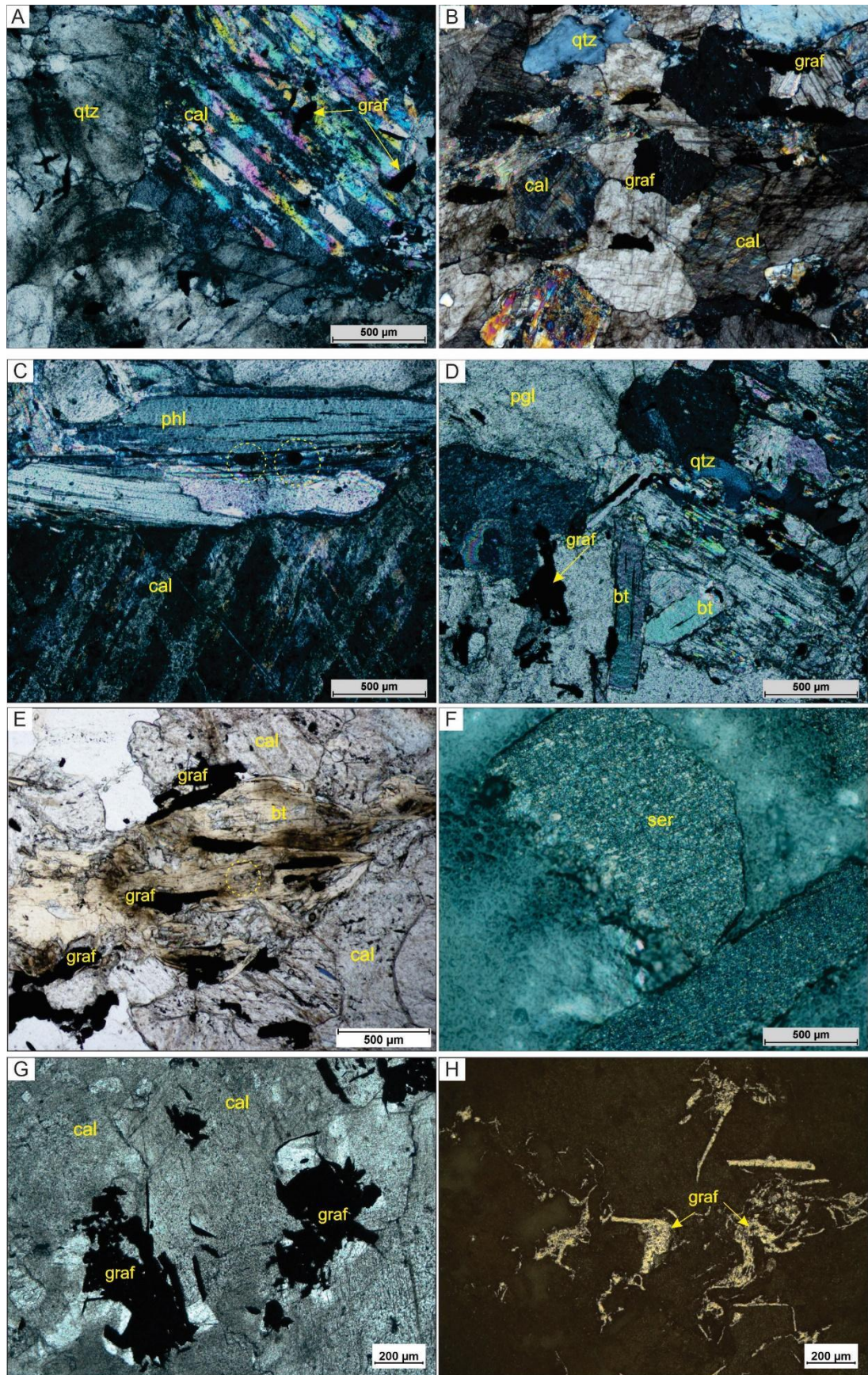


Figura 14. fotomicrografias dos mármore grafíticos da região de Canindé. A, B)

Calcita subedral em contato com quartzo com grafita disseminada. C) Contato serrilhado entre flogopita e calcita. D) Grãos de grafita disseminados na calcita e plagioclásio. E) Grãos de grafita disseminados na biotita. F) Alteração sericitica nas amostras. G, H) Grafita subédrica com textura mais grossa na forma flake.

As seções delgadas de xistos grafitosos exibiram uma associação mineral formadas por actinolita-tremolita, quartzo, plagioclásio, biotita, muscovita e grafita. Os cristais de actinolita-tremolita são incolores a verdes e apresentam alto relevo, ocorrem como grãos prismáticos e alongados que definem a foliação (Figura 15A). Também são observados minerais ricos em óxido-hidróxidos de Fe nas bordas da actinolita-tremolita que são atribuídos a expulsão do Fe da estrutura dos anfibólios por processos hidrotermais (Figuras 15A, B, C).

