

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Departamento de Engenharia de Minas**  
**Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais**

GUSTAVO DE AGUILAR HONORATO

**ANÁLISE DA RELAÇÃO DE INFLUÊNCIA ENTRE O TIPO DE MINERALIZAÇÃO  
DE GRAFITA DA PROVÍNCIA BAHIA-MINAS E SUA CARACTERIZAÇÃO  
MINERALÓGICA**

Belo Horizonte

2024

GUSTAVO DE AGUILAR HONORATO

ANÁLISE DA RELAÇÃO DE INFLUÊNCIA ENTRE O TIPO DE MINERALIZAÇÃO DE  
GRAFITA DA PROVÍNCIA BAHIA-MINAS E SUA CARACTERIZAÇÃO  
MINERALÓGICA

Monografia de especialização apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de especialista.

Orientadora: Profa. Dra. Andréia Bicalho Henriques

Belo Horizonte

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MINAS  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

### MONOGRAFIA/ARTIGO

Aos vinte e três dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e quatro, de 08h:00min às 11h:15min, o estudante Gustavo de Aguilar Honorato, matrícula 2023662030, defendeu o Trabalho intitulado **“ANÁLISE DA RELAÇÃO DE INFLUÊNCIA ENTRE O TIPO DE MINERALIZAÇÃO DE GRAFITA DA PROVÍNCIA BAHIA-MINAS E SUA CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA”**

Participaram da banca examinadora os professores abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

**Nota:** 97

**Situação:** Aprovado

**Orientadora:** Professora Andréia Bicalho Henriques

**Examinadora:** Professora Rísia Magriotis Papini

**Examinador:** Professor Gilberto Rodrigues da Silva



Documento assinado eletronicamente por **Andreia Bicalho Henriques, Professora do Magistério Superior**, em 15/01/2025, às 16:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gilberto Rodrigues da Silva, Professor do Magistério Superior**, em 15/01/2025, às 19:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rísia Magriotis Papini, Usuária Externa**, em 06/02/2025, às 08:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3811005** e o código CRC **03A9ABCE**.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais (CEERMIN) do DEMIN-UFMG, à Viva Mineração e aos laboratórios FRX Service e de Caracterização de Minérios e Materiais (LCMM) do DEMIN-UFMG, pelo apoio técnico, institucional e eficiência na análise das amostras enviadas. Os autores agradecem também ao CNPq pelo apoio – Bolsa de Produtividade - 308793/2023-

## RESUMO

O grafite vem ganhando destaque devido às suas diversas propriedades químicas e físicas. Tais propriedades o tornam uma matéria-prima chave para a indústria e a sua transição energética. A caracterização permite avaliar o minério grafitico em relação à mineralogia, teores, distribuição granulométrica, dentre outros parâmetros relevantes para etapas de tratamento do minério. Diante disso, este trabalho desenvolve um estudo de caracterização para dois tipos de minério da região da Província Bahia-Minas. Foi observado que o Grafita-Gnaiss possui uma tendência de apresentar flakes maiores e com uma distribuição mais homogênea em frações granulométricas mais grossas, se comparado ao Grafita-Xisto. Além disto, a caracterização das fases minerais que compõem estes minérios evidencia que a mineralização do Grafita-Gnaiss ocorreu em um regime de mais alto grau metamórfico (granulito), enquanto o Grafita-Xisto ocorreu em um regime inferior (anfíbolito).

Palavras-chave: Minério de grafita; Província Bahia-Minas; Caracterização mineralógica; Complexo Jequitinhonha.

## **ABSTRACT**

The graphite has been increasing prominence due to its diverse chemical and physical properties. These characteristics make it a key raw material for the industry and its energy transition. With the Bahia-Minas Graphite Province hosting the most significant Brazilian occurrences, knowledge based on mineralogical characterization makes it possible to assess the standards in relation to mineralogy, chemical content, particle size distribution, among other relevant parameters for ore treatment stages. In this way, this work develops one characterization study for two types of ore in the region. It was observed that Graphite-Gneiss tends to have larger flakes and a more homogeneous distribution in coarser grain size fractions compared to Graphite-Shale. In addition, the characterization of the mineral phases that compose these ores shows that the mineralization of Graphite-Gneiss occurred in a regime of higher metamorphic grade (granulite), while graphite-shale occurred in a lower regime (amphibolite).

