

Universidade de São Paulo

Instituto de Geociências

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA DAS OCORRÊNCIAS
DE GRAFITA DO COMPLEXO CANINDÉ DO CEARÁ CENTRAL, ARIM TRÓIA-
PEDRA BRANCA, PROVÍNCIA BORBOREMA (CE)**

LUCAS BASSAN

Orientador: Professor Dr. Fábio Ramos Dias de Andrade (GMG – IGc - USP)

Co-orientador: Pesquisador em Geociências Me. Marcelo Januário de Sousa (SGB/CPRM)

Monografia de Trabalho de Formatura

São Paulo

2019

Universidade de São Paulo

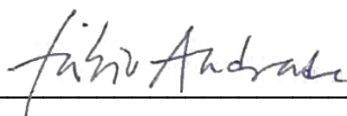
Instituto de Geociências

CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA DAS OCORRÊNCIAS
DE GRAFITA DO COMPLEXO CANINDÉ DO CEARÁ CENTRAL, ARIM TRÓIA-
PEDRA BRANCA, PROVÍNCIA BORBOREMA (CE)

Monografia de Trabalho de Formatura

(TF 19/22)

De acordo,



Professor Dr. Fábio Ramos Dias de Andrade

São Paulo

2019

*Este trabalho é dedicado aos meus ypykuéra que, me ensinaram de onde vim,
firmaram bem as raízes e deram autonomia para que eu decida aonde vou:*

Odília, Paulo, Judite, Moacir, Geraldo, Dé, Abílio, Horma e Milton.

Agradecimentos

Escrever os agradecimentos é uma tarefa difícil. Nomes brotam, outros somem, e sempre parece que acaba faltando alguém. Como o trabalho em questão marca o fim de um ciclo, acho importante agradecer a todos que tornaram possível que eu chegasse até aqui. Então, vou tentar.

Começando de trás pra frente: gostaria de agradecer ao SGB/CPRM por financiar este trabalho e pela oportunidade de estágio.

Em especial, gostaria de agradecer ao meu supervisor de estágio, orientador e amigo Marcelo Januário de Sousa por compartilhar comigo o seu conhecimento geológico, por sempre me aconselhar, me corrigir e me ajudar a melhorar meu trabalho. Aprendi demais contigo nesse último um ano e meio.

Gostaria de agradecer a todo o pessoal da CPRM que me ajudou (Vidyã, Francisco, Guilherme (Onça), e muitos outros), tirando dúvidas, enriquecendo discussões e ajudando na logística de viabilizar as análises do projeto. Ao Calipso e ao Rico por me ajudarem com o trabalho e me darem suas opiniões sempre que precisei. Ao Maurício Pavan por sempre estar disposto a me ajudar, tanto com os assuntos do TF quanto com os do estágio. Foi uma experiência ótima estagiar na CPRM.

Agradeço ao meu orientador professor Fábio Ramos Dias de Andrade, por ter topado desde o início fazer parte desse desafio e pelo suporte que me deu ao longo desse último ano. Também gostaria de agradecer a todo mundo que trabalha no IGc e dedicou parte do seu tempo de trabalho para me ajudar: Professor Renato de Moraes, pela ajuda com o metamorfismo. Ao Samuca, Zé Paulo, Isaac, todo o pessoal da química, Flávio do DRX, Marcos, Leandro e Paulinho da Microsonda, Fininho e Renato. Todos vocês foram muito importantes para que eu pudesse “fazer a coisa andar”. Agradecer ainda à todos os professores que me fizeram olhar pra geologia com outros olhos e me apaixonar: Adriana, Fred, Mário, Caetano e Ninguém.

Gostaria de agradecer ao professor Rômulo Augusto Ando do IQ pela ajuda e por me permitir usar a infraestrutura do laboratório para as análises de Raman.

Não teria chegado ao TF se não fosse por alguns amigos que sempre me deram força. Cada um em um momento e ao seu jeito me ajudou a não “saltar de banda” e continuar a graduação: Kibinho lindo do meu coração, Ana Porto, Samara, Piroto, Bibifa, Dani, Teitei, Bibizinha, Bongô. É muito bom que, num lugar tomado pela competitividade, como é a universidade, a gente tenha podido olhar pras necessidades uns dos outros e criar ambientes de ajuda mutua. Tenho certeza que nossa passagem ajudou a transformar o IGc num ambiente mais diverso,

menos elitista e menos conservador. A todos que lutam por um mundo mais justo e igual: muito obrigado.

Às minhas queridas Rafa e Narubia, por terem aparecido na minha vida e me acompanhado nas aventuras geológicas. Vocês me fazem sentir que estão sempre presentes, apesar de todo o tempo que a gente passa sem se ver. Com certeza, os campos que fizemos juntos foram importantes para me animar com a ideia de ser geólogo e conseguir “dar cabo” disso aqui.

À Mônica, minha companheira, por me tirar da pindaíba e me auxiliar na escalada das montanhas de mim mesmo, por me dar força, apoio, motivação. Por todo o mate compartilhado nas horas de trabalho intenso e de descanso. Te agradeceria, ainda, por uma infinidade de outros motivos que não podem e nem devem ser expostos aqui.

“Mbae’epe pesekar?”, e’i, na semiekara kuabe’yma ruã.

N’a’eî xe rekorama kuapa ranhẽ.

Diálogo construído a partir de Catecismo na lingoa brasilica (de Araujo, 1618)

“Adeus, adeus, toma adeus, que eu já vou-me embora

Eu morava no fundo d’água, não sei quando eu voltarei

Eu sou canoeiro.

Eu não moro mais aqui, nem aqui quero morar.

Ô beira mar, adeus dona,

Adeus riacho de areia.

Moro na casca da lima, no caroço do juá.

Ô beira mar, adeus dona,

Adeus riacho de areia”

Canto popular do vale do Jequitinhonha

“Nada é mais real que aprender maneira simples de viver”

Canção de Almir Sater

“Vou me encontrar

Longe do meu lugar

Eu, caçador de mim”

Canção de Milton Nascimento

RESUMO

O presente trabalho consiste na caracterização mineralógica e petrográfica da grafita presente nos paragneisses migmatíticos do Alvo Pedra Preta, no Complexo Canindé do Ceará Central. As amostras, pertencentes ao SGB/CPRM no âmbito do Projeto Grafita Brasil, foram analisadas em microscopia óptica, espectroscopia Raman, difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura. A grafita ocorre como cristais euédricos e lamelares, de seção basal hexagonal, compondo a foliação da rocha, com granulação variando de *fine flake* a *extra large flake* (0,02 a 1,5 mm), frequentemente associados e intercrescidos com biotita. Os cristais apresentam superfície lisa a pouco fraturada e bordas bem definidas. A espectroscopia Raman revelou grafita de alta qualidade cristalina, com a banda da desordem (D1) inexistente ou de intensidade inferior a banda da ordem (G). No estudo foi possível constatar a influência da preparação das amostras, em especial do polimento, sobre os resultados obtidos. A paragênese mineral indica condições de pico metamórfico com temperatura entre 700 e 805°C e pressão entre 4,0 e 9,1 kbar. Temperaturas estimadas com base em espectroscopia Raman e difração de raios X da grafita atingem $676 \pm 30^{\circ}\text{C}$ (temperatura mínima) e 770°C , respectivamente. Assim, as ocorrências de grafita no Complexo Canindé do Ceará Central constituem interessantes alvos exploratório para pesquisa mineral, uma vez que a grafita ali presente é de elevado grau de cristalinidade, comparável ao encontrado nas minas brasileiras em produção. Além de possuir a maior parte dos *flakes* nas granulações *large* e *extra large flake*, que são as de maior valor comercial.

Palavras Chaves: Grafita, Complexo Canindé do Ceará Central, ARIM Tróia - Pedra Branca, Espectroscopia Raman, Geotermometria.

ABSTRACT

The presente work consists of mineralogical and petrographic characterization of graphite hosted in the Alvo Pedra Preta's migmatitic paragneisses, in the Canindé do Ceará Central complex. The samples belongs to the Grafita Brasil Project of SGB/CPRM and has been analyzed under optical microscopy, Raman spectroscopy, X-Ray diffraction, and scanning electron microscopy. The graphite occurs associated with biotite on the rock xistosity as euhedral lamellar crystals with hexagonal basal section and granulation varying since fine flake until extra large flake (0,02 a 1,5 mm). The graphite crystals have a flat and non fractured surface. Raman spectroscopy has reveald a graphite with high cristaline quality as shown by height of the D1 band peak always smaller than the G band peak. In this study was possible to see the destructive influence of polishing the thin sections over the graphite quality. The mineral assembly indicate metamorphic peak conditions about 700-805°C of temperature and 4.0-9.1kbar of pressure. The minimun temperature obtained in the Raman spectroscopy is $676 \pm 30^{\circ}\text{C}$ and the temperature based in the X ray diffraction is 770°C . Therefore, the graphite occourences in the Canindé do Ceará complex constitute an intersting target to mineral exploration once the graphite hosted there has a high degree of cristallinity and can be comparable to the graphite of the brasilian mines in production. Besides that, the large and extra large grain size of graphite flakes has the highest price in the graphite market.

Keywords: Graphite Mineralization, Canindé do Ceará Central Complex, Raman Spectroscopy, geothermometry.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
2. LOCALIZAÇÃO	2
3. OBJETIVO	4
4. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA	4
4.1 Aspectos Geológicos e Econômicos da Grafita	4
4.2 Síntese Geológica Regional	11
5. MATERIAIS E MÉTODOS	18
5.1 Caracterização Petrográfica	18
5.1.1 Análise em Lupa de Mesa	18
5.1.2 Microscopia Óptica	19
5.2 Caracterização Mineralógica	22
5.2.1 Espectrometria Raman	22
5.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura	27
5.2.3 Difração de Raios X	27
5.3 Modelo de Teores	28
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
6.1 Petrografia da Rocha Hospedeira	28
6.2 Caracterização Petrográfica da Grafita	37
6.3 Espectrometria Raman	43
6.4 Microscopia Eletrônica de Varredura	50
6.5 Difração de Raios X	52
6.6 Modelo tridimensional da mineralização	54
6.7 Metamorfismo e evolução tectônica	57
7. CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXO 1: COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DAS ROCHAS ESTUDADAS – RESULTADO DA ANÁLISE PETROGRÁFICA	74
ANEXO 2: ASPECTOS DEFORMACIONAIS E DE ASSOCIAÇÃO DOS FLAKES DE GRAFITA	77
ANEXO 3: DIMENSÕES E MORFOLOGIA DOS FLAKES DE GRAFITA	78

ANEXO 4: DADOS OBTIDOS NA TERCEIRA ETAPA DE ESPECTROSCOPIA RAMAN, PARÂMETROS CALCULADOS E TEMPERATURAS ESTIMADAS PARA CADA MEDIDA REALIZADA.....	79
ANEXO 5: MODELO ESQUEMÁTICO DA DISPOSIÇÃO DOS LITOTIPOS E TEORES NO ALVO PEDRA PRETA.....	82
ANEXO 6: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS FUROS DE SONDAGEM EXECUTADOS NO ALVO PEDRA PRETA.....	83

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: LOCALIZAÇÃO DAS FOLHAS 1:250.000 QUE POSSUEM INDÍCIOS, OCORRÊNCIAS, GARIMPO OU MINAS DE GRAFITA NO BRASIL (SOUSA E MATOS, NO PRELO).....	2
FIGURA 2: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E DISPOSIÇÃO DOS FUROS DE SONDAGEM. OS FUROS EM AMARELO APRESENTARAM INTERSECÇÕES DE GRAFITA.....	3
FIGURA 3: PRINCIPAIS TIPOS DE GRAFITA NATURAL COMERCIALIZADOS ATUALMENTE (MODIFICADA DE SIMANDL <i>ET AL.</i> , 2015).....	6
FIGURA 4: PRINCIPAIS TIPOS DE GRAFITA NATURAL COMERCIALIZADOS ATUALMENTE: A- IMAGEM DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DE GRAFITA TIPO “AMORFA”; B- IMAGEM MEV DE GRAFITA TIPO FLAKE; C- FOTOGRAFIA DE VEIO DE GRAFITA (<i>LUMP GRAPHITE</i>) DO SRI LANKA (GRAPHENE MARKET, 2019; SAINT JEAN CARBON, 2019).....	7
FIGURA 5: PRINCIPAIS CONTEXTOS GEOLÓGICOS E MODELOS GENÉTICOS PARA AS MINERALIZAÇÕES DE GRAFITA (SOUSA E MATOS, NO PRELO).	7
FIGURA 6: MAIORES PRODUTORES MUNDIAIS DE GRAFITA DE 2014 A 2018 (CONSTRUÍDO COM DADOS DE USGS (2015; 2017; 2019)).....	10
FIGURA 7: MAIORES RESERVAS MUNDIAIS DE GRAFITA DE 2014 A 2018, POR PAÍS (CONSTRUÍDO COM DADOS DE USGS (2015; 2017; 2019)).	10
FIGURA 8: A LOCALIZAÇÃO DA PROVÍNCIA BORBOREMA NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL (MODIFICADA DE SCHOBENHAUS E CAMPOS, 1984).	12
FIGURA 9: DIVISÃO DOS TERRENOS TECTONO-ESTRATIGRÁFICOS DA PORÇÃO NORTE DA PROVÍNCIA BORBOREMA - ZCP: ZONA DE CISALHAMENTO PERNAMBUCO; ZCSPII: ZONA DE CISALHAMENTO SOBRAL – PEDRO II; ZSPJ: ZONA DE CISALHAMENTO PIAUÍ - JOÃO CÂMARA; ZCRP: ZONA DE CISALHAMENTO RIACHO DO PONTAL; ZCSP: ZONA DE CISALHAMENTO SENADOR POMPEU; ZCT: ZONA DE CISALHAMENTO TAUÁ; ZCPA: ZONA DE CISALHAMENTO PATOS (CAMPELO, 2009).....	13
FIGURA 10: CONTEXTO GEOLÓGICO DA FOLHA QUIXADÁ (1:100.000) (ELABORADO A PARTIR DOS DADOS DE CPRM LEVANTADOS EM COSTA E PALHETA (2017)).	15
FIGURA 11: LÂMINAS PETROGRÁFICAS SOB LUZ REFLETIDA, APRESENTANDO AS FORMAS MORFOLÓGICAS DE OCORRÊNCIA DA GRAFITA. A: CRISTAIS TABULARES E SEÇÃO BASAL HEXAGONAL; B: CRISTAIS TABULARES COM BORDAS ESFARRAPADAS; C: FARRAPOS (FONTE: BELÉM, 2006)	20

FIGURA 12: CLASSIFICAÇÃO DO TAMANHO DOS <i>FLAKES</i> DE GRAFITA E INDICAÇÃO DOS USOS ADEQUADOS PARA CADA CLASSE (FIGURA DE SOUSA E MATOS, NO PRELO, BASEADA EM SCROGINS, 2015; RIBEIRO, 2016).....	21
FIGURA 13: EXEMPLO DE ESPECTRO RAMAN DE PRIMEIRA ORDEM DE MATERIAL GRAFITOSO COM A INDICAÇÃO DAS BANDAS G, D1 E D2. A INTENSIDADE E A ÁREA REGISTRADAS NESSAS POSIÇÕES SÃO USADAS PARA O CÁLCULO DOS PARÂMETROS R1 E R2 (ESPECTRO DE BEYSSAC ET AL., 2002).	23
FIGURA 14: EVOLUÇÃO ESQUEMÁTICA DE R1 EM FUNÇÃO DA DESORDEM. A RETA TRACEJADA DE DIVISÃO DA CURVA MARCA LIMITE ENTRE A GRAFITA NANOCRISTALINA E O CARBONO AMORFO (FERRARI, 2007).	25
FIGURA 15: ESPECTROS RAMAN DOS: (A) GGF (GRAFITA DE GRÃO FINO), SEM TRATAMENTO SUPERFICIAL E (B) HOPG (<i>HIGH ORDERED PIROLITIC GRAPHITE</i>) (RETIRADO DE AMARAL JUNIOR E BALDAN, 2017).....	26
FIGURA 16: FOTOGRAFIAS DOS EQUIPAMENTOS QUE CONSTITUEM O ESPECTRÔMETRO DE MICRO-RAMAN. A: MICROSCÓPIO ÓTICO EQUIPADO COM ESPECTRÔMETRO. B: <i>HELLIUM-NEON LASER</i>	26
FIGURA 17: FOTOGRAFIA DE AMOSTRAS (A) FC-R-18-1 E (B) FC-R-19-2.2, EXEMPLIFICANDO O ASPECTO ACINZENTADO DOS GRAFITA XISTOS, E FOTOMICROGRAFIAS DA LÂMINA PETROGRÁFICA FC-R-14B, EM (C) LUZ TRANSMITIDA, COM POLARIZADOR DESCRUZADO E (D) EM LUZ REFLETIDA, VISANDO DESTACAR A TEXTURA GERAL DA ROCHA. NOTAR OCORRÊNCIA DE GRAFITA INTERCRESCIDA COM BIOTITA.	29
FIGURA 18: FOTOGRAFIA DE AMOSTRAS (A) FC-R-14A, COM BANDAMENTO GNÁISSICO BEM DEMARCADO, E (B) FC-R-36-2, COM BANDAMENTO MAIS DIFUSO, E FOTOMICROGRAFIAS DA LÂMINA PETROGRÁFICA FC-R-36, EM LUZ TRANSMITIDA (C), COM POLARIZADOR DESCRUZADO E (D) EM LUZ REFLETIDA, VISANDO DESTACAR A TEXTURA GERAL DA ROCHA. NOTAR OCORRÊNCIA DE GRAFITA INTERCRESCIDA COM BIOTITA OU QUARTZO E FELDSPATO, SEGUINDO A ORIENTAÇÃO GERAL DA ROCHA.	30
FIGURA 19: FOTOGRAFIA DE AMOSTRAS: (A) FC-R-12-2 APRESENTANDO A ESTRUTURA NEBULÍTICA; (B) FC-R-15-2 COM ESTRUTURA DOBRADA; (C) FC-R-40, COM ESTRUTURA <i>SCHLIEREN</i> A ESTROMÁTICA E; (D) FC-R-30 COM ESTRUTURA VENULAR A <i>SCHLIEREN</i> . DESTAQUE PARA A HETEROGENEIDADE E VARIEDADES DE ESTRUTURAS QUE PODEM SER APRESENTADAS POR ESSE LITOTIPO.....	31

- FIGURA 20: FOTOMICROGRAFIAS DA LÂMINA PETROGRÁFICA (A) FC-R-10-2, EM LUZ TRANSMITIDA, COM POLARIZADOR DESCRUZADO E (B) EM LUZ TRANSMITIDA COM POLARIZADOR CRUZADO, VISANDO DESTACAR UMA DAS TEXTURAS MAIS COMUNS NESSE LITOTIPO, QUE APRESENTA BANDAMENTO METAMÓRFICO BEM DEMARCADO. EM C E D É APRESENTADA OUTRA FEIÇÃO TÍPICA, SEGREGAÇÃO EM BOLSÕES DE QUARTZO FELDSPATO. 33
- FIGURA 21: FOTOMICROGRAFIAS DA LÂMINA PETROGRÁFICA FC-R-10-2, EM LUZ TRANSMITIDA, COM POLARIZADOR DESCRUZADO (A) E EM LUZ TRANSMITIDA COM POLARIZADOR DESCRUZADO (B) VISANDO DESTACAR AS FORMAS DE OCORRÊNCIA DA FIBROLITA. 33
- FIGURA 22: FOTOMICROGRAFIAS DA LÂMINA PETROGRÁFICA FC-R-13, EM LUZ TRANSMITIDA, COM POLARIZADOR CRUZADO MOSTRANDO CRISTAL DE PLAGIOCLÁSIO COM GEMINAÇÃO POLISSINTÉTICA (MARCADA PELAS RETAS BRANCAS) EM *KINK BAND* (A) E SIMPLECTITOS ENTRE OS MINERAIS FÉLSICOS (B). 34
- FIGURA 23: FOTOGRAFIA DE AMOSTRAS FC-R-11 (A): LEUCOSSOMA GRANÍTICO ROSADO; FC-R-32 (B): HORIZONTE QUARTZO-FELDSPÁTICO COM *SCHLIEREN* DE GRAFITA XISTO; FC-R-14 (C), CONTATO DO LEUCOSSOMA ROSADO COM CAMADA DE GRAFITA XISTO; E FC-R-27 (D): LEUCOSSOMA DE COLORAÇÃO ESBRANQUIÇADA. 35
- FIGURA 24: FOTOMICROGRAFIAS DA LÂMINA PETROGRÁFICA FC-R-11, EM (A) LUZ TRANSMITIDA, COM POLARIZADOR DESCRUZADO (B) E CRUZADO, VISANDO DESTACAR A TEXTURA GERAL DA ROCHA. 36
- FIGURA 25: FOTOMICROGRAFIAS DA LÂMINA PETROGRÁFICA FC-R-39, EM LUZ TRANSMITIDA, COM POLARIZADOR (A) DESCRUZADO (B) E CRUZADO, VISANDO MOSTRAR OS AGLOMERADOS DE MICROCLÍNIO COM PRESENÇA DE *MELT* NO INTERCRISTAIS. 36
- FIGURA 26: MICROTOGROFIAS DA LÂMINA PETROGRÁFICA FC-R-11, EM (A) LUZ TRANSMITIDA, COM POLARIZADOR DESCRUZADO E (B) CRUZADO, VISANDO MOSTRAR OS AGLOMERADOS DE MS+BT+SIL+GR. OPACOS PLACÓIDES SÃO GRAFITA. 37
- FIGURA 27: HISTOGRAMAS E INDICADORES ESTATÍSTICOS DAS MEDIDAS DE COMPRIMENTO E LARGURA DOS *FLAKES* DE GRAFITA, SEPARADOS POR TIPO DE ROCHA HOSPEDEIRA, EM A E B SÃO APRESENTADOS OS RESULTADOS PARA OS XISTOS, EM C E D, DOS GNAISSES E EM E F, DOS *FLAKES* ENCONTRADOS NO LEUCOSSOMA. NOTAR A CONCENTRAÇÃO DE VALORES MUITO BAIXOS NO LEUCOSSOMA (E E F), COMO TAMBÉM, DE VALORES ANÔMALOS (*OUTLIERS*). 38
- FIGURA 28: FOTOMICROGRAFIAS DA LÂMINA PETROGRÁFICA DA TIPOLOGIA XISTO (FC-R-14B), ILUSTRANDO AS DIFERENÇAS ESTRUTURAIS APRESENTADAS PELA GRAFITA. EM (A), SOB LUZ REFLETIDA, SÃO MOSTRADOS *FLAKES* DE GRAFITA BEM FORMADOS, COM GEOMETRIA TABULAR,

EM CRISTAIS LAMELARES (LINEARES). EM (B) É APRESENTADA UMA FOTOMICROGRAFIA, EM LUZ TRANSMITIDA DE UMA FIGURA DE INTERFERÊNCIA TIPO 3, EM LAÇO (RAMSEY E HUBER, 1987) DESTACADA PELA DEFORMAÇÃO DOS CRISTAIS DE BIOTITA E GRAFITA.	39
FIGURA 29: FOTOMICROGRAFIA DA LÂMINA PETROGRÁFICA DA TIPOLOGIA GNAISSE (FC-R-09-2), EM LUZ TRANSMITIDA COM POLARIZADOR DESCRUZADO, VISANDO DESTACAR A FORMA DE OCORRÊNCIA DA GRAFITA, EM AGLOMERADOS DE CRISTAIS MAIORES QUE A GRANULAÇÃO <i>EXTRA LARGE FLAKE</i>	40
FIGURA 30: FOTOMICROGRAFIA DA LÂMINA PETROGRÁFICA DA TIPOLOGIA GNAISSE (FC-R-28), SOB LUZ REFLETIDA. DESTAQUE PARA OS <i>FLAKES</i> DE GRAFITAS EM FARRAPOS (CÍRCULO VERMELHO) E TABULARES COM BORDAS ESFARRAPADAS (CIRCULADO EM AZUL) CONVIVENDO JUNTAS.	40
FIGURA 31: FOTOMICROGRAFIAS DA LÂMINA PETROGRÁFICAS DA TIPOLOGIA GNAISSE (FC-R-09-2), VISANDO DESTACAR A DIFERENÇA MORFOLÓGICA E TEXTURA E GRANULOMÉTRICA ENTRE A GRAFITA QUE OCORRE ASSOCIADA À BIOTITA E A QUE OCORRE ASSOCIADA AO QUARTZO. AS PRIMEIRAS APRESENTAM-SE FORTEMENTE ORIENTADAS, COM GRANULAÇÃO MAIS FINA (ENTRE 0,1 E 0,2 MM) E CONTORNOS NÃO LINEARES (LEVEMENTE SERRILHADOS). QUANDO OCORREM EM MEIO AO QUARTZO, OS CRISTAIS SÃO BEM FORMADOS, COM BORDAS LINEARES E GRANULAÇÃO RELATIVAMENTE MAIS GROSSA (DE 0,3 A 0,5 MM). LUZ TRANSMITIDA EM A E LUZ REFLETIDA EM B. NOTAR, NOS AGLOMERADOS, A PRESENÇA DE <i>FLAKES</i> COM MAIS DE 0,8 MM (CIRCULADOS DE VERMELHO).	41
FIGURA 32: FOTOMICROGRAFIAS DA LÂMINA PETROGRÁFICAS DA TIPOLOGIA XISTO (FC-R-18-2C), VISANDO APRESENTAR A FORMA DE OCORRÊNCIA DOS AGLOMERADOS GLOBULARES DE GRAFITA (CIRCULADOS EM VERMELHO).	42
FIGURA 33: FOTOMICROGRAFIAS DA LÂMINA PETROGRÁFICA DA TIPOLOGIA LEUCOSSOMA (FC-R-22-02), SOB LUZ TRANSMITIDA E POLARIZADORES (A) DESCRUZADOS E (B) CRUZADOS MOSTRANDO A PRESENÇA DE CRISTAIS DE GRAFITA ASSOCIADO À MUSCOVITA EM LEUCOSSOMA GRANÍTICO.	42
FIGURA 34: ESPECTROS RAMAN OBTIDOS NA PRIMEIRA MEDIDA REALIZADA LÂMINA FC-R-14B EM CADA UMA DAS DUAS PRIMEIRAS ETAPAS. EM A A LÂMINA PETROGRÁFICA FOI CONFECCIONADA COM POLIMENTO, ENQUANTO A LÂMINA USADA EM B NÃO FOI POLIDA.	44
FIGURA 35: GRÁFICO <i>BOX PLOT</i> APRESENTANDO A DIFERENÇA ENTRE OS DADOS OBTIDOS NA PRIMEIRA E NA SEGUNDA ETAPA.	44

FIGURA 36: GRÁFICO <i>Box Plot</i> APRESENTANDO A DIFERENÇA ENTRE OS PARÂMETROS R2 CALCULADOS A PARTIR DOS DADOS OBTIDOS PARA A LÂMINA FC-R-14B NA PRIMEIRA E NA SEGUNDA ETAPA.....	45
FIGURA 37: IMAGENS DOS ESPECTROS OBTIDOS NA PRIMEIRA MEDIDA REALIZADA LÂMINA FC-R-18-1, NA TERCEIRA ETAPA. EM A A LÂMINA PETROGRÁFICAS FOI CONFECCIONADA COM POLIMENTO, ENQUANTO A LÂMINA USADA EM B NÃO FOI POLIDA.....	45
FIGURA 38: ESPECTROS RAMAN OBTIDOS EM FUNÇÃO DA PREPARAÇÃO DA AMOSTRA E DA POSIÇÃO DA MEDIDA REALIZADA. AS CIRCUNFERÊNCIAS REPRESENTAM O DIÂMETRO DO FEIXE E ESTÃO POSICIONADA NO LOCAL EM QUE AS MEDIDAS FORAM REALIZADAS.	46
FIGURA 39: EFEITO DO POLIMENTO COMO INCREMENTO NO PARÂMETRO R1 SEM ALTERAÇÕES SIGNIFICATIVAS NA LARGURA (<i>FULL WIDTH AT HALF MAXIMUM</i> - FWHM) DA BANDA G, OU SEJA, EM UM G CONSTANTE HÁ UMA VARIABILIDADE SIGNIFICATIVA EM D.....	47
FIGURA 40: INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE EXCITAÇÃO DO LASER SOBRE A POSIÇÃO, INTENSIDADE E LARGURA DA BANDA D (D1) (TRADUZIDA DE POCSIK <i>ET AL.</i> , 1998).....	48
FIGURA 41: ESTIMATIVAS DE TEMPERATURA DE CRISTALIZAÇÃO DE GRAFITA DE DIVERSAS LOCALIDADES DO MUNDO (DADOS DE BEYSSAC <i>ET AL.</i> , 2002; BELÉM, 2006; SOUSA E MATOS, NO PRELO)	49
FIGURA 42: IMAGEM DE ELÉTRONS RETROESPALHADOS OBTIDA POR MEV DA AMOSTRA FC-R-32.	50
FIGURA 43: IMAGEM DE ELÉTRONS RETROESPALHADOS OBTIDA POR MEV APRESENTANDO OS MINERAIS PRESENTES NA AMOSTRA FC-R-32 E APROXIMAÇÕES (<i>zoom</i>) REALIZADAS PARA UM MAIOR DETALHAMENTO DAS TEXTURAS ENCONTRADAS.	51
FIGURA 44: IMAGEM DE ELÉTRONS RETROESPALHADOS OBTIDA POR MEV DE CRISTAIS DE BIOTITA COM PEQUENOS <i>flakes</i> DE GRAFITA DE FORMATO HEXAGONAL INTERCALADOS ENTRES AS PLANOS DE CLIVAGEM DA MICA.	51
FIGURA 45: IMAGEM DE ELÉTRONS RETROESPALHADOS OBTIDA POR MEV DE <i>flakes</i> DE GRAFITA DE FORMATO HEXAGONAL BEM FORMADOS, COM SUPERFÍCIE LISA, BORDA RETILÍNEA DEFINIDA E ALGUMAS FRATURAS.	52
FIGURA 46: IMAGENS DE ELÉTRONS RETROESPALHADOS OBTIDAS POR MEV DE <i>flakes</i> DE GRAFITA DE GEOMETRIA IRREGULAR INTERCRESCIDOS COM OS CRISTAIS DE BIOTITA. EM (A) OS <i>flakes</i>	

SE ENCONTRAM MAIS LISOS, COM MENOS FRATURAS E COM BORDAS MAIS BEM DEFINIDAS QUE EM (B).	52
FIGURA 47: DIFRATOGRAMA DE RAIOS X (COBRE, K ALFA) DA AMOSTRA FC-R-09, INDICANDO PRESENÇA DE GRAFITA HEXAGONAL, BIOTITA, QUARTZO E CAULINITA.	53
FIGURA 48: ESTIMATIVA DE TEMPERATURA COM BASE NO PARÂMETRO C DA CELA UNITÁRIA DA GRAFITA (FIGURA OBTIDA MALISA (1998) <i>APUD</i> SHENGELIA <i>ET AL.</i> (1977)).	54
FIGURA 49: MODELO ESQUEMÁTICO DOS TEORES DE CARBONO GRAFÍTICO AO LONGO DA ZONA MINERALIZADA AMOSTRADA NO ALVO PEDRA PRETA.	56
FIGURA 50: DIAGRAMA DE TEMPERATURA E PRESSÃO (VIELZEUF AND HOLLOWAY, 1988) PARA ROCHAS METAPELÍTICAS E <i>METAGRAYWACKES</i> (XMG PRÓXIMO DE 0.5) EM CONDIÇÕES DE TEMPERATURA E PRESSÃO ULTRA-ALTA. O CAMPO DE ESTABILIDADE ESTÁ DEMARCADO PELO POLÍGONO VERMELHO, DE CONTORNOS GROSSOS. AS CONDIÇÕES DE TEMPERATURA FORAM PROJETADAS NAS RETAS VERMELHAS E DE PRESSÃO NAS RETAS VERDES.	58
FIGURA 51: INTERVALO DE TEMPERATURA PARA A CRISTALIZAÇÃO DOS <i>FLAKES</i> DE GRAFITA E PICO METAMÓRFICO.	59
FIGURA 52: HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DE IDADES DE ZICAÇÃO DETRÍTICO DAS UNIDADES METASSEDIMENTARES DO TERRENO CEARÁ CENTRAL, COMPILADAS DE FETTER <i>ET AL.</i> (2003) E FETTER <i>ET AL.</i> (2000), APRESENTADOS EM <i>KERNEL DENSITY ESTIMATION</i> (VERMEESCH, 2012), COM REPRESENTAÇÃO DOS QUATRO CICLOS TECTONO-DEPOSICIONAIS PROPOSTOS POR FETTER (1999).	60
FIGURA 53: MODELO DE EVOLUÇÃO GEOLÓGICA E GÊNESE DA GRAFITA DO COMPLEXO CANINDÉ DO CEARÁ CENTRAL.	62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DA GRAFITA (MODIFICADA DE ROBINSON <i>ET AL.</i> , 2017)	5
TABELA 2: RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E INDUSTRIAIS DOS TRÊS TIPOS DE GRAFITA COMERCIALIZADOS (MODIFICADA DE ROBINSON <i>ET AL.</i> , 2017)	8
TABELA 3: CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS DE <i>FLAKES</i> CONTIDOS NAS ROCHAS DO ALVO PEDRA PRETA. A MÉDIA É PONDERADA PELO NÚMERO DE MEDIDAS.	43
TABELA 4: PARÂMETROS CALCULADOS A PARTIR DE RESULTADO DAS ANÁLISES DE ESPECTROSCOPIA RAMAN.....	48
TABELA 5: TEORES DE CARBONO GRAFÍTICO E TONELAGENS DE GRAFITA POR LITOTIPO.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARIM	Área de Relevante Interesse Mineral
CCCC	Complexo Canindé do Ceará Central
DCC	Domínio Ceará Central
DGAB	Distrito Grafitífero de Aracoiaba-Baturité
GEOSGB	Banco de dados de informações geológicas do Serviço Geológico do Brasil
GGF	Grafita de Grão Fino
HOPG	<i>High Ordered Pirolitic Graphite</i>
PGBM	Província Graftica Bahia-Minas
SGB/CPRM	Serviço Geológico do Brasil/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
SUREG	Superintendência Regional do SGB/CPRM.
TCC	Terreno Ceará Central

Estruturas Geológicas

ZCP	Zona de Cisalhamento Pernambuco;
ZCSPII	Zona de Cisalhamento Sobral – Pedro II;
ZSPJ	Zona de Cisalhamento Piauí - João Câmara;
ZCRP	Zona de Cisalhamento Riacho do Pontal;
ZCSP	Zona de Cisalhamento Senador Pompeu;
ZCT	Zona de Cisalhamento Tauá;
ZCPA	Zona de Cisalhamento Patos

Siglas das Unidades Geológicas no GEOSGB

JK_Beta_c	Rio Ceará Mirim Diques Máficos
PP2sjm	Complexo São José de Macaoca Indiviso
PR_gamma_li	Leucogranito Itapiúna
PRcn1	Complexo Canindé do Ceará Paragnaisse Migmatítico
PRcn2	Complexo Canindé do Ceará Ortognaisse Migmatítico
Q2a	Depósitos Aluvionares

Métodos

MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Micro-Raman	Espectroscopia Raman de áreas microscópicas
Raman	Espectroscopia Raman

Minerais formadores de rocha - definidos como em Whitney e Evans (2010)

An	Anortita
Bt	Biotita
Chl	Clorita
Ep	Epidoto
Gr	Grafita
Hbl	Hornblenda
Kfs	Feldspato Potássico
Ms	Muscovita
Pl	Plagioclásio
Qz	Quartzo
Sil	Sillimanita
Tur	Turmalina
Zrn	Zircão

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho faz parte do Projeto Grafita Brasil do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) que objetiva apresentar o potencial metalogenético da grafita do país. O estudo visou aplicação de metodologias geológicas quantitativas de classificação e de discriminação de tipologias de grafita.

O Brasil está entre os maiores países produtores e detentores de reservas de grafita natural do tipo *flake*, sendo o 2º maior produtor e detendo a 3º maior reserva mundial desse bem mineral (USGS, 2015; 2017; 2019). Com o aumento de pesquisa e desenvolvimento nas áreas de tecnologias de miniaturização (Geim, 2009), as baterias de íons de lítio (Yoshio e Noguchi, 2009) e os produtos à base de grafeno (Geim e Novoselov, 2007) impulsionaram as pesquisas de grafita em todo o mundo (European Commission, 2017; Robinson *et al.*, 2017). Assim, a grafita é considerada um mineral estratégico e crítico, a depender do contexto, dados seus usos militares e a potencial escassez de suprimentos para o parque industrial de um país (Butts, 1993; European Commission, 2017; Robinson *et al.*, 2017).

A produção de grafita do Brasil se encontra em cinco minas, localizadas nos estados de Minas Gerais e Bahia, sendo três delas na Província Gráfica Bahia-Minas (PGBM).

Na Província Borborema, no norte do estado do Ceará, o SGB/CPRM identificou três agrupamentos de ocorrências de grafita nos mapeamentos regionais (1:100.000). Eles se encontram nas folhas (1) Senador Pompeu (SB. 24-V-D-VI); (2) Itapiúna (SB.24-X-A-IV) e (3) Quixadá (SB.24-V-B-VI). Essas ocorrências hospedam-se em rochas paraderivadas migmatíticas dos Complexos Canindé do Ceará Central, Acopiara e Jaguaratama e no contato com granitos do tipo S gnaissificados.

O Distrito Gráfico de Araújoaiaba – Baturité (DGAB) engloba as rochas metassedimentares paleoproterozoicas do Complexo Canindé do Ceará Central em volta do núcleo Arqueano Tróia – Pedra Branca (Fragomeni e Pereira, 2013). No DGAB, o Alvo Pedra Preta, foi objeto de sondagem da Lara Exploration Ltda. em 2015 (Lara Exploration Ltda., 2015) e contou com interseções de grafita em 05 furos de sondagem rotativa. O melhor resultado para o alvo Pedra Preta foi uma intersecção de 13,69 m com 18,38 %Cg (carbono gráfico) contido em rocha total (Lara Exploration Ltda., 2015). Durante a campanha de sondagem foram executados 08 furos de sondagem. Todavia, o último furo (DDH-08) foi gêmeo do primeiro (DDH-01) e amostrado para testes metalúrgicos. Ao final da campanha de sondagem foram obtidas interseções de cerca de 32,0 m de grafita disseminada e 2,59 m de grafita “maciça” hospedadas em gnaiss e grafita xisto, respectivamente.

Os resultados da exploração foram considerados não econômicos pela Lara Exploration Ltda. e, em seguida, a empresa desistiu da área e doou parte dos furos exploratórios para o SGB/CPRM em 2017. Assim, os testemunhos de sondagem doados pela empresa de exploração júnior compõem a base amostral de grafita estudada neste estudo.

2. LOCALIZAÇÃO

A área de estudos se localiza estado do Ceará, Nordeste do Brasil, mais especificamente na região sudoeste do município de Canindé, entre as latitudes $-4,57560^{\circ}$ e $-4,57630^{\circ}$ e longitudes $-39,40070^{\circ}$ e $-39,4000^{\circ}$ em *Datum* WGS84, que correspondem às coordenadas UTM Y:9494270m a 9494210m e X:455700m a 455560m, na zona 24M. A região está localizada na Folha Quixadá 1:250.000 (Figura 1). A Figura 2 apresenta a localização precisa da área de estudos.