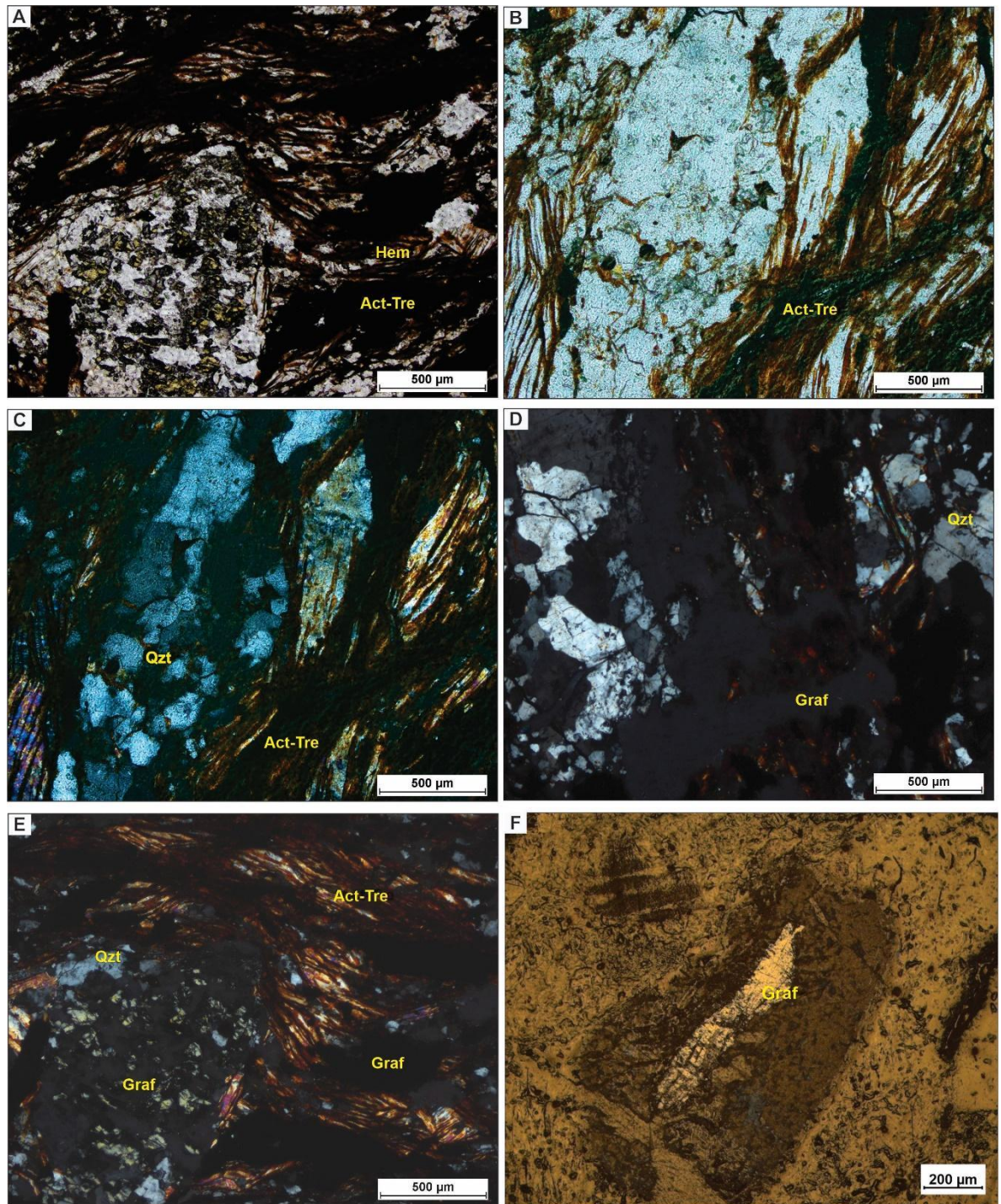


Figura 15. Fotomicrografias de Xistos grafitosos estudados. A) Actinolita-tremolita em cristais alongados com hematita na borda do cristal. B, C) Actinolita-tremolita com quartzo, definindo o plano de foliação da amostra. D, E) Grafita disseminada na amostra com actinolita-tremolita definindo o plano de foliação. F) Grafita na forma flake em luz refletida.

A ocorrência de actinolita-tremolita é um indicador mineral de provável fácies anfibolito e sugere condições de alta T e P. Quartzos ocorrem com extinção ondulante e exibem textura *cheessboard* (Kruhl, 1996). Que também sugere deformação e processos metamórficos em alta T e P (Figura 15C, D). O plagioclásio ocorre na forma de grãos anedrais e aparecem rotacionados com grãos de biotita na borda. A biotita e a muscovita ocorrem como grãos alongados e prismáticos em forma subedral definindo a foliação da rocha. Ainda ocorrem inclusões de zircão e apatita. A Grafita ocorre disseminada na actinolita-tremolita acompanhando o plano de foliação (Figura 15E) e em grãos na forma *flake*, e é caracterizada pela alta refletividade em luz refletida (Figura 15F).