**Keywords:** Graphite ore; Bahia-Minas Graphite Province; Mineralogical characterization; Jequitinhonha Complex.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Mapa de localização dos pontos amostrados em relação à geologia regional. Modificado de CPRM (2014). .....	10
<b>Figura 2</b> - Fluxograma de sequenciamento da preparação e geração da amostra do Grafita-Xisto. ....	11
<b>Figura 3</b> - Fluxograma esquemático do sequenciamento de preparação da amostra no laboratório e geração da amostra representativa do Grafita-Gnaisse. ....	12
<b>Figura 4</b> - Gráfico de distribuição granulométrica da amostra de Grafita-Gnaisse (GG-01) e Grafita-Xisto (GX-01) .....	13
<b>Figura 5</b> - Gráficos indicando as variações granuloquímicas para a amostra GG-01. ....	18
<b>Figura 6</b> - Gráficos indicando as variações granuloquímicas para a amostra GX-01. ....	20

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Descritivo dos incrementos que compõem a amostra representativa do Grafita-Gnaisse .....	11
<b>Tabela 2</b> - Resultado da distribuição granulométrica fracionada e acumulada .....	13
<b>Tabela 3</b> - Identificação das fases minerais para a amostra de Grafita-Gnaisse (GG-01) por DRX do laboratório FRX Service (em branco) e UFMG (em cinza).....	14
<b>Tabela 4</b> - Identificação das fases minerais para a amostra de Grafita-Xisto (GX-01) por DRX do laboratório FRX Service (em branco) e UFMG (em cinza).....	15
<b>Tabela 5</b> - Resultado de análise química de óxidos por fluorescência de raios-x .....	16
<b>Tabela 6</b> - Resultados de análise granuloquímica de óxidos, carbono e enxofre para o GG-01 .....	17
<b>Tabela 7</b> - Dados estatísticos indicando as variações de teores como resultado da análise granuloquímica da amostra de Grafita-Gnaisse (GG-01).....	18
<b>Tabela 8</b> - Resultados de análise granuloquímica de óxidos, carbono e enxofre para o GX-01 .....	19
<b>Tabela 9</b> - Dados estatísticos indicando as variações de teores como resultado da análise granuloquímica da amostra de Grafita-Xisto (GX-01).....	19
<b>Tabela 10</b> - Matriz de correlação linear por Pearson. Amostra GX-01 (em branco) e GG-01 (em cinza).....	21

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	DESENVOLVIMENTO.....	9
2.1	A Província Gráfica Bahia-Minas .....	9
2.2	Materiais e métodos.....	9
2.3	Determinação dos pontos de amostragem .....	10
2.4	Coleta e preparação das amostras.....	11
2.5	Caracterização exploratória .....	12
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	13
3.1	Granulometria.....	13
3.2	Difratometria por raios-X .....	14
3.3	Análise química por FRX e Infravermelho LECO .....	16
3.4	Granuloquímica .....	17
3.5	Análise por correlação .....	20
4	CONCLUSÕES .....	23
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	24

## 1 INTRODUÇÃO

O grafite e seus derivados vêm despertando um interesse crescente por parte de empresas de mineração e grupos de investidores, atribuído às suas diversas propriedades, singularidades e aplicabilidades na indústria. A evolução do mercado de grafite mineral está intrinsecamente ligada aos avanços tecnológicos e à criação de novos materiais nesses setores, consolidando-o como uma nova fronteira de oportunidades.

As ocorrências mais significativas de grafita no Brasil estão situadas na denominada Província Grafítica Bahia-Minas (Ribeiro, 2016). Essa província abrange a região norte do estado de Minas Gerais e o sul da Bahia, sendo associada a rochas do Complexo Jequitinhonha, Grupo Macaúbas e a granitoides. Esta, por sua vez, hospeda depósitos de grafita lamelar que se formaram a partir da concentração e cristalização do carbono durante o metamorfismo regional, bem como pela recristalização de substâncias carbonosas, conforme apontado por Faria (1997).

A importância de se desenvolver um estudo de caracterização mineralógica, no caso dos tipos de minérios de grafita presentes na Província Bahia-Minas, se dá como uma estratégia determinante para ponderar as especificidades em relação à mineralogia, distribuição de teores, distribuição granulométrica, dentre outras características.

Desta forma, o presente trabalho desenvolve uma análise da influência do tipo de minério de grafita presente na Província Bahia-Minas, em relação às suas respectivas características mineralógicas, químicas e granulométricas. Para isto, foram executados ensaios de caracterização através de análises por difração de raios-X, distribuição granulométrica, granuloquímica, fluorescência de raios-X e análise de carbono grafítico.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 A Província Grafítica Bahia-Minas**

A Província Grafítica Minas-Bahia situa-se no extremo nordeste do Orógeno Araçuaí e é composta por uma cadeia de montanhas edificada entre 630 e 500 Ma (Pedrosa-Soares et al., 2001). Diversas unidades litológicas do Orógeno Araçuaí contêm rochas grafitosas, mas os maiores depósitos de grafita atualmente conhecidos estão no Complexo Jequitinhonha e Grupo Macaúbas (Pedrosa-Soares et al., 1999).