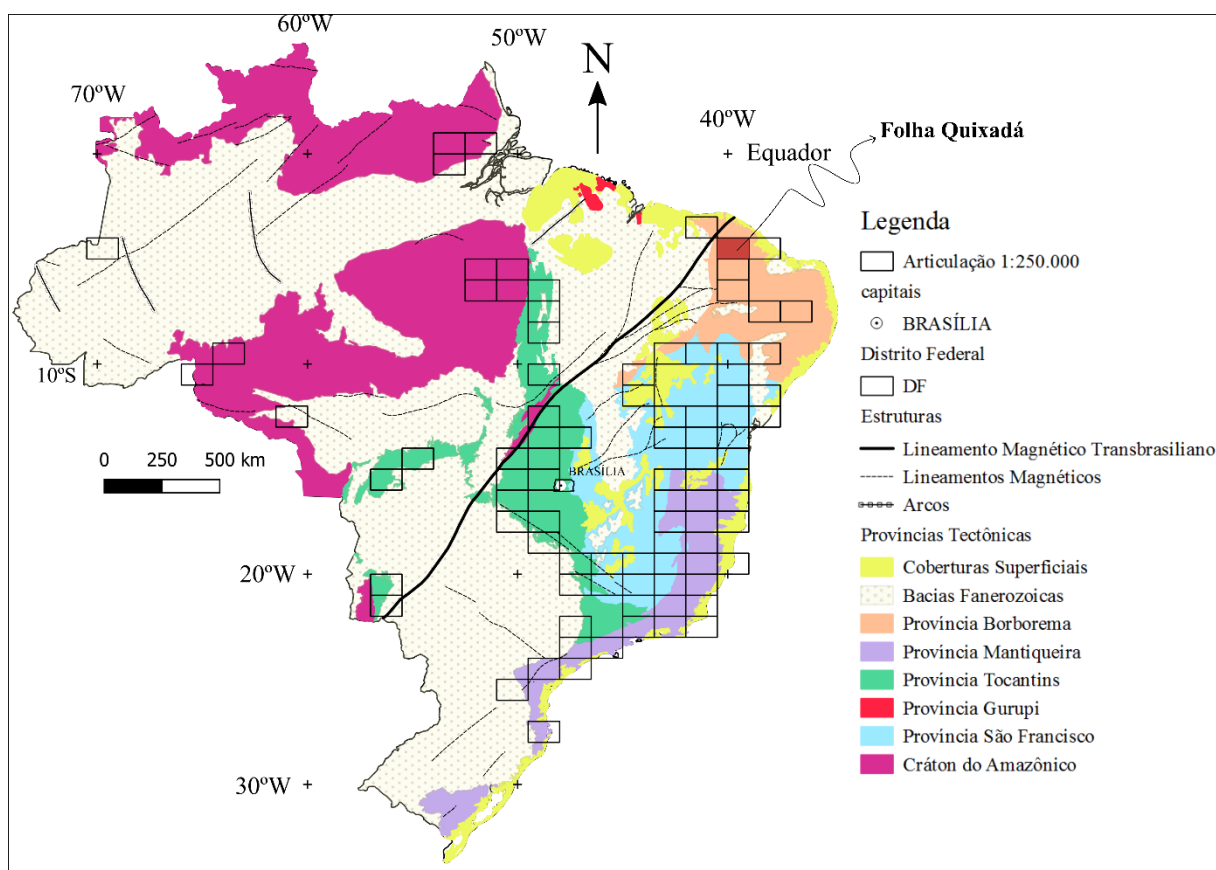


Figura 1: Localização das folhas 1:250.000 que possuem indícios, ocorrências, garimpo ou minas de grafita no Brasil (Sousa e Matos, no prelo).

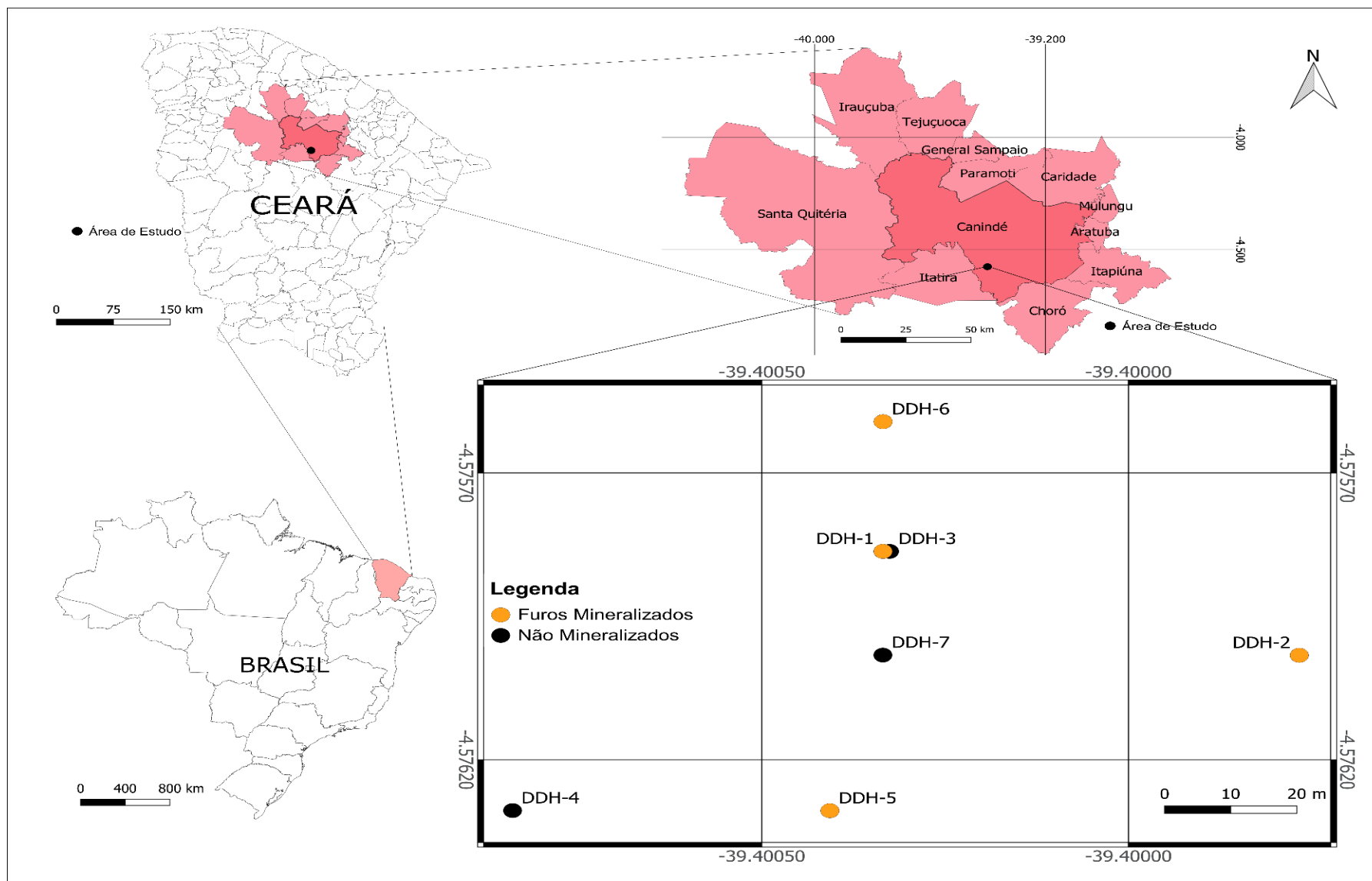


Figura 2: Localização da área de estudo e disposição dos furos de sondagem. Os furos em amarelo apresentaram intersecções de grafita.

3. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo fornecer a caracterização petrográfica e mineralógica das ocorrências de grafita do Distrito Grafítico de Araçoiaba – Baturité (DGAB) presentes nas rochas do Complexo Canindé do Ceará Central. Assim, pretende-se definir a morfologia, o grau de cristalinidade dos *flakes*, estimativas de temperatura de formação, além da formas de ocorrência e das associações minerais presentes, com vistas a promover a melhora do entendimento científico desse tipo de mineralização, bem como fomentar a pesquisa mineral desse tipo de *commodity* na região.

4. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Aspectos Geológicos e Econômicos da Grafita

A grafita é uma substância pura simples composta por carbono com estrutura cristalina hexagonal formada por camadas unidas umas às outras por forças de van der Waals. Internamente, as camadas se mantêm com ligações covalentes, devido à hibridização sp^2 do carbono. Com ponto de fusão acima de 3.500°C , o mineral é altamente refratário, além de ser quimicamente inerte e bastante flexível (Tabela 1). É o melhor condutor termoelétrico entre os não metais, além de possuir razoável compressibilidade, elasticidade e lubricidade (Wissler, 2006; Harben e Bates 1990; Hand, 1996). São essas características combinadas que tornam a grafita uma substância desejada em processos industriais.

Tabela 1: Principais características e propriedades da grafita (modificada de Robinson *et al.*, 2017)

PROPRIEDADES	DESCRIÇÃO
Composição	Carbono (C)
Cor	Cinza a preto, com brilho metálico.
Dureza (Escala de Mohs)	0,5 a 1
Densidade (g/cm³)	2,09 a 2,26
Morfologia	Sistema Hexagonal; clivagem basal perfeita; usualmente placóide.
Ponto de Fusão	Fusão a ~3550°C (situações não oxidantes); decompõe-se a ~600°C (situações oxidantes)
Gerais	Inerte; não toxica; alta condutividade térmica e elétrica; lubrificante natural.
Condutividade térmica (watt/cm°C)	Eixo a: 4,0; Eixo c: 0,8
Coef.de expansão térmica (1/°C)	Eixo a: 1.10^{-7} ; Eixo c: 140.10^{-7}
Resistividade elétrica (ohm-cm.10⁴)	Eixo a: 1 a 100; Eixo c: 10000.

Segundo Sharma e Kumar (1998), o material grafitoso contido nas rochas pode ser originar por três processos principais, apresentados a seguir:

- **Desidrogenação progressiva da matéria orgânica** provocada pelo metamorfismo de rochas sedimentares. Esse processo, conhecido como grafitização, compreende a transformação da matéria de origem biológica em grafita a partir de CO₂, CH₄, e H₂O por processos metamórficos (Itaya, 1981);
- **Grafita de fonte magmática**, em que o material grafitoso é gerado por precipitação a partir de soluções (fluidos magmáticos ou gases vulcânicos) enriquecidos em carbono que infiltram pelas rochas. Nesse processo, o que origina a grafita é o resfriamento ou mudança de estado de oxidação de fluidos, que, ricos em CO₂ e CH₄, acabam por precipitar grafita (Luque *et al.*, 2014).
- **Grafita gerada em reações de minerais carbonáticos** é o material grafitoso hospedado em rochas carbonáticas e com origem pós-deposicional. Os mármore grafíticos ocorrem em sequências supracrustais arqueanas no sudoeste da Índia (Sharma e Kumar, 1998), no *Greenstone Belt* Isua (3,8Ga), na Groenlândia Ocidental (Lepland *et al.*, 2002). Há ocorrências também no Complexo Grenville, no flanco leste das Montanhas Adirondack, em Nova York; além da sequência pré-cambriana de Mörtersdoff na Áustria (Weis *et al.*, 1981). No Brasil, as principais ocorrências desse tipo são encontradas em mármore das sequências manganíferas da Serra do Navio e Buritirama do Paleoproterozoico (Bello, 1978).

A grafita natural é produzida comercialmente de três formas (Figura 3 e Figura 4) que carregam estreita relação com a gênese do depósito (Figura 5):

- Tipo “amorfo”: grafita microcristalina, em geral, hospedada em rochas metamórficas submetidas a metamorfismo regional ou de contato de fácies sub-xisto verde a xisto verde. Os depósitos são estratiformes ou lenticulares;
- Tipo *flake*: cristais e agregados (flocos) de grafita, bem formados, geralmente hospedados em rochas metamórficas de médio a alto grau (fácies anfibolito e granulito), pegmatitos e granitos do tipo S (Simandl, 1992; Simandl *et al.*, 1995; Simandl e Keenan, 1997a). O metamorfismo regional é o grande responsável pela conversão da matéria orgânica, presente no protólito sedimentar, em grafita. Em casos raros, pode ser encontrada em rochas ultramáficas serpentinizadas, tendo como fonte de carbono o manto terrestre (Crespo *et al.*, 2006). A grafita pode se apresentar como minério disseminado ou maciço, formando níveis de ocorrência exclusiva desse material. Os depósitos podem ser estratiformes ou lenticulares na rocha hospedeira;
- Tipo veio (“*lump*”): grafita contida em veios, venulações, *pods*, brechas, *stockworks*, lentes ou outros corpos de geometria irregular (Simandl, 1992; Simandl e Keenan, 1997b). O material grafitico pode se apresentar como rosetas, flocos grossos, grãos fibrosos ou espiculares. Se formam devido à remobilização, por ação de fluidos hidrotermais provenientes da cristalização de um corpo ígneo intrusivo, da grafita contida nas rochas metamórficas. A formação desse tipo de mineralização de grafita é comum em regiões onde, após evento de metamorfismo regional, ocorre a colocação de corpos graníticos.

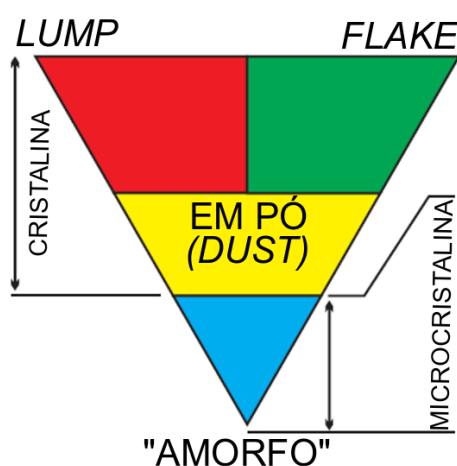


Figura 3: Principais tipos de grafita natural comercializados atualmente (modificada de Simandl *et al.*, 2015).

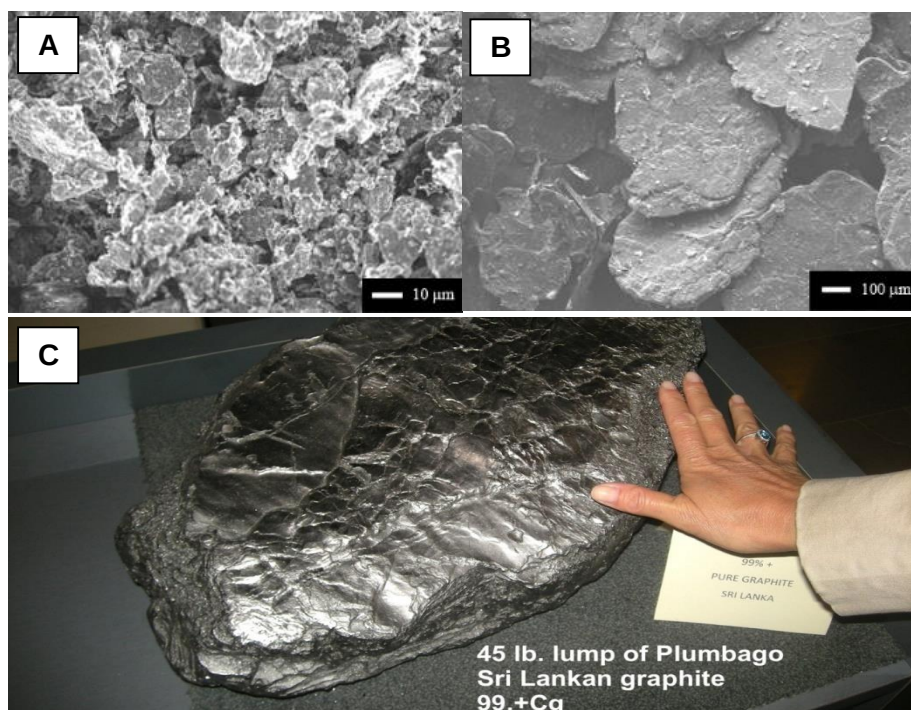


Figura 4: Principais tipos de grafita natural comercializados atualmente: A- Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de grafita tipo “amorfa”; B- Imagem MEV de grafita tipo flake; C- Fotografia de veio de Grafita (Lump Graphite) do Sri Lanka (Graphene Market, 2019; Saint Jean Carbon, 2019).

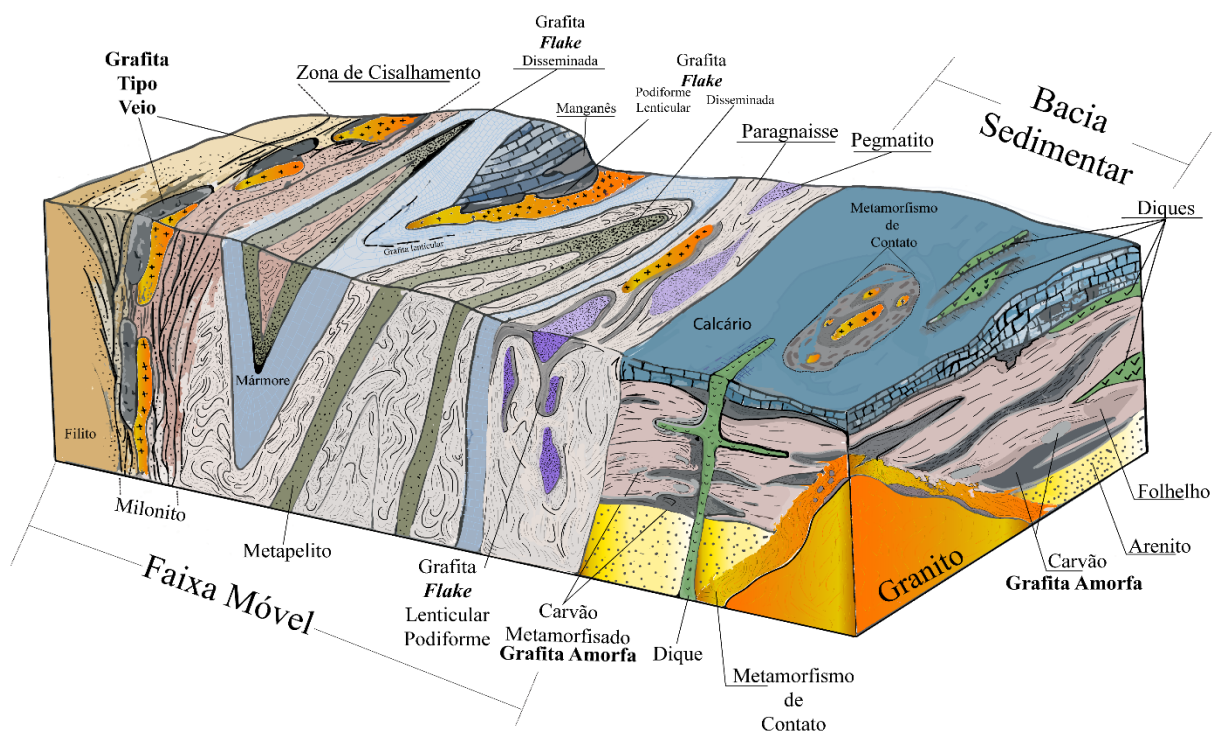


Figura 5: Principais contextos geológicos e modelos genéticos para as mineralizações de grafita (Sousa e Matos, no prelo).

A Tabela 2 apresenta as principais características geológicas, industriais e econômicas dos três principais tipos de grafita natural:

Tabela 2a: Resumo das características geológicas e industriais dos três tipos de grafita comercializados (modificada de Robinson *et al.*, 2017)

CARACTERÍSTICAS	TIPO DE COMMODITY		
	“AMORFO”	FLAKE	DEPÓSITO TIPO VEIO (Lump ou Chip)
Cristalinidade	Microcristalino	Cristalino	Cristalino
Propriedades	Agregados terrosos a microcristalinos e compactados; a granulação é sempre inferior a 4 µm.	Cristais em formato de plaquetas bem desenvolvidos, com tamanho variando entre 40 µm e 4 cm (mas em geral menor que 1 cm) e espessura entre 1 e 150 µm.	Agregados interligados de cristais grossos - Desde pó até pedaços de 10 cm.
Origem	Metamorfismo de contato, frequentemente por intrusão de diabásio ou granito, e(ou) metamorfismo regional de sedimentos carbonosos, normalmente carvão.	Metamorfismo regional de sedimentos carbonosos em, ou acima de, condições de fácies anfibolito.	Veios epigenéticos e filões formados pelos fluidos metamórficos (em geral, de granulitos), ou intrusões ígneas.
Corpo Mineralizado	Camadas ou lentes em rochas carbonosas. Cada nível possui poucos metros de espessura e centenas de metros de comprimento podendo atingir até muitos quilômetros; deve estar deformado ou falhado.	Estrato ligadas; formato tabular ou em lentes; poucas dezenas de metros de espessura e milhares de metros de comprimento. O formato pode ser irregular em áreas de maior deformação. A quantidade de grafita varia, tanto de lente para lente, quanto internamente (dentro de cada lente).	Veios e preenchimentos de fraturas, ao longo de ou cortando estruturas metamórficas ou contatos litológicos. Os veios individuais variam entre 0,05 a 3 m de espessura e centenas de metros de extensão - mas, em geral, é muito raro que possuam mais que dezenas de metros de extensão.
Porcentagem de Carbono grafítico no minério	50 a 90% - os agregados podem possuir carbono não grafítico.	Em geral, entre 5 e 30% - localmente pode ser mais concentrado.	40 a 90% - Pode necessitar de triagem manual.
Tonelagem do Depósito (Milhão de Toneladas Métricas)	0,1 a 500.	0,1 a 100.	Pequena (sem dados acessíveis para os veios individuais).
Operação (Mina)	Superfície ou <i>underground</i> - As minas usam, em geral métodos mecânicos, mas podem usar métodos manuais.	Geralmente <i>Open pit</i> . Em geral, a porcentagem de grafita aumenta com o intemperismo dos minerais de ganga.	Minas pequenas, de trabalho intensivo, e <i>underground</i> . As minas do Sri Lanka possuem profundidade entre 30 e 400m. O minério é catado manualmente.

Tabela 2b: Resumo das características geológicas e industriais dos três tipos de grafita (modificada de Robinson *et al.*, 2017)

CARACTERÍSTICAS	TIPO DE COMMODITY		
	AMORFO	FLAKE	DEPÓSITO TIPO VEIO <i>LUMP OR CHIP</i>
Principais Usos	Refratários, Indústria do Aço, tintas, revestimentos e baterias.	Refratários, forro de freios, lubrificantes, baterias e aplicações expansíveis de grafita.	Escovas de Carvão, forro de freio e lubrificantes.
Preços em US\$ (por tonelada métrica)	Preço em dezembro de 2011 (80 a 85% de grafita) custavam entre \$600 e \$800.	Preço em dezembro de 2011 (90% de grafita, <i>medium-large flake</i>) custavam entre \$1150 e \$2000.	Preço em dezembro de 2011 para o Sri Lanka (99,9% de grafita) custavam entre \$1700 e \$2070. Preços variam de acordo com a pureza, teor e tamanho.
Maiores produtores	China, República da Coreia, México, Áustria.	China, Brasil , Índia, Madagascar, Alemanha, Áustria, Noruega, Canadá, Zimbábue.	Sri Lanka.

Segundo o Serviço Geológico dos EUA (USGS, 2015; 2017; 2019) o país com maior produção de grafita natural é a China, que em 2018 produziu cerca de 630 mil toneladas métricas (Kton). Com a queda na produção da Índia, o Brasil foi o segundo maior produtor do ano, com 95 Kton (ver Figura 6). Canadá e Índia foram terceiro e quarto maiores produtores, com 40 e 35 Kton produzidas, respectivamente (USGS, 2015; 2017; 2019). Apesar de ser a maior produtora, a China possui a segunda maior reserva de grafita (73 Mton), ficando atrás da Turquia (90 Mton). O Brasil segue de perto, com a terceira maior reserva de grafita do mundo (72 Mton), onde a Província Gráfica Bahia-Minas - com as minas de Salto da Divisa, Maiquinique e Pedra Azul - é responsável pela maior parte da reserva e produção nacional (USGS, 2015; 2017; 2019). A Figura 7, a seguir, apresenta as principais reservas mundiais de grafita.

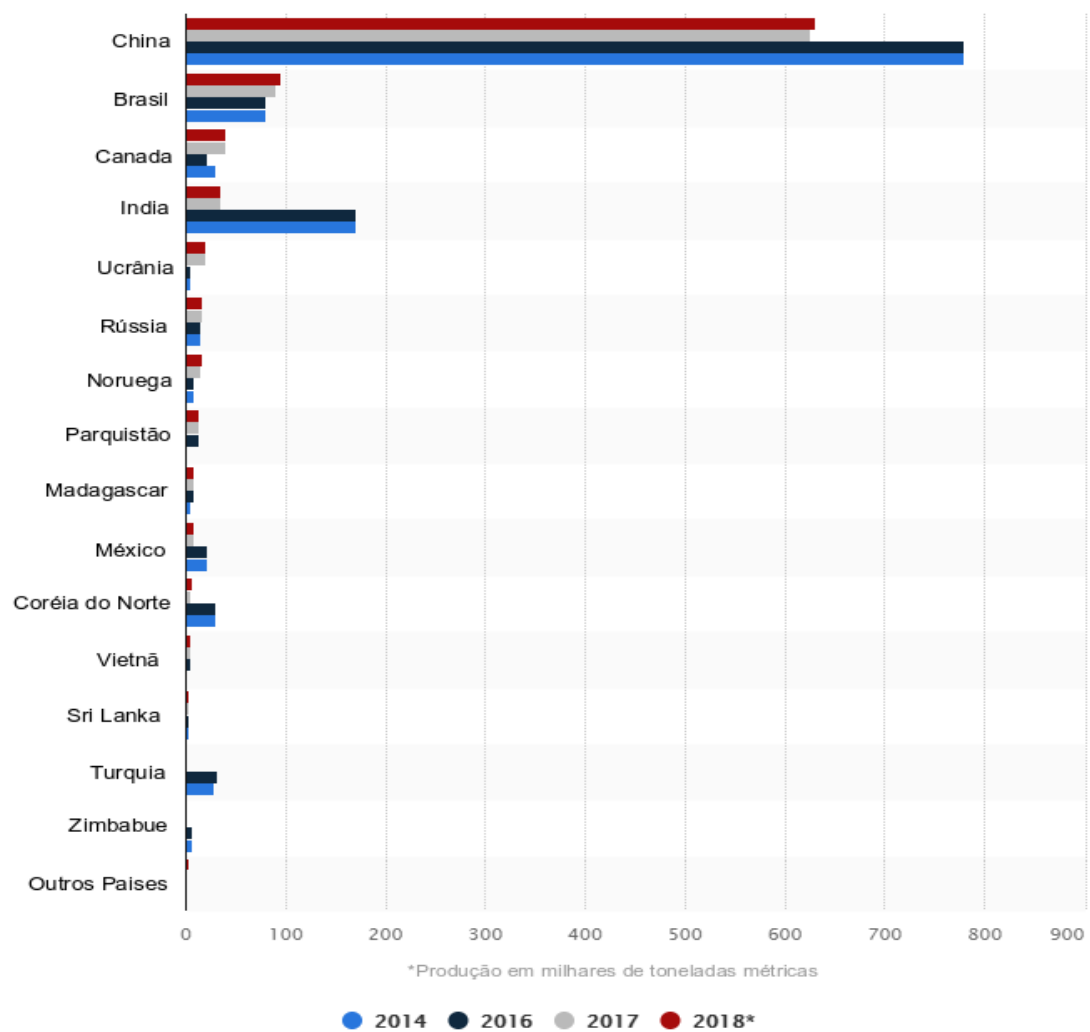


Figura 6: Maiores produtores mundiais de grafita de 2014 a 2018 (construído com dados de USGS (2015; 2017; 2019)).

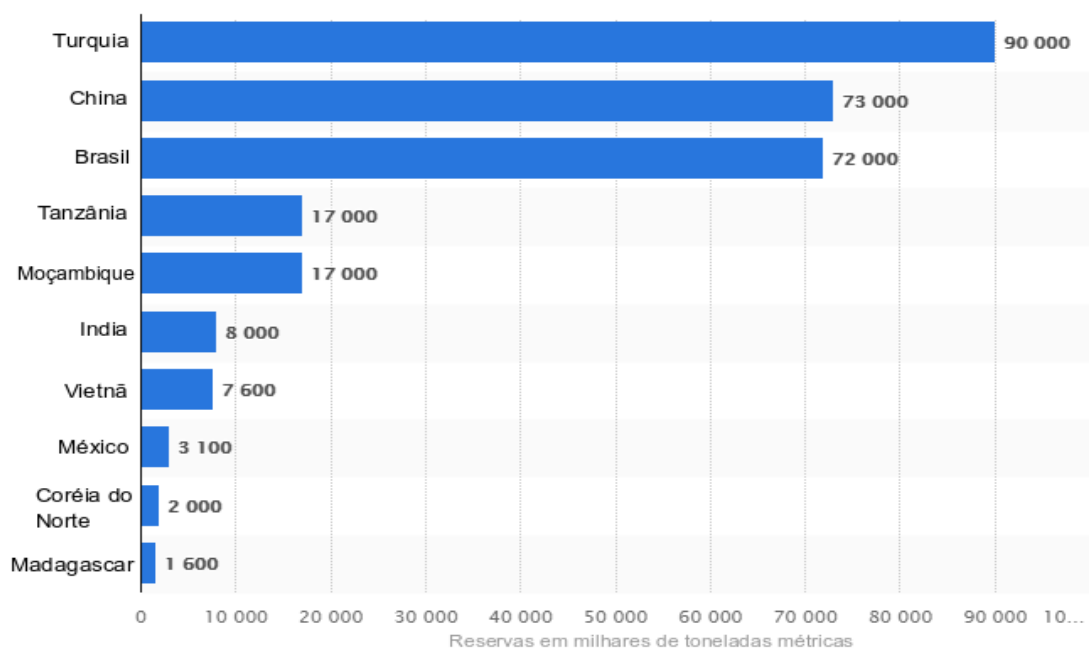


Figura 7: Maiores reservas mundiais de grafita de 2014 a 2018, por país (construído com dados de USGS (2015; 2017; 2019)).

A grafita é considerada um mineral estratégico por suas aplicações essenciais para os setores aeroespacial e de energia. Esse mineral tem serventia como refratário e nos processos de fundição da indústria do aço, além de ser usada como lubrificante de alta temperatura, em reatores nucleares, células de combustível, motores elétricos e outras aplicações no setor de eletrônicos. Devido ao aumento da demanda por grafita no setor de energia e automobilístico (com o advento e popularização dos carros híbridos e elétricos), as fontes atuais podem não ser suficientes para abastecer um mercado que anseia progressivamente por *flakes* de grafita de alta pureza (Robinson *et al.*, 2017; O'Driscoll, 2010; Olson *et al.*, 2016).

De modo geral, a economicidade de um depósito de grafita é determinada por alguns fatores. Os principais são: as características originais dos cristais de grafita e; a adequação do material extraído (mineral de minério e ganga) aos processos de separação e beneficiamento para a produção dos concentrados com teor e granulometria de carbono demandados pela indústria (Harben 1999).

Os *flakes* de grafita podem ser classificados em *fine flakes* (ff), *small flakes* (sf) *medium flakes* (mf), *large flakes* (lf) e *extra large flakes* (elf) segundo Scrogins (2015). A classificação depende apenas do tamanho da palheta de grafita: se menores que 0,075 mm, são classificadas como *fine flakes*; se são maiores que 0,075 e menores que 0,15 mm são considerados *small flakes*; possuindo entre 0,15 e 0,18 mm, são *medium flakes*; de 0,18 a 0,30 mm são *large flakes*; e acima de 0,30 mm são *extra large flakes*. Essa forma de classificar carrega conotação econômica, uma vez que quanto maior o tamanho do *flake*, maior o valor comercial. Apenas para ilustrar a relevância da classificação, em 2015, o preço de uma tonelada de grafita tipo *small flake* custava em torno de US\$750, enquanto a mesma quantidade do tipo *extra large flake* custava US\$2000 (Scrogins, 2015).

4.2 Síntese Geológica Regional

A área estudada localiza-se no Domínio Ceará Central (DCC) (Brito Neves *et al.*, 2000) ou Terreno Ceará Central (TCC) (Campelo, 2009), localizado na porção setentrional da Província Borborema do Neoproterozoico (Arthaud, 2007; Fetter *et al.*, 2003).

A Província Borborema (Figura 8) é o termo utilizado para definir a região oriental da plataforma Sul Americana, compreendida em um complexo mosaico de cinturões de dobramentos, em domínios independentes separados por extensas zonas de cisalhamento crustais (Almeida *et al.*, 1977). Foi construída durante a Orogenia Brasileira/Pan-Africana, como resultado da convergência e colisão do Crátons São-Luís-Oeste África e São Francisco-Congo, no contexto da colagem do Gondwana Ocidental (Arthaud, 2007).

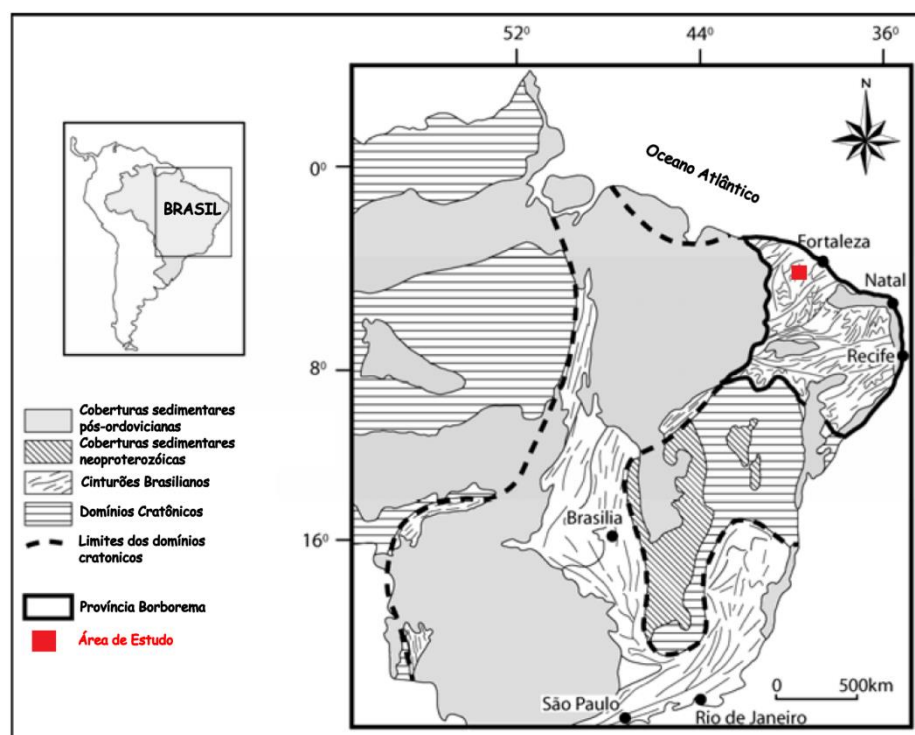


Figura 8: A Localização da Província Borborema na Região Nordeste do Brasil (modificada de Schobbenhaus e Campos, 1984).

O Terreno Ceará Central (TCC) constitui-se, majoritariamente, de um embasamento paleoproterozoico com núcleo arqueano compreendido pelo Maciço de Tróia-Pedra Branca e uma extensa cobertura neoproterozoica. O TCC apresenta coberturas sedimentares fanerozoicas, notadamente, entre o Paleozoico e o Cenozoico. Os sedimentos do Paleozoico se encontram na Bacia do Parnaíba (Grupo Serra Grande) e os do Cenozoico pelos sedimentos da Província Costeira (Cavalcante *et al.*, 2003). Tectonicamente, o TCC é limitado a noroeste pelo Lineamento Transbrasiliiano-Kandi, que o separa do Terreno Noroeste do Ceará; a nordeste, pela Província Costeira; a oeste, pelo Terreno Tauá e pela Província Sedimentar do Parnaíba; e a sudeste pelo Lineamento Senador Pompeu-Ile Ife (Figura 9).

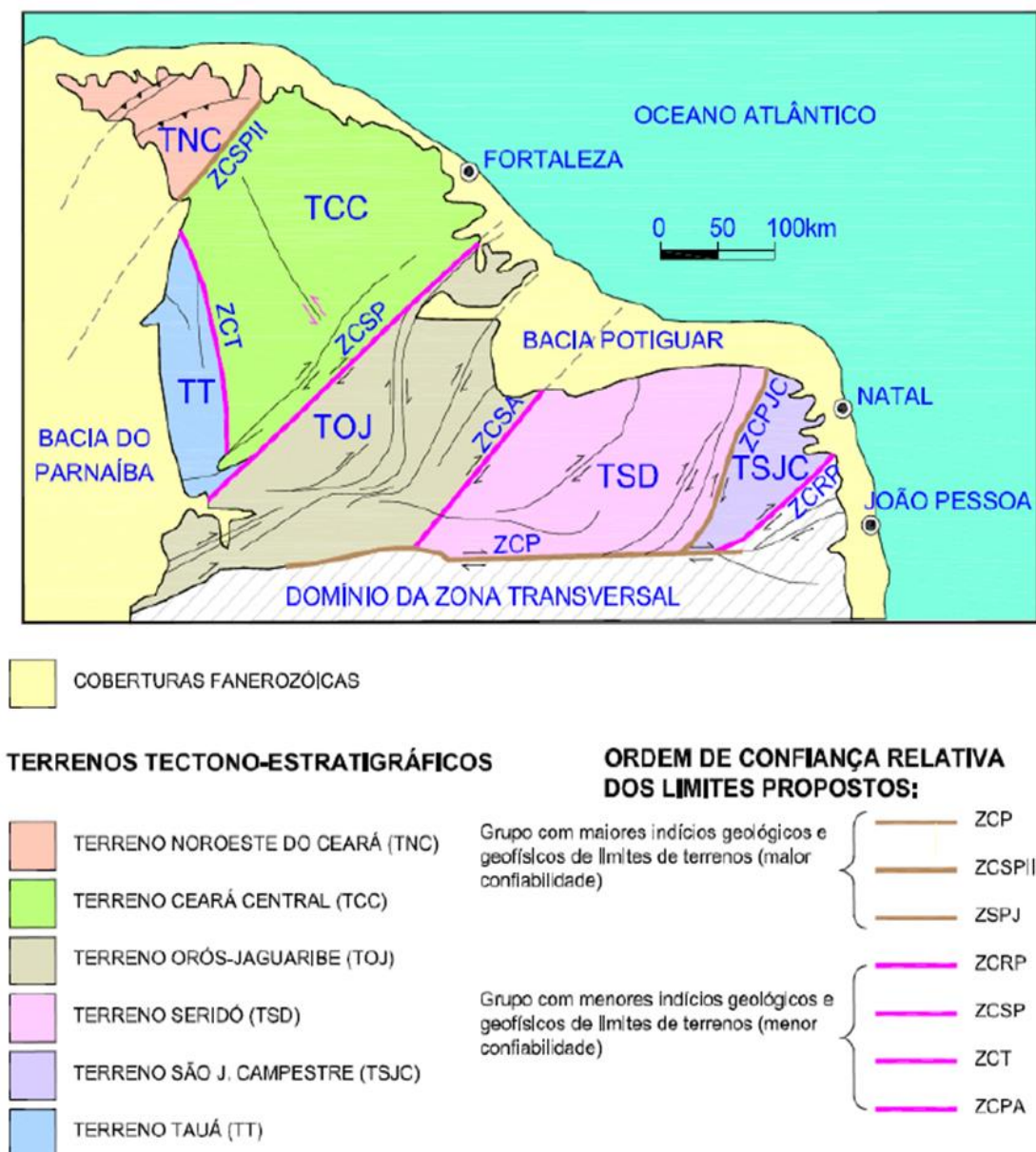


Figura 9: Divisão dos terrenos Tectono-estratigráficos da porção Norte da Província Borborema - ZCP: Zona de Cisalhamento Pernambuco; ZCSPII: Zona de Cisalhamento Sobral – Pedro II; ZSPJ: Zona de Cisalhamento Piauí - João Câmara; ZCRP: Zona de Cisalhamento Riacho do Pontal; ZCSP: Zona de Cisalhamento Senador Pompeu; ZCT: Zona de Cisalhamento Tauá; ZCPA: Zona de Cisalhamento Patos (Campelo, 2009).

As rochas de origem sedimentar metamorfizadas do Ceará foram primeiramente referenciadas como “Série Ceará” (Crandall, 1910 apud Campos *et al.*, 1979). Na literatura é possível encontrar trabalhos que utilizam a designação de Grupo (Santos e Brito Neves, 1984; Arthaud, 2007). Desde os trabalhos pioneiros realizados na área (CPRM, 1983; Caby e Arthaud, 1986), existe um esforço por separar os ortognaisses do Terreno Ceará Central das sequências supracrustais (dominadas por paragneisses). Estes trabalhos enquadraram tanto os ortognaisses como os paragneisses no Complexo ou Grupo Ceará.