4.3 Caracterização por DRX

As amostras estudadas revelaram através da análise por DRX uma associação mineral composta por grafita, quartzos, calcita e muscovita. Todas estas interpretações estão de acordo com as descrições petrográficas. Em todas as amostras, o pico da grafita possui 2θ em 31.5° e $d_{002}(\text{\AA})$ em 3,35 angstrom em média. Em adição, foram interpretados quartzos no mesmo pico coexistindo com o pico de grafita (Figura 16A, B, C). Picos secundários em 1,41 angstrom, em menor proporção, também foram identificados e reforçam a interpretação mineral para grafita. Somente a amostra da região de Sobral-Forquilha (DCD-03) apresentou pico singular de grafita com d° em 3,35 angstrom (Figura 16C), sugerindo bom arranjo estrutural na amostra analisada.

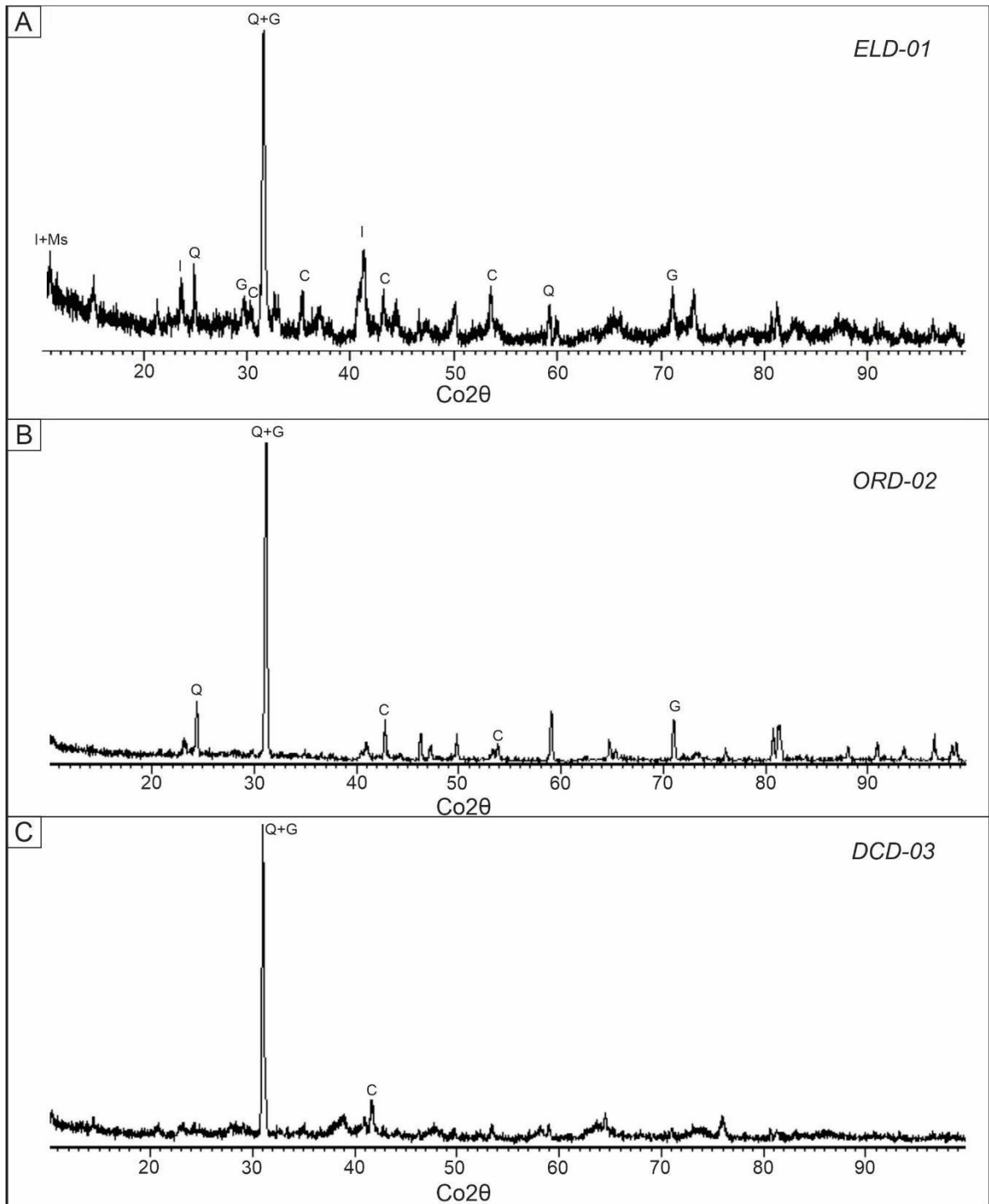


Figura 16. Difrátogramas das amostras de grafita. A) Amostra de grafita de Senador Pompeu (ELD-01 = SEP-01). B) Amostra de grafita de Orós (ORD-02). C) Amostra de grafita de Sobral-Forquilha (DCD-03).