Diversos estudos de campo e laboratório foram realizados na região, com o objetivo de desenvolver uma caracterização geológica, petrográfica, tectônica-metamórfica e tecnológica dos depósitos e ocorrências de minérios de grafita na região. Diante disto, Pedrosa-Soares (2022) resumiu em três tipos principais de mineralizações que são controladas pelo metamorfismo, sendo estas: Tipo Grafita-Xisto, geralmente contendo grafita lamelar (flake) fina, é característico de associações litológicas com metamorfismo da fácies anfibolito alto, zona da sillimanita; Tipo Grafita-Gnaisse, geralmente contendo grafita lamelar (flake) de granulometria grossa a muito grossa, sendo encontrado em associações litológicas com metamorfismo desde a transição de fácies anfibolito-granulito a fácies granulito, sendo de mais alto grau metamórfico se comparado à do tipo Grafita Xisto; Tipo veio, caracterizado por corpos ricos em grafita maciça (lump) em zonas ricas em leucossomas graníticos (alta taxa de fusão parcial) em migmatitos.

Faria (1997) e Belém (2006) desenvolveram um estudo do metamorfismo regional, sugerindo temperaturas crescentes de NW para SE, desde o intervalo de 650-750 °C, na região de Pedra Azul – Maiquinique, a 750-950 °C, na região de Almenara – Salto da Divisa – Itamaraju. Os autores identificaram uma correlação progressiva de crescimento das palhetas de grafita em amostras, partindo de NW até SE da Província.

### **2.2 Materiais e métodos**

Foram conduzidos ensaios laboratoriais, incluindo Difração de Raios-X, Fluorescência de Raios-X, além de ensaios granulométricos e granuloquímicos de dois tipos de minérios de grafita presentes na província descrita. O propósito dessas análises foi obter informações sobre suas características e, estabelecer uma correlação com as condições geológicas que influenciam

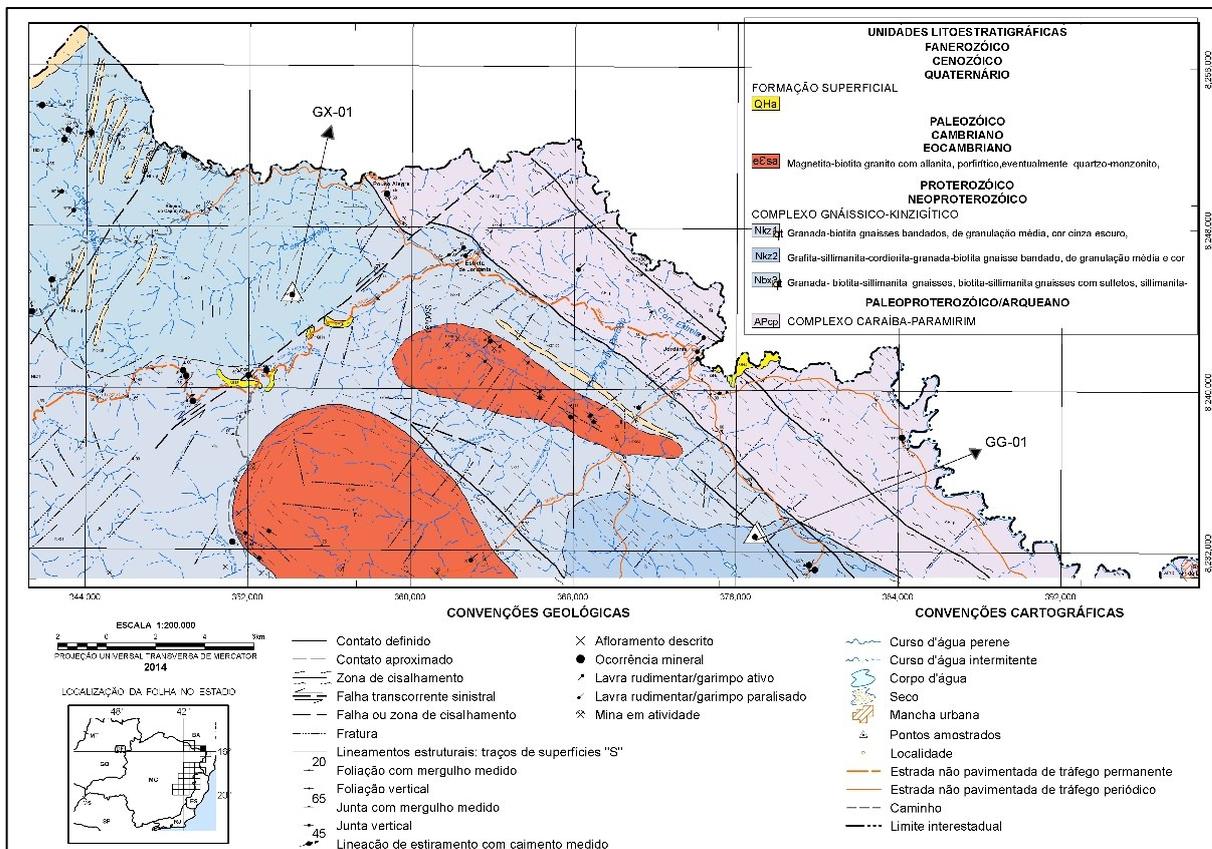
sua mineralização. Para a plotagem das tabelas, gráficos e análises estatísticas, utilizou-se o Microsoft Excel

### 2.3 Determinação dos pontos de amostragem

Os locais para a coleta de amostras foram definidos de acordo com o posicionamento em relação aos depósitos de grafita, priorizando os projetos da Viva Mineração situados no extremo nordeste de Minas Gerais e sul da Bahia, mais precisamente no município de Jordânia/MG.