A Área de Relevante Interesse Mineral (ARIM) Tróia-Pedra Branca foi empreendida com o intuito de contribuir para o entendimento do potencial e vocação metalogenética da região, fomentando a exploração mineral (Costa *et al.*, 2018). Por representar uma das principais entidades geológico-metalogenéticas da porção Noroeste da Província Borborema, a região de Tróia-Pedra Branca foi alvo de pesquisa mineral executada pela Lara Exploration Ltda. devido a seu alto potencial para abrigar mineralizações de grafita. A ARIM Troia-Pedra Branca possui, ainda, zonas favoráveis para abrigar mineralizações de ouro, elementos do grupo da platina, ferro e manganês (Costa *et al.*, 2018). As mineralizações de grafita e a área sondada pela Lara Exploration Ltda. se encontram nos metassedimentos, especialmente paragneisses, metamorfizados em fácies anfibolito a granulito, no contato norte com as sequências tipo granito-*greenstone* hospedeiras de Au, Fe, Mn e EGP (Elementos do Grupo da Platina) (ver Figura 10).

Conforme a redefinição proposta em Arthaud *et al.* (1998), o Grupo Ceará é formado principalmente por rochas paraderivadas metamorfizadas em alto grau e, comumente, migmatizadas. Nesse grupo se destacam gnaisses e xistos com sillimanita e/ou cianita e granada, quartzitos e, em menor proporção, rochas carbonáticas: litotipos característicos de sequências tipo quartzito-pelito-carbonato (QPC), interpretadas como o produto de sedimentação tipo-margem passiva (Arthaud, 2007). Assemelhando-se ao mesmo ambiente tectônico do Grupo Macaúbas hospedeiro da maior província gráfica do país e do minério tipo grafita xisto (Soares *et al.*, 2007; Belém, 2018).

Fetter (1999) sugere que quatro eventos tectono-deposicionais teriam dado origem a essas sequências, datando de cerca de 2150, 1780, 775 e 650 Ma. O complexo empilhamento de *nappes* dessas rochas supracrustais são produto do evento Brasileiro (Caby e Arthaud, 1986; Arthaud *et al.*, 1988) evidenciado pela vergência geral (para sul) das dobras e a intensa tectônica transcorrente pós pico metamórfico (Monié *et al.*, 1997).

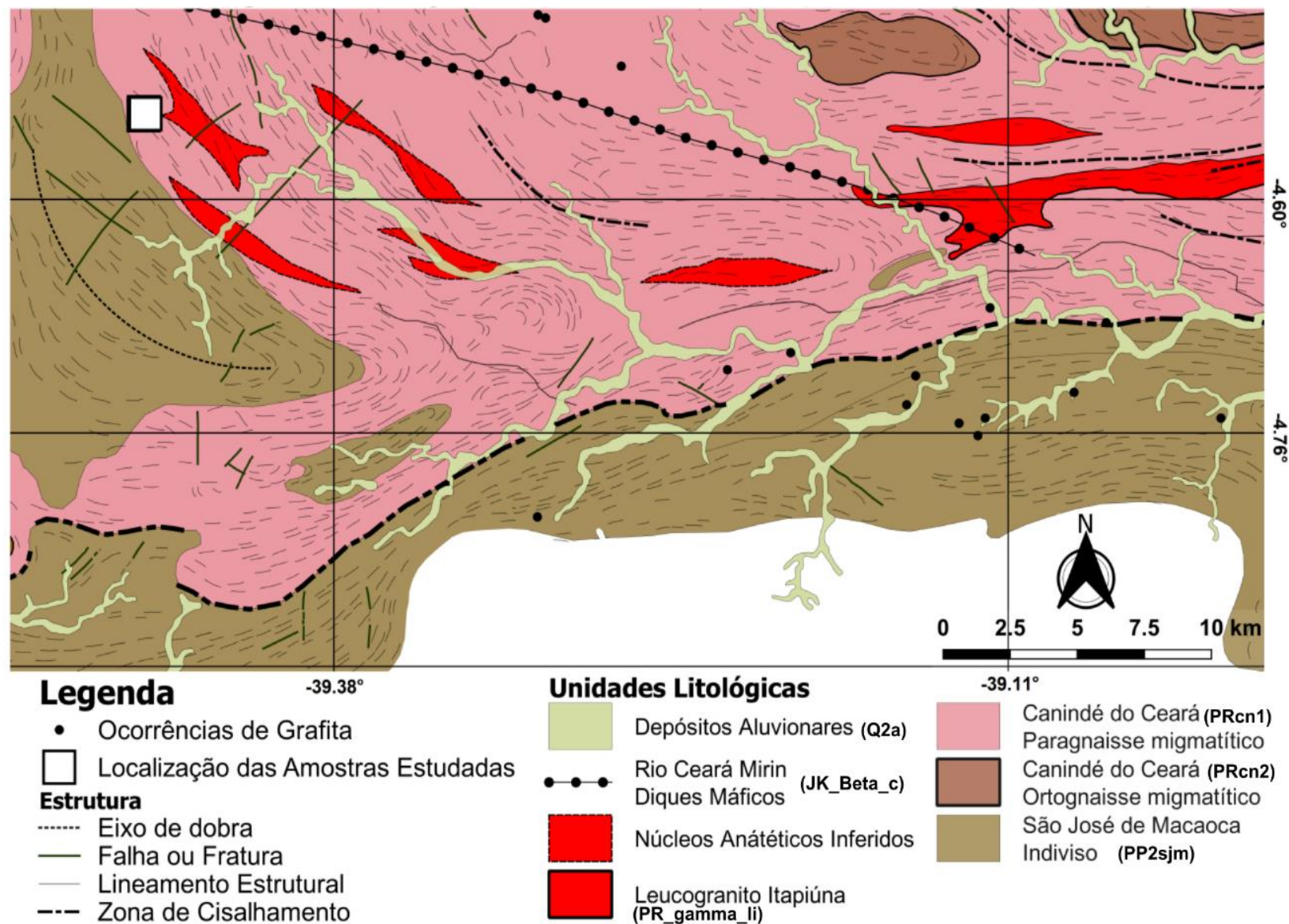


Figura 10: Contexto geológico da folha Quixadá (1:100.000) (elaborado a partir dos dados de CPRM levantados em Costa e Palheta (2017).

Neste trabalho, seguindo o adotado por Costa e Palheta (2017), as rochas foram tratadas de Complexo Canindé do Ceará, apoiado nos mapas da Folha Quixadá – em escala 1:250.000 (Torres *et al.*, 2007) e Geológico do Ceará – escala 1:500.000 (Cavalcante *et al.* 2003), englobando os litotipos essencialmente paraderivados das unidades Independência, Quixeramobim e Canindé do Ceará Central.

O Complexo Canindé do Ceará Central (Costa e Palheta, 2017), inicialmente referido como “Unidade Canindé” por Cavalcante *et al.* (2003), é composto majoritariamente por paramigmatitos e corresponde à individualização PRcn1 de Torres *et al.* (2007). A unidade passou a ser denominada “Unidade Canindé do Ceará Central” para suprimir algumas inconsistências do banco de dados geológicos (GEOSGB, antigo GEOBANK) da CPRM e será assim referenciada no presente trabalho. O código da individualização das Unidades é apresentado como forma de facilitar a pesquisa na base de dados de estratigrafia do GEOSGB, evitando ambiguidade com unidades de nome similar.

Esta unidade predomina na porção setentrional das folhas (1:100.000) Itapiúna e Quixadá, compreendendo as designações litológicas de migmatitos, xisto e gnaisses, rochas quartzíticas e lenticulares. Os migmatitos, xistos e gnaisses são os litotipos predominantes.

Migmatitos: É comum a ocorrência de diatexitos, em estrutura *schlieren*, com coloração creme e granulação média a grossa, frequentemente com restitos de fusão compostos por granada e biotita (Costa e Palheta, 2017). Ocorrem também como metatexitos estromáticos e dobrados, de mesossomas com composição de biotita gnaisse, com ou sem granada e sillimanita. Possui ainda, leocossomas quartzo-feldspáticos, com ocorrências frequentes de granada, sillimanita e grafita. Como a sillimanita se apresenta nos mesossomas como fibrolita e está associada ora a andaluzita e biotita, ora a cordierita e granada, isso é um indicativo de que as rochas foram submetidas a condições de metamorfismo progressivo de fácies granulito (zona da sillimanita), caracterizando rochas kinzigíticas. A rocha pode possuir quartzo, plagioclásio, cristais opacos (magnetita, rutilo, grafita e prováveis sulfetos), sendo a grafita remobilizada fisicamente pelo processo de migmatização. As fases acessórias são apatita, epidoto, zircão e monazita (Costa e Palheta, 2017).

Devido às condições encontradas nessas rochas, é possível afirmar que elas foram submetidas a fusão parcial, dando origem a granitos peraluminosos, como os cartografados na unidade leucogranítica Itapiúna (PR_γ_{li}), que também hospedam concentrações, até o momento, subeconômicas de grafita (Costa e Palheta, 2017).

Xistos e gnaisses: ocorrem em meio aos migmatitos, representados por paragnaisses e xistos pelíticos. Essas rochas apresentam granulação fina a média e cor variando em tons de cinza. A assembleia mineral contém feldspato, biotita, muscovita, quartzo, granada,

sillimanita. A grafita e óxidos/hidróxidos de manganês ocorrem disseminados ou em lentes concentradas de dimensões centimétricas. Em lâmina delgada, as rochas apresentam textura granolepidoblástica a granoblástica, formada por níveis micáceos contendo biotita e muscovita, além de opacos (hematita, magnetita, grafita), granada e zircão. Intercalados com os níveis micáceos, têm-se níveis ricos em feldspato potássico, quartzo e plagioclásio. A rocha apresenta ainda fibrolita e sericita. A associação mineralógica feldspato potássico + granada + biotita + sillimanita + quartzo + plagioclásio + opacos indica metamorfismo progressivo de grau médio a alto em fácies granulito, zona da sillimanita. No entanto, a presença de sericita + muscovita + biotita + quartzo + opacos + plagioclásio indica superposição de processos retrometamórficos (Costa e Palheta, 2017).

Rochas quartzíticas: essas rochas possuem ocorrência restrita a algumas porções da folha Itapiúna em elevações topográficas denominadas por “serrote”. Possui coloração amarelada a esbranquiçada e granulação fina a grossa. É composta por, além de quartzo, aglomerados de granada associadas a magnetitas, de granulação milimétrica a centimétrica, e ripas de sillimanita e alguma biotita. Possui, como minerais acessórios, monazita e zircão. A associação quartzo + sillimanita + granada + opacos indica metamorfismo de alto grau, fácies granulito, também em zona da sillimanita (Costa e Palheta, 2017). O caráter aluminoso dessas rochas sugerem que elas sejam potenciais hospedeiras de grafita como ocorre nos xistos peraluminosos do Grupo Macaúbas (Belém, 2006).

Mármore micáceos: estão presentes ainda, como lentes, mármore micáceos de coloração esbranquiçada, bem recristalizados, de espessura métrica, encaixados concordantemente com os metatextos bandados. Entre as zonas de cisalhamento Senador Pompeu e Orós é comum a ocorrência de rochas cálcio-silicáticas, associadas a granada anfíbolitos migmatizados e mármore estéreis à grafita (Costa e Palheta, 2017).

A unidade possui contato tectônico por superfície milonítica de baixo ângulo, tipo *nappe*, com o Complexo São José da Macaoca (ver Figura 8). Contatos de alto ângulo são menos frequentes. Com os granitos da unidade leucogranito Itapiúna o contato é transicional a abrupto, ou tectônico (Costa e Palheta, 2017).

O Complexo Canindé do Ceará Central engloba ainda as rochas gnáissico-migmatíticas ortoderivadas (registradas sob a sigla PRcn2), comumente hornblenda plagioclásio gnaisses, de composição granodiorítica a tonalítica, coloração acinzentada e foliação de baixo ângulo, marcadas pela orientação dos minerais máficos (Costa e Palheta, 2017).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Caracterização Petrográfica

Foram estudadas 41 amostras provenientes dos quatro furos de sondagem cedidos pela Lara Exploration Ltda. ao SGB/CPRM. As amostras foram nomeadas recebendo um prefixo “FC-R” seguido do número da amostra. As amostras de número 1 a 8 pertencem ao furo DDH-01, que não foram cedidas fisicamente ao SGB/CPRM, mas as informações relativas a teores e litologias intersectadas foram disponibilizadas. As amostras FC-R-09 até FC-R-32 pertencem ao furo DDH-02. As amostras FC-R-33 a 36 compõem o furo DDH-06 e as amostras FC-R-37 e FC-R-38 compõem o furo DDH-08.

O processo de caracterização teve início com a separação, limpeza e registro fotográfico de cada amostra. Em seguida, elas foram investigadas na lupa de mesa, visando identificar os melhores lugares para execução das seções polidas. Determinada a localização dos cortes, as amostras foram enviadas à litoteca do SGB/CPRM em Araraquara (SP) para confecção das seções petrográficas. Outras amostras foram preparadas no laboratório de laminação do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP) com o intuito de eliminação de defeitos no processo de preparação (por exemplo, buracos). As fotos das amostras com indicação da posição em que as lâminas foram locadas se encontra apresentado como material suplementar.

A descrição das lâminas petrográficas permitiu a caracterização granulométrica e morfológica da grafita, bem como, a associação mineralógica da ganga (silicatos e sulfetos) associada à grafita. Além disso, auxiliou na escolha das melhores posições para a aplicação de outros métodos de caracterização, como a espectroscopia Raman e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

5.1.1 Análise em Lupa de Mesa

A análise por lupa de mesa utiliza instrumento de modelo Olympus SZ61, na Superintendência Regional de São Paulo do SGB/CPRM (SUREG/SP), e teve como principal objetivo o reconhecimento de texturas e minerais. O equipamento permite o uso de *zoom ratio* de 0,67 a 4,5 e aumento de 2,0 a 270x, permitindo visualização 3D e fidelidade à coloração verdadeira. Com essa análise será possível determinar a textura e mineralogia característica de cada amostra.

Cada amostra foi analisada na lupa para a identificação da textura e mineralogia características. As informações obtidas foram utilizadas para definir as melhores regiões para confecção de lâminas petrográficas.

5.1.2 Microscopia Óptica

As análises petrográficas foram realizadas em microscópio ótico Olympus BX51 do SGB/CPRM da SUREG/SP, equipado com objetivas de aumento de 2X, 4X, 10X, 20X e 50X, fonte de luz superior e inferior, polarizador e condensador, além de ajustes para análises petrográficas com uso de luz refletida e transmitida. Acoplado ao microscópio, se encontra uma câmera fotográfica digital, *Infinity 1*.

Ambos, câmera e microscópio ótico, se encontram conectados a um computador que conta com o *software* Olympus de análise de imagem. O que permitiu a aquisição de dados de medição de tamanho (comprimento e largura) dos *flakes* de grafita e dos demais minerais, além de fotografias das lâminas petrográficas com diferentes configurações de visualização e aumentos (*zoom*).

Para simplificar a identificação dos minerais nas fotomicrografias e em algumas citações ao longo do texto, foram utilizadas as abreviações listadas na Lista de Siglas e Abreviações apresentada no início do trabalho.

As lâminas petrográficas abrangem todos os litotipos amostrados durante a campanha e foram confeccionadas em seções com e sem polimento e sem lamínula, pois objetiva o estudo microscópico sob luz transmitida e refletida. A descrição microscópica das lâminas petrográficas visa fornecer um olhar detalhado sobre as formas de ocorrência, granulação, feições morfológicas e estruturas presentes nos cristais de grafita e minerais associados, por exemplo, em intercrescimentos de filossilicatos com grafita.

Para evidenciar as diferentes formas de ocorrência da grafita nas litologias estudadas, as amostras foram classificadas em três tipologias:

- Leucossoma: leucossomas graníticos a sienograníticos;
- Gnaiss: biotita gnaisses e sillimanita-grafita-biotita gnaisses (metatexitos);
- Xisto: biotita xistos e biotita-grafita xistos.

Do ponto de vista da morfologia e grau de impureza empírico, os *flakes* foram classificados em três tipos (Belém, 2006): (i) palhetas tabulares (Figura 11A), que em seções basais apresentam contornos hexagonais bem definidos; (ii) palhetas tabulares com pontas esfarrapadas (Figura 11B) e (iii) farrapos (Figura 11C). As palhetas tabulares caracterizam-se por formas retangulares bem delimitadas, extremidades preservadas e ausência de inclusões. Sendo que os dois últimos tipos morfológicos, por apresentarem alto teor de impureza, causam problemas no aproveitamento do minério (Belém, 2006). Com respeito as estruturas, os *flakes* foram classificados como cristais lamelares (ou dobras abertas) e cristais com

dobramentos intensos (dobras fechadas). Os resultados observados se encontram no Anexo 2.

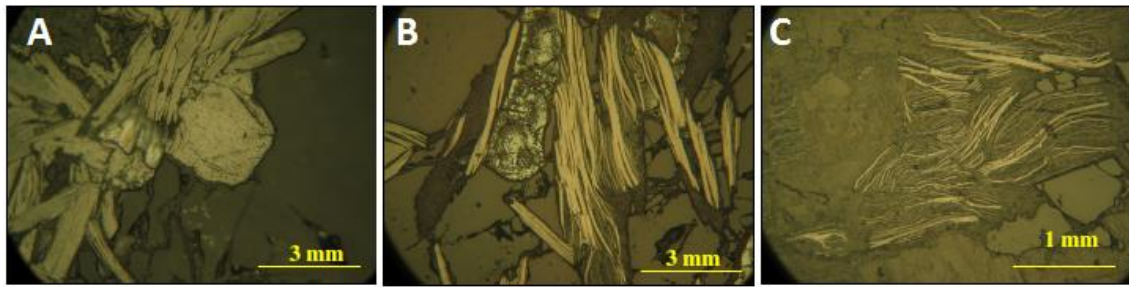


Figura 11: Lâminas petrográficas sob luz refletida, apresentando as formas morfológicas de ocorrência da grafita. A: cristais tabulares e seção basal hexagonal; B: Cristais tabulares com bordas esfarrapadas; C: Farrapos (fonte: Belém, 2006)

Para uma caracterização mais detalhada, foi feita a medição direta dos cristais de grafita em algumas lâminas, o resultado dessas medidas encontram-se no Anexo 3. Os *flakes* medidos foram classificados utilizando critério baseado em Scrogins (2015) e Ribeiro (2016) em *fine flakes* (ff), *médium flakes* (mf), *large flakes* (lf) e *extra large flakes* (elf). Os intervalos para cada uma das classes é apresentado na Figura 12. A classificação utilizada reúne as granulações *fine* e *small* dentro de uma mesma classe. O resultado dessa classificação e os histogramas com as informações das medidas estão apresentados no capítulo de resultados.

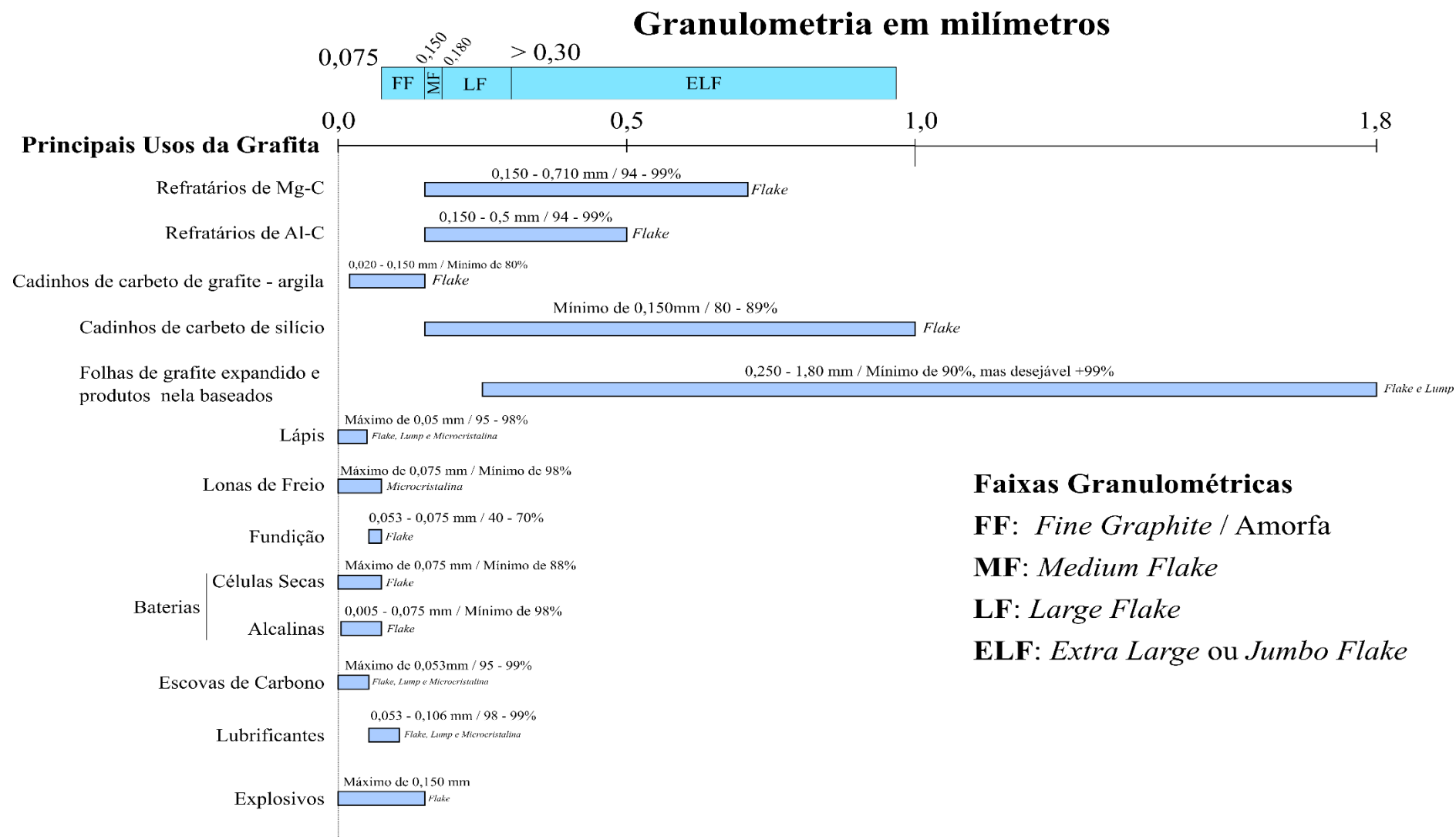


Figura 12: Classificação do tamanho dos *flakes* de grafita e indicação dos usos adequados para cada classe (figura de Sousa e Matos, no prelo, baseada em Scrogins, 2015; Ribeiro, 2016).

5.2 Caracterização Mineralógica

As lâminas selecionadas na caracterização petrográfica foram submetidas à espectroscopia Raman, visando obtenção do grau de cristalinidade e estimativa de temperatura de formação das grafitas.

Ao todo, foram realizadas três etapas de aquisição de dados de espectroscopia Raman. Na primeira, foram analisadas 6 amostras de lâminas petrográficas polidas confeccionadas na litoteca do SGB/CPRM. Na segunda etapa foram analisadas 6 amostras de lâminas petrográficas não polidas manufaturadas no laboratório de laminação do IGc-USP. Em ambas as etapas, as amostras foram analisadas nas objetivas de 10x, 20x e 50x. Todavia, com o intuito de validar as duas primeiras etapas de amostragem, foi realizada uma terceira. Com 3 amostras produzidas na laminação do IGc-USP e uma amostra da laminação do SGB/CPRM, foi realizado um número maior de medidas em cada amostra, utilizando uma objetiva de maior aumento (100x).

Em seguida, uma amostra (FC-R-32) foi analisada em microscopia eletrônica de varredura, com vistas a conhecer melhor a disposição, o tamanho, a morfologia e a possível correlação com impurezas dos *flakes* de grafita. Para associar impurezas com a morfologia dos grãos analisou-se as micro-inclusões e os pequenos fraturamentos, bem como, a associação mineral e outras feições ou estruturas que pudessem indicar a qualidade do material estudado.

5.2.1 Espectrometria Raman

A espectroscopia Raman, daqui para frente referida apenas como Raman, é uma técnica analítica que emprega luz monocromática para atingir o objeto que se procura analisar. Quando o objeto é atingido, as ondas eletromagnéticas sofrem um espalhamento, que pode ser elástico ou inelástico. A radiação que foi espalhada inelasticamente pode ser coletada e, a partir dela, pode-se extrair diversas informações sobre a composição química e estrutura material analisado. A microscopia Raman consiste em utilizar um microscópio óptico convencional para focalizar o feixe de luz incidente e captar a radiação espalhada (Faria *et al.*, 1997; Clark e Dines, 1986).

A diferença entre a energia incidente e a captada (espalhada) corresponde à energia com que os átomos presentes na área estudada estão vibrando. Pela energia, é possível descobrir a frequência, e assim, determinar como os átomos estão ligados, inferir a geometria molecular, descobrir as espécies químicas presentes e como elas interagem entre si e com o ambiente, entre outras informações. Assim, a técnica Raman se constitui como uma poderosa ferramenta. Permitindo, inclusive, a diferenciação de polimorfos (Faria *et al.*, 1997; Clark e Dines, 1986; Sala, 1995).

A análise por Raman tem a vantagem de poder ser feita sem necessidade de preparações ou manipulações de qualquer natureza (como a pulverização, que destrói a amostra) (Faria *et al.*, 1997). Por ser simples, rápida, não destrutiva e poder ser utilizada tanto em análises de laboratório de pequena escala quanto em contextos de produção massiva, a análise Raman é uma técnica muito empregada para análise e identificação de diferentes matérias carbonosas (Tuinstra e Koenig, 1970; Beny-Bassez e Rouzaud, 1985; Wopenka e Pasteris, 1993; Beyssac *et al.*, 2002; Ferrari, 2007; Aoya *et al.*, 2010; Ferrari e Robertson, 2010; Jimenez, 2017).

O espectro Raman da grafita apresenta resposta na região de 1580 cm^{-1} , denominada de banda G (Figura 13), que representa a vibração E_{2g2} e simetria D_{6h}^4 (grupo espacial $P6_3/mmc$, zona Brillouin da estrutura hexagonal) (Wopenka e Pasteris, 1993), o que corresponde aos pares de átomos de C interligados por ligação sp^2 e não representam necessariamente ligações hexagonais de carbono. O espectro apresenta ainda resposta eletromagnética nos comprimentos de 1332 cm^{-1} e 1605 cm^{-1} que são denominados de banda D1 e D2, respectivamente.

Boa parte dos estudos que utilizam a espectrometria Raman nesses materiais é conduzido com o intuito de obter o grau de cristalinidade de materiais carbonosos. Isso se deve à correlação entre o espectro do material com a sua cristalinidade. De modo geral, com o aumento da temperatura de cristalização, o espectro de materiais carbonosos se modifica. Isso ocorre por aumento gradual da área da banda G (1580 cm^{-1}) e diminuição, até o completo desaparecimento, da banda D1 ($\sim 1332\text{ cm}^{-1}$).

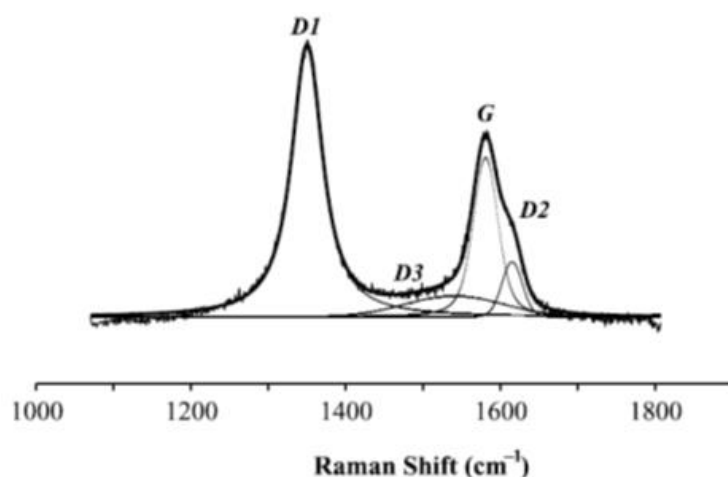


Figura 13: Exemplo de espectro Raman de primeira ordem de material grafitoso com a indicação das bandas G, D1 e D2. A intensidade e a área registradas nessas posições são usadas para o cálculo dos parâmetros R1 e R2 (espectro de Beyssac *et al.*, 2002).

Beyssac *et al.* (2002) e Aoya *et al.* (2010) estabelecem correlações entre o grau de organização do material carbonoso e a intensidade do metamorfismo, tanto para rochas

metamorfizadas regionalmente como afetadas por metamorfismo de contato. A cristalinidade ou grau de organização cristalográfica, é obtida pelo cálculo dos parâmetros R1 (Equação 1) e R2 (Equação 2).

Equação 1: Definição do parâmetro R1 como razão entre a intensidade dos picos contidos nas bandas D1 e G (Beyssac *et al.* (2002).

$$R1 = \frac{D1_{(intensidade)}}{G_{(intensidade)}}$$

Equação 2: Definição do parâmetro R2 como razão entre as áreas sob as curvas presentes nas bandas D1, D2 e G (Beyssac *et al.* (2002).

$$R2 = \frac{D1_{(área)}}{D1_{(área)} + D2_{(área)} + G_{(área)}}$$

A calibração do geotermômetro de Beyssac *et al.* (2002), foi feita comparando rochas ricas em material carbonoso a diferentes temperaturas metamórficas. O parâmetro R2 de cada uma dessas amostras foi calculado e, a relação estabelecida entre R2 e as condições máximas de temperatura alcançadas durante o metamorfismo progressivo (pico metamórfico), emprega a seguinte fórmula empírica (Equação 3):

Equação 3: Equação que estabelece a relação linear entre o parâmetro R2 e a temperatura de formação da grafita (Beyssac *et al.*, 2002).

$$T_{(°C)} = (-445) \times R2 + 641$$

A temperatura estimada usando essa equação tem erro de $\pm 50^{\circ}\text{C}$ (Beyssac *et al.*, 2002).

Aoya *et al.* (2010) desenvolveram outro geotermômetro, a partir da compilação dos mesmos dados de metamorfismo regional utilizados em Beyssac *et al.* (2002) e novos dados adquiridos para rochas de metamorfismo de contato. A relação estabelecida entre R2 e a temperatura é dada pela seguinte equação do segundo grau (Equação 4):

Equação 4: Equação que estabelece relação quadrática entre R2 e a temperatura de formação da grafita (Aoya *et al.*, 2010).

$$T_{(°C)} = (91,4) \times R2^2 - 556,3 \times R2 + 676,3$$

Para a Equação 4, o erro é estimado em $\pm 30^{\circ}\text{C}$ (Aoya *et al.*, 2010).

O grau de cristalinidade é obtido pela equação de Tuinstra – Konenig ou fórmula de Knight (Ferrari e Robertson, 2000; Mathews *et al.*, 1999; Tuinstra e Koenig, 1970) que estabelece uma relação inversamente proporcional entre o tamanho de cristalito (L_a) e o parâmetro R1 (Equação 5):

Equação 5: Relação entre o parâmetro R1 e o tamanho do cristalito (Ferrari e Robertson, 2000)

$$L_a = C(\lambda) \times R1^{-1}$$

onde R1 é a razão entre as intensidades de D1 pela banda G, e C é função de λ (comprimento de onda da radiação incidente), e foi estimado em $\sim 83 \text{ \AA}$ com base no $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ (Mathews *et al.*, 1999).

A partir do cálculo de L_a e da razão R1 um gráfico (Figura 14) que ilustra a evolução de R1 em função de L_a foi construído por Ferrari (2007). Esse gráfico considera que a função que descreve a evolução de R1 em função do L_a para carbono amorfo é diferente da função que descreve a relação entre esses parâmetros para grafita nanocristalina. No primeiro caso, existiria uma correlação diretamente e em proporção quadrática ($R1 \propto L_a^2$). Enquanto no segundo caso (para grafita nanocristalina) a relação é descrita pela Equação 5.

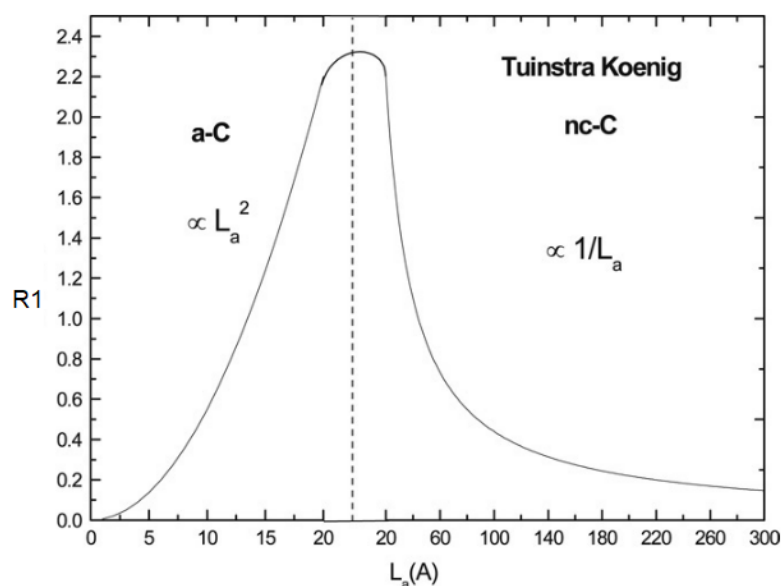


Figura 14: Evolução esquemática de R1 em função da desordem. A reta tracejada de divisão da curva marca limite entre a grafita nanocristalina e o carbono amorfo (Ferrari, 2007).

Outra forma de classificar a grafita (Amaral Junior e Baldan, 2017), se baseia na morfologia geral do espectro obtido (Figura 15). Nela, a grafita pode ser caracterizada como grafita de grão fino (GGF) ou *high ordered pirolitic graphite* (HOPG). Sendo essa (HOPG) uma grafita de elevado grau de cristalinidade. A classificação é baseada estritamente na presença ou ausência de resposta nas bandas D e D' (equivalentes a D1 e D2, respectivamente).

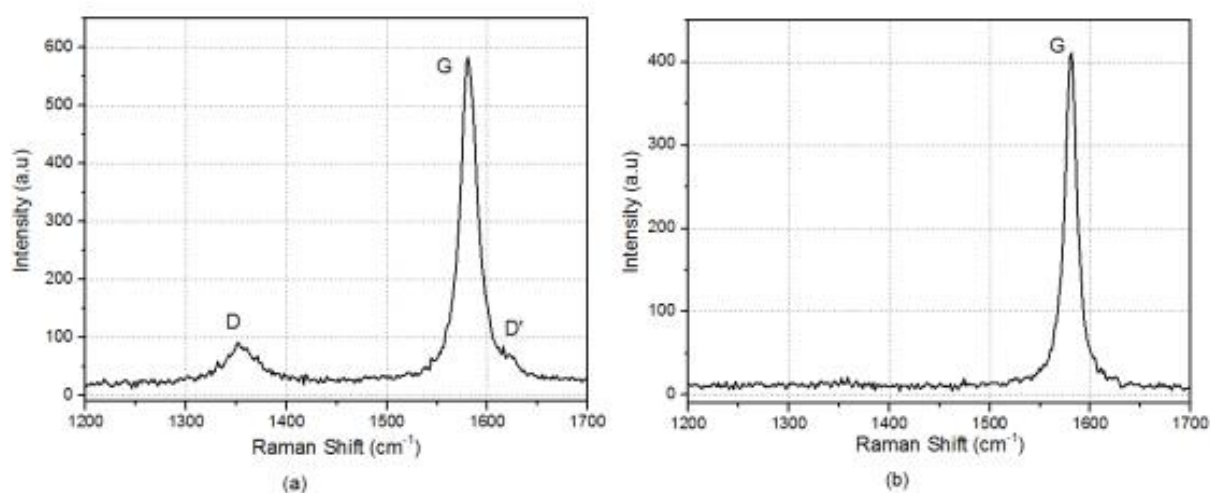


Figura 15: Espectros Raman dos: (a) GGF (grafita de grão fino), sem tratamento superficial e (b) HOPG (*high ordered pyrolytic graphite*) (retirado de Amaral junior e Baldan, 2017).

As medidas espectrométricas Raman foram efetuadas no aparelho Witec Alpha 300 com laser UHTS 600 - *Helium-Neon* (Figura 16) e comprimento de onda de 632,8 nm (excitação), do Instituto de Química da USP. Nas duas primeiras etapas, foram realizadas seis leituras em cada lâmina, cada leitura composta de vinte acumulações com dois segundos de duração. A terceira etapa seguiu as recomendações apresentadas em Aoya *et al.* (2010). Assim, foram realizadas vinte e cinco medidas em cada amostra, mantendo o tempo de exposição e o número de acumulações.

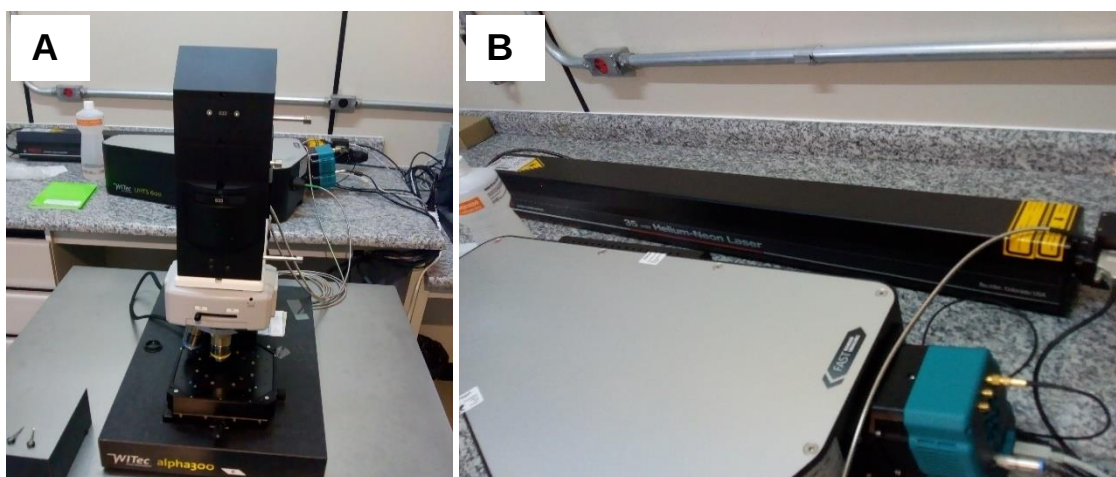


Figura 16: Fotografias dos equipamentos que constituem o espectrômetro de Micro-Raman. A: microscópio ótico equipado com espectrômetro. B: *Helium-Neon laser*.

Os espectros foram analisados segundo a metodologia de Amaral Junior e Baldan (2017) utilizando o *software* Origin®. Os resultados obtidos se encontram apresentados na seção a seguir.

5.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) consiste em analisar um material que é irradiado por um fino feixe de elétrons. Como produto dessa interação são emitidas uma série de radiações, tais como: elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios X característicos, elétrons Auger e fótons (Dedavid *et al.*, 2007). Quando obtido em amostragem sistemática, composta por malha regular de linhas sucessivas, essas radiações podem oferecer informações características sobre a amostra (composição, cristalografia, topografia de superfície, etc.) (Dedavid *et al.*, 2007).

A análise MEV foi empregada com o intuito de auxiliar nas definições morfológicas da superfície dos cristais de grafita, potencializando o entendimento das texturas, microestruturas ou faturamentos presentes nos cristais. Foram realizadas determinações químicas qualitativa pontuais, visando melhorar o entendimento da assembleia mineral presente na amostra.

A análise foi realizada no laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental (GSA) IGc-USP, em equipamento MEV LEO 440I, equipado com detector de energia dispersiva de raios X (*Energy Dispersive Spectroscopy* – EDS) da marca Oxford.

A amostra analisada foi um fragmento de rocha, não polido e recoberto com carbono.

5.2.3 Difração de Raios X

Os raios X são ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda, entre a radiação gama e ultravioleta, da ordem de ângstrons ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$). Por funcionarem como redes de difração para os raios X, as substâncias cristalinas podem ser identificadas, visto que os átomos da estrutura cristalina espalham os Raios X sem mudança de comprimento de onda, apenas de direção (Kaplan, 1978; Jenkins e Snyder, 1996). As distâncias interplanares de uma dada substância cristalina podem ser medidas relacionando-se o ângulo de difração (θ) e o comprimento da onda incidente (λ), através da lei de Bragg. Como cada substância tem um conjunto característico de distâncias interplanares, seu padrão de difração de raios X pode ser usado em sua identificação.