4.4 Espectroscopia Raman

Os espectros Raman nas amostras analisadas estão apresentados na Figura 17. Foram identificados três picos no espectro Raman. O pico D1 em *ca.* 1316cm^{-1} enquanto o pico G possui *ca.* 1577cm^{-1} . O pico D2 em *ca.* 1610cm^{-1} . Em todos os espectros foram identificados os picos D1 e G, o pico D2 não foi identificado na amostra ORD-02 (Figura 17C). A ausência do pico D2 na amostra da região de Orós (ORD-02) impossibilitou o cálculo de paleotermometria nessa amostra. Os picos D1 e D2 estão principalmente relacionados a defeitos na estrutura cristalina da grafita e estes picos tendem a ser menores à medida que aumenta o ordenamento estrutural em função do aumento de T. O pico G está relacionado ao alto ordenamento da estrutura da grafita e tende a aumentar à medida que aumenta a cristalinidade da grafita. Para identificação e quantificação dos picos foram calculadas as temperaturas de pico metamórfico nas amostras analisadas.

As análises por espectroscopia Raman revelaram T em 585°C para a amostra de Sobral-Forquilha (DCD-03) E 513°C para a amostra de Senador Pompeu (SEP-01). A partir destas temperaturas foi inferida condições metamórficas na fácies anfíbolito. Os dados de Raman estão discriminados na tabela 3.

Tabela 3. Valores de $d_{002}(\text{Å})$ e picos característicos da espectroscopia Raman para as amostras investigadas.

Amostra	$d_{002}(\text{Å})$	D1	G	D2	R2	T $^{\circ}\text{C}$
DCD-03	3.35	12012,5	26727,3	56856,0	0,1256	585

SEP-01 = ELD-01	3.34	28745,0	60713,0	10980,0	0,2861	513
CAN-01	3.34	1314,24	1579,47	1613,01	0,2916	511
ORD-02	3.35	-	-	-	-	-

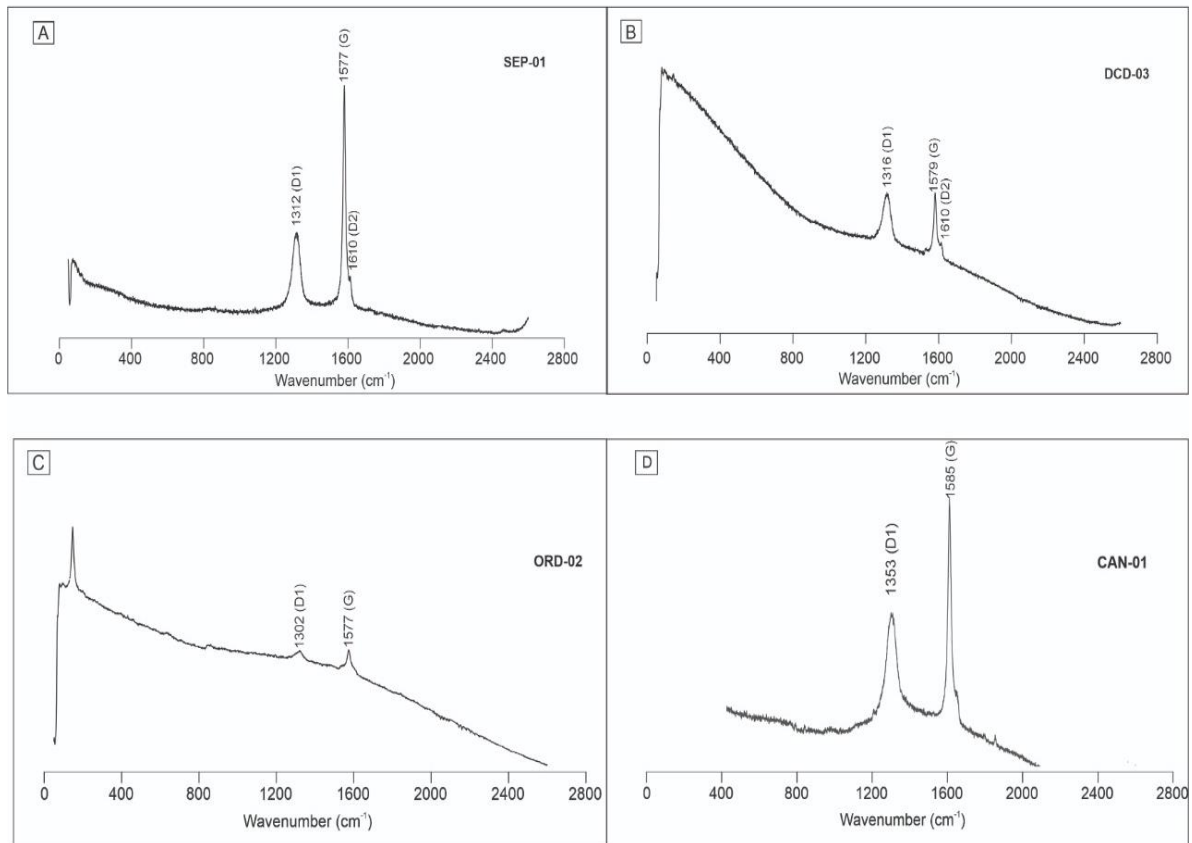


Figura 17. Espectros Raman para as amostras estudadas. A) Amostra de grafita de Senador Pompeu (ELD-01 = SEP-01). B) Amostra de grafita de Sobral-Forquilha (DCD-03). C) Amostra de grafita da região de Orós (ORD-02). D) Amostra de grafita da região de Canindé (CAN-01). As amostras detectam defeitos na estrutura cristalina das grafitas com a presença dos picos D1 e D2.