Tendo como referência o trabalho de Belém (2006), buscou-se amostrar próximo à pontos anteriormente já caracterizados como de Grafita-Xisto e Grafita-Gnaiss, sendo a do tipo xisto localizada na região mais a noroeste (NW) da província e a tipo gnaiss mais a sudeste (SE). Para o Grafita-Xisto a amostra recebeu a denominação de GX-01 e para o Grafita-Gnaiss o código GG-01. Ver figura 1.

**Figura 1** - Mapa de localização dos pontos amostrados em relação à geologia regional. Modificado de CPRM (2014).

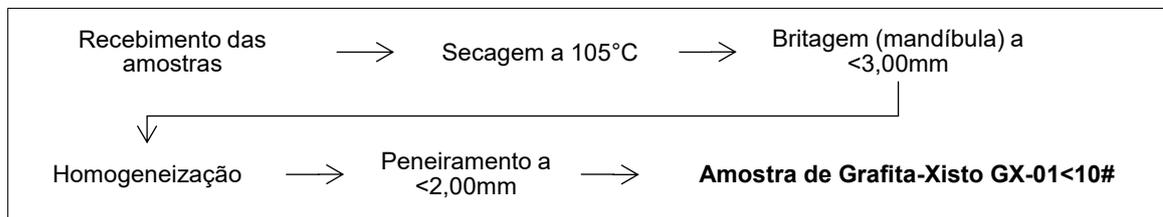


## 2.4 Coleta e preparação das amostras

Para a amostra do Grafita-Xisto (GX-01), foi realizada uma coleta por canaleta na zona mineralizada de um saprolito presente no interior de uma galeria localizada na área do projeto da Viva Mineração. Na coleta dos incrementos, respeitou-se um intervalo padrão horizontal de 1 metro, abrangendo aproximadamente 50 metros mineralizados ao longo desta galeria.

Estas amostras foram encaminhadas para o laboratório, onde foram submetidas a seguinte preparação, conforme indicado no fluxograma da Figura 2.

**Figura 2** - Fluxograma de sequenciamento da preparação e geração da amostra do Grafita-Xisto.



Já para a geração da amostra do Grafita-Gnaisse (GG-01), foi realizada uma campanha de amostragem utilizando uma sonda mecanizado do tipo trado. Para coleta dos incrementos, respeitou-se um intervalo padrão vertical de 1 metro, sendo selecionadas aquelas com mineralização positiva no saprolito do Grafita-Gnaisse. Na Tabela 1 tem-se os incrementos que formaram a amostra.

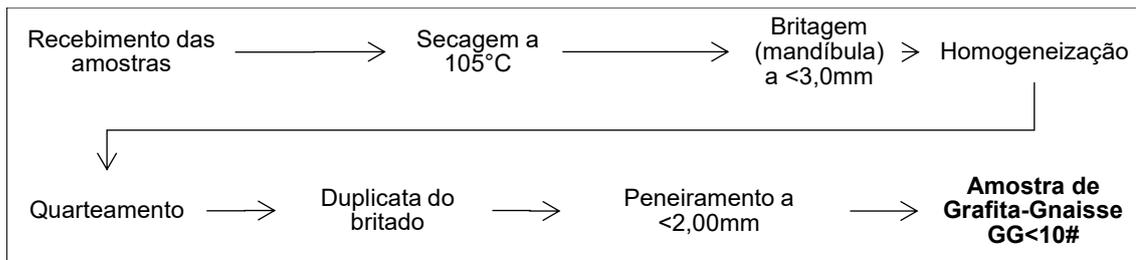
**Tabela 1** - Descritivo dos incrementos que compõem a amostra representativa do Grafita-Gnaisse

Num.	Código Da Alíquota	Intervalo Em Profundidade	Massa (Kg)	Data Da Coleta	Carbono Grafítico (%)
I	VIV-JTP-AD-0026 1000A1100	de 10 a 11 metros	16	10/05/2023	4.02
II	VIV-JTP-AD-0026 300A400	de 3 a 4 metros	16	10/05/2023	4.20
III	VIV-JTP-AD-0028 400A500	de 4 a 5 metros	14	11/05/2023	4.09
IV	VIV-JTP-AD-0026 1100A1200	de 11 a 12 metros	18	10/05/2023	4.55

Cada alíquota foi enviada ao laboratório para preparação e análise de teor de carbono grafítico, onde foram submetidas aos procedimentos conforme indicado no fluxograma da Figura 3.

Por fim, após homogeneização das 4 alíquotas preparadas e geradas pelo processo, compôs-se 4kg da amostra a ser utilizada no presente trabalho, para posterior caracterização do Grafita-Gnaise.