As análises de difração de raios X foram realizadas no laboratório de difração de Raios X (LDRX) do IGc-USP. As análises foram feitas em difratômetro de pó Siemens modelo Bruker D8 equipado com detector de cintilação e ótica fixa, com geradores de raios X e câmeras de difração de vários tipos para pó ou monocristais.

Para que se possa realizar a análise por difração de raios X da grafita, uma preparação prévia das amostras é necessária, com o intuito de separar a grafita dos demais constituintes

da rocha. Seguindo o procedimento descrito por Belém (2006), as amostras foram desagregadas manualmente, com auxílio de moinho de ágata. Em seguida, foram peneiradas e colocadas em decantação em mistura heterogênea bifásica composta por 1 mL de querosene com óleo de peroba (3 partes de querosene para cada parte de óleo de peroba) e 1 litro de água. As amostras foram deixadas em decantação por pelo menos 3 horas. Passado esse período, o material sobrenadante foi recolhido e levado à estufa, em temperatura em torno de 80°C, para secagem. Por último, o material seco foi analisado.

5.3 Modelo de Teores

Com vistas a melhorar o entendimento da mineralização de grafita e distribuição espacial dos teores utilizando as informações disponibilizadas pela Lara Exploration Ltda. (2015) e o *software* Datamine Studio RM® foi elaborado um modelo tridimensional da mineralização. Os teores foram interpolados utilizando o método do Inverso do Quadrado da Distância (IQD) e elipse de busca ajustada de modo ao eixo Y coincidir com o rumo do mergulho da foliação metamórfica, apenas visando oferecer uma visão tridimensional esquemática da distribuição dos teores ao longo da mineralização.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Petrografia da Rocha Hospedeira

A grafita hospeda-se em rochas metamórficas, paraderivadas e de caráter migmatítico. Os tipos litológicos incluem quartzo-biotita-grafita xisto (nas porções mais ricas em grafita), grafita-biotita gnaiss, grafita-sillimanita-biotita gnaiss migmatítico (metatexito) e bolsões de leucossoma (de composição granítica a sienogranítica).

Por se tratar de variações gradacionais dentro de uma mesma unidade geológica, o contato entre cada uma dessas litologias é difuso, sendo possível identificar dois ou mais litotipos intercalados em uma única amostra de mão.

A composição mineralógica de cada amostra se encontra no Anexo 1. As texturas e formas de ocorrência específicas da grafita serão discutidas em tópico separado. Os litotipos são descritos a seguir:

Quartzo-biotita-grafita xisto

São rochas acinzentadas a pretas (Figura 17A e Figura 17B), com estrutura orientada, por vezes deformada, em dobras intrafoliais. A textura varia de granolepidoblástica a puramente lepidoblástica (Figura 17C), marcada pela orientação dos cristais de biotita e grafita. A granulação é média a grossa (1 a 3 mm). A mineralogia principal é composta por

grafita (2 a 35%), biotita (17 a 47%), quartzo (11 a 38%), plagioclásio (2 a 18%), muscovita (0 a 4%) e feldspato potássico (0 a 14%). Ocorrem como acessório zircão, turmalina, monazita, rutilo e magnetita.

Os cristais de grafita ocorrem na forma de aglomerados irregulares, tabulares ou globulares, frequentemente associados à biotita ou, em menor proporção, a quartzo e feldspato. A grafita apresenta-se em cristais tabulares, com seção basal hexagonal. A biotita se apresenta placoide, definindo a foliação da rocha.

Quartzo e feldspato possuem formatos irregulares, com contatos interlobados a retilíneos (menos frequente), e apresentam bimodalidade na granulação, com cristais de 0,3 a 2,8 mm quando ocorrem em níveis puramente quartzo-feldspáticos e cristais de 0,08 a 0,3 mm quando ocorrendo em meio aos aglomerados de grafita. O plagioclásio é Andesina (An:35), apresenta geminação polissintética e inclusões de quartzo e turmalina.

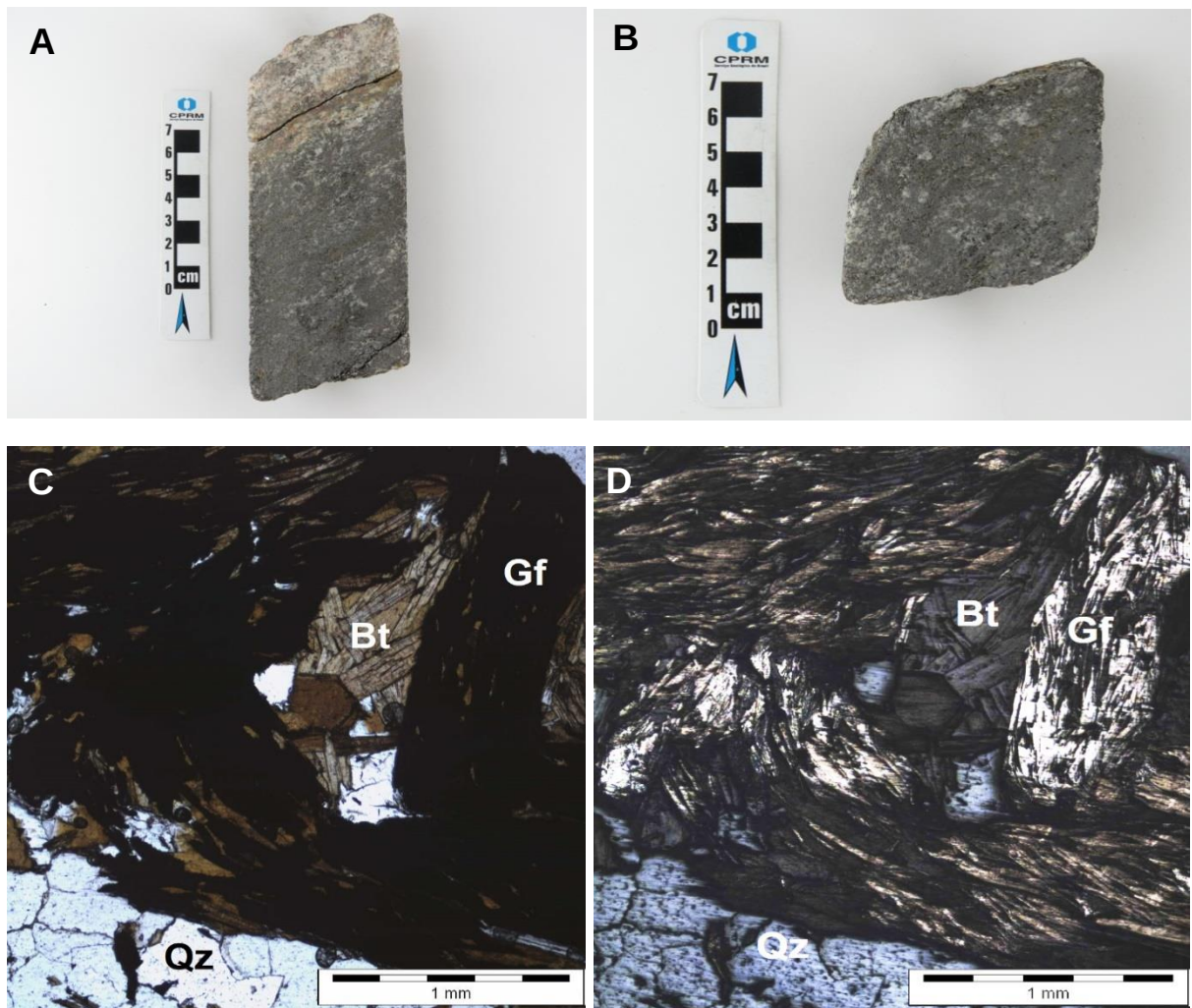


Figura 17: Fotografia de amostras (A) FC-R-18-1 e (B) FC-R-19-2.2, exemplificando o aspecto acinzentado dos grafita xistos, e fotomicrografias da lâmina petrográfica FC-R-14B, em (C) luz transmitida, com polarizador descruzado e (D) em luz refletida, visando destacar a textura geral da rocha. Notar ocorrência de grafita intercrescida com biotita.

Esse litotipo pode se apresentar de formas variadas, desde camadas de espessura centimétrica a decimétrica, passando por lentes subcentimétricas até *schlierens* de granulação milimétrica identificáveis em lâmina petrográfica.

Grafita-biotita gnaiss

Rocha de coloração branca a rósea e composta majoritariamente por quartzo (24 a 38%), feldspato potássico (2 a 23%), plagioclásio (An:40) (11 a 20%), biotita (13 a 30%) e grafita (7 a 25%). Possui foliação marcada pela orientação dos cristais de biotita e grafita. A rocha apresenta bandamentos bem demarcados, sendo uma banda composta por biotita e grafita e bandas compostas por feldspatos e o quartzo (Figura 18). A rocha apresenta matriz granolepidoblástica a lepidogranoblástica de granulação média a grossa, com cristais de 0,04 a 2 mm. Em algumas amostras, as bandas se desenvolvem com considerável continuidade lateral, de modo que é possível distinguir níveis submilimétricos francamente granolepidoblásticos a lepidoblásticos e níveis milimétricos lepidogranoblásticos a granoblásticos.

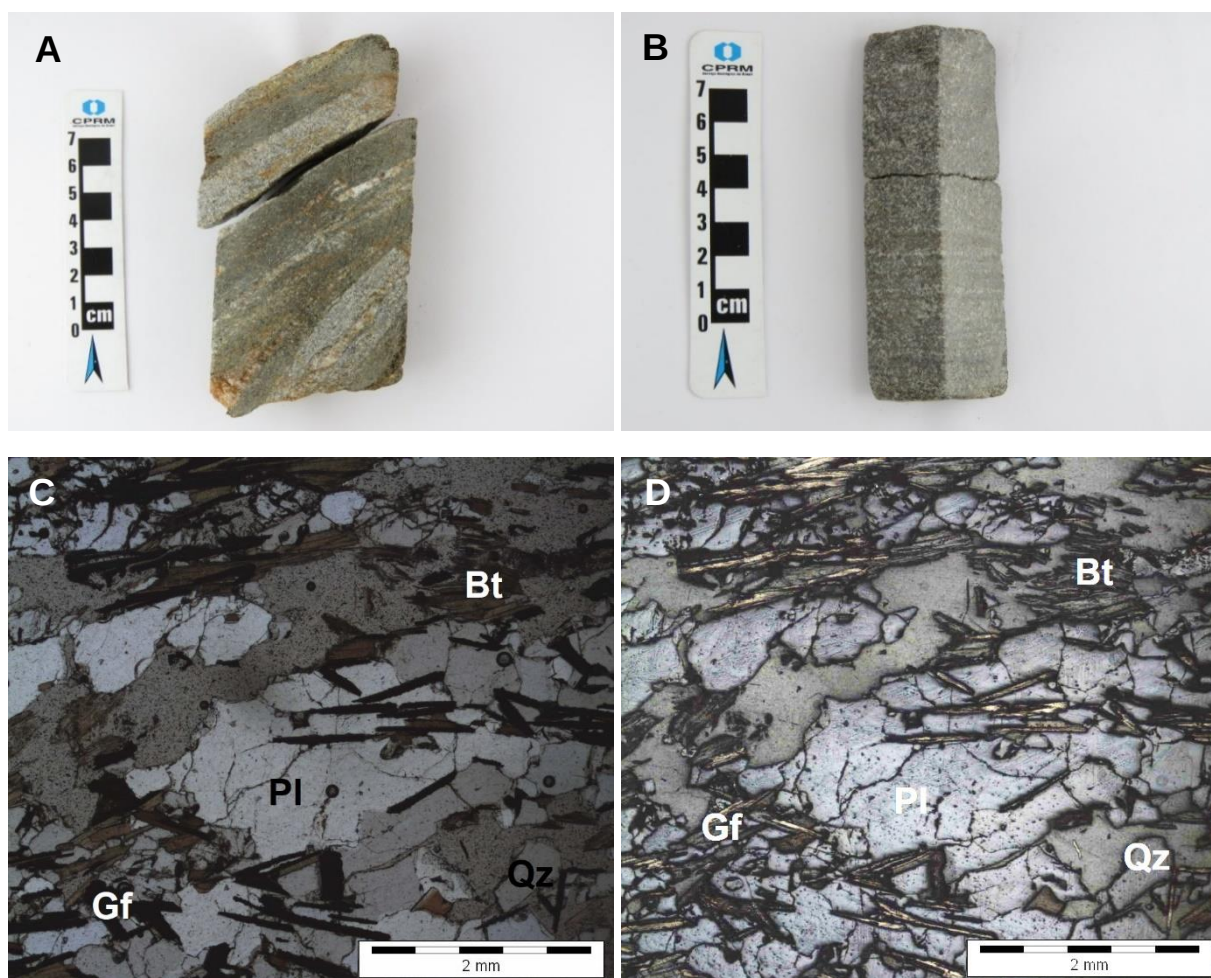


Figura 18: Fotografia de amostras (A) FC-R-14A, com bandamento gnáissico bem demarcado, e (B) FC-R-36-2, com bandamento mais difuso, e fotomicrografias da lâmina petrográfica FC-R-36, em luz transmitida (C), com polarizador descruzado e (D) em luz refletida, visando destacar a textura geral da rocha. Notar ocorrência de grafita intercrescida com biotita ou quartzo e feldspato, seguindo a orientação geral da rocha.

O quartzo apresenta extinção ondulante, rotação de subgrão e formato ameboide a poligonizado, indicando processo de migração de borda de grão e recristalização estática. O microclínio pode apresentar geminação em grade e inclusões de muscovita e quartzo.

A biotita é euédrica e placoide, sendo parcialmente substituída por cristais de clorita e muscovita (retrometamórficas). As porções ricas em biotita e grafita são mais susceptíveis a intempérica.

A grafita está dispersa na rocha hospedeira e, em granulação fina a média (de 0,05 a 1,9 mm), pode estar associada à biotita, quartzo ou feldspato. Descrições detalhadas da forma de ocorrência da grafita em cada litotipo se encontram apresentadas em seção específica.

Grafita-sillimanita-biotita gnaiss migmatítico (Metatextito)

Litotipo predominante na região sondada, trata-se de um migmatito de estrutura heterogênea, variando de estromática, a nebulítica, *schlieren* e venular (Figura 19).

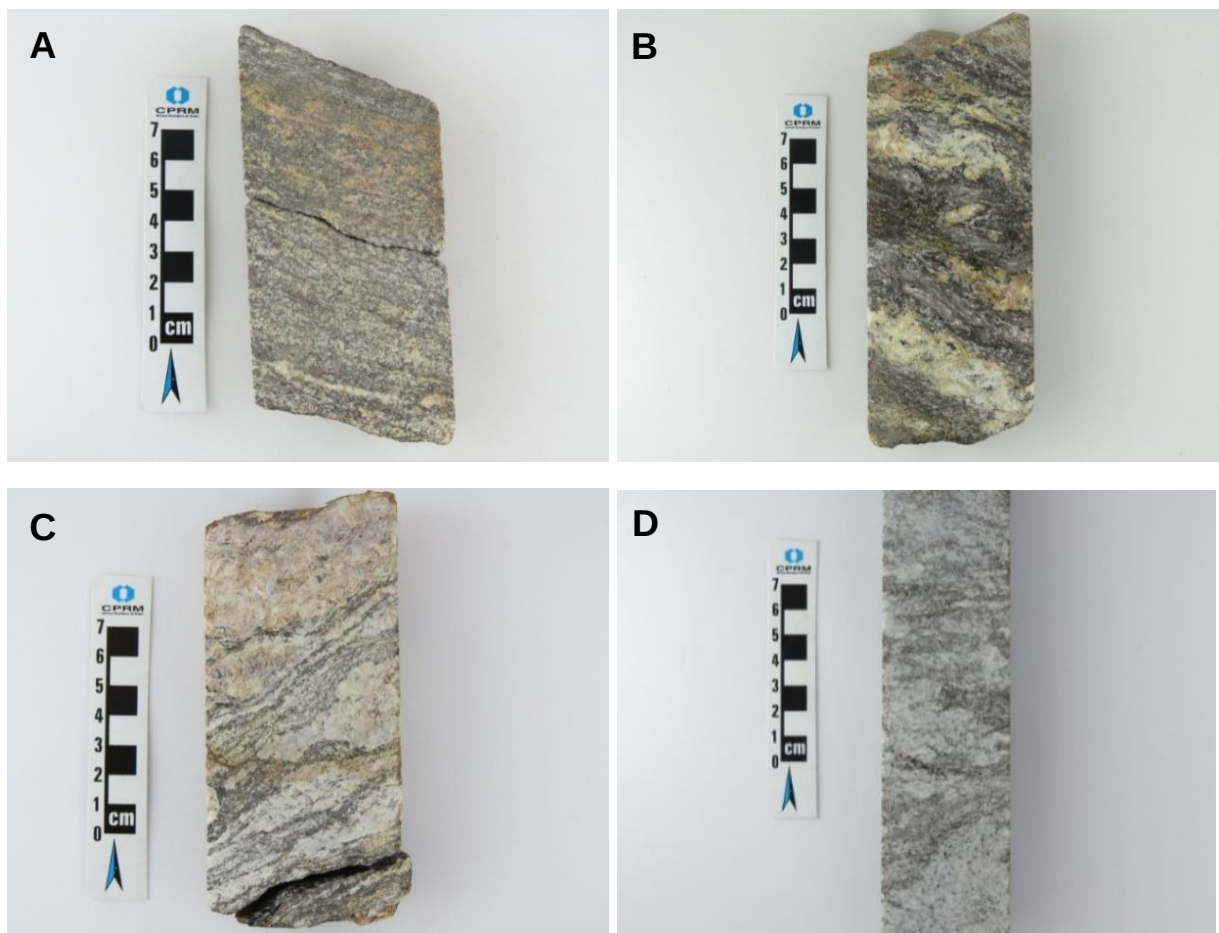


Figura 19: Fotografia de amostras: (A) FC-R-12-2 apresentando a estrutura nebulítica; (B) FC-R-15-2 com estrutura dobrada; (C) FC-R-40, com estrutura *schlieren* a estromática e; (D) FC-R-30 com estrutura venular a *schlieren*. Destaque para a heterogeneidade e variedades de estruturas que podem ser apresentadas por esse litotipo.

Apresenta-se como rocha branca, com porções acinzentadas e rosadas, composta majoritariamente por quartzo (19 a 45%), feldspato potássico (5 a 33%), plagioclásio (3 a 30%), biotita (8 a 25%), sillimanita (<1 a 18%) e grafita (1 a 23%). De estrutura foliada, definida pela orientação dos cristais de biotita, sillimanita e grafita. A estrutura da rocha é heterogênea, ora marcada por um aspecto metamórfico, bandamento gnáissico (Figura 20), com intercalações milimétricas de bandas lepidogranoblásticas, compostas por quartzo, feldspatos, biotita e grafita, de granulação média, e bandas nematolepidoblásticas, compostas por biotita, grafita e sillimanita, de granulação fina a média; ora apresentando um aspecto ígneo (bolsão), com estrutura maciça a levemente orientada, textura fanerítica inequigranular seriada, média a grossa, holocristalina, de composição félsica. Os bolsões contêm porções (Figura 20D) que preservam o aspecto metamórfico, com foliação bem marcada, podendo formar dobras convolutas, composto por biotita, grafita e sillimanita.

O quartzo possui contatos irregulares a retilíneos, podendo ser ameboide (migração de borda de grão) ou poligonizado (recristalização estática superimposta).

A biotita é euédrica, fortemente pleocróica e se encontra associada à grafita e à sillimanita.

O plagioclásio apresenta geminação polissintética (lei da albita) regular ou deformada, podendo formar *kink band* (Figura 22A) e possui composição de Andesina ($35 < An < 45$).

O feldspato potássico pode ocorrer de duas formas: levemente orientado, seguindo o bandamento, com geminação *carlsbad*, ou em meio aos bolsões quartzo-feldspáticos, com geminação em grade (microclínio), contatos retilíneos a lobados e inclusões de muscovita, quartzo, biotita e sillimanita.

A sillimanita se apresenta como fibrolita, em granulação muito fina (<0,1 mm), como aglomerados ou em inclusões em quartzo, feldspato e muscovita, mas também pode se apresentar em seção basal losangular, em granulação fina (entre 0,1 e 0,2 mm). Pode estar contida na foliação da rocha, orientada, ou se apresentar fibrorradiada (Figura 21).

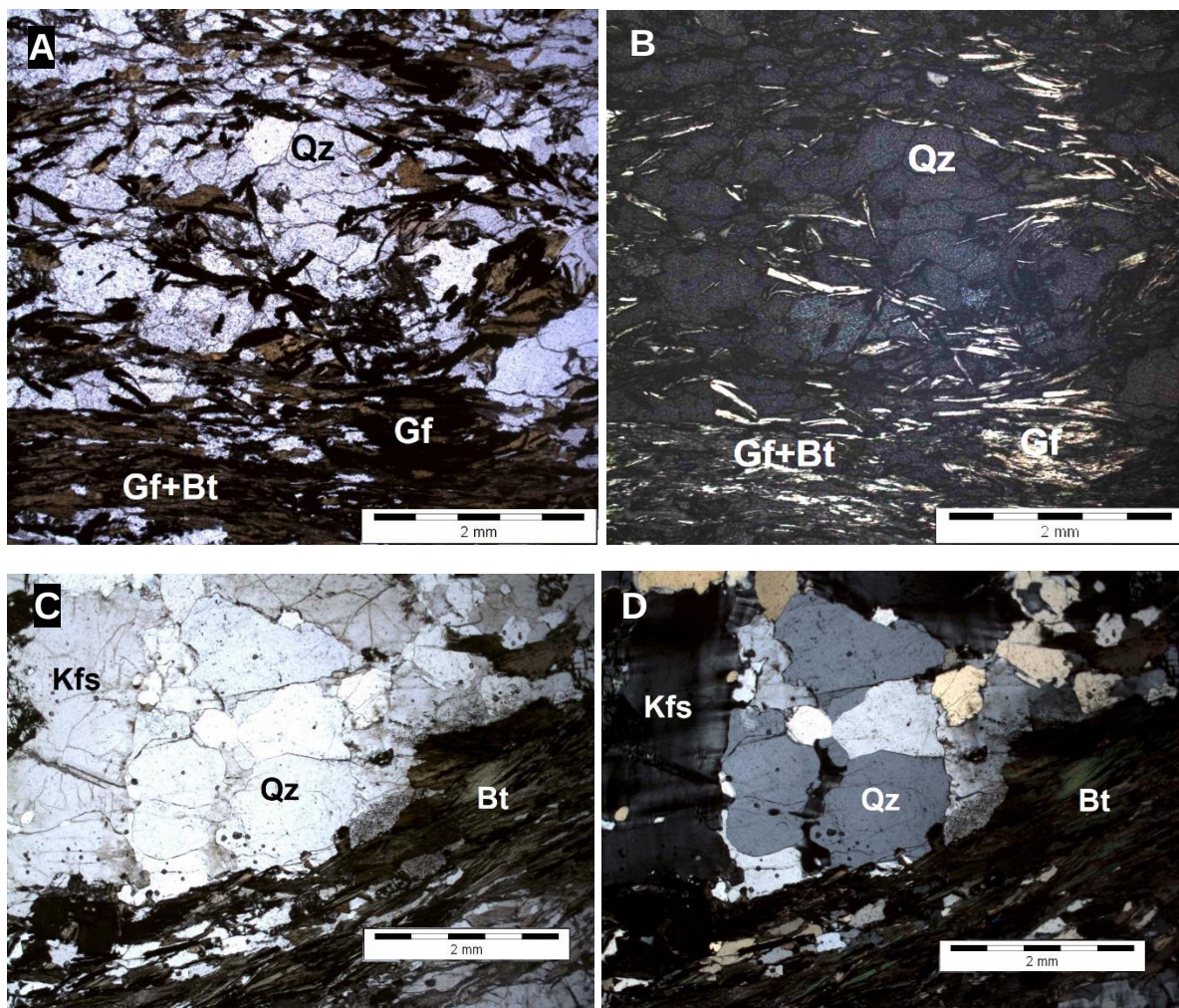


Figura 20: Fotomicrografias da lâmina petrográfica (A) FC-R-10-2, em luz transmitida, com polarizador descruzado e (B) em luz transmitida com polarizador cruzado, visando destacar uma das texturas mais comuns nesse litotipo, que apresenta bandamento metamórfico bem demarcado. Em C e D é apresentada outra feição típica, segregação em bolsões de quartzo feldspato.

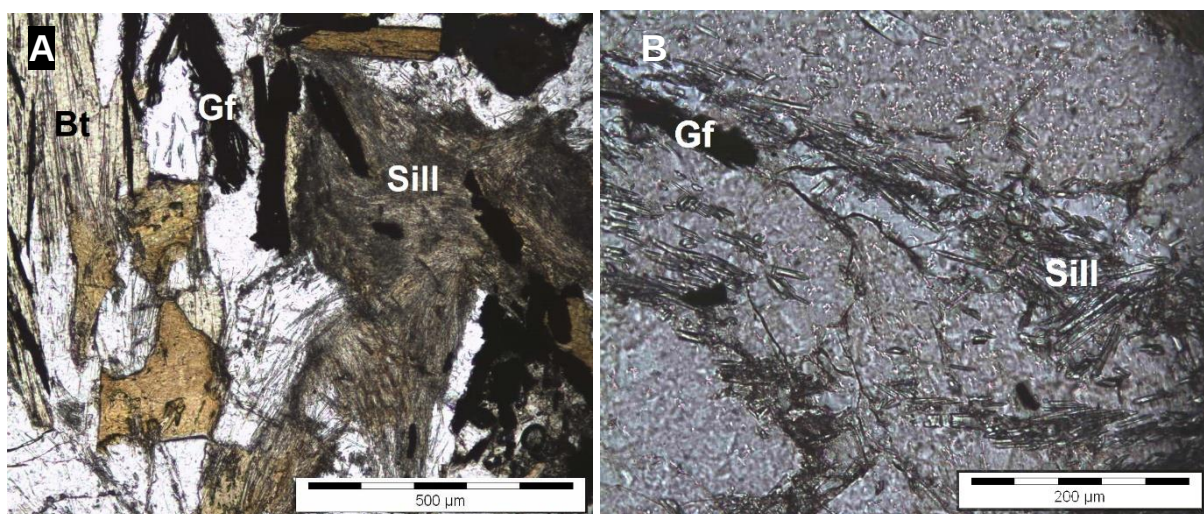


Figura 21: Fotomicrografias da lâmina petrográfica FC-R-10-2, em luz transmitida, com polarizador descruzado (A) e em luz transmitida com polarizador descruzado (B) visando destacar as formas de ocorrência da fibrolita.

Epidoto e sericita preenchem fraturas e substituem parcialmente o feldspato. A magnetita se encontra em aglomerados, de ocorrência pouco frequente, associada à grafita.

Localmente, a rocha pode apresentar bolsões quartzo-feldspáticos ricos em grafita, onde os cristais de grafita não estão orientados, biotita ausente, e os cristais de quartzo e feldspato com feição ígnea, sugerindo uma tipologia podiforme.

É possível observar simplectitos de feldspato potássico e plagioclásio ou quartzo e muscovita (Figura 22B)

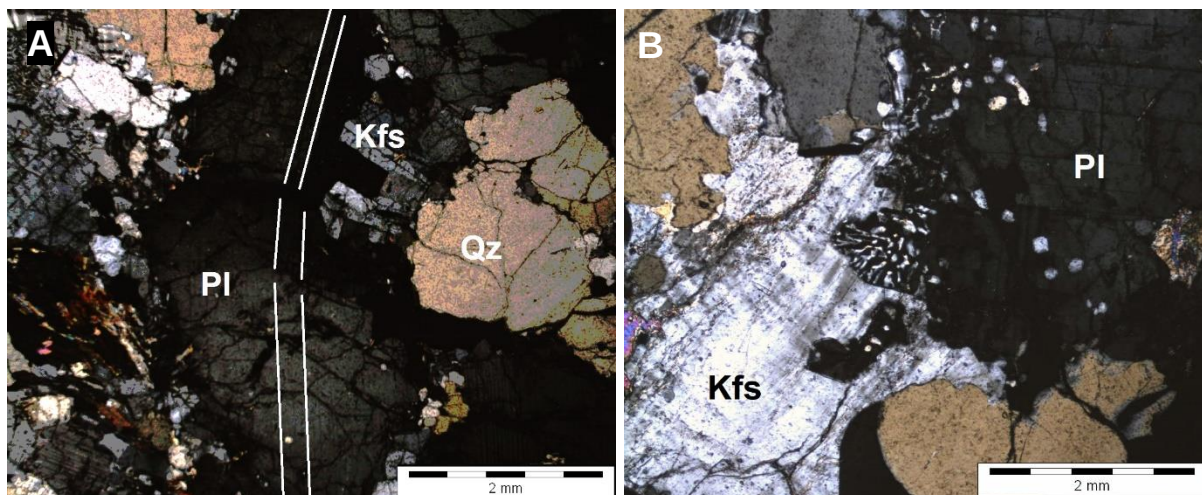


Figura 22: Fotomicrografias da lâmina petrográfica FC-R-13, em luz transmitida, com polarizador cruzado mostrando cristal de plagioclásio com geminação polissintética (marcada pelas retas brancas) em *kink band* (A) e simplectitos entre os minerais félsicos (B).

Leucossoma (granítico a sienogranítico)

Rocha branco-rosada, de estrutura maciça, com matriz inequigranular seriada, de granulação média a grossa (Figura 23 e Figura 24). Localmente, pode apresentar cristais de feldspato potássico de granulação mais grossa que a matriz da rocha (ca. 5,0 mm). A mineralogia é composta por quartzo (24 a 42%), feldspato potássico (16 a 38%), plagioclásio (8 a 24%), muscovita (2 a 7%), biotita (2 a 21%), sillimanita (1 a 4%) e grafita (<1 a 6%). Os minerais acessórios são epidoto, zircão, rutilo, turmalina e monazita (até 1%). Biotita, sillimanita e grafita frequentemente são de granulação fina, raramente média, compondo aglomerados venulares, de granulação média a grossa, com textura do tipo *schlieren*.

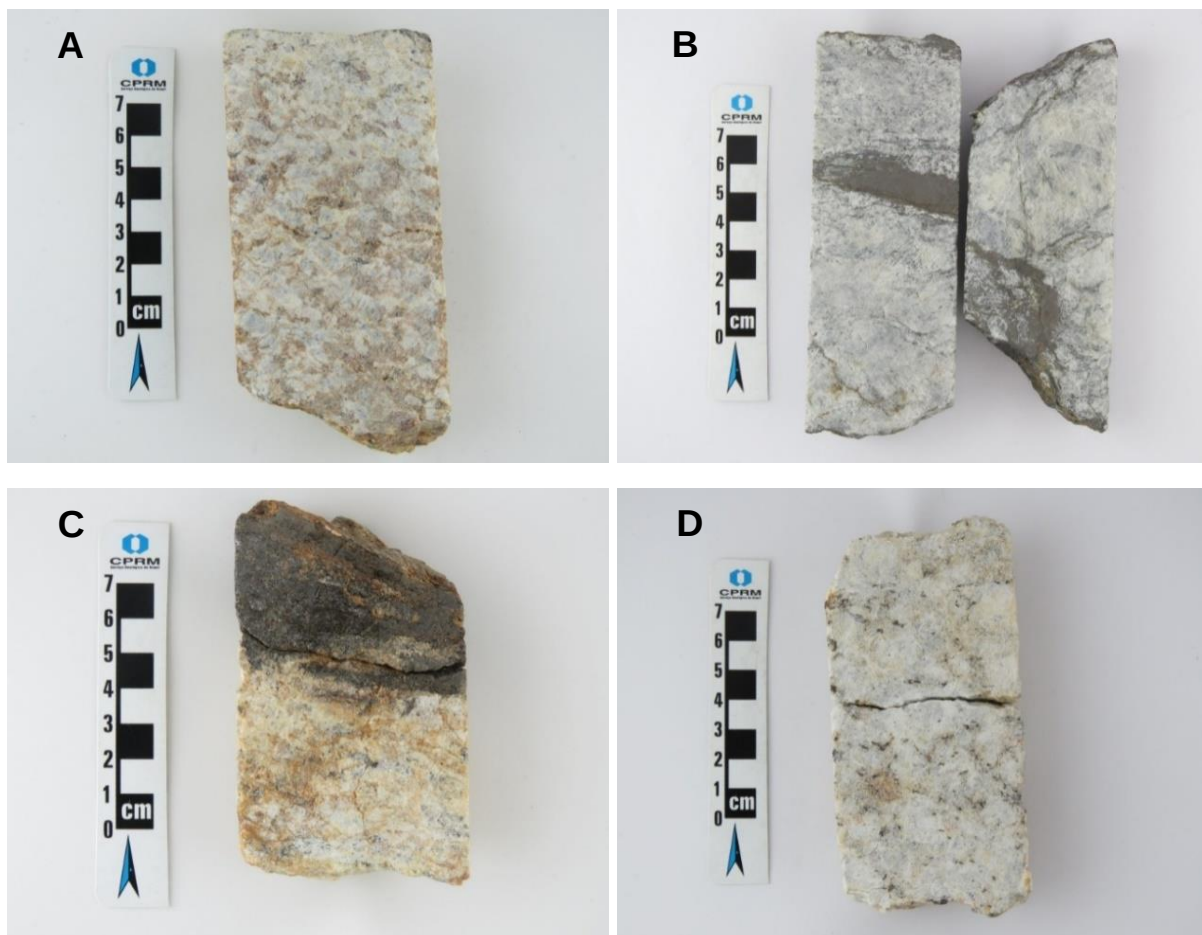


Figura 23: Fotografia de amostras FC-R-11 (A): Leucossoma granítico rosado; FC-R-32 (B): horizonte quartzo-feldspático com *schlieren* de grafita xisto; FC-R-14 (C), contato do leucossoma rosado com camada de grafita xisto; e FC-R-27 (D): leucossoma de coloração esbranquiçada.

O feldspato potássico possui geminação em grade e, quando em granulação grossa, pode conter inclusões de quartzo, muscovita, sillimanita e turmalina. Quando em granulação média, apresenta contatos retilíneos, sendo comum a presença de *melt* entre os cristais (Figura 25).

O plagioclásio é andesina (An:40) e apresenta geminação polissintética. A biotita se apresenta euédrica e pleocróica, em cristais de granulação média. O quartzo ocorre como cristais irregulares de contatos retilíneos a interlobados, podendo ocorrer vermiforme em inclusões no plagioclásio (mirmequita). A grafita possui granulação muito fina a fina, em inclusões na muscovita, ou média, em aglomerados de grafita.

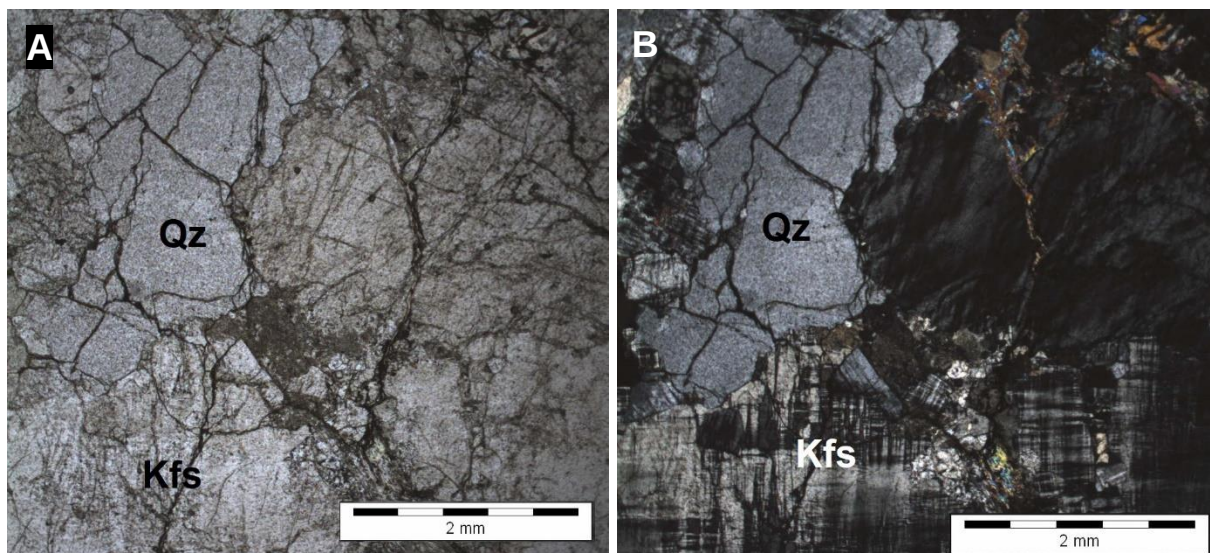


Figura 24: Fotomicrografias da lâmina petrográfica FC-R-11, em (A) luz transmitida, com polarizador descruzado (B) e cruzado, visando destacar a textura geral da rocha.

A muscovita é tardia e cresce sobre outros minerais (Figura 26), comumente sillimanita e feldspato, podendo ocorrer em granulação média a grossa. Quando fina, pode ocorrer em venulações submilimétricas, associada a sillimanita e grafita.

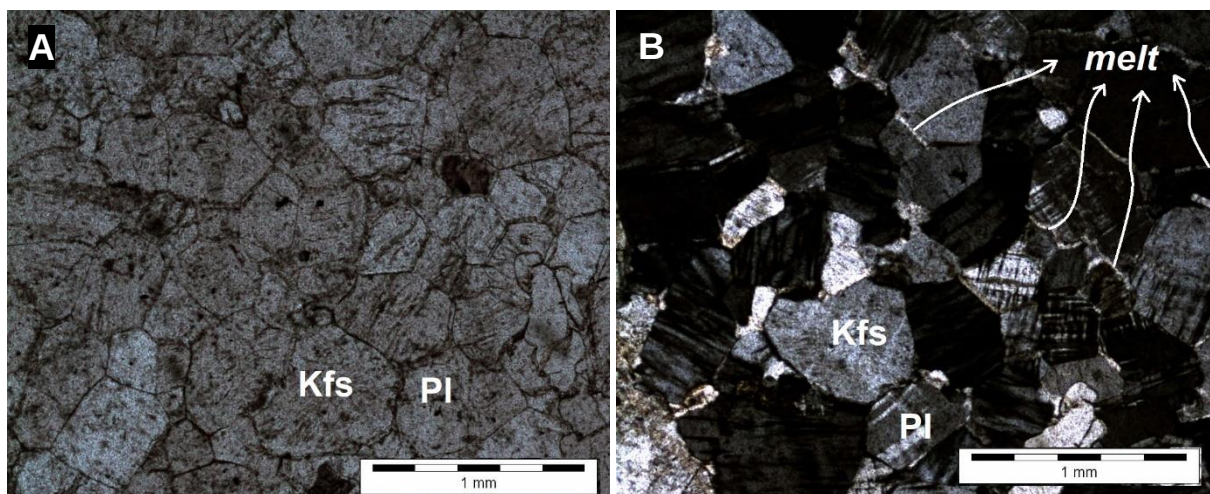


Figura 25: Fotomicrografias da lâmina petrográfica FC-R-39, em luz transmitida, com polarizador (A) descruzado (B) e cruzado, visando mostrar os aglomerados de microclínio com presença de *melt* no intercristais.