5 DISCUSSÃO

Paleotermometria e Evolução Metamórfica

A partir das observações petrográficas e mineralógicas pode-se argumentar que as unidades metassedimentares dos Complexos Nenelândia e Independência atingiram condições metamórficas da fácies anfibolito. Os dados de paleotemperatura obtidos por espectroscopia Raman são condizentes com a associação mineral observada na petrografia, com ocorrência de anfibólios tipo actinolita-tremolita. A tabela 4, sumariza os estágios de evolução metamórfica observados nas amostras e indica a paragênese mineral, a partir da petrografia. Nesta proposta a fase progradada do metamorfismo é caracterizada pela presença de biotita (flogopita) grafita e actinolita-tremolita. Nesta proposta a grafita estaria registrando condições de pico metamórfico durante o ciclo brasileiro (~ 630 Ma). Já o estágio retrógrado é marcado pela formação de muscovita, sericita, calcita e hematita, formados em condições de temperatura mais baixa, e podem ainda marcar evento hidrotermal tardio. Na região de Sobral-Forquilha ocorre retroeclogitos reportados por Cavalcante (2021) que sugere condições na fácies anfibolito sucedendo o estágio de alta pressão da fácies eclogito com condições termobarométricas calculadas em 770°C e 17.3Kbar (Santos et al., 2009). O valor obtido de 585°C para a amostra da região de Sobral-Forquilha em grafita marca este estágio de pós-pico descompressional argumentado por Cavalcante (2021).

Tabela 4. Paragênese mineral e proposta de evolução metamórfica das amostras estudadas

Rocha	Associação mineral	Estágio progrado	Estágio retrógrado	Forma da grafita
Mármore grafitoso	Cal+qtz+ms+bt phl+graf+ser	Pl+graf	Phl+ms+ser+cal	Disseminado Flake
Xisto grafitoso	Act-tr+qtz +ms+graf+hem	Act-tr	Hem	Disseminado Flake Hexagonal

Gênese das Grafitas do Domínio Ceará Central

Em relação à gênese e origem destas grafitas estudadas, sugere-se que estas são provenientes do metamorfismo de matéria orgânica depositadas previamente antes do metamorfismo por processos sedimentares.

Aplicabilidade Tecnológica das grafitas estudadas para a indústria do Grafeno

O aparecimento dos picos D1 e D2 no Raman, que refletem defeitos na estrutura cristalina devido a baixos valores de temperatura. Não obstante a ocorrência de grafita na forma anedral evidenciada na petrografia é condizente com os defeitos na estrutura cristalina. De acordo com Rantitsch et al. (2016) o aumento da temperatura, pressão e estiramento tectônico transformam o meta-antracito em grafita. Sob condições metamórficas da fácies anfíbolito o espectro Raman de grafitas tende a apresentar uma feição simétrica do pico G, enquanto os picos D1 e D2 tendem a desaparecer do espectro (Rantitsch et al., 2016). Em comparação visual, a amostra da região de Senador Pompeu (SEP-01) apresentou pico G

simétrico e com maior intensidade que os picos D1 e D2 o que sugere maior cristalinidade nesta amostra. Não obstante, a ausência do pico D2 na amostra da região de Orós (ORD-02; Figura 17C) e a alta simetria cristalográfica evidenciada no difratograma da amostra (Figura 16B) também sugerem uma maior cristalinidade desta amostra. A amostra da região de Sobral-Forquilha apresentou a maior simetria cristalográfica (Figura 16B), e baixa amplitude do pico G (Figura 17B) e a evidência petrográfica da grafita na forma flake (Figura 15F) nessa mesma amostra, que sugere uma maior cristalinidade, e portanto, boa aplicação na indústria do grafeno.