**Figura 3** - Fluxograma esquemático do sequenciamento de preparação da amostra no laboratório e geração da amostra representativa do Grafita-Gnaise.



## 2.5 Caracterização exploratória

As técnicas analíticas utilizadas para a caracterização foram: análise qualitativa e quantitativa Rietveld por Difratomia de Raios-X (DRX); Análise de distribuição granulométrica por peneiramento; Granuloquímica; Fluorescência de Raios-X (FRX); e análise elementar de carbono grafítico por infravermelho (LECO).

As análises de elementos por FRX, granulometria, granuloquímica, carbono contido por infravermelho, DRX qualitativa e quantitativa Rietveld foram executadas no laboratório da FRX Service Ltda. Para a caracterização mineral qualitativa por DRX, foi utilizado o difratômetro de Raios-X do Laboratório de Caracterização de Minérios e Materiais do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.

Para a análise de distribuição granulométrica e granuloquímica, as amostras foram classificadas nas frações retidas em 0,595mm, 0,297mm, 0,177mm, 0,105mm, 0,074mm, 0,044mm e fundo (<0,044mm).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Granulometria

A Tabela 2 apresenta os resultados da distribuição granulométrica das amostras de minério de Grafita-Gnaisse (GG-01) e Grafita-Xisto (GX-01) de forma fracionada e acumulada, considerando que estas já foram previamente peneiradas na peneira de 2,00mm.

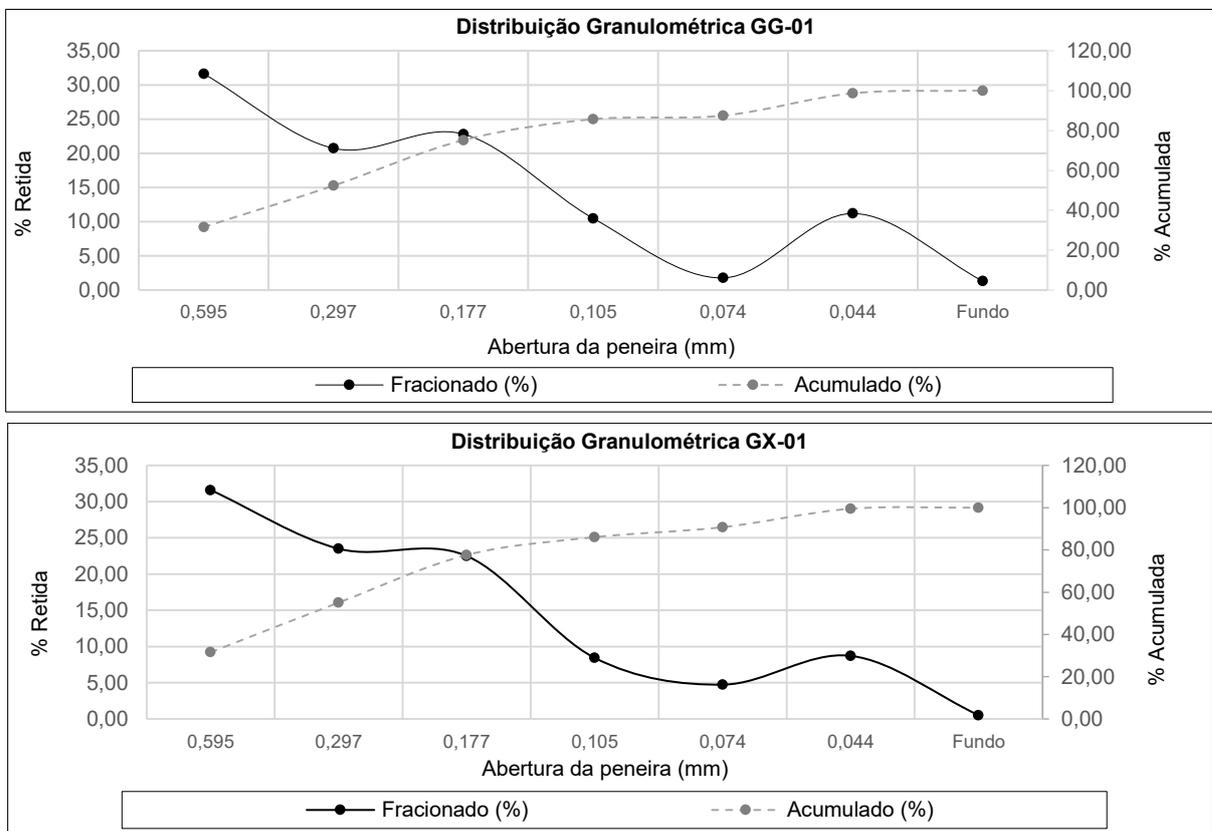
**Tabela 2** - Resultado da distribuição granulométrica fracionada e acumulada