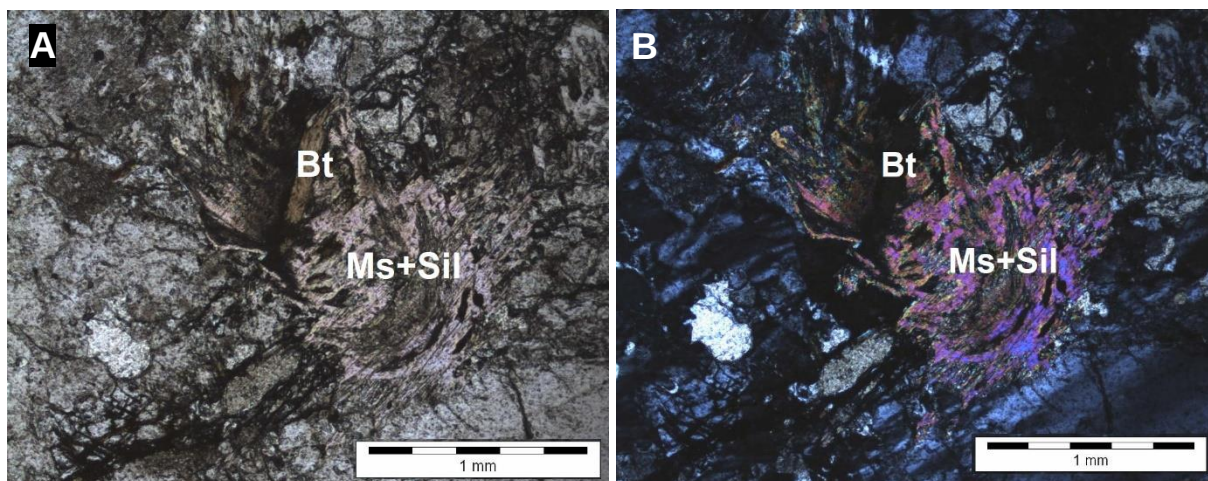


Figura 26: Microotografias da lâmina petrográfica FC-R-11, em (A) luz transmitida, com polarizador descruzado e (B) cruzado, visando mostrar os aglomerados de Ms+Bt+Sil+Gr. Opacos placóides são grafita.

6.2 Caracterização Petrográfica da Grafita

A grafita estudada varia entre as granulações *fine flakes* a *extra large flakes* (Figura 27, Figura 28 e Figura 29), onde o tamanho dos cristais varia entre 0,1 e 1,6 mm, com destaque para as amostras FC-R-09, FC-R-10, FC-R-21, FC-R-28 e FC-R-36 onde foram observados e medidos cristais de comprimento superior a 1,0 mm (Figura 29 e Figura 31). As medidas compõem histogramas de assimetria positiva (Figura 27), caracterizados por apresentarem média superior à mediana.

As dimensões dos cristais de grafita dos xistos e gnaisses variam dentro de intervalo restrito (Figura 27). Os xistos apresentam comprimentos e larguras médios (comprimento: 226,0 μm e largura: 42,6 μm), respectivamente, 30% e 16% inferiores aos encontrados em gnaisses (comprimento: 319,3 μm e largura: 50,3 μm), as médias com valores mais elevados dentre as tipologias consideradas. O coeficiente de variação encontrado nos xistos é 0,72 para as medidas de comprimento dos *flakes* e de 0,91 para as medidas de largura dos *flakes*. Por outro lado, no gnaiss os valores são de 0,66 e 0,63, para comprimento e largura respectivamente. Isso evidencia a maior variabilidade dos grãos de grafita hospedados em xistos do que em gnaisses. O leucossoma apresenta comprimento e largura médios mais baixos (comprimento: 82,6 μm e largura: 19,2 μm) e também mostra um conjunto de dados com maior variação relativa (Figura 27E e Figura 27F), com coeficiente de variação de 1,44 e 2,01 para comprimento e largura, respectivamente. Esse coeficiente elevado se deve a alguns fatores como: (1) o número escasso de medidas ($n=199$); (2) a média com valores baixos; e, (3) a concentração de medidas elevadas, ou seja, anômalos. Assim, as medidas estatísticas em *flakes* de grafita sugerem a seguinte relação de variabilidade entre os litotipos identificados: leucossoma > xisto > gnaiss.

Ademais, nos xistos, é comum observar aglomerados de grafita de granulação grossa ($>0,8$ mm) e morfologia globular a elipsoidal (Figura 32).

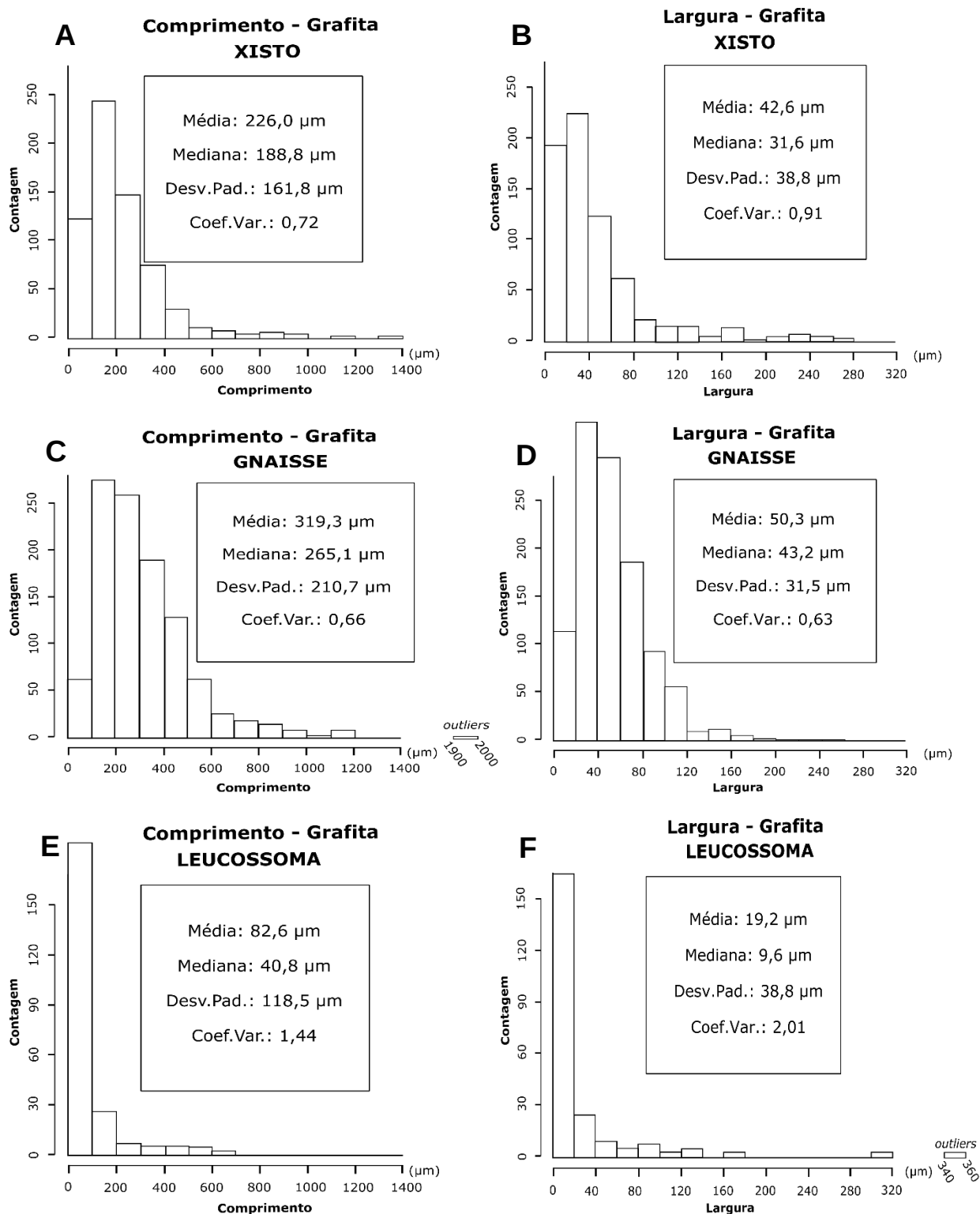


Figura 27: Histogramas e indicadores estatísticos das medidas de comprimento e largura dos *flakes* de grafita, separados por tipo de rocha hospedeira. Em A e B são apresentados os resultados para os xistos, em C e D, dos gnaisses e em E e F, dos *flakes* encontrados no leucossoma. Notar a concentração de valores muito baixos no leucossoma (E e F), como também, de valores anômalos (*outliers*).

A grafita ocorre como *flakes* em diferentes taxas de deformação e foram agrupados em três tipos: indeformado (cristais prismáticos lineares); pouco deformados (apresentando dobras abertas) e; muito deformados, formando dobras apertadas (por exemplo, xistos nas amostras FC-R-14B e FC-R-37; Figura 28).

Os grãos individuais de grafita são bem formados, de contornos definidos, hábito prismático, com seção tabular ou hexagonal, a depender do corte. Grãos com pontas esfarrapadas ou farrapos foram identificados apenas nas amostras FC-R-12, FC-R-10A e FC-R-28B (Figura 28) e perfazem menos que 7% dos cristais encontrados e medidos.

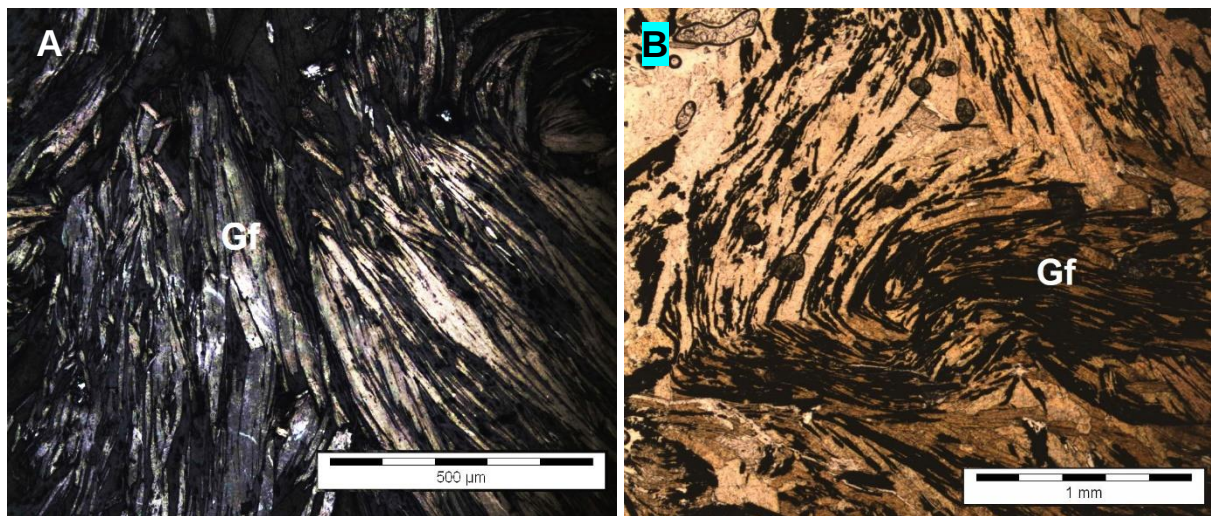


Figura 28: Fotomicrografias da lâmina petrográfica de xisto (FC-R-14B), ilustrando as diferenças estruturais apresentadas pela grafita. Em (A), sob luz refletida, são mostrados *flakes* de grafita bem formados, com geometria tabular, em cristais lamelares (lineares). Em (B) é apresentada uma fotomicrografia, em luz transmitida de uma figura de interferência tipo 3, em laço (Ramsey e Huber, 1987) destacada pela deformação dos cristais de biotita e grafita.

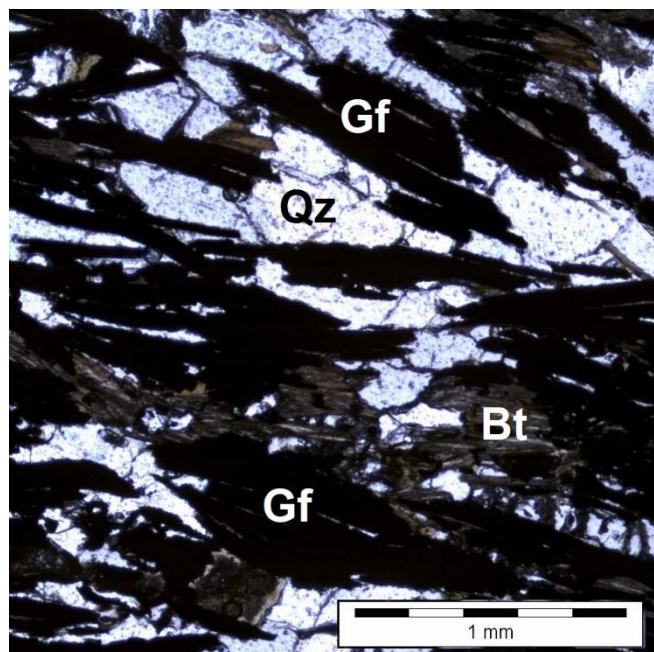


Figura 29: Fotomicrografia da lâmina petrográfica de gnaiss (FC-R-09-2), em luz transmitida com polarizador descruzado, visando destacar a forma de ocorrência da grafita, em aglomerados de cristais maiores que a granulação *extra large flake*.

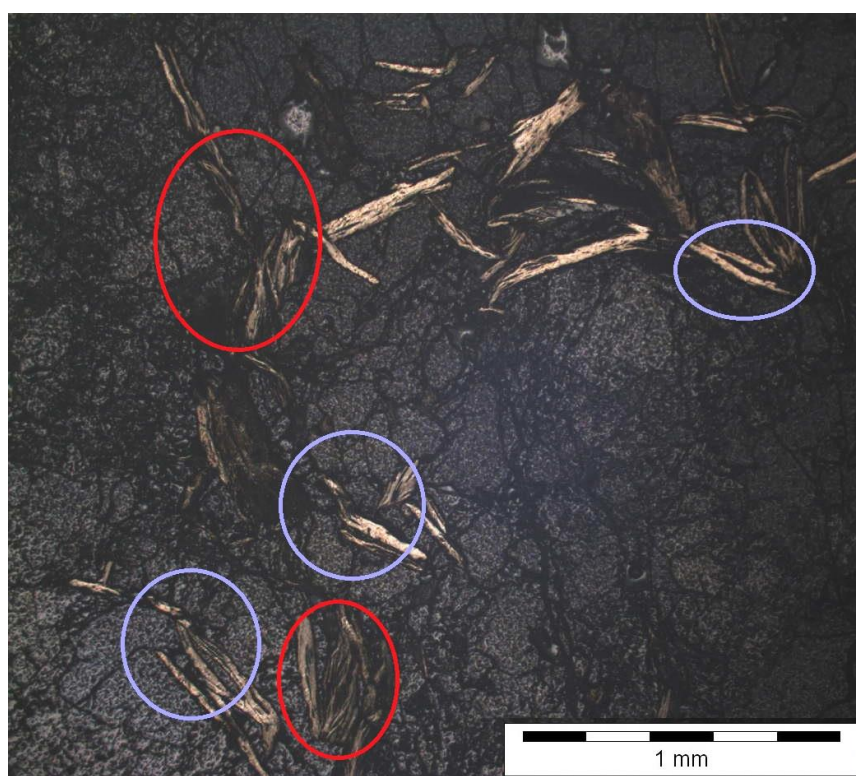


Figura 30: Fotomicrografia da lâmina petrográfica de gnaiss (FC-R-28), sob luz refletida. Destaque para os *flakes* de grafitas em farrapos (círculo vermelho) e tabulares com bordas esfarrapadas (circulado em azul) convivendo juntas.

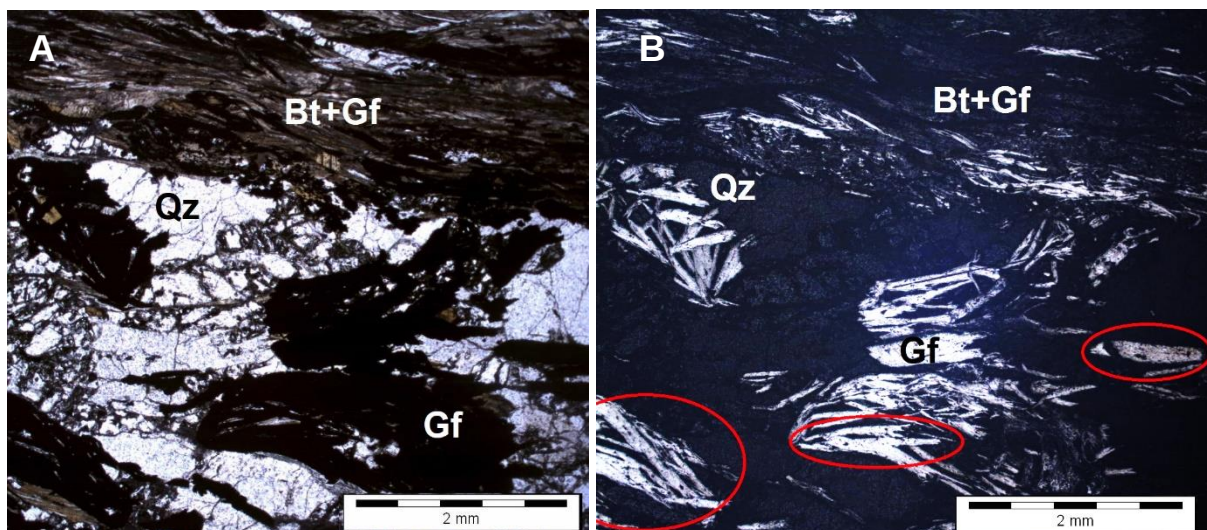


Figura 31: Fotomicrografias da lâmina petrográfica de gnaiss (FC-R-09-2), visando destacar a diferença morfológica e textura e granulométrica entre a grafita que ocorre associada à biotita e a que ocorre associada ao quartzo. As primeiras apresentam-se fortemente orientadas, com granulação mais fina (entre 0,1 e 0,2 mm) e contornos não lineares (levemente serrilhados). Quando ocorrem em meio ao quartzo, os cristais são bem formados, com bordas lineares e granulação relativamente mais grossa (de 0,3 a 0,5 mm). Luz transmitida em A e luz refletida em B. Notar, nos aglomerados, a presença de *flakes* com mais de 0,8 mm (circulados de vermelho).

O intercrescimento de grafita e biotita é comum nos xistos e nas bandas escuras dos gnaisses. Há também grafita associada a quartzo e feldspato. Menos frequente é a associação de grafita com muscovita e sillimanita, ocorrendo quase que somente nos leucossomas de composição granítica.

No gnaiss e metatextito, em amostras com bandamento marcado, parte dos cristais de grafita, associados à biotita, mostra granulação mais fina (e bordas afinadas). Esse afinamento não é observado em meio às bandas félsicas, onde a grafita se encontra cercada por cristais de quartzo e feldspato. Nesse contexto, os cristais de grafita ocorrem com borda serrilhada, não linear.

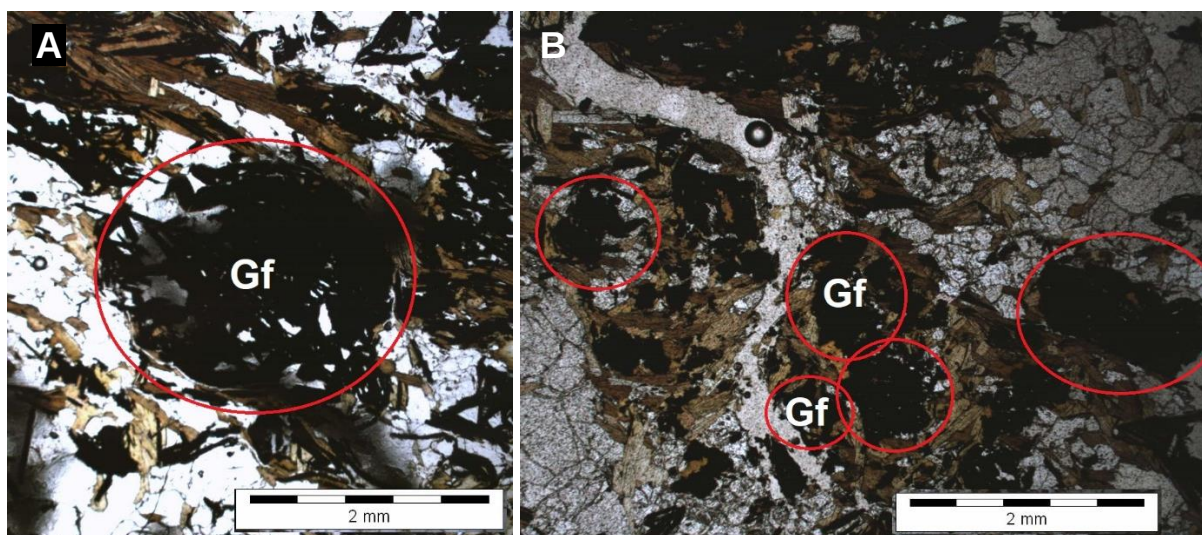


Figura 32: Fotomicrografias da lâmina petrográfica de xisto (FC-R-18-2C), visando apresentar a forma de ocorrência dos aglomerados globulares de grafita (circulados em vermelho).

A grafita tende a ocorrer na forma de agregados (*pods*) de grafita ou grafita + biotita dispersos na matriz da rocha. A maior ou menor densidade de ocorrência desses agregados caracteriza a diferenciação das tipologias xisto e gnaiss, respectivamente.

Nos granitos e bolsões quartzo-feldspáticos, a grafita é pouco frequente. Quando ocorre, é placoide, com bordas serrilhadas, associada aos aglomerados de biotita e fibrolita (com sobrecrecimento de muscovita), evidenciando sua afinidade com o restito. Raramente, é encontrada em inclusões no quartzo. Há ocorrência de agregados de grafita sem biotita e sillimanita associada. Essas características sugerem a possibilidade de remobilização física de agregados de grafita junto ao leucossoma (Figura 33). Todavia, a baixa densidade amostral dessa tipologia dificulta a definição da frequência de ocorrência desse fenômeno.

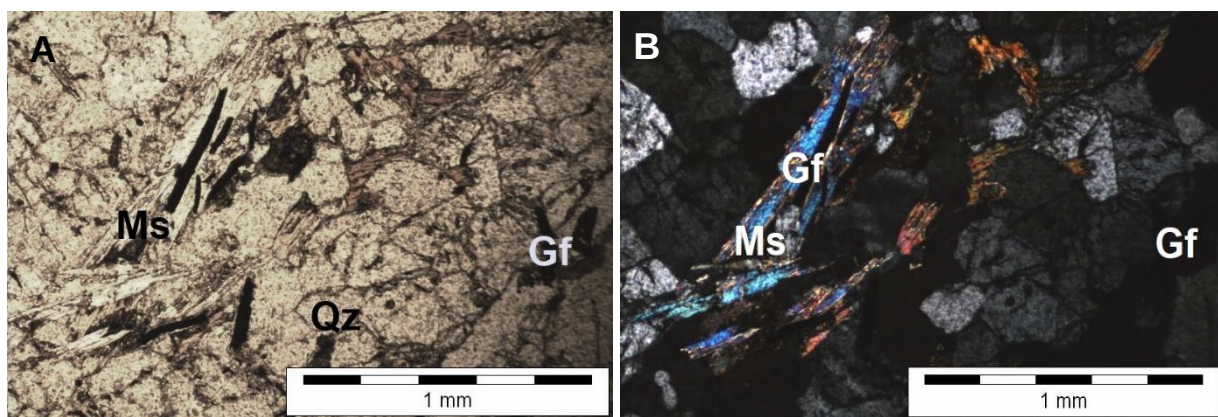


Figura 33: Fotomicrografias da lâmina petrográfica de leucossoma (FC-R-22-02), sob luz transmitida e polarizadores (A) descruzados e (B) cruzados mostrando a presença de cristais de grafita associado à muscovita em leucossoma granítico.

Com base nas informações apresentadas e na classificação proposta por Scrogins (2015) é possível dizer que a grafita presente no Alvo Pedra Preta é composta em sua maioria (60%) por *extra large flakes* (ou *Jumbo flakes*) e *large flakes* (33% e 27% dos *flakes*, respectivamente). Do restante, 30% são *fine flake*, e 8% *médium flake*.

A classificação separada para os xistos, gnaisses e leucossoma é apresentada na Tabela 3. É interessante notar que os gnaisses apresentam a maior proporção de *extra large flakes* e *large flakes* (44% e 29%, respectivamente).

Tabela 3: Classificação granulométrica dos de *flakes* contidos nas rochas do Alvo Pedra Preta. A média é ponderada pelo número de medidas.

	Gnaisse	Xisto	Leucossoma	Total (%)
<i>Fine flakes (%)</i>	17.5	38.3	86.9	31.7
<i>Medium flakes (%)</i>	9.2	8.7	1.0	8.2
<i>Large flakes (%)</i>	29.4	30.4	4.6	27.1
<i>Extra large flakes (%)</i>	44.0	22.6	7.2	33.0

6.3 Espectrometria Raman

A grafita presente nas amostras analisadas apresenta elevado grau de cristalinidade. Em geral, as amostras apresentam $R1 < 1$, ou seja, a intensidade da resposta eletromagnética encontrada na banda G é mais elevada que a da banda D1 (Figura 34).

Nas duas primeiras etapas de análise, os resultados apresentaram uma dispersão relativamente grande:

- O parâmetro R1 das amostras analisadas na primeira aquisição de dados Raman varia em um intervalo entre 1,20 e 0,39 (Tabela 4), com R1 médio de 0,61 e apenas uma das medidas realizadas apresentou $R1 > 1$. Essa medida foi realizada na amostra FC-R-41. O R1 mais baixo foi registrado na lâmina FC-R-14B. Esse dado é importante, pois limita os tamanhos de cristalitos (L_a) calculados a um intervalo de 69,17 a 212,82 angstroms (Å).
- Na segunda etapa, os dados obtidos evidenciam a presença de grafita de grau de cristalinidade bastante superior (Figura 34). Os valores de R1 variam entre 0,37 e 0,00. O que significa que L_a varia de 224,32 Å até cristalitos de tamanho infinito, o que, na prática, significa maiores que o diâmetro do feixe incidente.

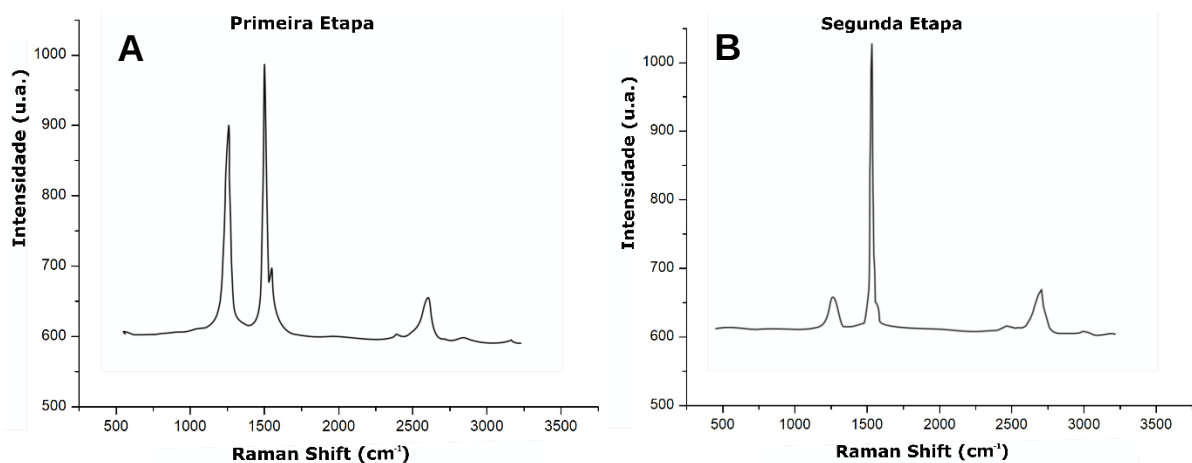


Figura 34: Espectros Raman obtidos na primeira medida realizada lâmina FC-R-14B em cada uma das duas primeiras etapas. Em A a lâmina petrográfica foi confeccionada com polimento, enquanto a lâmina usada em B não foi polida.

A disparidade entre os dados obtidos nas duas etapas pode ser visualizado nas Figura 35 e Figura 36. Nessas figuras são apresentados *Box Plots*, que comparam os resultados obtidos.

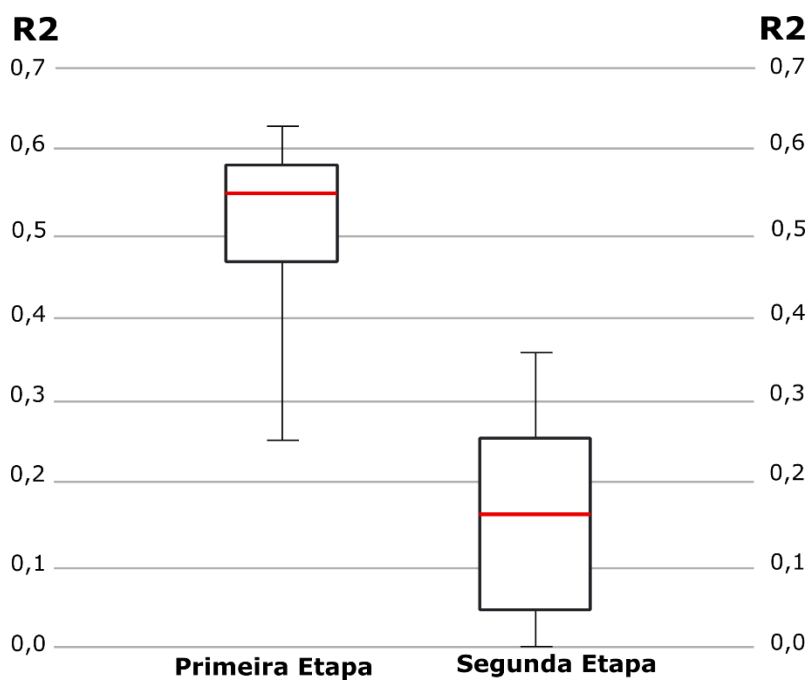


Figura 35: Gráfico *Box Plot* apresentando a diferença entre os dados obtidos na primeira e na segunda etapa.

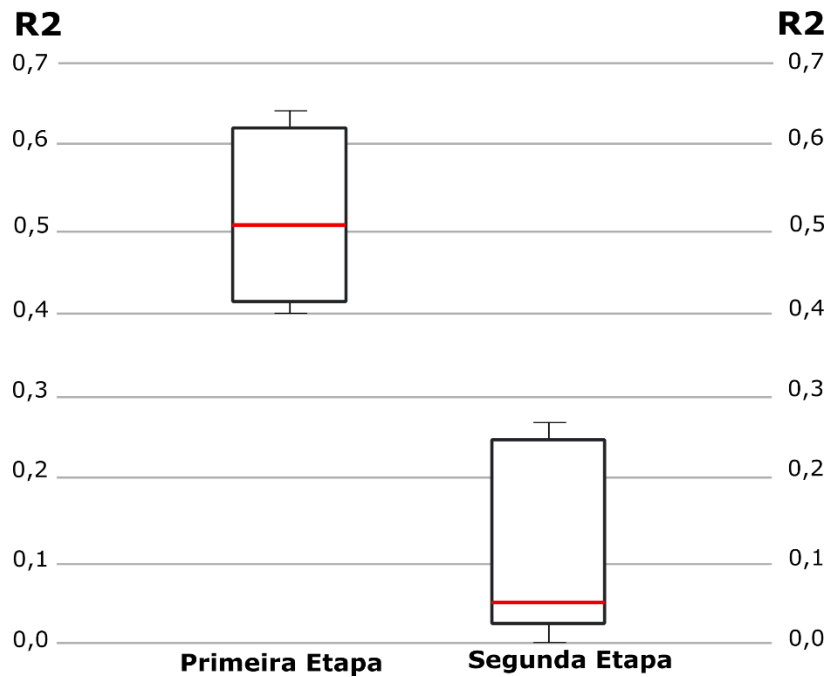


Figura 36: Gráfico *Box Plot* apresentando a diferença entre os parâmetros R2 calculados a partir dos dados obtidos para a lamina FC-R-14B na primeira e na segunda etapa.

Foi com a terceira etapa que se pôde entender com maior clareza o comportamento da grafita sob as análises de espectroscopia Raman. A grafita preserva suas características cristalográficas nas lâminas sem polimento evidenciado pela quase ausência de defeitos cristalinos (bandas D1 e D2) (Figura 37). Quando apresentam resposta, as bandas D1 e D2 apresentam intensidade extremamente baixa, quando comparado com a banda G (*Graphite*). Confirmando o efeito destrutivo do polimento das lâminas.

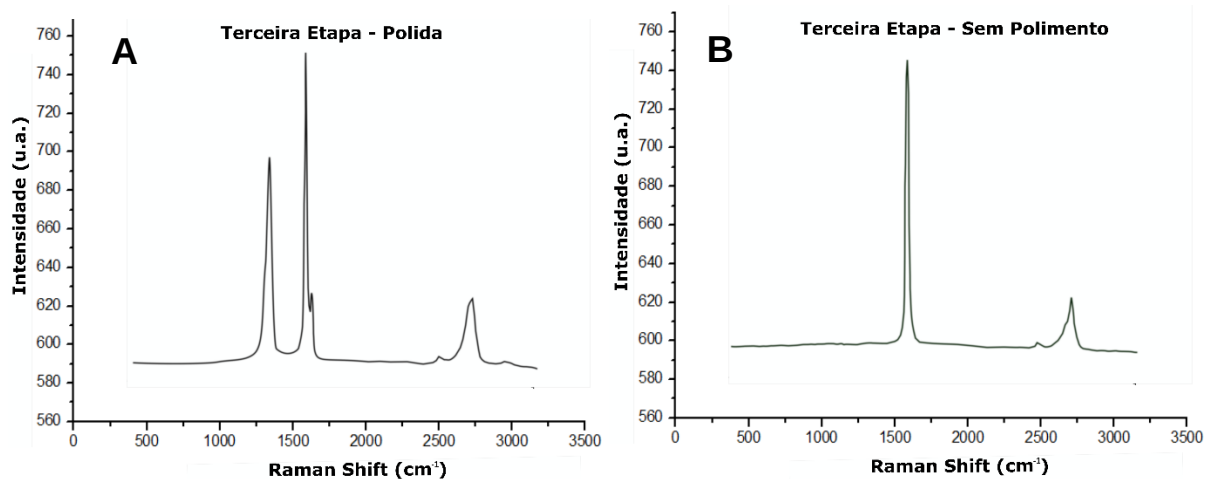


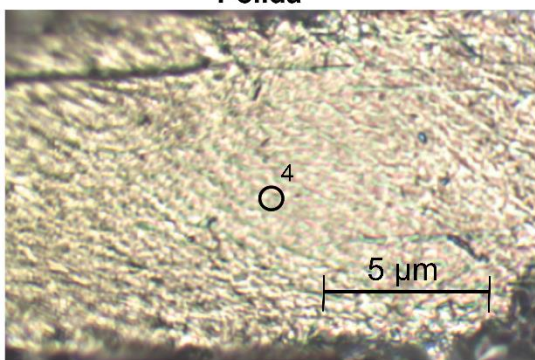
Figura 37: Imagens dos espectros obtidos na primeira medida realizada lâmina FC-R-18-1, na terceira etapa. Em A a lâmina petrográfica foi confeccionada com polimento, enquanto a lâmina usada em B não foi polida.

A partir da ideia de que o polimento deforma parcialmente a cristalinidade dos *flakes* de grafita, procedeu-se uma análise mais detalhada dessa relação entre polimento e aumento dos defeitos cristalinos. Até a segunda etapa, utilizou-se apenas a objetiva de 50x para análises dos espectros Raman e imageamento dos cristais. Na terceira etapa, procedeu-se a análise com a objetiva de 100x. Isso possibilitou observar a homogeneidade das ranhuras oriundas do polimento nos grãos de grafita como observado na Figura 38 e, por conseguinte, o aumento dos defeitos cristalinos nas bandas D1 e D2. Em amostras não polidas, medidas realizadas no interior, nas bordas ou entre “microgrãos” apresentam respostas bastante distintas. Quando realizadas no interior deles, a resposta na banda D1 desaparece. Por outro lado, entre os microgrãos, o espectro apresenta intensidade mais elevada do que quando medido na borda de um microgrão.

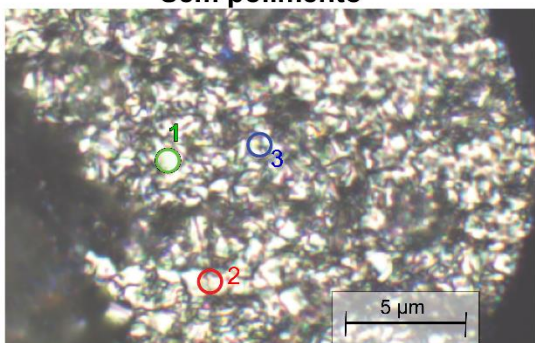
Outra banda que têm comportamento espectral relacionável ao grau de cristalinidade do material carbonoso é a banda D2, refletindo defeitos na estrutura cristalina. Essa banda possui resposta em todas as medidas realizadas em lâminas polidas. Mas em amostras não polidas, a banda D2 tem resposta pouco intensa, quando a medida é realizada entre microgrãos. A banda é ausente nos dois outros casos (Figura 38).

Aspecto ao microscópio:

Polida



Sem polimento



Espectro Raman:

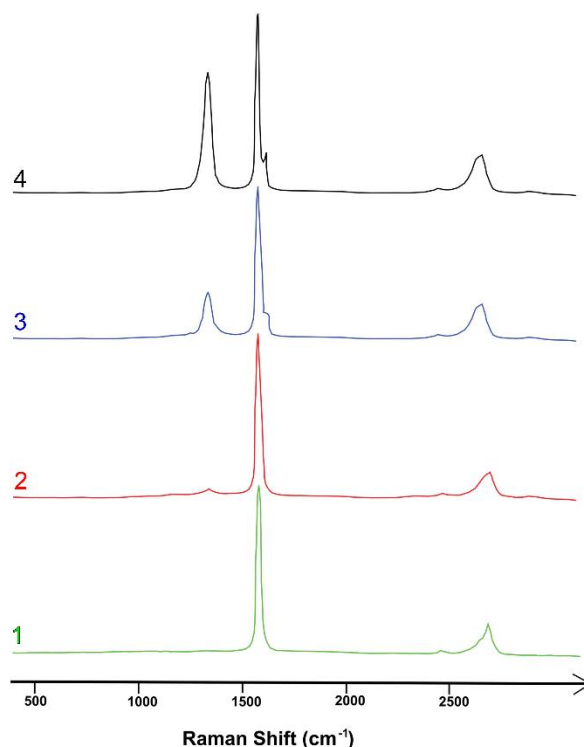


Figura 38: Espectros Raman obtidos em função da preparação da amostra e da posição da medida realizada. As circunferências representam o diâmetro do feixe e estão posicionada no local em que as medidas foram realizadas.

Em trabalho realizado por Ammar *et al.* (2015), o efeito do polimento sobre os espectros Raman é descrito como um desvio de crescimento do parâmetro R1 sem alterações significativas na espessura e morfologia do espectro na banda G. A Figura 39 foi construída utilizando as medidas das três etapas e confirma as observações propostas por Ammar *et al.* (2015).

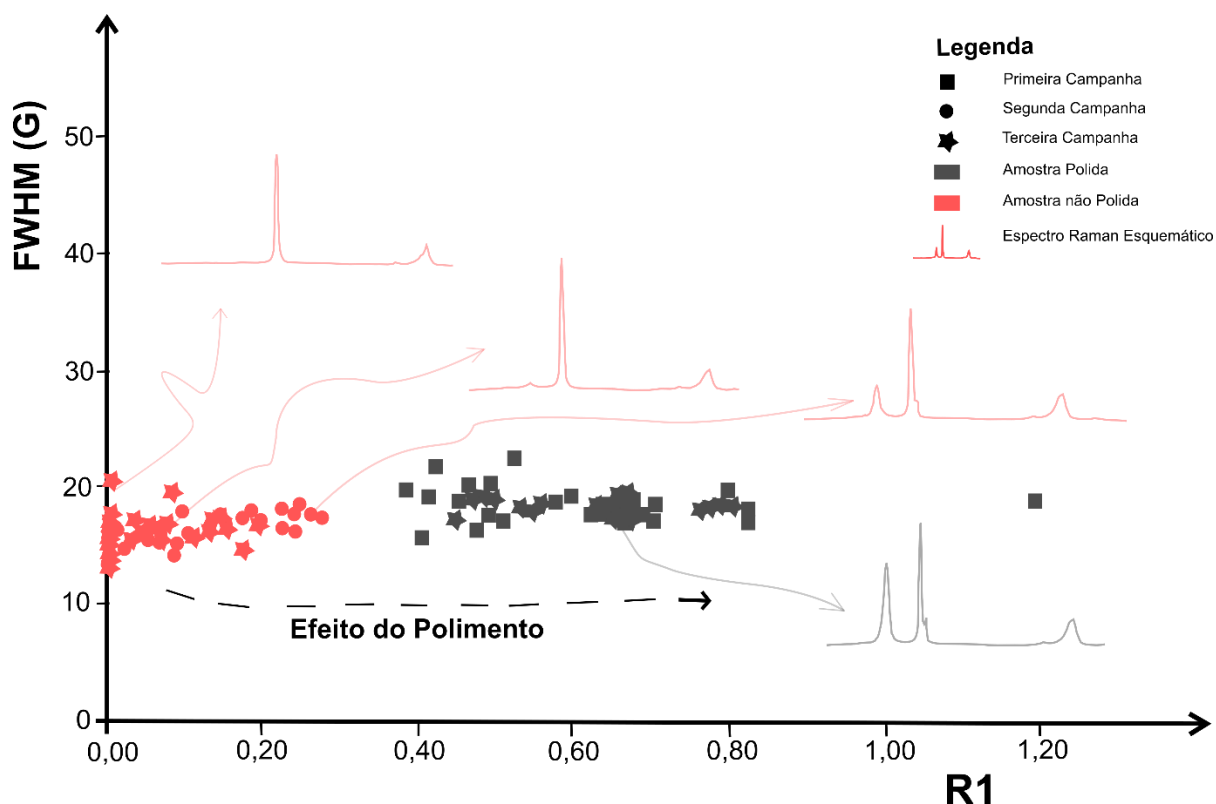


Figura 39: Efeito do polimento como incremento no parâmetro R1 sem alterações significativas na largura (*full width at half maximum* - FWHM) da banda G, ou seja, em um G constante há uma variabilidade significativa em D.