As observações petrográficas de grafitas na forma flake, bem como na forma hexagonal, sugerem alguns intervalos com maior presença de minerais com alto arranjo cristalino, especialmente nas amostras da região de Sobral-Forquilha. As demais amostras apresentaram picos D1 e D2 na estrutura o que sugere a preservação de defeitos na estrutura cristalina dessas amostras. Inagaki (2013) mostra como o aumento de temperatura influencia na feição do pico G nos espectros Raman. O autor realiza um aquecimento sequencial em amostras de pristino e até atingir valores de temperatura de 2800°C e destaca o aumento do pico G e desaparecimento do pico D1. Os valores do espaço intercristalino obtidos nas amostras analisadas sugerem valores médios de d_{002} (Å) de 3.35 Å o que indica que as amostras analisadas são grafitas verdadeiras e não semi-grafitas. Esta caracterização mineral sugere que as grafitas estudadas apresentam potencial favorável na utilização na indústria do grafeno.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, pode se afirmar que:

- 1) As unidades grafitosas dos Complexos Nenêlandia e Independência estão registrando condições metamórficas da fácies anfibolito após um estágio descompressional que atingiu condições metamórficas da fácies eclogito-granulito.
- 2) As amostras de grafita analisadas, apresentaram bom potencial de aplicabilidade na indústria com base na estrutura cristalográfica destas amostras, com baixo pico/ausência D1 e D2 e um pico G de alta simetria, classificação como grafita verdadeira devido aos valores de $d_{002}(\text{Å})$, e a feição textural na forma flake.
- 3) As amostras investigadas da região de Orós são de natureza orgânica e sedimentar e foram formadas por metamorfismo regional de materiais grafitosos ricos em matéria orgânica, enquanto as grafitas da região de Sobral-Forquilha e Canindé possuem além da origem orgânica/sedimentar uma influência hidrotermal na sua gênese.

Agradecimentos

As autoras agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pela concessão da bolsa de mestrado da primeira autora. Os autores são gratos ao Laboratório de Espectroscopia Vibracional do Departamento de Física da UFC e ao Laboratório de Raios-X da UFC pela infraestrutura analítica concedida para realização desta pesquisa. As autoras agradecem aos revisores anônimos pelas considerações realizadas na versão original desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B.; Fuck, R.A. Brazilian Structural Provinces: an introduction. *Earth Sciences Reviews*, v. 17, p. 1-29, 1981.

Beysac O., Goffé B., Chopin C., Rouzaud J.N. 2002. Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: A new geothermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 20(9):859-871

Caby, R., Arthaud, M.H. Major Precambrian nappes of the Brazilian Belt. Ceará, Northeast Brazil. *Geology*, 14, p. 871-874, 1986.

Dill, H.G. "The "chessboard" classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium." *Earth-Science Reviews* 100.1-4 (2010): 1-420.

Fetter, A.H.; Van Schmus, W.R.; Santos, T.J.S.; Arthaud, M.; Nogueira Neto, J.A. U-Pb and Sm-Nd geochronological constraints on the crustal evolution and basement architecture of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the existence of the paleoproterozoic supercontinent Atlantica. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, p. 102-106, 2000.

Fragomeni, P.R.P. Levantamento e estudo das ocorrências de grafita do Distrito Grafítico Araçoiaba-Baturité, CE. Tese, UERJ, Rio de Janeiro, 2011.

Neves, S.P. Proterozoic history of the Borborema province (NE Brazil): Correlations with

neighboring cratons and Pan-African belts and implications for the evolution of western Gondwana. *Tectonics* 22.4 (2003).

Rezende, L.C., Chaves, A.O., Ramos, S.L.L. Origin and metamorphism of graphite from Formiga, Minas Gerais (Brazil). *Brazilian Journal of Geology* 51 (2021).

Simandl G.J., Paradis S., Akam C. 2015. Graphite deposit types, their origin, and economic significance. In: Simandl G.J., Neetz M. (Eds.), *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings*. Victoria: British Columbia Geological Survey, p. 163-171

Tagiri M., Oba T. 1986. Hydrothermal syntheses of graphite from bituminous coal at 0.5–5 kbar water vapor pressure and 300–600°C. *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, 81(7):260-271

Van Schmus, W.R., Kozuch, M., Brito Neves, B.B. Precambrian history of the Zona transversal of the Borborema Province, NE Brazil: insights from Sm–Nd and U–Pb geochronology. *J. S. Am. Earth Sci.* 31, p. 227–252, 2011.

SANTOS, T. J. S. et al. Relics of eclogite facies assemblages in the Ceará Central Domain, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of West Gondwana. *Gondwana Research*, v. 15, p. 454–470. 2009.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, pode se propor que as unidades grafitosas do Complexo Independência e Nenelândia estão registrando a partir da análise espectroscópica condições metamórficas da fácies anfibolito. Esta assinatura metamórfica foi estabelecida após um estágio descompressional que atingiu condições metamórficas na fácies eclogito-granulito. As amostras analisadas da região de Orós e Canindé apresentaram melhor aplicabilidade na indústria do grafeno com base na estrutura cristalográfica, com baixo pico/ausência de D1 e D2 e um pico G de alta simetria. As amostras investigadas da região de Orós são de natureza orgânica e sedimentar e foram formadas por metamorfismo regional de materiais grafitosos ricos em matéria orgânica, enquanto as grafitas da região de Sobral-Forquilha e Canindé possuem além da origem orgânica/sedimentar uma influência hidrotermal na sua gênese. Sugere-se a partir desta dissertação a aplicação de mais testes em escala industrial tais como rota de processo nas grafitas de Canindé para confirmar sua aplicação e aproveitamento econômico para indústria do grafeno. Recomenda-se a aplicação de isótopos estáveis nas amostras para melhor aferição quanto a sua gênese e estudo sobre a matéria orgânica de idade Pré-cambriana.