Amostra	% Retida (mm)						
	0,595	0,297	0,177	0,105	0,074	0,044	Fundo
GG-01 < 10#	31.64	20.73	22.82	10.49	1.78	11.21	1.32
GX-01 < 10#	31.60	23.50	22.50	8.43	4.74	8.72	0.52

Amostra	% Acumulada (mm)						
	0,595	0,297	0,177	0,105	0,074	0,044	Fundo
GG-01 < 10#	31.64	52.37	75.19	85.69	87.47	98.68	100.00
GX-01 < 10#	31.60	55.09	77.59	86.03	90.76	99.48	100.00

**Figura 4** - Gráfico de distribuição granulométrica da amostra de Grafita-Gnaisse (GG-01) e Grafita-Xisto (GX-01)



Verifica-se uma semelhança nas distribuições granulométricas das amostras, mesmo considerando que se trata de minérios distintos. Esperava-se que as amostras de Grafita-Xisto exibissem uma granulometria mais fina em comparação com o Grafita-Gnaisse. No entanto, isto pode ser consequência do método de amostragem e pelo grau de alteração e intemperismo semelhantes entre elas. Em outras palavras, quando se trata do horizonte dessas rochas ao nível de saprolito, ambas tendem a demonstrar um comportamento granulométrico similar.

### 3.2 Difractometria por raios-X

As Tabela 3 apresenta as fases minerais identificadas na amostra de Grafita-Gnaisse (GG-01) pelo laboratório da FRX Service e do Laboratório de Minérios e Materiais do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.

**Tabela 3** - Identificação das fases minerais para a amostra de Grafita-Gnaisse (GG-01) por DRX do laboratório FRX Service (em branco) e UFMG (em cinza)

DRX – Lab. FRX Service			DRX – Lab. UFMG	
Fase Mineral	Fórmula química	Quantificação (%)	Fase Mineral	Fórmula química
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	44,63	Quartzo	SiO <sub>2</sub>
Caulinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	30,60	Caulinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
Ortoclásio	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	8,47	Sanidina	K <sub>4</sub> Si <sub>12</sub> Al <sub>4</sub> O <sub>32</sub>
Goethita	FeO(OH)	6,06	Goethita	FeO(OH)
Greenalita	Fe <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	6,31	Grafita	C
Grafita	C	3,93		

Analisando os resultados do DRX, identifica-se que o Quartzo e a Caulinita são componentes dominantes nos Gnaisses do Complexo Jequitinhonha, especialmente nos saprolitos mais intemperizados.

Já o Ortoclásio, mineral identificado pelo laboratório da FRX Service, é um Feldspato alcalino, polimorfo de KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> e que se cristaliza em temperaturas intermediárias se comparado aos outros polimorfos, Sanidina e Microclínio. Desta forma, a identificação da Sanidina na DRX da UFMG, permite indicar que este Gnaisse se formou em condições de altas temperaturas (>800°C) e com uma taxa de resfriamento de velocidade moderada (Klein & Dutrow, 2012).

A Greenalita, identificado na análise do laboratório da FRX Service, pode ser interpretado como um produto de alteração da Serpentina, em um ambiente oxidante e associado à Goethita, gerando o enriquecimento em ferro.

A Tabela 4 apresenta as fases minerais identificadas na amostra de Grafita-Xisto.

**Tabela 4** - Identificação das fases minerais para a amostra de Grafita-Xisto (GX-01) por DRX do laboratório FRX Service (em branco) e UFMG (em cinza)

DRX – Lab. FRX Service			DRX – Lab. UFMG	
Fase Mineral	Fórmula química	Quantificação (%)	Fase Mineral	Fórmula química
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	59,22	Quartzo	SiO <sub>2</sub>
Caulinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	18,10	Caulinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
Moscovita	KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(F,OH) <sub>2</sub>	9,24	Anortoclásio	Al <sub>2</sub> Si <sub>6</sub> Na <sub>1.70</sub> K <sub>0.30</sub> O <sub>16</sub>
Ortoclásio	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2,37	Goethita	FeO(OH)
Goethita	FeO(OH)	2,98	Fengita	K <sub>1.90</sub> Na <sub>0.10</sub> Al <sub>9.12</sub> Mg <sub>0.80</sub> Fe <sub>1.12</sub> Si <sub>12.96</sub> O <sub>47.84</sub> F <sub>0.16</sub> H <sub>7.84</sub>
Grafita	C	8,09	Grafita	C

Em comparação com a amostra de Grafita-Gnaiss (GG-01), nota-se que o Grafita-Xisto (GX-01) exibiu proporções mais elevada de Quartzo e Grafita, ao passo que os minerais Caulinita, Ortoclásio e Goethita mostraram mais reduzidos.

No caso do Grafita-Xisto, foi identificado a Moscovita no laboratório da FRX Service e a Fengita no DRX da UFMG. A Moscovita é um mineral formador de rocha bastante abundante, característico de granitos, pegmatitos e rochas metamórficas, formando o componente primário dos xistos micáceos. Na zona de metamorfismo da Clorita, esta ocorre na fácies metamórfica Anfíbolito a Anfíbolito Alto e em temperaturas na faixa de 600°C a 700°C, sendo neste caso, um importante mineral indicador de grau de metamorfismo.