A intensidade da energia de excitação do laser é o terceiro fator de influência dos resultados Raman obtidos, pois ele também superestima os defeitos cristalinos, devido à relação inversa entre o comprimento de onda do feixe incidente e a energia de excitação. Pocsik *et al.* (1998) e Aoya *et al.* (2010) descrevem um alargamento da banda D1 quando é adotada uma menor energia de excitação nos experimentos ou um maior comprimento de onda (Figura 40).

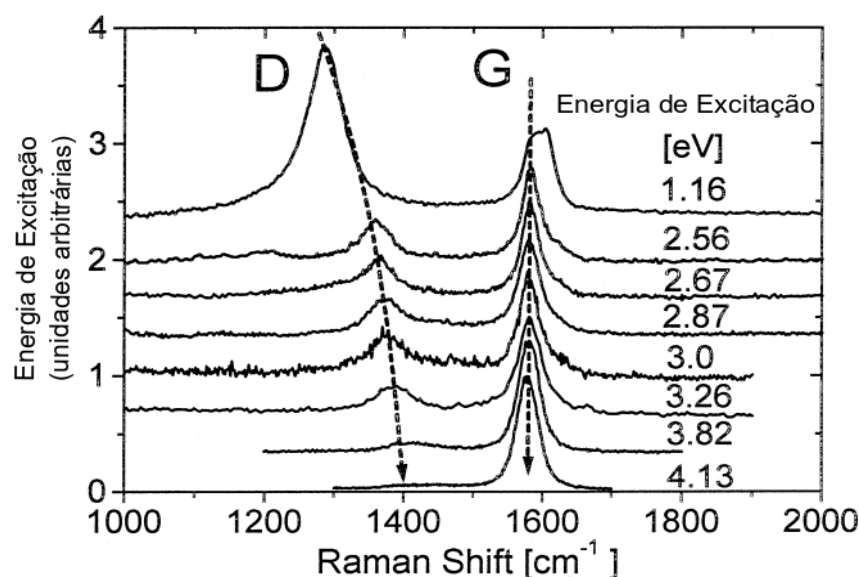


Figura 40: Influência da energia de excitação do laser sobre a posição, intensidade e largura da banda D (D1) (traduzida de Pocsik *et al.*, 1998).

Para os cálculos termométricos, foram escolhidas as medidas que apresentam $R1 \leq 0,2$. Este critério serve como controle de qualidade para garantir menor influência do processo de preparação de amostras no resultado obtido, como demonstrado por Ammar *et al.* (2015). Isso permitiu o uso de todos os dados da terceira etapa. Os resultados obtidos para tamanho de cristalito (L_a) e temperaturas estimadas encontra-se apresentado na Tabela 4. Os dados obtidos se encontram disponíveis no Anexo 4.

Tabela 4: Parâmetros calculados a partir de resultado das análises de espectroscopia Raman.

	Parâmetros		Temperaturas (°C)		Cristalito
	R1	R2	Beyssac <i>et al.</i> (2002)	Aoya <i>et al.</i> (2010)	L_a (Å)
Mínimo	0	0	516,6	527,9	415,90
Médio	0,038	0,034	626,0	657,7	2196,06
Máximo	0,199	0,279	641	676,3	∞^*

*Maior que o diâmetro do Feixe = 0,5 micrômetro.

As temperaturas mais elevadas foram identificadas nas amostras em contato direto com o leucossoma ou no restito. Sugerindo também, que as porções anatéticas são as áreas propícias para se encontrar grafita com alto grau de cristalinidade.

Para situar os resultados obtidos frente aos obtidos por outros trabalhos (Frey *et al.*, 1980; Borghi *et al.*, 1985; Borghi *et al.*, 1986; Chopin *et al.*, 1991; Azanon, 1994; Enami *et al.*, 1994; Todd e Engi, 1997; Bouybaouene *et al.*, 1998; Trotet, 2000; Agard *et al.*, 2001a; Agard *et al.*, 2001b; Jolivet *et al.*, 2001; Beyssac *et al.*, 2002; Parra *et al.*, 2002; Belém, 2006; Aoya *et al.*, 2010) foi realizada uma compilação dos dados presentes nos trabalhos citados e construída

a imagem a seguir (Figura 41). Nela, é possível visualizar, de maneira comparativa, as temperaturas obtidas em diversas localidades do mundo em que rochas portadoras de grafita tiveram suas temperaturas de pico metamórfico estimadas, seja por geotermobarometria ou pelos termômetros baseados em espectroscopia Raman.

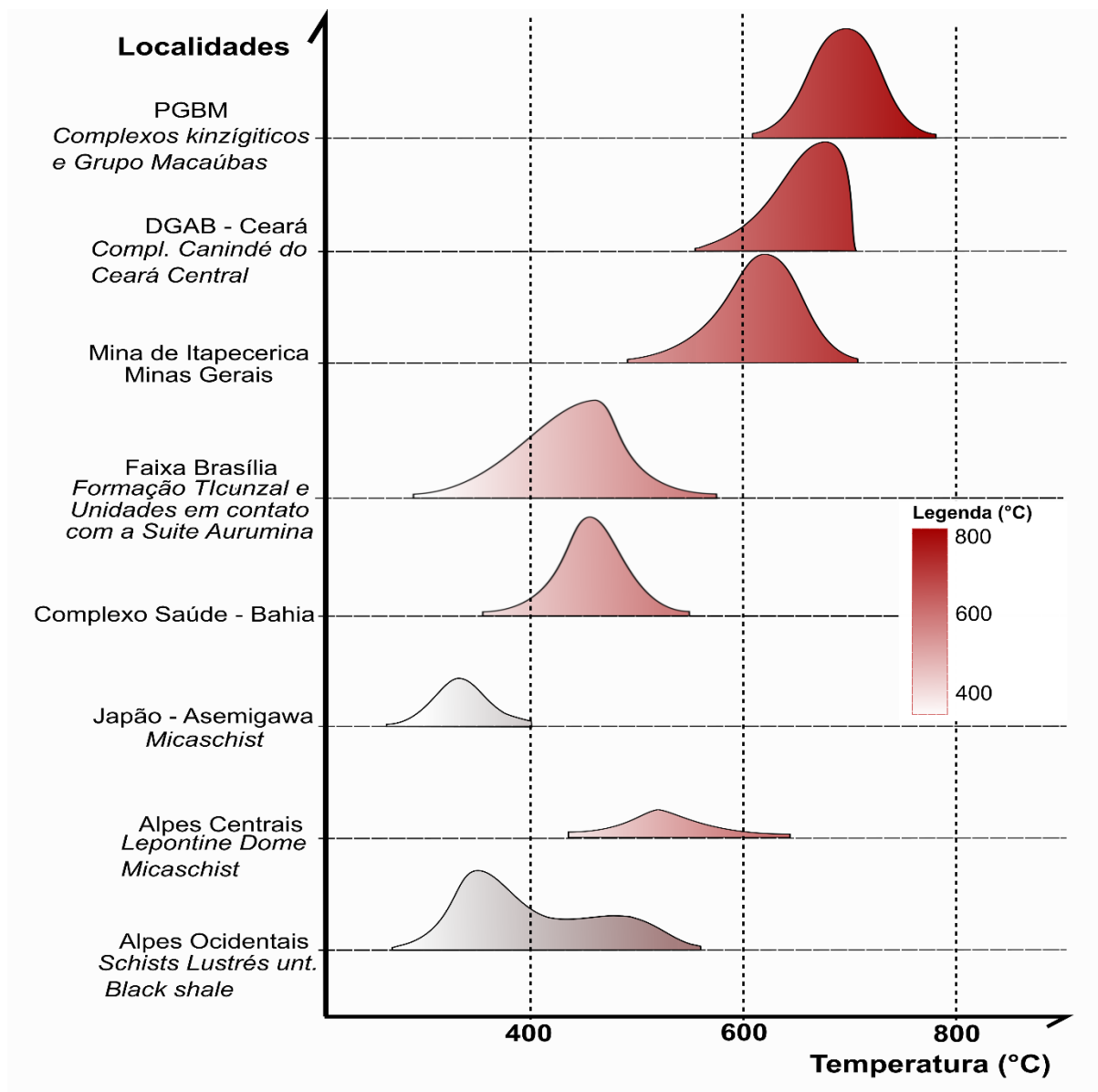


Figura 41: Estimativas de temperatura de cristalização de grafita de diversas localidades do mundo (dados de Beyssac *et al.*, 2002; Belém, 2006; Sousa e Matos, no prelo)

Assim, a termometria comparada do Distrito Grafítico de Araçoiaba-Baturité (DGAB) com outras províncias mineralizadas, por exemplo, Província Grafítica Bahia – Minas Gerais (PGBM) e Mina de Itapecerica (MG) aponta para a alta potencialidade do DGAB hospedar mineralizações de grafita similares (Figura 42).

6.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

A amostra FC-R-32 foi analisada em microscopia eletrônica de varredura com vistas caracterizar detalhadamente os cristais de grafita e minerais associados, considerando aspectos como hábito, grau de faturamento e tipo de superfície. A região da amostra analisada se trata de um aglomerado de biotita e grafita (*schlieren*).

Os *flakes* presentes na amostra apresentam granulação final, variando entre 0,03 e 0,6 mm, hábito hexagonal (seção basal), superfície lisa e baixo grau de faturamento (Figura 45). A mineralogia (Figura 42 e Figura 43) caracterizada qualitativamente na análise é compatível com a encontrada em microscopia ótica, com a adição de sulfetos (pirita), que não haviam sido observados ao microscópio de luz refletida.

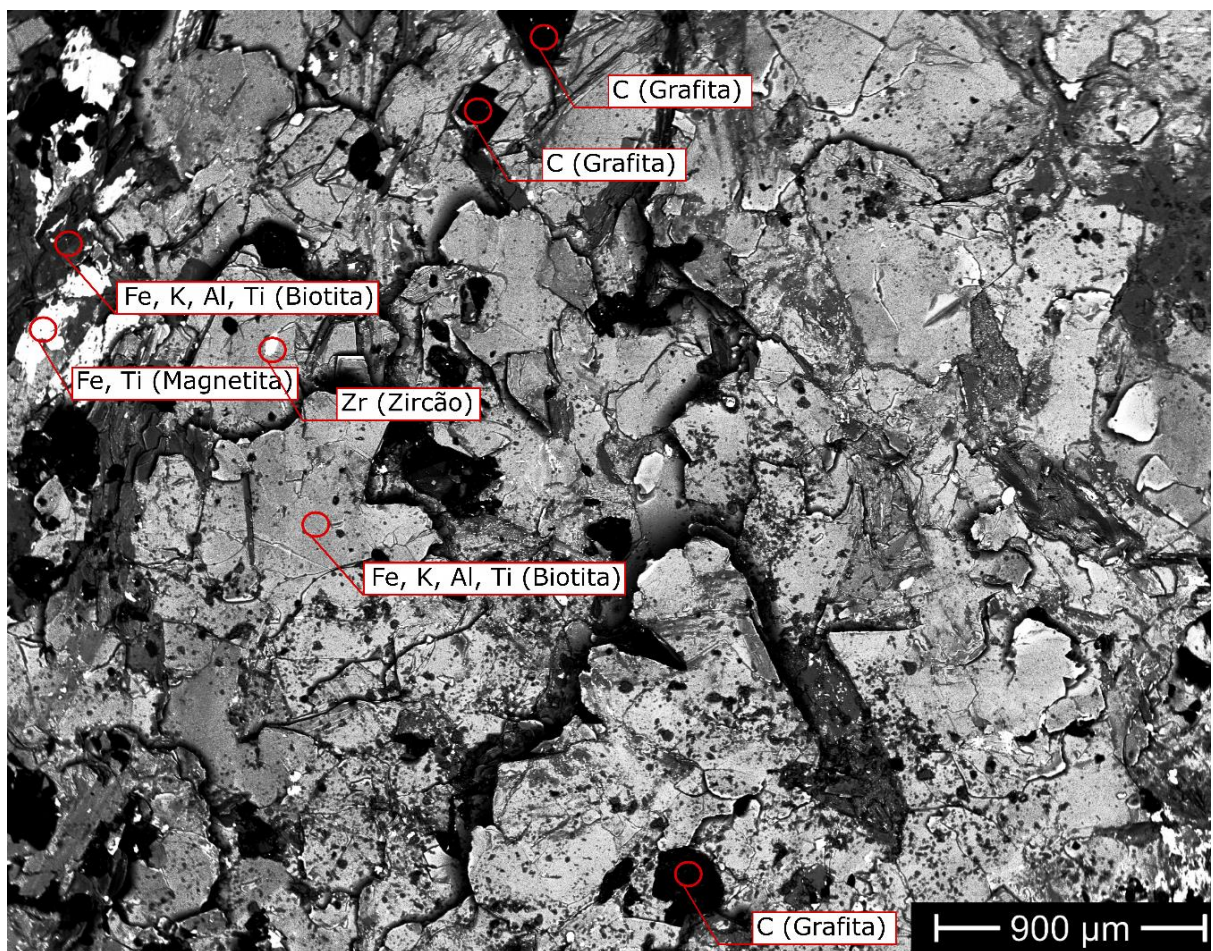


Figura 42: Imagem de elétrons retroespalhados obtida por MEV da amostra FC-R-32.

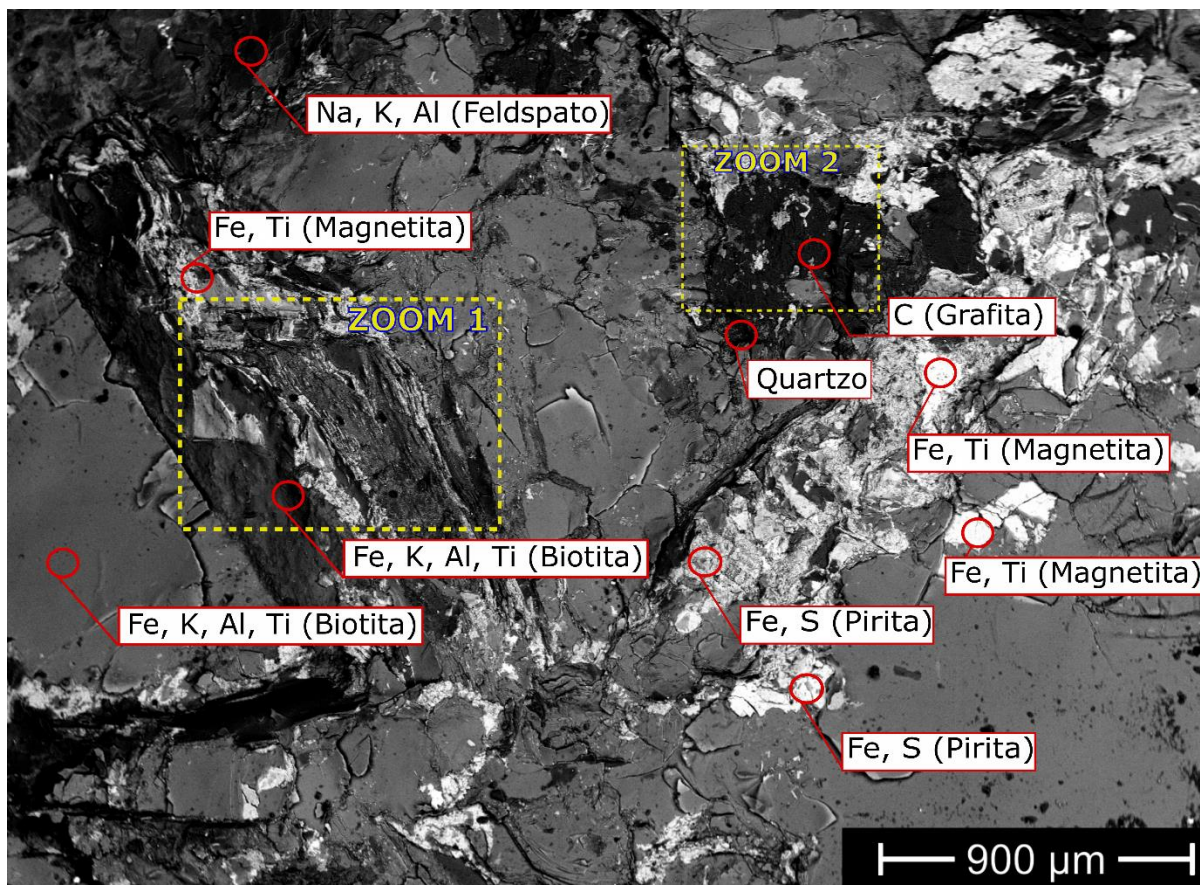


Figura 43: Imagem de elétrons retroespalhados obtida por MEV apresentando os minerais presentes na amostra FC-R-32 e aproximações (*zoom*) realizadas para um maior detalhamento das texturas encontradas.

Na primeira aproximação apresentada (Figura 44) é possível visualizar pequenos *flakes* de grafita de até 0,3 mm de diâmetro ocorrendo entre os planos de clivagem da biotita.

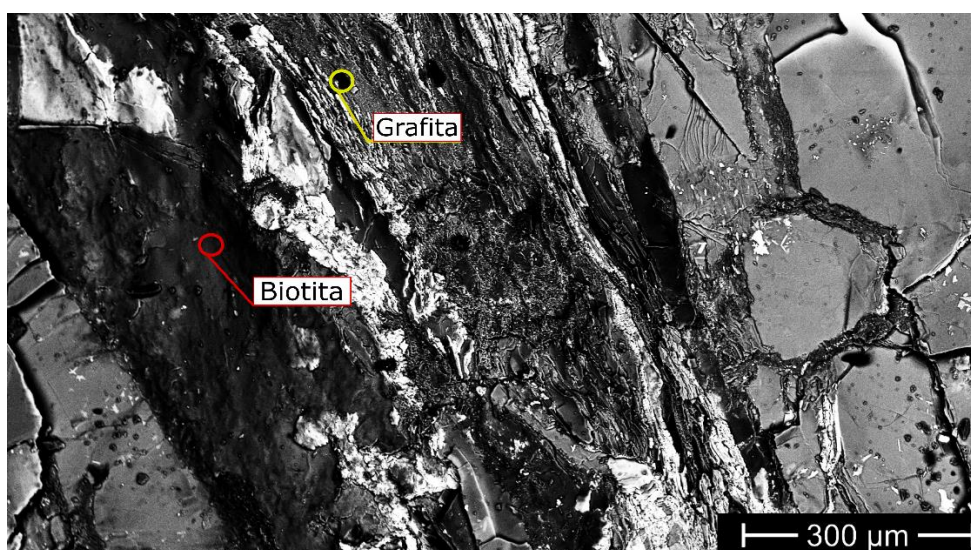


Figura 44: Imagem de elétrons retroespalhados obtida por MEV de cristais de biotita com pequenos *flakes* de grafita de formato hexagonal intercalados entres as planos de clivagem da mica.

Foram observados também *flakes* de grafita de geometria hexagonal e irregular, tamanho superior a 0,4 mm, com superfície lisa e poucas fraturas. Esses cristais maiores também se apresentam intimamente intercrescidos com a biotita, e podem estar fraturados (Figura 45 e Figura 46).

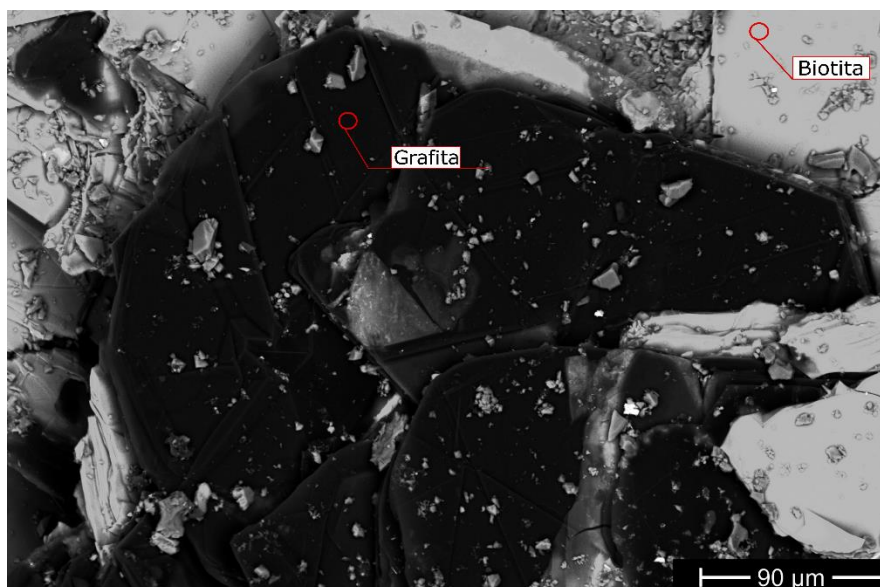


Figura 45: Imagem de elétrons retroespalhados obtida por MEV de *flakes* de grafita de formato hexagonal bem formados, com superfície lisa, borda retilínea definida e algumas fraturas.

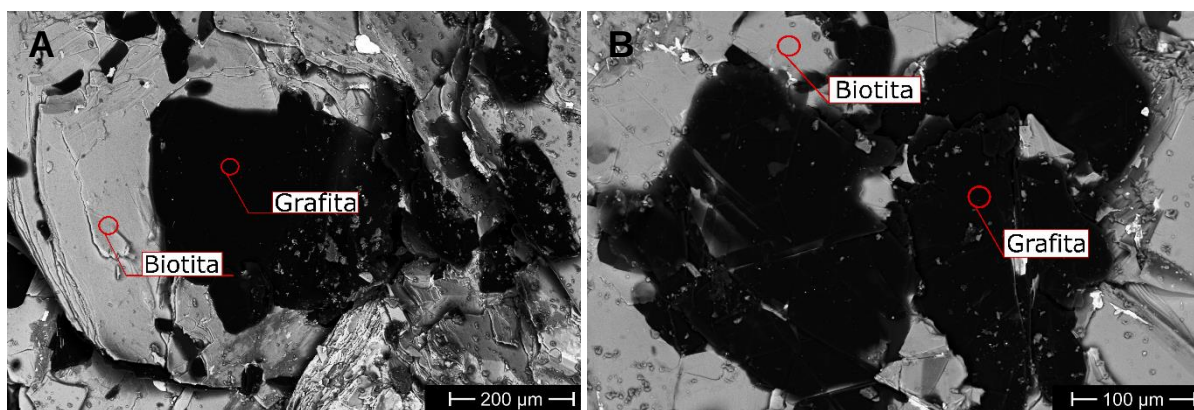


Figura 46: Imagens de elétrons retroespalhados obtidas por MEV de *flakes* de grafita de geometria irregular intercrescidos com os cristais de biotita. Em (A) os *flakes* se encontram mais lisos, com menos fraturas e com bordas mais bem definidas que em (B).

6.5 Difração de Raios X

O difratograma da amostra analisada (Figura 47) indica presença de grafita de simetria hexagonal e “contaminação” por quartzo, biotita e caulinita, mostrando ineficiência no método de separação da grafita. Um segundo método de preparação testado consiste em raspar das amostras apenas a camada mais rica em grafita. Após a raspagem, a amostra seguiu o mesmo procedimento descrito acima: material foi moído, decantado, levado à estufa e

analisado em difratômetro. O espectro obtido é similar ao apresentado na Figura 47, e também evidencia a ineficácia da separação da grafita.

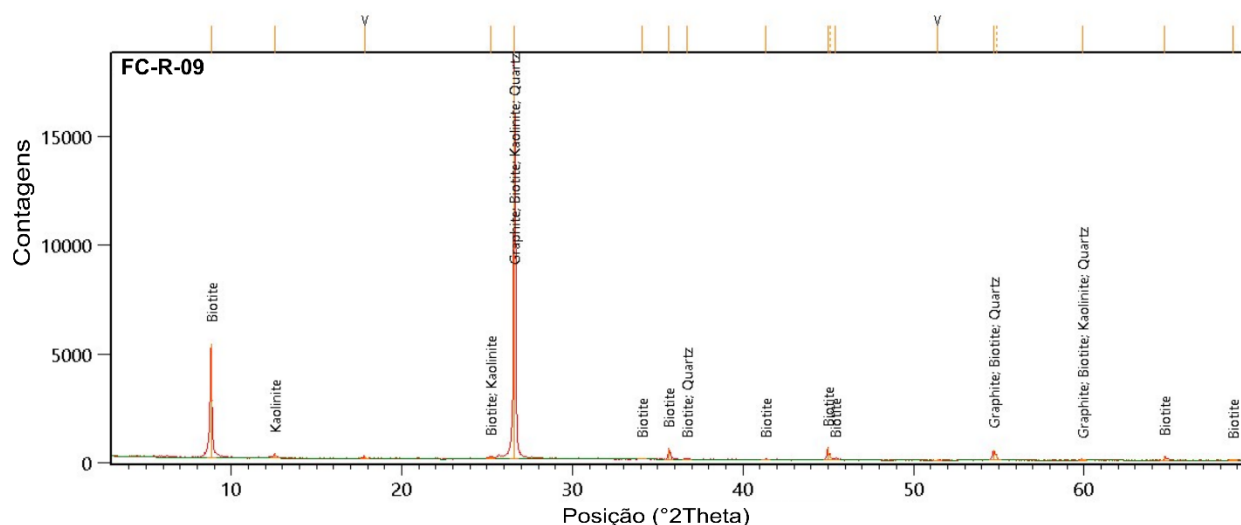


Figura 47: Difratoograma de raios X (Cobre, K alfa) da amostra FC-R-09, indicando presença de grafita hexagonal, biotita, quartzo e caulinita.

Os resultados de difração de raios X evidenciam a importância de análise petrográfica que permitiu identificar a íntima associação da grafita com tectossilicatos e filossilicatos (por exemplo, quartzo e biotita), ocorrendo em aglomerados envolvendo outros minerais. Esse intercrescimento é o apontado como o principal causador da ineficiência no processo de separação. Isso ocorre quando minerais mais moles, como a biotita e a caulinita, ao serem moídas para uma fração muito fina em conjunto com a grafita, tenham ficado presas junto ao material gráfitico sobrenadante devido às forças de tensão superficial do líquido.

Devido às sobreposições, não foi possível calcular área ou largura do pico principal da grafita para uso em geotermometria. Mas é possível localizá-lo de maneira precisa e, aplicando o refinamento dos parâmetros de cela pelo método de Rietveld, chega-se aos seguintes resultados: a: 2,4566 Å; b: 2,4566 Å; c: 6,7019 Å.

Estudos de termometria de grafita utilizando difração de raios X (Malisa, 1998; Rodas *et al.*, 2000) adotam o diagrama apresentado em Shengelia *et al.* (1977) indica uma relação linear entre o comprimento de eixo c e a temperatura de cristalização da grafita. A temperatura obtida para a amostra analisada é de 770°C (Figura 48).

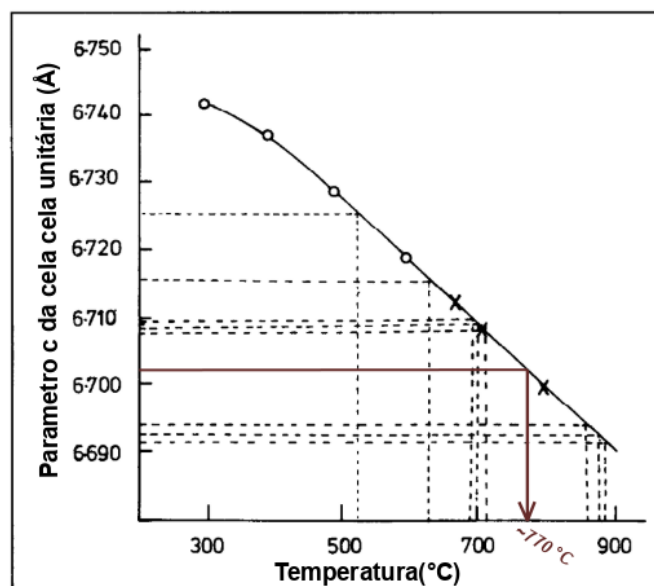


Figura 48: Estimativa de temperatura com base no parâmetro c da cela unitária da grafita (figura obtida Malisa (1998) *apud* Shengelia *et al.* (1977)).

6.6 Modelo tridimensional da mineralização

O modelo de distribuição dos teores de carbono grafítico ao longo da região compreendida dentro da campanha de amostragens é apresentada na Figura 49, a seguir. Um modelo tridimensional que pode ser visualizado de maneira interativa se encontra disponibilizado no Anexo 5. Quatro seções na direção leste-oeste, com vistas em perspectiva e ortogonais às seções, visando ilustrar a heterogeneidade de teores apresentados pela amostragem e uma representação dos furos de sondagem com os litotipos amostrados se encontram disponíveis no Anexo 6.

Para a construção do modelo litológico foram criadas classificações litológicas que englobam os principais litotipos descritos, evitando tanto as subclassificações excessivas, que ressaltam demais detalhes secundários, quanto generalizações que escondam heterogeneidades internas. A disposição dos litotipos foi baseada em considerações feitas a respeito das formas de ocorrência das rochas dessa unidade (Costa e Palheta, 2017), na orientação principal do bandamento metamórfico, em lineamentos estruturais mapeados e, principalmente, na disposição dos litologias amostradas ao longo dos furos de sondagem. O modelo elaborado é uma das diversas interpretações possíveis para os dados analisados.

Quanto à classificação de teores em muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, cabe dizer que os intervalos definidos não apresentam conotação econômica, sendo eles arbitrariamente definidos, considerando os teores presentes no alvo analisado.

A quantificação dos teores e tonelagem de grafita em cada litotipo se encontra apresentada na Tabela 5. O litotipo de maior ocorrência e que apresentou o maior teor médio de grafita é o metatextito, com 7,42% em peso do mineral de interesse na rocha. Hospedando um total de 85.918 toneladas de grafita, mais de 80% da mineralização. O teor médio do depósito é de 6,96% de carbono grafítico, totalizando 104.731 toneladas de grafita em uma área de cerca de 9.000m².

Mas essas informações, construídas com apenas quatro furos de sondagem, carregam um grau elevado de incerteza geológica, sendo utilizado no presente trabalho apenas de maneira ilustrativa. Para reduzir a incerteza geológica seria necessária uma expansão e adensamento da malha de sondagem, atividades que fogem totalmente à alçada do presente trabalho.

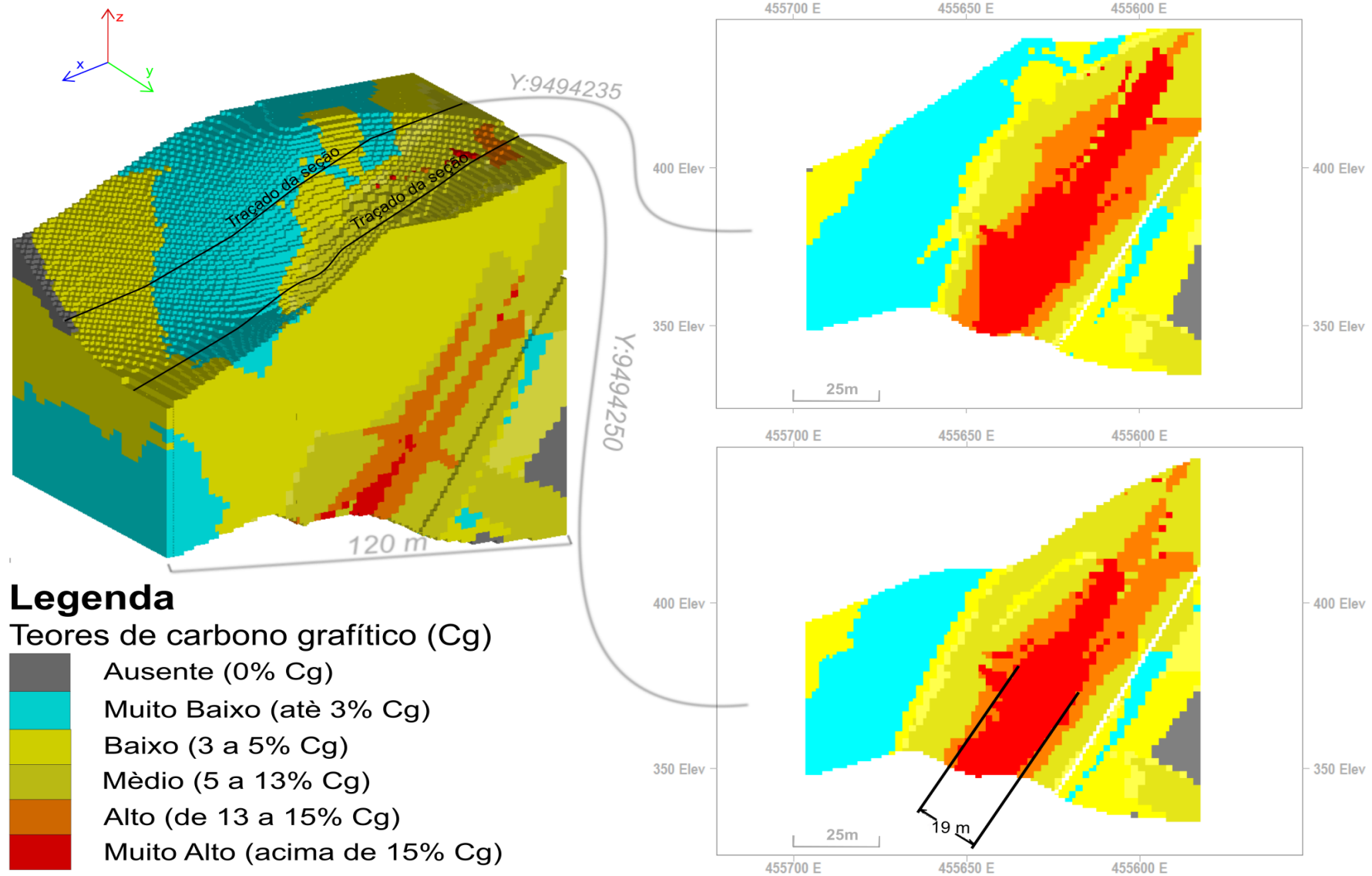


Figura 49: Modelo esquemático dos teores de carbono gráfico ao longo da zona mineralizada amostrada no alvo Pedra Preta.

Tabela 5: Teores de carbono gráfico e tonelagens de grafita por litotipo.

LITOTIPO	Volume (m³)	Teor Médio (%)	Tonelagem de Grafita (ton)	Situação
GNAISSE	58.785,3	4,92	6.507,5	Mineralizada
METATEXITO	514.632,7	7,42	85.917,9	Mineralizada
XISTO	57.842,3	6,29	8.181,2	Mineralizada
LEUCOSSOMA	28.063,0	6,55	4.135,7	Mineralizada
GRANODIORITO	500.963,3	0,00	0,0	Estéril
VEIO DE QUARTZO	9.461,3	0,00	0,0	Estéril
MINERALIZAÇÃO (TOTAL)	668.784,7	6,96	104.731,7	

6.7 Metamorfismo e evolução tectônica

As análises petrográficas não permitem precisar um campo de pressão e de temperatura devido à ausência de paragênese metamórfica específica. Uma abordagem que permite estimar, grosso modo, as condições em que se deu o metamorfismo é pelo estudo da associação mineral presente em quase todas as amostras de grafita-sillimanita-biotita gnaisse.

As amostras apresentam texturas e associação mineralógica que permitem inferir que o sistema superou condições de temperatura e pressão da reação $Ms + Qz \rightarrow Sil + L$ e não atingiu a reação $Bt + Sil + Qtz + V \rightarrow Kfs + Opx + L$. Com base nisso, é possível estimar uma provável condição de pressão: $4,0 < P < 9,1$ kbar; e temperatura $700 < T < 805^{\circ}C$ (Figura 50).

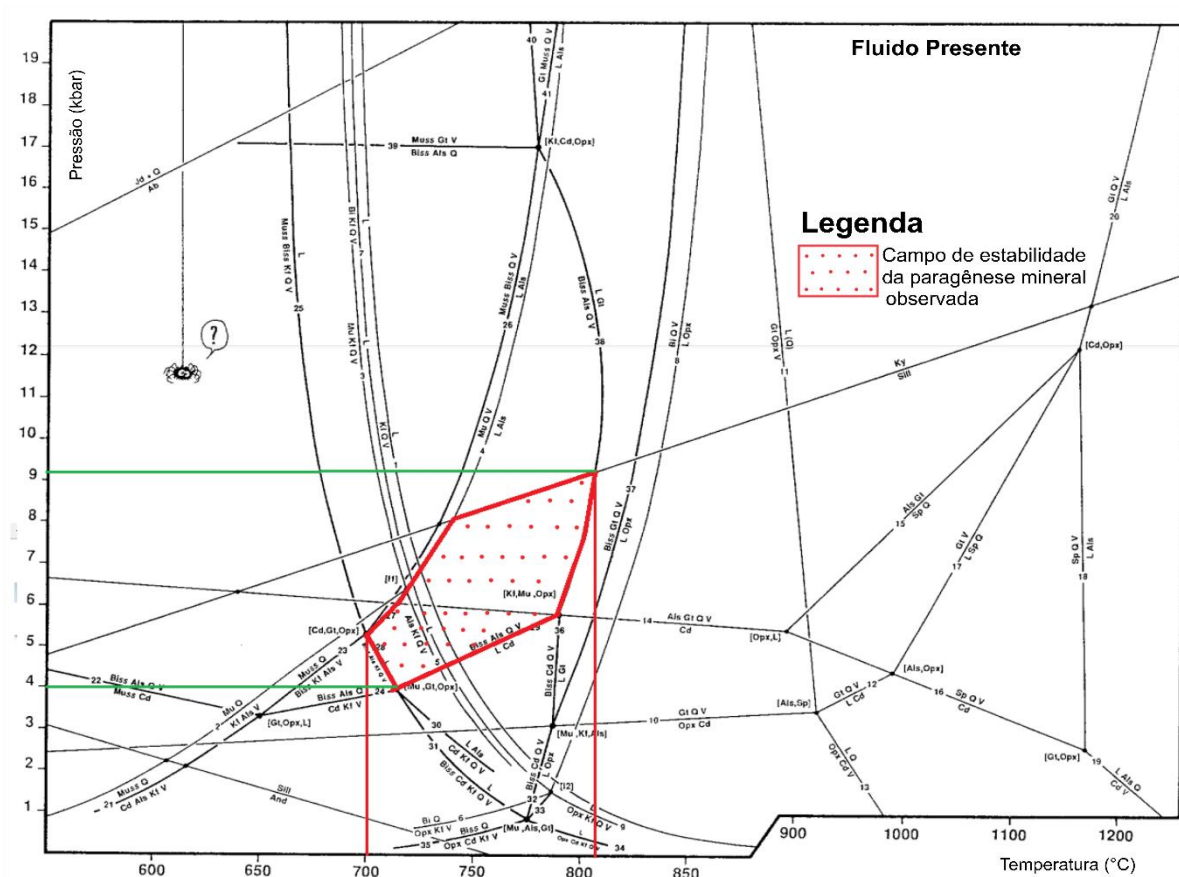


Figura 50: Diagrama de temperatura e pressão (Vielzeuf and Holloway, 1988) para rochas metapelíticas e metagraywackes (XMg próximo de 0.5) em condições de temperatura e pressão ultra-alta. O campo de estabilidade está demarcado pelo polígono vermelho, de contornos grossos. As condições de temperatura foram projetadas nas retas vermelhas e de pressão nas retas verdes.