REFERÊNCIAS

- AQUINO, J. M. **Caracterização do Minério de Mármore na Região do Domínio Ceará Central**. Trabalho de Conclusão de Curso, UFC, Fortaleza, 2017.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. **Brazilian Structural Provinces: an introduction**. Earth Sciences Reviews, v. 17, p. 1-29, 1981.
- ALMEIDA, A.R.; ULBRICH, H.H.G.J.; MCREATH, I. **O Batólito Quixadá: petrologia e geoquímica**. Revista de Geologia, Fortaleza, v.12, p. 29-52, 1999.
- AMARAL, W. S. **Integração de dados aerogeofísicos e geológicos e sua contribuição a evolução geodinâmica do domínio ceará central, província borborema**. 2007. 114 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- AMARAL, W. S. **Análise geoquímica, geocronológica e termobarométrica das rochas de alto grau metamórfico, adjacentes ao arco magmático de Santa Quitéria, NW da Província Borborema**. 2010. 248 p. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2010.
- AMARAL, W.S; KRAUS, R.K.; DANTAS, E.L.; FUCK, R.A.; PITOMBEIRA, J.P.A. **Sinistral reactivation of the Transbrasiliano Lineament: Structural and geochronological evidence in the Cariré Granulite Zone, Borborema Province - NE Brazil**. Journal of South American Earth Sciences, v. 79, p. 409 – 420, 2017.
- AMARAL, W.S., SANTOS, T.J.S. **Airborne geophysical na tectonics of the Ceará Central Domain eastern region of the Santa Quitéria magmatic arc, Borborema Province, NE Brazil**. Brazilian journal of geophysics, v. 26, p. 527-542, 2008.
- ARTHAUD, M. H. **Elementos de geologia estrutural**. Dep. Geologia, UFC, Apostila, Fortaleza, 122p, 1989.
- ARTHAUD, M. H. **Evolução Neoproterozoica do grupo Ceará - domínio central, NE Brasil: da sedimentação à colisão continental brasileira**. 2007. 132 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- ARTHAUD, M.H.; FUCK, R.A; DANTAS, E.L; SANTOS, T.J.S.; CABY, R.; ARMSTRONG, R. **The Neoproterozoic Ceara Group, Ceara Central domain, NE Brazil: Depositional age and provenance of detrital material**. New insights from U-Pb and Sm-Nd geochronology. Journal of South American Earth Sciences. p 1 – 15, 2014.
- BARNES, J. W. **Basic geological mapping. The geological field guide series**. 3 ed. John Wiley & Sons, 1995. P. 133.
- BEST M. G. **Igneous and metamorphic petrology**. Blackwell Science Ltd., 729 p, 2003.
- BRITO NEVES, B.B. **Regionalização Geotectônica do Pré-Cambriano Nordestino**.

Instituto de Geociências. 198 p. Universidade de São Paulo, Brazil, Doctoral thesis (unpublished), 1975.

BRITO NEVES, B. B. e CORDANI, U. G. **Tectonic evolution of South America during the late Proterozoic.** Precambrian Research. vol. 53, p. 23 – 40, 1991.

BUCHER, K; GRAPES R. **Petrogenesis of Metamorphic Rocks.** Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2011.

CABY, R., ARTHAUD, M.H. Major Precambrian nappes of the Brazilian Belt. Ceará, Northeast Brazil. **Geology**, 14, p. 871-874, 1986.

CASTRO, N. **Evolução geológica proterozóica da região entre Madalena e Taparuaba, Domínio Tectônico Ceará Central (Província Borborema).** 2004. 221 p. Dissertação (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

CAVALCANTE, J. C.; VASCONCELOS, A. M.; MEDEIROS, M. F.; PAIVA, I. P.; GOMES, F. E. M.; CAVALCANTE, S. N.; CAVALCANTE, J. E.; MELO, A. C. R.; DUARTE NETO, V. C.; BEVENIDES, H. C. **Mapa Geológico do Estado do Ceará –Escala 1:500.000.** Fortaleza, CPRM-SGB Serviço Geológico do Brasil, 2003.

De Wit, M., Jeffrey, M., Bergh, H., Nicolaysen, L. Geological map of sectors of Gondwana reconstructed to their disposition ca. 150Ma. **AAPG**, Tulsa, 2 sheets. 1988.

DAVIS, G. H.; REYNOLDS, S. J. **Structural geology of rocks and regions.** 2.ed, John Wiley, 776p, 1996.

DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. **Minerais constituintes das rochas.** CONDE, L.E.N. (trad.) Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 558p, 1966.

FETTER, A.M.; SANTOS T.J.S.; NOGUEIRA NETO, J.A.; VAN SCHMUS W.R. Geocronologia U/Pb em zircão e Sm/Nd em rocha total do estado do Ceará - Resultados iniciais. **In: Simp. Geol. do Nordeste.** 16. Atas... Recife, Bol. Núcleo Nordeste da SBG. 14: 418-422, 1995.