Em relação à distinção com a Fengita, identificado na DRX da UFMG, cabe ressaltar que a Moscovita forma uma série com a Paragonita (mica isoestrutural porém mais rica em Na) e com a Celadonita (mica também isoestrutural mais rica em Fe e Mg). A Fengita ocupa-se como o membro intermediário (Amisano-Canesi *et al*, 1994).

Outra divergência encontrada entre as análises, foi em relação ao Ortoclásio e o Anortoclásio. Ambos são minerais do grupo dos feldspatos alcalinos, e a distinção entre suas composições moleculares ocorre principalmente pelas proporções de K:Na. Em contrapartida, o fato da identificação do Anortoclásio, permite uma interpretação em relação à temperatura de cristalização do mineral. Também denominado de “Microclina sódica”, este é um polimorfo de baixa temperatura do ortoclásio.

De posse destas informações, a presença da Sanidina na amostra de minério de Grafita-Gnaissé permite inferir que esta mineralização ocorreu em um regime de mais alto grau de temperatura, enquanto o Grafita-Xisto representada pela amostra GX-01 ocorreu em um regime de mais baixa temperatura de cristalização, tendo em vista a presença dos minerais de Anortoclásio (“Microclina Sódica”) e Moscovita.

### 3.3 Análise química por FRX e Infravermelho LECO

Na Tabela 5 são apresentados os resultados das análises químicas dos elementos em forma de óxidos e carbono presentes nas amostras de Grafita-Gnaissé (GG-01) e Grafita-Xisto (GX-01), ambas classificadas na peneira de 2,00mm de abertura (malha de 10 mesh). Foram analisados os elementos químicos Al, Fe, K, Mg, Na, Si e Ti (resultados apresentados forma de óxidos), PPC (perda por calcinação), além do carbono grafítico inorgânico (Cg), carbono total (Ct) e enxofre total (St).

**Tabela 5** - Resultado de análise química de óxidos por fluorescência de raios-x

Id.	Ensaio (%)										
	Grav.	Fluorescência de Raios-X							Infravermelho		
Am.	PPC 1000°C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cg	Ct	St
GG-01	11,21	16,58	8,19	1,48	1,04	<0,1	60,14	0,99	3,93	3,94	0,03
GX-01	12,53	10,78	2,64	1,00	0,18	<0,1	72,06	0,66	8,09	8,13	0,03

Em comparação entre as duas amostras, a Grafita-Gnaissé apresentou teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O ligeiramente mais elevados, enquanto a de Grafita-Xisto apresentou maiores teores em PPC, SiO<sub>2</sub>, Carbono grafítico e Carbono total. Para os outros elementos, houve uma tendência de valores semelhantes.

Estima-se que os maiores teores apresentados de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O e MgO na amostra GG-01 se deu pela maior proporção dos minerais de Caulinita, Goethita e Ortoclásio (Sanidina) que compõem a rocha, respectivamente. Enquanto a amostra GX-01 apresentou maiores teores de SiO<sub>2</sub> por conta da maior presença do mineral de Quartzo.

Os teores mais elevados de Carbono Grafítico e Carbono total no Grafita-Xisto resultam das próprias características da mineralização, com uma presença mais significativa de *flakes* de

grafita. Além disso, foi observado que ambas as amostras exibiram teores de PPC relativamente próximos, entre 11 a 12,5%.

### 3.4 Granuloquímica

Alíquotas das amostras GG-01 e GX-01 foram classificadas por meio de peneiramento, segundo a disposição em aberturas de 0,595mm, 0,297mm, 0,177mm, 0,105mm, 0,074mm, 0,044mm e fundo. Cada fração gerada foi submetida à análise por fluorescência de raios-X e infravermelho, para determinação dos teores de óxidos, carbono total (Ct), carbono grafítico (Cg) e enxofre total (St).

Os resultados referentes à amostra de Grafita-Gnaiss (GG-01), com teores acima do Limite de Quantificação e detecção do elemento pelo método de análise no laboratório ( $LQ > 0,01$ ), podem ser visualizados na Tabela 6 a seguir.