As texturas de cristalização do quartzo observadas são migração de borda de grão (*grain boundary migration* - GBM), rotação de subgrão (*subgrain rotation* - SGR) e recristalização estática (*annealing* - ANN). Elas permitem inferir condições de temperatura superiores a 500°C (ANN e SGR), em torno de 650°C (GBM) (Stipp *et al.*, 2002).

A cristalização dos cristais de biotita em arcos poligonais, é registro de atuação da recristalização estática sobre esses minerais, correspondente a estimativas de temperatura de >550°C.

As temperaturas com base nos espectros Raman são incompatíveis com as estimadas pela paragênese metamórfica (700 – 805° C). Mesmo a fórmula apresentada no estudo de Aoya *et al.* (2010), que é válida para temperatura mais elevadas que as de Beyssac *et al.* (2002), subestimam as temperaturas de pico metamórfico, quando comparadas com as temperaturas obtidas pelo diagrama de Vielzeuf e Holloway (1988).

Isso se deve a alguns fatores. O primeiro é o teto de temperatura dos geotermômetros, 641°C em Beyssac *et al.* (2002) e 676°C em Aoya *et al.* (2010). O que as torna inapropriadas

para estimar as temperaturas de rochas metamórficas de alto grau ($T > 700^{\circ}\text{C}$). O segundo fator é a complexidade de definir com exatidão a temperatura de pico metamórfico de rochas pelíticas com alguma taxa de anatexia (Vielzeuf e Holloway, 1988). Pode-se somar a isso os efeitos do polimento das amostras e da energia de excitação do *laser* que influem no sentido de subestimar o grau de cristalinidade dos *flakes* de grafita e, consequentemente, subestimar ainda mais as temperaturas de cristalização.

O resultado obtido com base na difração de raios X (770°C de temperatura) é compatível com o campo de estabilidade definido pela paragênese, mas é de pouca confiabilidade, devido à sobreposição dos picos de minerais diferentes no mesmo espectro, que inviabilizaram uma aproximação consistente dos parâmetros de cela. Espera-se, com temperaturas dessa magnitude, taxas de fusão parcial superiores às observadas em petrografia.

O intervalo de temperatura definido com base na integração dos dados obtidos (700 a 706°C) é apresentado na Figura 51.

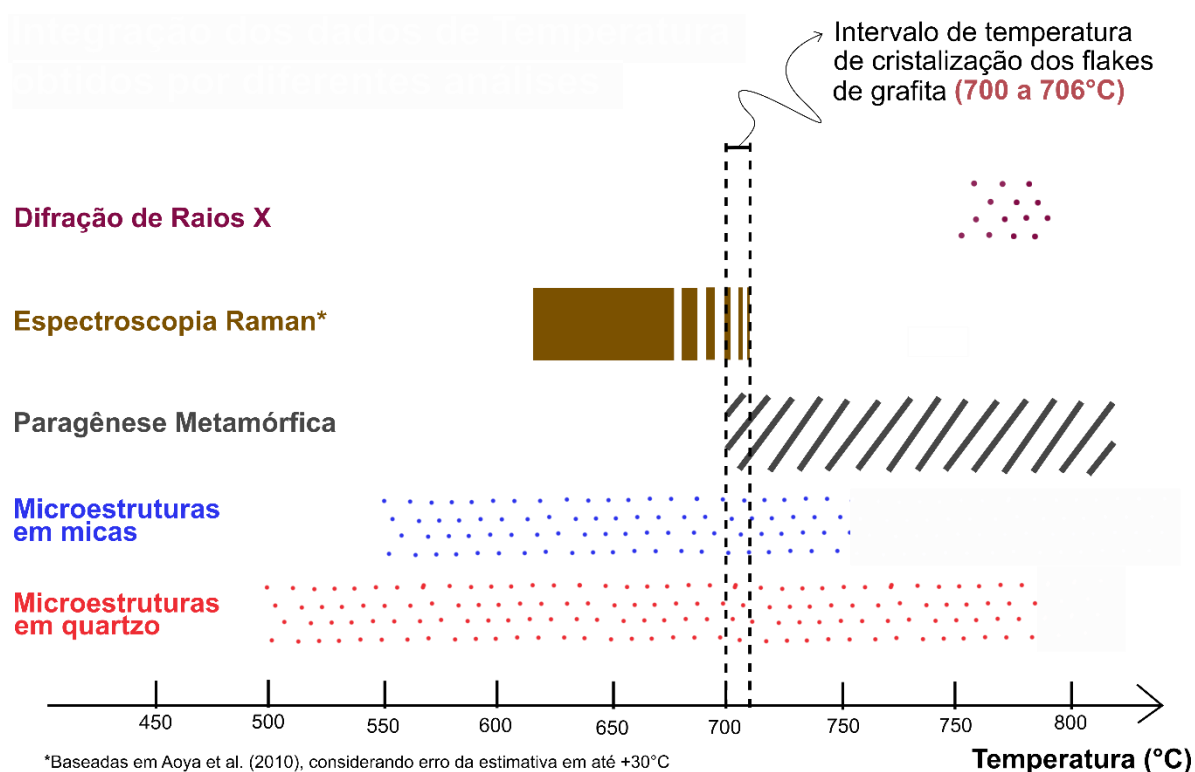


Figura 51: Intervalo de temperatura para a cristalização dos *flakes* de grafita e pico metamórfico.

No contexto das rochas estudadas, Fetter (1999) descreve a ocorrência de, pelo menos, quatro ciclos tectono-deposicionais para as rochas do Complexo Canindé do Ceará Central (CCCC) com idades de zircões detríticos entre $1,9 - 2,2$ Ga (U-Pb em zircão; Costa e Palheta, 2017; Kalsbeek et al., 2013), indicando idade máxima de deposição paleoproterozoica para os sedimentos.

Ao cruzar as idades de deposição com os ciclos propostos em Fetter *et al.* (1999) e com as interpretações de Arthaud (2007), temos a seguinte configuração:

- Primeiro Ciclo (2,15 Ga) – evento tectono-termal que gerou a maior parte dos zircões, seguida de deposição dos sedimentos que deram origem às rochas do Complexo Canindé do Ceará Central;
- Segundo Ciclo (1,78 Ga) – deposição de sedimentos que deram origem às outras sequências supracrustais;
- Terceiro Ciclo (775 Ma) – abertura de bacia neoproterozoica (de idade máxima de 794 Ma, interpretada por Arthaud, 2007) e acúmulo de sedimentos;
- Quarto Ciclo (650 Ma) – metamorfismo progressivo, atingindo fácies anfibolito alto a granulito, zona da silimanita, durante o evento Brasileiro e intrusão dos corpos graníticos tardi a pós-colisionais (Figura 52).

A Figura 52 registra ainda dois grandes picos de geração de zircões em 1,35 e 1,2 Ga. Para um melhor detalhamento dos eventos, é necessário um estudo geocronológico e de proveniência sistemático das sequências supracrustais do Terreno Ceará Central.

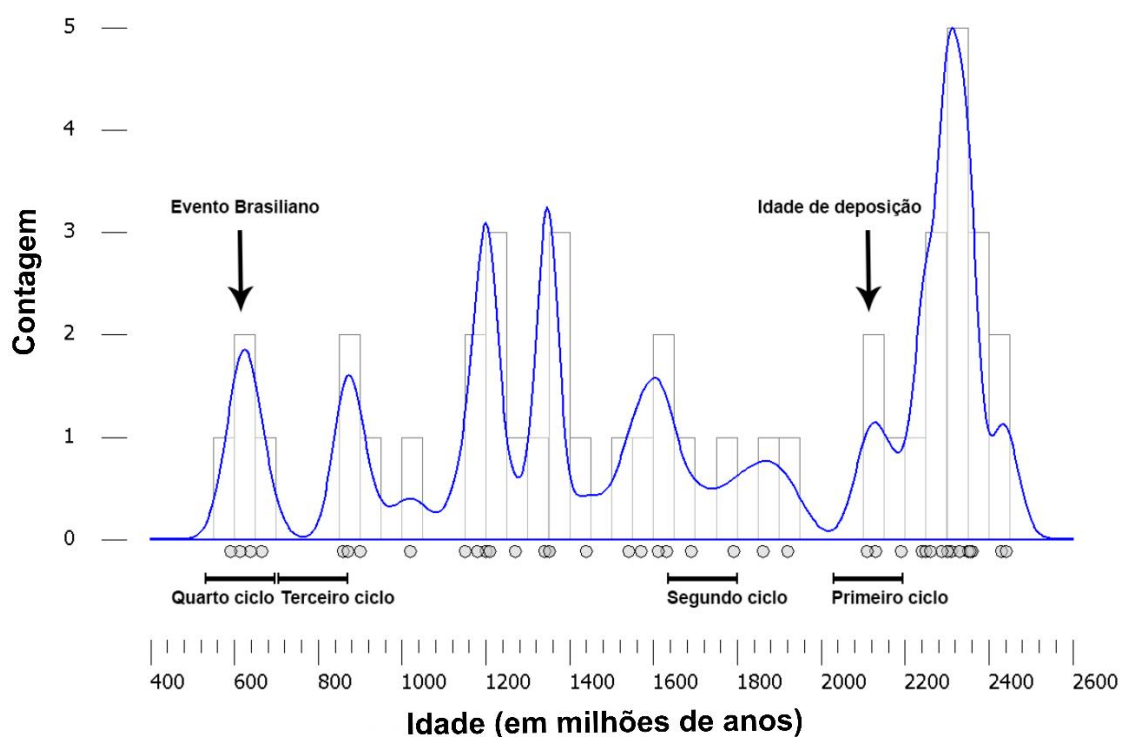


Figura 52: Histograma de distribuição de Idades de zircão detrítico das unidades metassedimentares do Terreno Ceará Central, compiladas de Fetter *et al.* (2003) e Fetter *et al.* (2000), apresentados em *Kernel Density Estimation* (Vermeesch, 2012), com representação dos quatro ciclos tectono-deposicionais propostos por Fetter (1999).

Um modelo simples para a gênese da grafita no CCCC é apresentado na Figura 53, onde os principais eventos geológicos registrados foram a deposição dos sedimentos tipo QPC, ricos em matéria orgânica, em bacia de margem passiva durante o Paleoproterozoico. Em seguida, esses sedimentos foram submetidos a metamorfismo de alto grau e anatexia ao longo do evento Brasileiro.

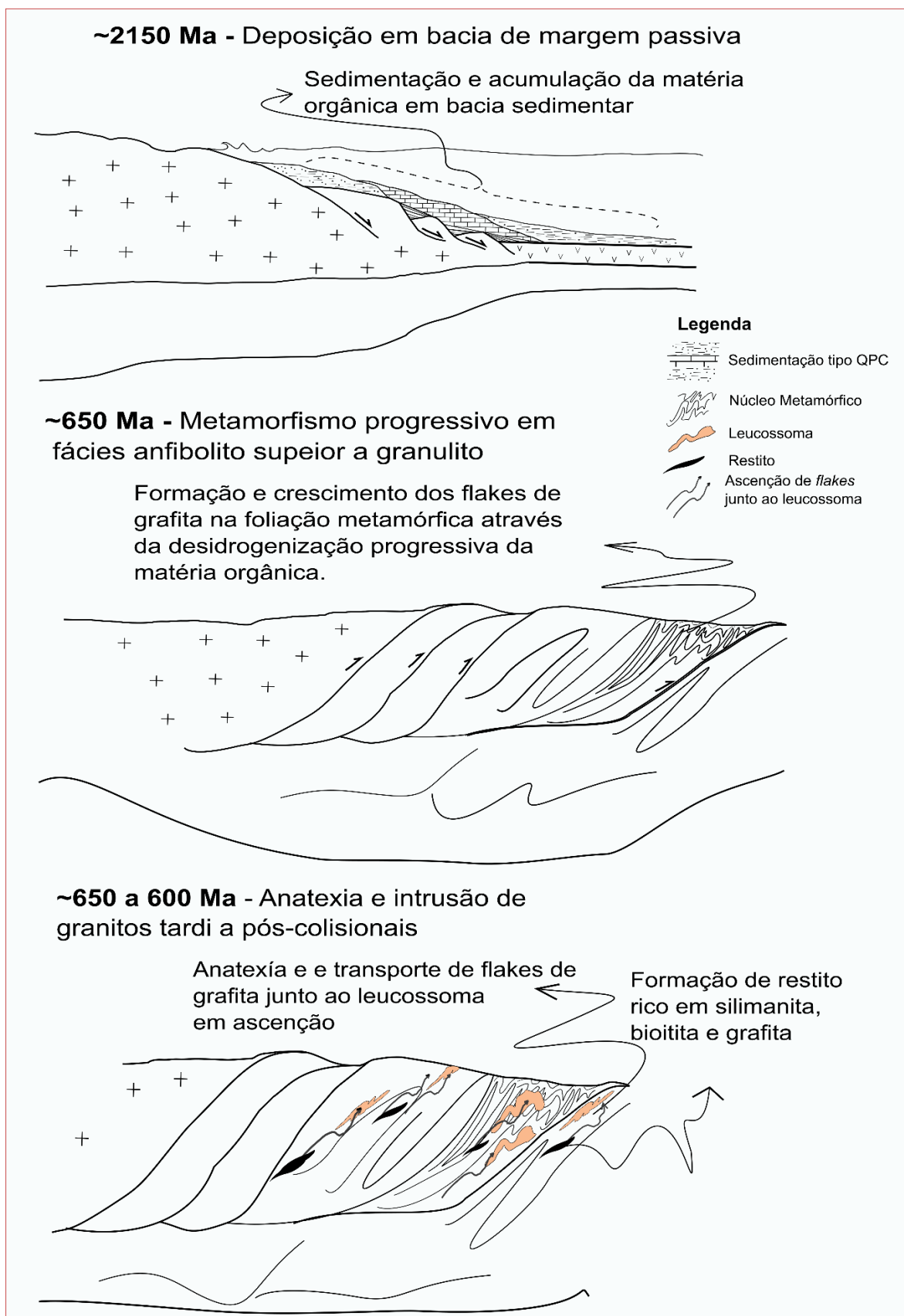


Figura 53: Modelo de evolução geológica e gênese da grafita do Complexo Canindé do Ceará Central.

7. CONCLUSÕES

Petrograficamente, a caracterização da grafita revelou heterogeneidades ao longo dos litotipos amostrados, variando em tamanho e associação mineralógica. É mais grossa e em associação frequente com biotita (e, as vezes, fibrolita) nos gnaisses e xistos, e relativamente mais fina quando associada ao quartzo e feldspato no leucossoma de migmatitos. O intercrescimento de grafita com filossilicatos e/ou fibrolita observado nos gnaisses e xistos é deletério no processo de separação mineral em escala industrial. As heterogeneidades em granulometria e associação mineralógica não se refletem em alterações morfológicas dos cristais, já que as palhetas são bem formadas em todos os casos, mesmo quando formam aglomerados globulares, nos xistos. Apesar da presença predominante de *fine flakes* no leucossoma, a maioria (60%) das palhetas de grafita presente na rocha são *extra large flakes* e *large flakes* (33% e 27% dos *flakes*, respectivamente).

A microscopia eletrônica de varredura revelou *flakes* de grafita bem formados, com tamanhos variando entre 0,03 e 0,6mm, com seção basal hexagonal, superfície lisa e, por vezes, apresentando algumas fraturas. Na amostra analisada, foi observada ao MEV a presença raros cristais de pirita entre a assembleia mineral. Por se tratar de um contaminante indesejado no processo de beneficiamento da grafita, é necessário que se realize análises litoquímica para quantificar a ocorrência de pirita e outros sulfetos.

Quanto à geotermometria, não se espera que as temperaturas de formação da grafita diverjam das indicadas pela paragênese metamórfica, apesar disso temperaturas obtidas pela termometria baseada em espectroscopia Raman (média de 657°C) são parcialmente incompatíveis com as estimadas pela paragênese metamórfica (700 – 805° C), subestimando a temperatura de formação da grafita.

A baixa confiabilidade dos dados obtidos por difração de raios X, devido à sobreposição dos picos de outros minerais (quartzo e biotita) sobre o difratograma desse mineral, tornam a estimativa de temperatura inconclusiva, uma vez que a magnitude implicaria processos geológicos não observados na descrição petrográfica.

Uma possível forma de interpretar os dados seria proceder como em Jimenez (2017) e considerar que a temperatura de pico metamórfico é obtida pelo espectro da grafita de melhor cristalinidade. Assim, as temperaturas de pico metamórfico ficariam no intervalo de 676 a 706°C, viabilizando uma intersecção entre a temperatura estimada baseando-se na paragênese metamórfica e a baseada em espectroscopia Raman (700 a 706°C).

A discrepância entre os dados obtidos nas diferentes etapas de espectroscopia Raman confirma a influência da preparação das amostras, em especial no polimento das lâminas

petrográficas, sobre os resultados. O polimento causou deformação significativa, introduzindo defeitos e diminuindo o grau de cristalinidade da grafita. As amostras FC-R-14B e FC-R-18-1 são bons exemplo desse fenômeno. As lâminas preparadas pela litoteca do SGB/CPRM usadas na primeira etapa apresentam grau de cristalinidade muito inferior ao apresentado pelas lâminas confeccionada no IGc-USP, feitas a partir dos mesmos espelhos e usadas nas etapas seguintes. A principal diferença entre elas é o fato de as primeiras terem sido submetida a polimento.

Tectonicamente, a gênese dessa mineralização grafitica relaciona-se a quatro eventos tectono-termais de abertura de bacia, sedimentação plataformar, inversão de bacia e, finalmente, fusão parcial de granitos tipo S. De modo geral, verifica-se que isso está de acordo com as principais províncias grafiticas brasileiras e mundiais, as quais envolvem múltiplos estágios termais para alcançarem o grau de minério (ver Figura 41). Especificamente no Brasil, o Paleoproterozoico e o Neoproterozoico são apontadas como as principais idades metalogenéticas de sedimentação e metamorfismo, respectivamente (vide, Sousa e Matos, no prelo). Dessa forma, dando à região alto potencial metalogenético.

Finalmente, do ponto de vista da pesquisa mineral, é possível definir o Distrito Grafitífero de Araçoiaba-Baturité (DGAB) como correlato às ocorrências de grafita do Complexo Canindé do Ceará Central. Regionalmente agrupadas elas podem ser consideradas uma região cujo potencial exploratório é definido pelas similaridades de ambiente deposicional com as rochas do Grupo Macaúbas (PGBM) e temperatura de formação com as províncias PGBM e Distrito de Itapeçerica (MG), com presença de *flakes* de elevado valor comercial e alta cristalinidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agard, P.; Jolivet, L.; Goffé, B. (2001a). Tectonometamorphic evolution of the Schistes lustrés complex: implications for the exhumation of HP and UHP rocks in the western Alps. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 172, 617–636.
- Agard, P.; Vidal, O.; Goffé, B. (2001b). Interlayer and Si content of phengite in HP-LT carpholite-bearing metapelites. *Journal of Metamorphic Geology*, 19, 479–496.
- Almeida, F. F. M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B. B. (1977). Províncias estruturais brasileiras. Províncias estruturais brasileiras. *VIII Simpósio de Geologia do Nordeste*, 8, 363-391. Campina Grande: SBG.
- Amaral Junior, M. A.; Baldan, M. R. (2017). *Rotina de ajuste do espectro Raman de primeira ordem para materiais carbonosos*. São José dos Campos: INPE. Acesso em 13 de junho de 2019, < <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/07.12.19.35/doc/publicacao.pdf>>.
- Ammar, M. R.; Galy, N.; Rouzaud, J. N.; Toulhoat, N.; Vaudey, C. E.; Simon, P.; Moncoffre, N. (2015). Characterizing various types of defects in nuclear graphite using Raman scattering: heat treatment, ion irradiation and polishing. *Carbon*, 95, 364-373.
- Aoya, M.; Kouketsu, Y.; Endo, S.; Shimizu, H.; Mizukami, T.; Nakamura, D.; Wallis, S. (2010). Extending the applicability of the Raman carbonaceous-material geothermometer using data from contact metamorphic rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(9), 895-914.
- Arthaud M. H., Hartmann M. B., Tagliani T. R. M. (1988). Metamorfismo inverso na porção centroleste da Folha Independência-CE: suas implicações estruturais e estratigráficas. *Revista de Geologia – UFC*, 1, 41-44.
- Arthaud M. H., Vasconcelos A. M., Oliveira F. V. C. (1998). As seqüências metasedimentares do Ceará Central. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 40. Belo Horizonte: SGB. v.1, p. 16.
- Arthaud, M. H. (2007). *Evolução neoproterozoica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central – NE do Brasil): da sedimentação a colisão continental brasileira*. Tese (Doutorado). Brasília: Instituto de Geociências - UnB.
- Azanon, J. M. (1994). *Metamorfismo de alta presión /baja temperatura, baja presión / alta temperatura y tectonica del complejo Alpujarride (Cordilleras Betico-Rifenas)*. Tese (Doutorado). Granada: University of Granada.

- Belém, J. (2006). *Caracterização mineralógica, física e termobarométrica de minérios de grafita da Província Gráfica Bahia-Minas*. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Instituto de Geociências – UFMG.
- Belém, J. (2018). *Grafita. Recursos Minerais de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Codemge.
- Bello, R. M. D. S. (1978). *Condições de metamorfismo de Buritirama, Pará, e Serra do Navio, Amapá*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências - USP.
- Beny-Bassez, C.; Rouzaud, J. N. (1985). Characterization of carbonaceous materials by correlated electron and optical microscopy and Raman microspectroscopy. *Scanning electron microscopy*, 1, 119-132.
- Beyssac, O.; Goffé, B.; Chopin, C.; Rouzaud, J. N. (2002). Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: a new geothermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 20, 859–871.
- Borghi, A.; Cadoppi, P.; Porro, A.; Sacchi, R. (1985). Metamorphism in the northern part of the Dora Maira massif (Cottian Alps). *Bollettino Del Museo Regionale Di Scienze Naturali, Torino*, 3, 369–380.
- Borghi, A.; Compagnoni, R.; Sandrone, R. (1986). Composite P-T paths in the Internal Penninic Massifs of the Western Alps: Petrological constraints to their thermo-mechanical evolution. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 89, 345–367.
- Bouybaouene, M.; Michard, A.; Goffé, B. (1998). High-Pressure granulites on top of the Beni Bousera peridotites, Morocco: a record of an ancient thickened crust in the Alboran domain. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 169, 153–162.
- Brito Neves, B. B.; Santos E. J.; Van Schmus, W. R. (2000). Tectonic History of the Borborema Province, Northeast Brazil. In: Cordani, U. G.; Thomaz Filho, A.; Campos, D. A. (Eds.). Tectonic Evolution of the South America. *International Geology Congress of 2000*, vol.31, 151-182. Rio de Janeiro: CPRM.
- Butts, K. H. (1993). *Strategic minerals in the new world order*. Army War College (U.S.). Strategic Studies Institute.
- Caby, R. (1989). Precambrian terranes of Benin-Nigeria and northeast Brazil and the Late Proterozoic south Atlantic fit. Dallmeyer, D.D. (ed.) Terranes in the Circum-Atlantic Paleozoic orogens. *Geological Society of America, Special Papers*, 230, 145-158.
- Caby, R. (2003). Terrane assembly and geodynamic evolution of Central-Western Hoggar: a synthesis. *Journal of African Earth Sciences*, 37, 133-159.

- Caby, R.; Arthaud M.H. (1986). Major Precambrian nappes of the Brazilian belt, Ceará, Northeast Brazil. *Geology*, 14, 871-874.
- Campelo, R. C. (2009). *Análise de terrenos na porção setentrional da Província Borborema, NE do Brasil: integração de dados geológicos e gravimétricos*. Dissertação (Mestrado) - Natal: Departamento de Geologia – UFRN.
- Campos, M.; Braga, A. P. G.; Mello, A. A.; Souza, E. M.; Silva, F. A. F.; França, J. B. (1979). *Projeto Rio Jaguaribe. Estado do Ceará, Rio Grande Norte e Paraíba. Relatório Final de Geologia*. Seção Geológica Básica. Brasília: DNPM/CPRM.
- Cavalcante, J. C.; Vasconcelos, A. M.; Medeiros, M. D. F.; Paiva, I. G. (2003). *Mapa geológico do Estado do Ceará*. Escala 1:500.000. Fortaleza: CPRM.
- Chopin, C.; Henry, C.; Michard, A. (1991). Geology and petrology of the coesite-bearing terrain, Dora-Maira massif, Western Alps. *European Journal of Mineralogy*, 3, 263–291.
- Clark, R. J. H.; Dines, T. J. (1986). Resonance Raman-Spectroscopy, and its Application to Inorganic-Chemistry, *Angewandte Chemie International Edition*, 25(2), 131-158.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (1983). *Mapa geológico do Estado do Ceará*. Escala: 1:500.000. Brasília: Ministério das Minas e Energia.
- Costa, F. G. da; Naleto, J. L. C.; Calado, B. D. O. (2018). *Áreas de relevante interesse mineral Tróia-Pedra Branca: geologia e mineralização aurífera da sequência metavulcanossedimentar da Serra das Pipocas, Maciço de Tróia, Ceará*. Fortaleza: SGB/CPRM.
- Costa, F. G. da; Palheta, E. S. de M. (2017). *Geologia e recursos minerais das folhas Quixadá (SB.24-V-B-IV) e Itapiúna (SB.24-X-A-IV)*. Escala 1:100.000. Fortaleza: SGB/CPRM.
- Crespo, E.; Luque, F. J.; Rodas, M.; Wada, H.; Gervilla, F. (2006). Graphite-sulfide deposits in Ronda and Beni Bousser peridotites (Spain and Morocco) and the origin of carbon in mantle-derived rocks. *Gondwana Research*, 9, 279-290.
- Dedavid, B. A.; Gomes, C. I.; Machado, G. (2007). *Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras*. Porto Alegre: EDIPUCSRS.
- Enami, M.; Wallis, S. R.; Banno, Y. (1994). Paragenesis of sodic pyroxene-bearing quartzschists: implications for the P-T history of the Sanbagawa belt. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116, 182–198.
- European Commission (2017). Study on the review of the list of critical raw materials - *Critical*

Raw Materials Factsheets, European Commission. Acesso em 12 de março de 2019, <<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/08fdab5f-9766-11e7-b92d-01aa75ed71a1>>.

Faria, D. L. A.; Santos, L. G. C.; Gonçalves, N. S. (1997). *Uma Demonstração Sobre o Espalhamento Inelástico de Luz: Repetindo o Experimento de Raman*. São Paulo: Química Nova.

Ferrari, A. C. (2007). Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects. *Solid State Commun*, 143, 47–57. Acesso em 19 de maio de 2019, <<https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.03.052>>.

Ferrari, A. C.; Robertson, J. (2000). Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physics Review B*, 61, 14095–14107. Acesso em 18 de maio de 2019, <<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.14095>>.

Fetter, A. H. (1999). *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*. Tese (Doutorado). Lawrence: Departament of Geology, University of Kansas.

Fetter, A. H.; Santos, T. J. S.; Van Schmus, W. R.; Hackspacher, P.C.; Brito Neves, B. B.; Arthaud, M. H.; Nogueira Neto, J. A. A.; Wernick, E. (2003). 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*, 6(2), 265-273.

Fetter, A. H.; Van Schmus, W. R.; Santos, T. J. S. Nogueira Neto, J. A.; Arthaud, M. H. (2000). 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*, 30(1), 102-106.

Fragomeni, P. R. P.; Pereira, R. M. (2013). The graphite mineralization in the Aracoiá-Baturité District (CE): geotectonic and metallogenetic implications. *Brazilian Journal of Geology*, 43(2), 223–234. DOI: 10.5327/z2317-48892013000200003.

Frey, M.; Bucher, K.; Frank, E.; Mullis, J. (1980). Alpine metamorphism along the GeoTraverse Basel-Chiasso-a review. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 73, 527–546.

Geim, A. K. (2009). Graphene: Status and Prospects. *Science*, 324, 1530-1534.

- Geim, A. K. N.; Novoselov, K.S. (2007). The Rise of Graphene. *Nature materials*, 6, 183-91. DOI: 10.1038/nmat1849.
- Graphene Market (2019). Research Materials. Acesso em 12 de abril de 2019, <<https://graphene-supermarket.com/Amorphous-Graphite-100-Grams.html>>.
- Hand, G. P. (1996). Graphite: applications & developments. *Industrial Minerals*, 342, 69-72.
- Harben, P. W. (1999). *The industrial minerals handybook: a guide to markets, specifications & prices*. Londres: Metal Bulletin.
- Harben, P. W.; Bates, R. L. (1990). *Industrial minerals geology and world deposit*. Londres: Metal Bulletin.
- Itaya, T. (1981). Carbonaceous material in pelitic shists of the Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan. *Lithos*, 14(3), 215-224.
- Jenkins, R.; Snyder, R. L. (1996). *Introduction to X-Ray Powder Diffractometry. Chemical Analysis*. New York: Wiley.
- Jimenez, F. A. C. (2017). *Relações Petrogenéticas entre a Suite Granítica Aurumina e sua encaixante, a Formação Ticunzal, no Setor Setentrional da Zona Externa da Faixa Brasília*. Tese (Doutorado). Brasília: Instituto de Geociências - UnB.
- Jolivet, L.; Beyssac, O.; Goffé, B.; Avigad, D.; Lepvrier, C.; Maluski, H.; Thang, T. T. (2001). Oligo-Miocene midcrustal subhorizontal shear zone in Indochina. *Tectonics*, 20, 46–57.
- Kaplan, I. (1978). *Física Nuclear*. (2° ed.). Rio de Janeiro: Guanabara Dois.
- Kalsbeek, F.; Ekwueme, B. N.; Penaye, J.; Souza, Z. S.; Thrane, K. (2013). Recognition of Early and Late Neoproterozoic supracrustal units in West Africa and North-East Brazil from detrital zircon geochronology. *Precambrian Research*, 226, 105-115.
- Lara Exploration Ltda. (2015). Press Release: *13.69 meters averaging 18.38% grafitic carbon intersected by the Canindé Project in Brazil*. Acesso em 21 de fevereiro de 2019, <<https://www.laraexploration.com/news/2015/lara-exploration-ltd-13.69-metres-averaging-18.38-graphitic-carbon-intersected-by-drilling-at-the-caninde-project-in-brazil/>>.
- Lepland, A.; Van Zuilen, M.; Layne, G. D.; Arrhenius, G. (2002). Graphite as a biomarker in rocks of the 3.8 Ga Isua Supracrustal Belt. *American Geophysical Union Fall Meeting*. São Francisco.
- Luque, F. J.; Huizenga, J. M.; Crespo-Feo E.; Wada, H.; Ortega, L.; Barrenechea, J. F.; (2014).

Vein graphite deposits: Geological settings, origin, and economic significance. *Mineralium Deposita*, 49(2), 261–277.

Malisa, E. P. (1998). Application of graphite as a geothermometer in hydrothermally altered metamorphic rocks of the Merelani-Lelatema area, Mozambique Belt, northeastern Tanzania. *Journal of African Earth Sciences*, 26, 313–316.

Mathews, M. J.; Pimenta, M. A.; Dresselhaus, G.; Dresselhaus, M. S.; Endo, M. (1999). Origin of dispersive effects of the raman d band in carbon materials. *Condensed Matter and Material Physics*, 59, 6585–6588. Disponível em: <<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.59.R6585>>.

Monié, P.; Caby, R.; Arthaud, M. H. (1997). The neoproterozoic Brasiliano orogeny in northeast Brazil: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and petrostructural data from Ceará. *Precambrian Research*, 81, 241–264.

O'Driscoll, M. (2010). Minerals meet in Miami heat. *Industrial Minerals*. Acessado em 18 de Fevereiro de 2019, <<http://www.indmin.com/Article/2398524/Minerals-meet-in-Miami-heat.html/>>.

Olson, D. W.; Virta, R. L.; Mahdavi, M.; Sangine, E. S.; Fortier, S. M. (2016). Natural graphite demand and supply—Implications for electric vehicle battery requirements In: Wessel, G. R., and Greenberg, J. K. (Eds.), *Geoscience for the public good and global development—Toward a sustainable future* (v.520, 67-77). Virginia: Geological Society of America. Acesso em 13 de fevereiro de 2019, <[http://dx.doi.org/10.1130/2016.2520\(08\)](http://dx.doi.org/10.1130/2016.2520(08))>.

Parra, T.; Vidal, O.; Jolivet, L. (2002). P-T path of high pressure, low-temperature schists on Tinos Island (Cyclades Archipelago, Greece) using chlorite-potassic white mica pairs. *Lithos*, 63, 41–66.

Pócsik, I.; Hundhausen, M.; Koós, M.; Ley, L. (1998). Origin of the D peak in the Raman spectrum of microcrystalline graphite. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 227, 1083-1086.

Ramsay, J. G.; Huber, M. I. (1987). *The Techniques of Modern Structural Geology: Folds and Fractures*. (6, 391p). London, Orlando, San Diego, New York, Austin, Boston, Sydney, Tokyo, Toronto: *Geological Magazine*, 125(3), 316-317.

Ribeiro, T. M. G. (2016). *Caracterização de minério de grafita de Almenara – MG*. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Escola de Engenharia – UFMG.

Robinson, G. R. Jr.; Hammarstrom, J. M.; Olson, D. W. (2017). Graphite In: Schulz, K.J., Young, J.H., Jr.; Seal, R.R., II; Bradley, D.C. (Eds.), *Critical mineral resources of the United States —Economic and environmental geology and prospects for future supply* (v.

1802, J1-J8). Virginia: U.S. Geological Survey Professional Paper.

Rodas, M.; Luque, F. J.; Barrenechea, J. F.; Fernández-Caliani, J. C.; Miras, A.; Fernández-Rodríguez, C. (2000). Graphite occurrences in the low-pressure/high-temperature metamorphic belt of the Sierra de Aracena (southern Iberian Massif). *Mineralogical Magazine*, 64(5), 801–814.

Saint Jean Carbon (2019). Sri Lanka is the only region in the world that produces vein (lump) graphite. Acesso em 13 de março de 2019, <<http://www.saintjeancarbon.com/index.php/graphene/graphite/lumpvein/sri-lanka/>>.

Sala, O. (1995). *Fundamentos da Espectroscopia Raman e no Infravermelho*. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista.

Santos, E. J.; Brito Neves, B. B. Província Borborema. In: Almeida, F. F. M de; Hasui, Y. O (1984). *Pré-cambriano do Brasil* (v.1, 123-186). São Paulo: Edgard Blucher.

Schobbenhaus, C.; Campos, D. A. (1984). A evolução da Plataforma Sul-Americana no Brasil e suas principais concentrações minerais. In: Schobbenhaus C., Campos, D. A., Derze, G. R., Asmus, H. E. *Geologia do Brasil*. (v.1, 9-53). Brasília: Ministério das Minas e Energia/Departamento Nacional da Produção Mineral.

Scrogins, A. (2015). Graphite: Where size matters. *Australia's Paydirt*, 1(225), 78.

Sharma, D. S.; Kumar, B. (1998). Carbon isotope systematics of graphites from Dharwar craton, southern India: Implications to their source and post-depositional alterations. *Current Science*, 75(4), 396-399.

Shengelia, D. M.; Akhvlediani, R. A.; Ketskaveli, D. N. (1977). Graphitic Thermometer. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 235(6), 1407-1409.

Simandl, G. J. (1992). *Gîtes de graphite de la région de la Gatineau, Québec*. Tese (doutorado). Montréal: Université de Montréal.

Simandl, G. J.; Keenan, W. M. (1997a). Crystalline Flake Graphite. In: *Geological Fieldwork*. British Columbia Ministry of Employment and Investment, 1998(1), 1-3.

Simandl, G. J.; Keenan, W.M. (1997b). Vein graphite in metamorphic terrains. In: *Geological Fieldwork 1997*, British Columbia Ministry of Energy and Mines, *British Columbia Geological Survey Paper* 1998(1), 1-3. Acesso em 22 de fevereiro de 2019, <http://www.empr.gov.bc.ca/Mining/Geoscience/PublicationsCatalogue/Fieldwork/Documents/1997/simandl_kenan.pdf>.

- Simandl, G. J.; Paradis, S.; Akam, C. (2015). Graphite deposit types, their origin, and economic significance. Symposium on Strategic and Critical Materials, *British Columbia Geological Survey, Columbia*, 163-171.
- Simandl, G. J.; Paradis, S.; Valiquette, G.; Jacob, H. L. (1995). Crystalline graphite deposits, classification and economic potential, Lachute-Hull-Mont-Laurier Area, Quebec. I. XXVIII *Forum on the Geology of Industrial Minerals*, 168-174. Martinsburg, West Virginia.
- Soares, A. C. P.; Noce, C. M.; Alkmim, F. F. D.; Silva, L. C. D.; Babinski, M.; Cordani, U. G.; Castañeda, C. (2007). Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977. *Geonomos*, 15, 1-16, Acesso em 13 de abril de 2019, <<http://www.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geonomos/article/view/103>>.
- Sousa, M. J.; Matos, D. R. (no prelo). *Informe de Recursos Minerais: Projeto Grafita Brasil*. Brasília: SGB/CPRM.
- Stipp, M.; Stünitz, H.; Heilbronner, R.; Schmid, S.M. (2002). The eastern Tonale fault zone: A “natural laboratory” for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700 °C. *Journal of Structural Geology*, 24, 1861–1884.
- Todd, C. S; Engi, M. (1997). Metamorphic field gradients in the Central Alps. *Journal of Metamorphic Geology*, 15, 513–530.
- Torres, P. F. M.; Cavalcante, J.C.; Palheta, E.S.M.; Vasconcelos, A.M.; Oliveira, F.V.; Forgiarini, L.L.; Frizzo, S.J.; Melo, C.R. de; Neto, V.C.D.; Gomes, F.E.M.; Cavalcante, S. N.; Cavalcante, S. E.; Sousa, R. R. (2007). *Mapa Geológico da Folha Quixadá (SB-24-V-B): escala 1:250.000*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Programa Levantamentos Geológicos Básicos.
- Trotet, F. (2000). Exhumation des roches de Haute Pression – Basse Temperature le long d'un transect des Cyclades au Péloponnèse (Grèce): implications géodynamiques. Tese (Doutorado), Orsay: Université Paris XI.
- Tuinstra, F.; Koenig, J.L. (1970). Raman Spectrum of Graphite. *Journal of Chemistry and Physics*, 53, 1126–1130.
- U.S. Geological Survey, (2015). Graphite (Natural). *Mineral Commodity Summaries*. Acesso em 23 junho de 2019, < <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/graphite/mcs-2014-graph.pdf>>.
- U.S. Geological Survey, (2017). Graphite (Natural). *Mineral Commodity Summaries*. Acesso em 23 junho de 2019, < <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/graphite/mcs-2016-graph.pdf>>.

- U.S. Geological Survey, (2019). Graphite (Natural). *Mineral Commodity Summaries*. Acesso em 23 junho de 2019, < <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/graphite/mcs-2018-graph.pdf>>.
- Vermeesch, P. (2012). On the visualisation of detrital age distributions. *Chemical Geology*, 312, 190–194.
- Vielzeuf, D.; Holloway, J. R. (1988). Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system, *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 98, 257-276.
- Weis, P. L.; Friedman, I.; Gleason, J. P. (1981). The origin of epigenetic graphite: evidence from isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45(12), 2325-2332.
- Whitney, D. L.; Evans, B. W. (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American mineralogist*, 95(1), 185-187.
- Wissler, M. (2006). Graphite and carbon powders for electrochemical applications. *Journal of Power Sources*, 156, 142-150.
- Wopenka, B; Pasteris, J.D. (1993) Structural characterization of kerogens to granulite-facies graphite: Applicability of Raman microprobe spectroscopy. *American Mineralogist*, 78, 533–557.
- Yoshio, M.; Noguchi, H. (2009). Introduction: Development of Lithium-Ion Batteries. In: Yoshio, M; Brodd, R.J.; Kozawa, A. (Eds.), *Lithium-ion Batteries: Science and Technology*; (v.1, 14-23); New York: Springer.