FETTER, A.H. **U-Pb and Sm-Nd Geochronological constraints on the crustal framework and geological history of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of Gondwana.** 1999. 164 p. Tese (*Ph.D.*) – Departamento de Geologia, Universidade do Kansas, Lawrence, KS – USA, 1999.

FETTER, A.H.; VAN SCHMUS, W.R.; SANTOS, T.J.S.; ARTHAUD, M.; NOGUEIRA NETO, J.A. U-Pb and Sm-Nd geochronological constrains on the crustal evolution and basement architecture of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the existence of the paleoproterozoic supercontinent Atlantica. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, p. 102-106, 2000.

FETTER, A. H.; SANTOS, T. J.; VAN SCHMUS, W. R.; HACKSPACHER, P. C.; BRITO NEVES, B. B.; ARTHAUD, M. H.; NOGUEIRA NETO, J. A.; WERNICK, E. **Evidence for Neoproterozoic continental arc magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of west Gondwana.** Gondwana Research, Japão, v. 6, n. 2, p. 265-273, 2003.

FOSSEN, H. **Geologia estrutural**. Tradução de Andrade, F.R.D. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

FRAGOMENI, P.R.P. **Levantamento e estudo das ocorrências de grafita do Distrito Grafítico Araçoiaba-Baturité, CE**. Tese, UERJ, Rio de Janeiro, 2011.

FRY, N. **The field description of metamorphic rocks. The geological field guide series**. John Wiley & Sons, 110 p, 1984.

FUJIMORI, S.; FERREIRA, Y. **A Introdução ao uso do microscópio petrográfico**. UFBA, Salvador, 202 p, 1987.

GANADE DE ARAUJO, C. E. G., CORDANI, U. G., WEINBERG, R. F., BASEI, M. A. S., ARMSTRONG, R., SATO, K. **Tracing Neoproterozoic subduction in the Borborema Province (NE-Brazil): Clues from U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf-O isotopes on granitoids and migmatites**. Lithos. p. 167-189. 18 maio 2014.

HEINRICH, E. W. **Identificación microscópica de los minerales**. GARCIA, E.M. (trad.), Ediciones URMO, Bilbao, 456p, 1970.

KLEIN, C.; HURLBUT JR., E. **Manual of mineralogy** (After J.D. Dana), 21 edition, revised, 596 p, 1998.

MACKENZIE, W. S; GUILFORD, C. **Atlas of rock-forming minerals in thin section**. Longman, 98p, 1980.

PASSCHIER, C. W.; MYERS, J. S.; KRONER, A. **Geologia de campo de terrenos gnaissicos de alto grau**. FIGUEIREDO, M.C.H. (trad.), Sao Paulo: Ed. da USP, 188p, 1993.

PASSCHIER, C. W.; TROUW, R.A.J. **MICROTECTONICS**. 2. ed. Hardcover: Springer Verlag, 2005. 366 p.

SANTOS, T. J. S., FETTER, A. H., HACKSPACHER, P. C., VAN SCHMUS, W. R. & NOGUEIRA NETO, J. A. Neoproterozoic tectonic and magmatic episodes in the NW segment of the Borborema Province, NE Brazil, during the assembly of the western Gondwana. **Journal of South American Earth Sciences**, 25, p. 271-284, 2007 (publicado em 2008).

THORPE, R. S; BROWN, G. C. **The field description of igneous rocks. The geological field guide series**. John Wiley & Sons, 154p, 1985.

TUCKER, M. E. **The field description of sedimentary rocks**. Open University, 2 ed., 115 p, 1996

VAN SCHMUS, W.R., BRITO NEVES, B.B., HACKSPACHER, P.C. AND BABINSKY, M. U-Pb and Sm-Nd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, NE Brazil: initial conclusions. **J. of S. American Earth Sciences**, 8(3/4): p. 267-288, 1995.

VAN SCHMUS, W.R., KOZUCH, M., BRITO NEVES, B.B. **Precambrian history of the geochronology**. **J. S. Am. Earth Sci.** 31, p. 227-252, 2011.

VERNON, R. H. **A Practical Guide to Rock Microstructure**. Cambridge University Press, p. 594, 2004.

WERNICK, E. **Rochas magmáticas: conceitos fundamentais e classificação modal, química, termodinâmica e tectônica**. UNESP, Rio Claro, 655 p, 2004.

WILSON, M. **Igneous petrogenesis**. Dep. of Earth Sciences, University of Leeds, Unwin Hyman, 466p, 1989.

YARDLEY, B.W.D. **Introdução à petrologia metamórfica**; tradução de Reinhardt Adolfo Fuck. Editora Universidade de Brasília, 2. ed. Revista, 2004. 432 p.

SANTOS, T. J. S. et al. **Relics of eclogite facies assemblages in the Ceará Central Domain, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of West Gondwana**. *Gondwana Research*, v. 15, p. 454–470. 2009.