ANEXO 1: COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DAS ROCHAS ESTUDADAS – RESULTADO DA ANÁLISE PETROGRÁFICA

Amostra	Qtz	Kfelds	Pla	Mus	Bt	Chl	Sill	Gf	Ep	Hbl	Zir	Tur	Rutilo	Monazita	Opacos	Classificação	OBS
FC-R-09-1	28%	18%	16%	2%	10%			27%			<1%	1%	<1%	<1%		Bt - Gf gnaiss	
FC-R-09-2	35%	19%	14%	1%	12%			19%			<1%	<1%	<1%	<1%		Bt - Gf gnaiss	
FC-R-09-3	25%	19%	17%	2%	14%			23%			<1%	<1%	<1%	<1%		Bt - Gf gnaiss	
FC-R-10-1	25%	23%	19%	3%	12%	<1%	4%	12%			<1%	1%	<1%			Gf-Sill-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-10-2	22%	21%	17%	4%	17%	1%	6%	13%			<1%	<1%	<1%	<1%		Gf-Sill-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-11	32%	38%	24%	2%	2%		1%	1%				<1%	<1%			Leucossoma com sillimanita, muscovita e grafita	
FC-R-12-1	38%	12%	7%	2%	25%		9%	6%	1%		<1%	1%	<1%			Gf-Sill-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-12-02	32%	19%	23%	2%	13%		5%	4%	1%		<1%	1%	<1%	<1%		Gf-Sill-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-13	29%	15%	19%	3%	16%	1%	6%	7%				1%	<1%	<1%		Sill-Gf-Bt gnaiss migmatítico	Simplectito + Mirmequita perfazem cerca de 2%
FC-R-14A	42%	22%	14%	4%	10%		4%	3%	1%			1%		<1%		Bt Granito com sillimanita, muscovita e grafita	
FC-R-14B	11%	1%	2%	4%	47%			35%			<1%	<1%	<1%	<1%		Gf-Bt Xisto	
FC-R-15	25%	19%	22%	6%	16%	1%	9%	2%	<1%			<1%	<1%	<1%		Sill-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-16A	45%	20%	3%	2%	12%	1%	10%	3%						<1%		Sill-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-16B	28%	16%	11%	5%	19%		14%	5%						<1%		Ms-Gf-Sill-Bt gnaiss	
FC-R-17	26%	6%	18%	4%	21%		16%	5%			1%	1%		2%		Gf-Sill-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-18-1	30%	10%	18%	5%	17%			25%			<1%		<1%	<1%		Bt-Gf Xisto	
FC-R-18-2A	30%	15%	15%	3%	16%	<1%	11%	5%			1%	1%	<1%			Gf-Sill-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-18-2B	37%	10%	12%	2%	18%			17%			<1%	1%		3%		Gf-Bt gnaiss	
FC-R-18-2C	28%	9%	11%	3%	21%			28%								Bt-Gf Xisto	
FC-R-18-3	20%	14%	6%		25%			35%								Bt-Gf Xisto	

Amostra	Qtz	Kfelds	Pla	Mus	Bt	Chl	Sill	Gf	Ep	Hbl	Zir	Tur	Rutilo	Monazita	Opacos	Classificação	OBS
FC-R-19-1	35%	11%	16%	2%	10%	1%	<1%	23%				1%	<1%	<1%		Bt-Gf gnaiss migmatítico	
FC-R-19-2A	38%	7%	15%	1%	20%	<1%	9%	5%			<1%	1%		3%	<1%	Gf-Sill-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-19-2B	20%	8%	14%	2%	25%	1%	3%	26%			<1%	1%	<1%	<1%		Bt-Gf Xisto	
FC-R-21A	30%	3%	16%	3%	23%			25%			<1%	<1%	<1%	<1%		Gf-Bt gnaiss	
FC-R-21B	27%	2%	20%		23%	1%		25%	1%			1%	<1%	<1%		Bt-Gf Gnaiss (a xisto)	
FC-R-22-1	24%	15%	11%	5%	18%	<1	3%	22%			2%		<1%	<1%		Bt-Gf Gnaiss	
FC-R-22-2	35%	28%	20%	5%	4%		2%	6%	<1%		<1%	<1%		<1%		Leucossoma com muscovita, grafita, sillimanita e biotita	
FC-R-22-3	21%	26%	13%	4%	13%	<1%	10%	13%								Sill-Gf-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-22-4	29%	27%	8%	7%	12%		11%	4%				1%		1%		Sill-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-23A	23%	14%	7%	4%	24%	1%	18%	10%			<1%	<1%		1%		Gf-Sill-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-23B	32%	15%	10%	3%	20%	<1%	12%	6%			1%	1%				Gf-Sill-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-24	38%			<1%	45%	2%		2%	2%	6%		1%	<1%			Hornblenda-Biotita xisto	
FC-R-25	25%	12%	14%	3%	24%	1%	12%	7%			<1%	1%	<1%	1%		Gf-Sill-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-26	19%	28%	8%	2%	18%	1%	10%	12%	1%		<1%	1%		1%		Sill-Gf-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-28A	30%	14%	10%	10%	15%		8%	13%			<1%	<1%		<1%		Sill-Gf-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-28B	28%	5%	18%	5%	10%		8%	23%	2%		1%	<1%		<1%		Sill-Gf-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-31	24%	16%	22%	7%	21%		3%	3%			1%					Leucossoma com muscovita, grafita, sillimanita e biotita	Mirmequita e antipertita perfazem 6%
FC-R-32	25%	13%	30%	4%	9%		2%	15%	2%		1%	1%		<1%		Bt-Gf gnaiss migmatítico	
FC-R-35A	25%	33%	17%	6%	8%	1%	3%	4%	1%				1%	<1%		Ms-Bt gnaiss migmatítico	
FC-R-35B	27%	32%	14%	5%	8%	1%	2%	1%	1%				1%	<1%		Ms-Bt gnaiss migmatítico	Mirmequita (1%)

Amostra	Qtz	Kfelds	Pla	Mus	Bt	Chl	Sill	Gf	Ep	Hbl	Zir	Tur	Rutilo	Monazita	Opacos	Classificação	OBS
FC-R-36	38%	4%	17%		13%			24%	1%			<1%	2%	1%		Bt-Gf Gnaiss	
FC-R-37-1	24%	6%	13%	2%	30%			22%			1%	1%		1%		Bt-Gf xisto	
FC-R-37-2	23%	4%	11%	2%	30%	2%		26%	1%		<1%	1%	<1%	1%		Bt-Gf xisto	
FC-R-39	29%	33%	8%	7%	15%	3%	2%	<1%	1%					<1%		Leucossoma com muscovita, sillimanita e biotita	Mirmequita (<1%)
FC-R-40	36%	23%	13%	2%	17%	1%	2%	7%	1%		1%	1%		3%		Bt-Gf Gnaiss	
FC-R-41	27%	23%	12%	4%	10%	1%	9%	9%	<1%		<1%	<1%		1%	4%	Sill-Gf-Bt gnaiss migmatítico	

ANEXO 2: ASPECTOS DEFORMACIONAIS E DE ASSOCIAÇÃO DOS FLAKES DE GRAFITA

Amostra	Tipo	Aspectos Deformacionais		Impurezas ou inclusões	Associação					
		Lineares/ Dobra aberta	Dobra fechada/ Crenulada		Quartzo/ Feldspato	Bt	Ms	Sil	Hematita	Aglomerados de Grafita
FC-R-09-1	Gnaiss	100%		Inexistente	25.18%	74.82%				
FC-R-09-2	Gnaiss	100%		Inexistente	57.30%	42.70%				
FC-R-10A	Gnaiss	100%		Inexistente	24.10%	68.70%	1.78%	5.35%		
FC-R-11	Granito	100%		Inexistente	13.30%		86.70%			
FC-R-12-02	Gnaiss	100%		Porções com intercrescimento de Óxidos (magnetita)	42.76%	38.36%		18.86%	<1%	
FC-R-14B	Xisto	96.47%	3.53%	Inexistente	11.24%	81.63%				7.13%
FC-R-16A	Leucossoma	100%		Inexistente	16.68%	78.20%	<1%	5.12%		
FC-R-17	Gnaiss	100%		Inexistente	13.88%	61.12%		25.00%		
FC-R-18-1	Xisto	100%		Porções com intercrescimento de Óxidos (magnetita)	18.57%	25.71%			<1%	55.72%
FC-R-18-3	Xisto	100%		Porções com intercrescimento de Óxidos (magnetita)	17.50%	53.56%			5.50%	23.44%
FC-R-21A	Gnaiss	100%		Inexistente	65.19%	34.81%				
FC-R-22-3	Xisto	100%		Porções com intercrescimento de Óxidos (magnetita)		100%			<1%	
FC-R-28B	Gnaiss/ Xisto	100%		Inexistente	33.07%	51.34%		6.17%		9.42%
FC-R-36	Gnaiss	100%		Inexistente	55.47%	44.53%				
FC-R-37-1	Gnaiss/ Xisto	97.93%	2.07%	Inexistente	32.86%	61.07%				6.07%

ANEXO 3: DIMENSÕES E MORFOLOGIA DOS FLAKES DE GRAFITA

Amostra	Tipo	Granulação (Rocha)	Comprimento da palheta (mm)	Comprimento Médio (mm)	Largura da palheta (mm)	Largura Média (mm)	Morfologia (%)			
							Seção Basal Hexagonal	Tabular	Tabular com pontas esfarrapadas	Farrapo
FC-R-09-1	Gnaiss	Média	0,065-1,031	0.300	0,006-0,135	0.040	-	100%	-	-
FC-R-09-2	Gnaiss	Média	0,021-1,290	0.449	0,014-0,241	0.076	3.15%	96.85%	-	-
FC-R-10A	Gnaiss	Média	0,056-1,229	0.363	0,019-0,197	0.063	1.84%	95.41%	2.75%	-
FC-R-11	Granito	Media/ Grossa	0,004-0,171	0.041	0,001-0,026	0.007	14.30%	85.70%	-	-
FC-R-12-02	Gnaiss	Media	0,058-0,848	0.272	0,009-0,172	0.053	5.69%	87.34%	3.16%	3.80%
FC-R-14B	Xisto	Media	0,013-0,818	0.212	0,006-0,179	0.029	1.18%	98.82%	-	-
FC-R-16A	Granito	Média/ Grossa	0,071-0,659	0.251	0,017-0,356	0.051	3.95%	96.05%	-	-
FC-R-17	Gnaiss	Média	0,080-0,859	0.207	0,017-0,201	0.046	2.80%	97.20%	-	-
FC-R-18-1	Xisto	Média	0,102-0,717	0.264	0,008-0,263	0.078	11.60%	88.40%	-	-
FC-R-18-3	Xisto	Média	0,016-0,342	0.129	0,003-0,131	0.017	1.03%	98.97%	-	-
FC-R-21A	Gnaiss	Média	0,019-1,240	0.385	0,010-0,240	0.058	1.71%	98.29%	-	-
FC-R-22-3	Xisto	Média	0,031-0,920	0.180	0,011-0,105	0.038	1.86%	98.14%	-	-
FC-R-28B	Gnaiss/ Xisto	Média	0,011-1,391	0.334	0,004-0,250	0.061	6.75%	88.55%	3.55%	1.15%
FC-R-36	Gnaiss	Média	0,021-1,990	0.295	0,007-0,104	0.031	-	100%	-	-
FC-R-37-1	Gnaiss/ Xisto	Média	0,011-0,774	0.209	0,008-0,146	0.035	2.78%	97.22%	-	-

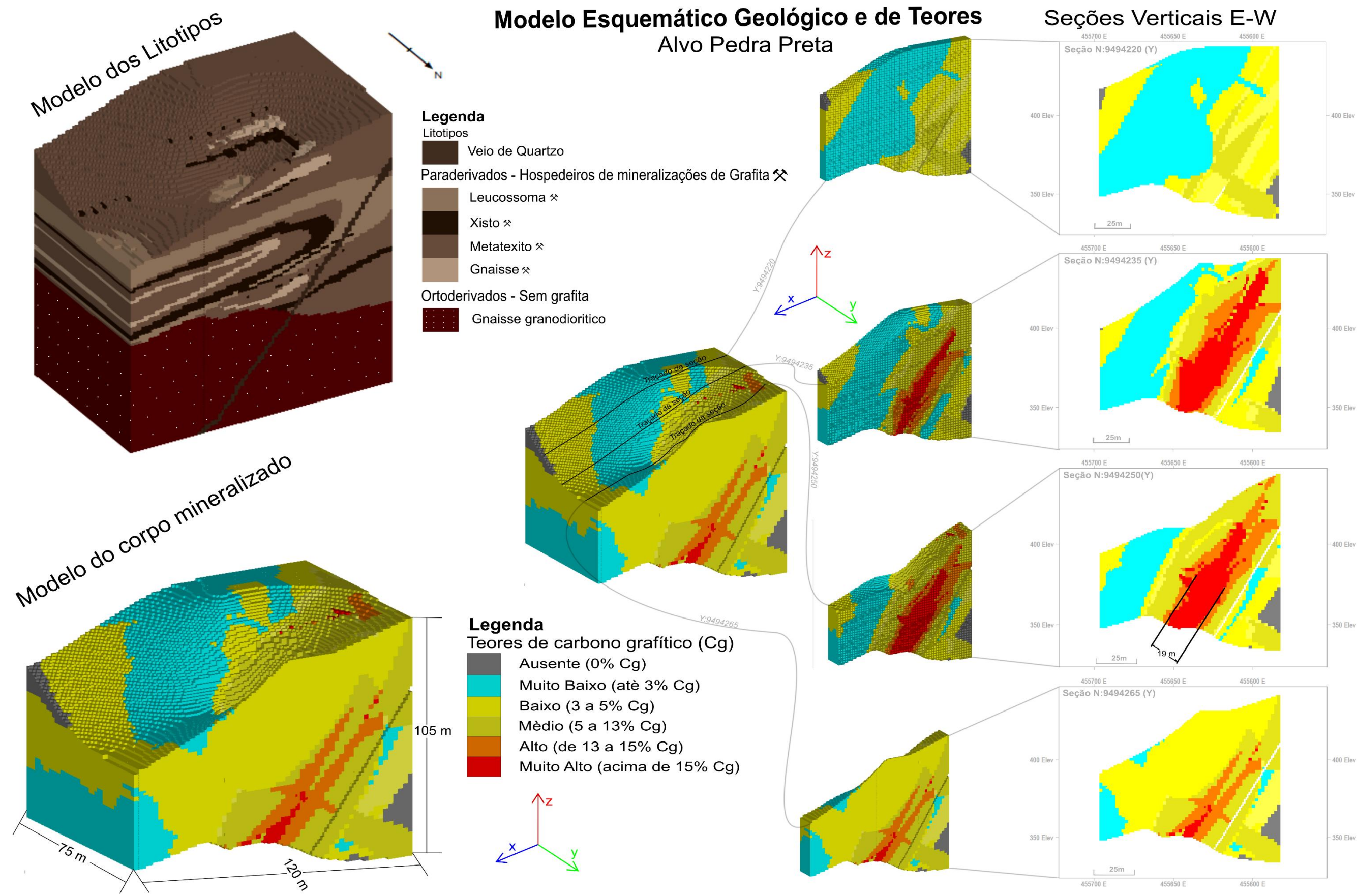
ANEXO 4: DADOS OBTIDOS NA TERCEIRA ETAPA DE ESPECTROSCOPIA RAMAN, PARÂMETROS CALCULADOS E TEMPERATURAS ESTIMADAS PARA CADA MEDIDA REALIZADA

Amostra - Medida	D1 (D)				G				D2				G'				Parâmetros		Temperatura		Preparação
	Área	Posição	FWHM	Altura	Área	Posição	FWHM	Altura	Área	Posição	FWHM	Altura	Área	Posição	FWHM	Altura	R1	R2	Beyssac et al. (2002)	Aoya et al. (2010)	
FC-R-14B-1	0.0	--	0.0	--	13113.1	1581.0	14.7	419.8	0.0	--	0.0	--	6717.3	2685.4	59.3	77.7	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-2	0.0	--	0.0	--	10662.6	1581.0	14.9	416.3	0.0	--	0.0	--	5090.5	2685.4	57.8	72.7	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-3	0.0	--	0.0	--	10721.0	1581.0	14.9	410.4	0.0	--	0.0	--	5043.3	2686.9	54.1	73.8	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-4	0.0	--	0.0	--	11144.2	1581.0	15.1	411.2	0.0	--	0.0	--	4899.3	2688.4	54.8	73.0	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-5	0.0	--	0.0	--	10716.1	1581.0	15.1	403.4	0.0	--	0.0	--	4989.2	2685.4	57.2	72.0	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-6	0.0	--	0.0	--	9728.6	1581.0	15.0	402.0	0.0	--	0.0	--	5052.9	2688.4	58.2	71.6	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-7	0.0	--	0.0	--	9865.7	1581.0	14.9	402.7	0.0	--	0.0	--	5166.8	2686.9	56.0	72.0	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-8	0.0	--	0.0	--	9584.6	1581.0	14.6	405.5	0.0	--	0.0	--	5077.8	2686.9	52.4	72.7	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-9	0.0	--	0.0	--	7046.9	1580.7	15.6	360.7	0.0	--	0.0	--	3919.1	2678.8	59.4	52.7	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-10	1892.6	1331.3	26.3	27	4877.1	1580.7	15.9	244.6	0.0	--	0.0	--	2281.4	2679.7	52.6	34.6	0.1	0.3	516.6	527.9	Não Polida
FC-R-14B-11	0.0	--	0.0	--	6978.1	1580.7	15.7	354.5	0.0	--	0.0	--	3856.5	2679.2	58.9	52.2	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-12	0.0	--	0.0	--	6993.5	1580.7	15.6	358.3	0.0	--	0.0	--	3869.4	2678.9	59.4	52.0	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-13	0.0	--	0.0	--	9108.0	1580.7	14.6	496.3	0.0	--	0.0	--	4634.2	2682.9	48.9	75.6	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-14	0.0	--	0.0	--	4501.5	1581.4	14.1	254.6	0.0	--	0.0	--	1727.4	2685.2	40.5	34.0	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-15	0.0	--	0.0	--	4590.8	1581.4	14.2	258.5	0.0	--	0.0	--	1736.0	2685.1	40.0	34.6	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-16	0.0	--	0.0	--	4569.7	1581.4	14.1	259.3	0.0	--	0.0	--	1778.4	2685.0	41.1	34.5	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-17	0.0	--	0.0	--	4586.3	1581.5	14.1	258.9	0.0	--	0.0	--	2073.0	2681.8	50.1	33.0	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-18	0.0	--	0.0	--	4567.9	1581.5	14.2	257.3	0.0	--	0.0	--	1748.1	2685.4	40.7	34.2	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-19	0.0	--	0.0	--	4582.2	1581.5	14.1	259.1	0.0	--	0.0	--	1773.0	2685.2	40.7	34.8	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-20	0.0	--	0.0	--	4546.2	1581.4	13.9	260.2	0.0	--	0.0	--	1788.7	2684.8	41.1	34.7	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-21	0.0	--	0.0	--	4661.3	1581.4	14.2	261.1	0.0	--	0.0	--	1804.1	2685.0	41.0	35.1	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-22	0.0	--	0.0	--	4663.6	1581.4	14.0	265.8	0.0	--	0.0	--	1816.5	2685.0	40.6	35.7	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-23	0.0	--	0.0	--	4707.4	1581.4	14.1	267.1	0.0	--	0.0	--	1825.4	2684.9	40.9	35.6	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-24	0.0	--	0.0	--	4699.1	1581.4	14.1	265.5	0.0	--	0.0	--	1894.1	2684.6	43.0	35.1	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-25	0.0	--	0.0	--	4948.8	1580.7	15.7	250.8	0.0	--	0.0	--	2114.9	2680.5	47.7	35.4	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-14B-26	0.0	--	0.0	--	4586.3	1581.5	14.1	258.9	0.0	--	0.0	--	2073.0	2681.8	50.1	33.0	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-1	0.0	--	0.0	--	4422.3	1580.8	14.6	242.4	0.0	--	0.0	--	2570.8	2683.0	50.5	40.6	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-2	0.0	--	0.0	--	4385.3	1580.6	14.7	238.8	0.0	--	0.0	--	2523.6	2682.7	49.8	40.4	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-3	0.0	--	0.0	--	4325.6	1580.7	14.5	237.3	0.0	--	0.0	--	2512.2	2682.9	50.5	39.7	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-4	0.0	--	0.0	--	4246.6	1580.7	14.7	231.1	0.0	--	0.0	--	2501.9	2682.3	52.0	38.4	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-5	0.0	--	0.0	--	4187.2	1580.7	14.7	227.8	0.0	--	0.0	--	2470.5	2682.1	51.2	38.5	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-6	0.0	--	0.0	--	1905.9	1580.2	16.3	93.4	0.0	--	0.0	--	2683.9	2679.3	49.2	31.2	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-7	0.0	--	0.0	--	1947.4	1580.1	16.2	96.0	0.0	--	0.0	--	2690.7	2680.1	48.3	31.9	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida

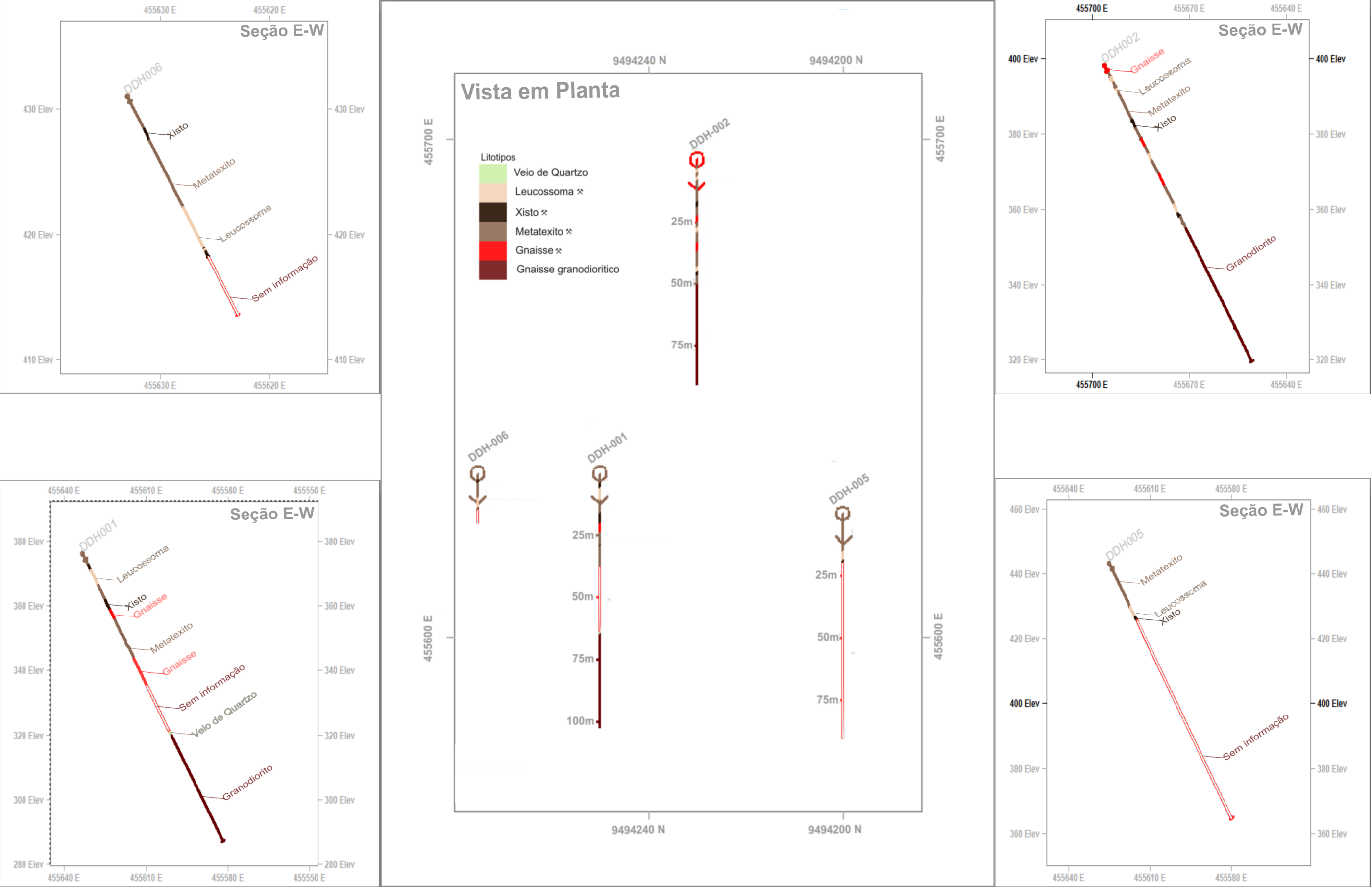
Amostra - Medida	D1 (D)				G				D2				G'				Parâmetros		Temperatura		Preparação
	Área	Posição	FWHM	Altura	Área	Posição	FWHM	Altura	Área	Posição	Altura	FWHM	Área	Posição	FWHM	Altura	R1	R2	Beyssac et al. (2002)	Aoya et al. (2010)	
FC-R-32-8	0.0	--	0.0	--	2023.2	1580.3	16.2	99.4	0.0	--	0.0	--	2688.9	2679.7	47.5	32.4	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-9	163.7	1331.6	5.7	17	2177.3	1581.0	16.0	85.1	0.0	--	0.0	--	2777.7	2682.5	48.3	32.9	0.1	0.1	609.9	637.9	Não Polida
FC-R-32-10	255.4	1329.8	4.4	15	2195.6	1581.0	16.7	83.0	0.0	--	0.0	--	4768.4	2679.5	81.9	33.3	0.1	0.1	594.6	619.3	Não Polida
FC-R-32-11	0.0	--	0.0	--	4954.6	1581.3	14.1	281.4	0.0	--	0.0	--	3315.7	2684.7	44.1	42.9	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-12	0.0	--	0.0	--	3462.3	1579.2	13.4	199.0	0.0	--	0.0	--	2461.1	2685.4	43.9	32.0	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-13	148.2	1327.9	5.9	12	2567.9	1581.0	16.2	94.5	0.0	--	0.0	--	1295.9	2686.9	47.6	15.6	0.1	0.1	616.7	646.2	Não Polida
FC-R-32-14	0.0	--	0.0	--	4994.9	1581.3	14.1	282.0	0.0	--	0.0	--	2358.0	2685.0	43.4	43.3	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-15	0.0	--	0.0	--	4992.5	1579.2	13.8	208.1	0.0	--	0.0	--	2660.1	2685.4	68.1	35.0	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-16	88.3	1335.2	7.4	11	2353.6	1579.2	15.9	43.9	0.0	--	0.0	--	3312.2	2688.4	59.5	31.8	0.0	0.0	624.9	656.3	Não Polida
FC-R-32-17	0.0	--	0.0	--	4936.2	1581.4	13.9	283.1	0.0	--	0.0	--	2357.7	2684.5	44.0	42.7	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-18	0.0	--	0.0	--	4907.9	1581.4	14.0	279.9	0.0	--	0.0	--	2319.2	2684.7	43.9	42.1	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-19	0.0	--	0.0	--	4942.0	1581.4	14.1	279.7	0.0	--	0.0	--	2328.6	2684.8	43.3	42.9	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-20	0.0	--	0.0	--	4919.4	1581.4	14.0	279.7	0.0	--	0.0	--	2351.6	2684.4	43.7	42.9	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-21	237.3	1329.8	5.2	10	2250.5	1581.0	16.6	82.8	0.0	--	0.0	--	1092.9	2683.0	104.9	13.4	0.1	0.1	598.5	624.1	Não Polida
FC-R-32-22	0.0	--	0.0	--	4915.5	1581.4	13.9	282.3	0.0	--	0.0	--	2347.8	2684.8	43.7	42.9	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-23	88.3	1331.6	7.6	11	2266.1	1581.0	16.2	40.5	0.0	--	0.0	--	1261.7	2685.4	70.8	39.8	0.0	0.0	624.3	655.6	Não Polida
FC-R-32-24	0.0	--	0.0	--	4995.4	1581.3	14.2	281.2	0.0	--	0.0	--	2367.8	2684.9	43.5	43.4	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-25	0.0	--	0.0	--	5012.7	1581.4	13.9	287.1	0.0	--	0.0	--	2359.2	2684.9	43.2	43.6	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-R-32-26	0.0	--	0.0	--	4989.3	1581.3	13.9	285.9	0.0	--	0.0	--	2422.5	2684.7	44.3	43.7	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-18-1NP-1	5329.4	1340.6	44.2	88	16862.6	1577.5	16.8	629.7	0.0	--	0.0	--	11824.1	2679.5	78.9	116.6	0.1	0.2	534.1	548.0	Não Polida
FC-18-1NP-2	5380.1	1344.3	21.4	151	18807.1	1577.5	16.9	654.6	0.0	--	0.0	--	12101.7	2682.5	78.1	122.1	0.0	0.2	542.0	557.1	Não Polida
FC-18-1NP-3	1547.7	1335.2	45.3	24	12374.3	1577.5	17.0	336.4	0.0	--	0.0	--	4589.2	2679.5	79.7	50.2	0.1	0.1	591.5	615.6	Não Polida
FC-18-1NP-4	1280.8	1329.8	48.1	22	10122.1	1579.2	17.2	342.4	0.0	--	0.0	--	4727.0	2684.0	31.5	88.4	0.1	0.1	591.0	615.0	Não Polida
FC-18-1NP-5	1949.4	1331.6	46.7	24	10935.7	1577.5	17.0	351.2	0.0	--	0.0	--	4507.4	2678.0	76.2	54.0	0.1	0.2	573.7	594.2	Não Polida
FC-18-1NP-6	0.0	--	0.0	--	9401.9	1577.5	16.6	354.7	0.0	--	0.0	--	4782.0	2682.5	39.2	50.5	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-18-1NP-7	2481.6	1330.4	44.8	23	10388.4	1577.8	16.9	443.5	0.0	--	0.0	--	4789.6	2670.3	62.2	61.5	0.2	0.2	555.2	572.4	Não Polida
FC-18-1NP-8	1332.0	1333.4	46.8	22	9635.1	1577.5	16.4	361.9	0.0	--	0.0	--	5276.0	2682.5	42.0	96.2	0.1	0.1	587.0	610.1	Não Polida
FC-18-1NP-9	1980.3	1335.2	51.2	23	10953.8	1577.5	16.8	354.6	0.0	--	0.0	--	4713.1	2684.0	79.3	53.9	0.1	0.2	572.9	593.3	Não Polida
FC-18-1NP-10	2715.8	1331.3	50.5	22	10044.0	1578.0	16.7	432.6	0.0	--	0.0	--	4789.8	2671.0	63.5	60.2	0.2	0.2	546.3	562.0	Não Polida
FC-18-1NP-11	0.0	--	0.0	--	9092.2	1577.9	16.7	434.0	0.0	--	0.0	--	4869.5	2670.9	63.7	61.0	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-18-1NP-12	1661.1	1329.8	51.5	23	10045.0	1577.5	16.7	349.6	0.0	--	0.0	--	3592.2	2678.0	36.4	90.9	0.1	0.1	577.9	599.2	Não Polida
FC-18-1NP-13	0.0	--	0.0	--	4164.2	1582.7	17.8	156.2	0.0	--	0.0	--	2600.1	2681.6	77.4	24.4	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-18-1NP-14	0.0	--	0.0	--	16810.6	1579.3	20.6	651.7	0.0	--	0.0	--	11738.2	2666.1	70.9	132.0	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-18-1NP-15	0.0	--	0.0	--	532.0	1581.0	16.2	26.2	0.0	--	0.0	--	3240.6	2676.8	62.6	34.4	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-18-1NP-16	0.0	--	0.0	--	711.2	1581.3	17.8	31.8	0.0	--	0.0	--	3962.9	2678.4	51.7	35.8	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-18-1NP-17	0.0	--	0.0	--	4306.1	1581.1	17.5	196.3	0.0	--	0.0	--	2085.4	2676.4	60.1	37.7	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-18-1NP-18	0.0	--	0.0	--	4277.2	1581.2	17.2	198.0	0.0	--	0.0	--	2020.6	2676.6	59.9	46.9	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-18-1NP-19	0.0	--	0.0	--	4251.2	1581.1	17.6	193.1	0.0	--	0.0	--	2037.9	2676.5	58.7	47.7	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida

Amostra - Medida	D1 (D)				G				D2				G'				Parâmetros		Temperatura		Preparação
	Área	Posição	FWHM	Altura	Área	Posição	FWHM	Altura	Área	Posição	Altura	FWHM	Área	Posição	FWHM	Altura	R1	R2	Beyssac et al. (2002)	Aoya et al. (2010)	
FC-18-1NP-20	0.0	--	0.0	--	3868.8	1581.0	17.8	148.8	0.0	--	0.0	--	2616.1	2682.5	77.4	34.4	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-18-1NP-21	5330.0	1331.6	43.5	43	15690.8	1579.2	19.7	546.9	0.0	--	0.0	--	4558.3	2228.2	32.2	80.9	0.1	0.3	528.2	541.1	Não Polida
FC-18-1NP-22	0.0	--	0.0	--	4397.7	1581.1	17.4	201.2	0.0	--	0.0	--	2085.4	2676.5	59.1	48.1	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-18-1NP-23	0.0	--	0.0	--	4417.2	1581.1	17.5	201.2	0.0	--	0.0	--	2117.8	2676.2	59.2	28.5	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-18-1NP-24	0.0	--	0.0	--	4447.4	1581.0	17.6	201.6	0.0	--	0.0	--	2108.8	2675.8	58.8	38.6	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-18-1NP-25	0.0	--	0.0	--	4471.7	1581.0	17.6	203.1	0.0	--	0.0	--	2132.1	2676.2	60.1	38.3	0.0	0.0	641.0	676.3	Não Polida
FC-18-1P-1	5566.1	1337	41.4	107	4108.1	1582.7	18.5	162.6	633.9	1621.1	34.2	10.01	2697.0	2676.5	36.5	58.4	0.7	0.5	400.7	402.6	Polida
FC-18-1P-2	5622.4	1340.6	42.4	109	4085.3	1582.7	17.7	167.9	492.5	1621.1	34.5	7.578	1651.7	2685.4	36.7	36.5	0.6	0.6	395.7	397.4	Polida
FC-18-1P-3	7181.7	1337	44.1	114	4773.4	1581.0	18.0	176.1	1138.9	1619.4	39.1	16.09	4432.7	2681.0	40.0	85.5	0.6	0.5	396.9	398.7	Polida
FC-18-1P-4	7093.1	1338.8	44.0	113	4738.0	1582.7	18.4	173.3	980.8	1621.1	38.2	14.11	2901.1	2680.5	38.5	53.3	0.7	0.6	394.6	396.3	Polida
FC-18-1P-5	5898.2	1333.4	43.7	109	4228.6	1582.7	18.1	172.3	578.7	1621.1	36.3	8.542	1702.3	2681.0	38.4	46.8	0.6	0.6	395.8	397.6	Polida
FC-18-1P-6	6966.2	1340.6	45.1	114	4938.2	1581.0	18.3	180.4	964.1	1621.1	39.3	6.45	2708.2	2682.2	38.3	45.0	0.6	0.5	400.1	401.9	Polida
FC-18-1P-7	7112.1	1337	43.1	117	5152.5	1581.0	18.6	179.4	1205.6	1619.4	41.2	9.147	2559.8	2681.7	39.2	36.6	0.7	0.5	406.0	408.1	Polida
FC-18-1P-8	12040.9	1338.8	45.6	181	6682.9	1582.7	18.2	237.8	1746.2	1619.4	60.6	8.888	5481.5	2686.9	50.4	82.3	0.8	0.6	379.2	380.7	Polida
FC-18-1P-9	11658.6	1338.8	45.1	181	6660.6	1581.0	18.1	237.7	1374.2	1619.4	57.7	6.042	4026.5	2681.0	50.0	58.2	0.8	0.6	377.6	379.0	Polida
FC-18-1P-10	12323.8	1340.6	45.4	185	6606.1	1581.0	17.8	242.7	1780.9	1619.4	60.5	9.253	4698.9	2688.4	49.8	77.2	0.8	0.6	376.2	377.6	Polida
FC-18-1P-11	11205.3	1338.8	44.2	174	6058.6	1581.0	18.0	222.9	1532.5	1619.4	52.9	8.989	3439.8	2680.3	43.5	57.1	0.8	0.6	375.7	377.1	Polida
FC-18-1P-12	10825.3	1338.8	45.4	170	6144.6	1581.0	18.0	219.0	1238.6	1621.1	53.7	5.601	2636.3	2688.1	47.2	48.5	0.8	0.6	376.4	377.9	Polida
FC-18-1P-13	10765.4	1338.8	44.9	168	6020.8	1581.0	17.9	217.7	1170.9	1621.1	51.1	5.527	3818.3	2675.3	43.9	43.9	0.8	0.6	374.2	375.6	Polida
FC-18-1P-14	11039.5	1337	46.1	165	5927.2	1581.0	18.0	213.8	1612.0	1621.1	52.8	9.886	3070.6	2679.4	40.9	52.8	0.8	0.6	376.6	378.0	Polida
FC-18-1P-15	10814.7	1338.8	45.6	163	5921.9	1581.0	18.1	211.1	1271.8	1619.4	51.4	6.579	4735.6	2682.8	50.1	72.6	0.8	0.6	373.8	375.2	Polida
FC-18-1P-16	10618.8	1338.8	45.1	162	5716.3	1582.7	18.3	202.4	1358.9	1621.1	49.8	8.024	3118.5	2681.3	44.6	54.9	0.8	0.6	373.9	375.4	Polida
FC-18-1P-17	10480.4	1340.6	45.2	159	5580.9	1581.0	18.2	199.2	1379.3	1619.4	48.3	8.756	3818.3	2682.9	43.9	60.7	0.8	0.6	373.6	375.0	Polida
FC-18-1P-18	10078.4	1340.6	45.2	154	5527.1	1582.7	18.3	194.7	1278.5	1621.1	48.2	7.588	4056.6	2684.9	48.2	64.7	0.8	0.6	375.4	376.8	Polida
FC-18-1P-19	8628.8	1335.2	44.9	136	8146.8	1581.0	18.3	246.7	0.0	--	0.0	--	5341.8	2685.4	50.3	82.6	0.6	0.5	412.1	414.3	Polida
FC-18-1P-20	8223.2	1337	43.1	156	7786.4	1581.0	17.9	288.4	0.0	--	0.0	--	5105.9	2685.4	57.8	78.5	0.5	0.5	412.4	414.7	Polida
FC-18-1P-21	1690.7	1335.2	43.3	29	1826.8	1581.0	19.0	60.9	386.8	1621.1	13.2	9.15	2216.9	2688.4	33.4	37.9	0.5	0.4	448.3	452.5	Polida
FC-18-1P-22	1729.4	1340.6	46.9	27	1962.5	1581.0	17.5	61.3	0.0	--	0.0	--	2608.4	2680.5	34.1	43.7	0.4	0.5	432.5	435.8	Polida
FC-18-1P-23	2104.9	1340.6	45.7	29	2221.3	1581.0	18.8	62.2	0.0	--	0.0	--	2334.0	2685.4	35.4	37.7	0.5	0.5	424.5	427.3	Polida
FC-18-1P-24	1645.8	1337	42.6	29	1875.6	1581.0	19.1	59.4	0.0	--	0.0	--	1916.1	2684.0	33.7	32.5	0.5	0.5	433.0	436.3	Polida
FC-18-1P-25	10498.9	1333.4	44.9	159	9966.1	1581.0	18.0	299.0	0.0	--	0.0	--	2301.7	2684.0	32.8	40.1	0.5	0.5	412.7	415.0	Polida

ANEXO 5: MODELO ESQUEMÁTICO DA DISPOSIÇÃO DOS LITOTIPOS E TEORES NO ALVO PEDRA PRETA



ANEXO 6: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS FUROS DE SONDAGEM EXECUTADOS NO ALVO PEDRA PRETA



MATERIAL SUPLEMENTAR: AMOSTRA COM INDICAÇÃO DA POSIÇÃO DAS LÂMINAS PETROGRÁFICAS