**Tabela 6** - Resultados de análise granuloquímica de óxidos, carbono e enxofre para o GG-01

GG-01											
Abertura da peneira (mm)	Ensaio (%)										
	Grav.	Fluorescência de Raios-X							Infravermelho		
		PPC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cg	Ct
0,595	11,12	16,32	8,34	1,26	0,77	0,10	60,91	0,96	3,96	4,01	0,05
0,297	10,62	14,47	7,58	1,19	0,92	0,10	64,00	0,89	4,25	4,29	0,03
0,177	10,15	14,15	7,01	1,42	1,14	0,10	64,92	0,90	4,11	4,14	0,03
0,105	11,31	16,97	8,04	2,01	1,47	0,11	58,75	1,06	4,18	4,2	0,03
0,074	11,77	19,44	9,09	2,42	1,38	0,14	54,28	1,13	3,74	3,75	0,03
0,044	12,92	22,33	10,38	2,23	1,15	0,10	49,35	1,20	3,52	3,54	0,04
Fundo	13,06	26,32	12,20	1,44	0,72	0,10	44,62	1,26	1,77	1,8	0,04

Dentre as variações de teor que apresentou um certo grau de relevância por fração analisada pelas frações granulométricas, cabe destacar o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>, PPC, carbono grafítico e carbono total. Na Tabela 7 são apresentados os dados estatísticos gerais, indicando as variações de teor para estes elementos e, em seguida, na Figura 5, os gráficos representando as variações de teor por fração.

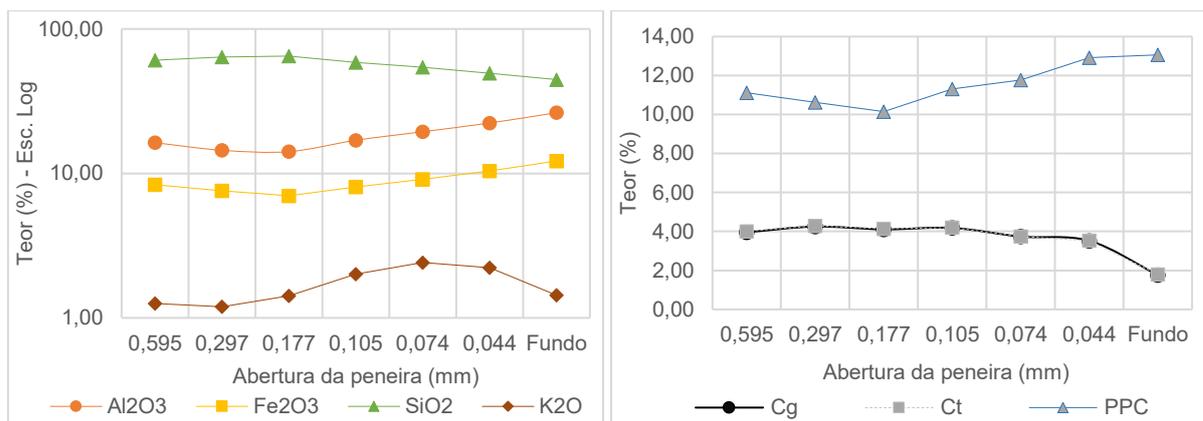
**Tabela 7** - Dados estatísticos indicando as variações de teores como resultado da análise granuloquímica da amostra de Grafita-Gnaiss (GG-01)

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	PPC	Cg	Ct
<b>Média (%)</b>	18,57	8,95	1,71	56,69	11,56	3,65	3,68
<b>Mínimo (%)</b>	14,15	7,01	1,19	44,62	10,15	1,77	1,80
<b>Máximo (%)</b>	26,32	12,20	2,42	64,92	13,06	4,25	4,29
<b>Desvio padrão (%)</b>	4,45	1,80	0,50	7,62	1,10	0,87	0,87

Percebe-se que o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> apresentam um comportamento semelhante, com uma leve redução da faixa de 0,595mm para 0,177mm e uma elevação constante da de 0,177mm até <0,044mm (fundo). Tal comportamento pode ser interpretado como uma maior concentração de argilominerais nas granulometrias mais finas da amostra.

No caso do K<sub>2</sub>O, apesar de uma variação absoluta de teor relativamente baixa, percebe-se um comportamento ondular com um mínimo em 0,297mm e máximo na granulometria de 0,074mm. Isto provavelmente ocorreu devido uma maior concentração de grânulos de K-feldspato (Sanidina e/ou Ortoclásio) nesta fração. Já o SiO<sub>2</sub> demonstrou uma breve elevação de teor entre 0,595mm e 0,177mm, e uma redução constante partindo de um máximo de 64,92% na fração 0,177mm até 44,62% na <0,044mm (fundo). Tal comportamento sugere que os grãos de quartzo se concentram mais nas frações de até 0,177mm.

**Figura 5** - Gráficos indicando as variações granuloquímicas para a amostra GG-01.



A Perda por calcinação (PPC) apresentou uma leve redução da fração de 0,595mm até 0,177mm e um incremento progressivo de 0,177mm até <0,044mm (fundo). Apesar da variação absoluta ter sido relativamente baixa, com um máximo de 13,06% e mínimo de 10,15%, entende-se que nas frações mais finas do minério há uma tendência de se concentrar mais voláteis e carbonatos.

Por fim, fica evidente uma tendência de estabilidade de teor de Cg até a fração de 0,044mm e uma brusca redução para a fração mais fina. Tal comportamento era o esperado, tendo em vista que este tipo de mineralização tende a possuir *flakes* maiores. Cabe destacar que o valor máximo de teor foi alcançado na fração de 0,297mm.

Os resultados referentes à amostra de Grafita-Xisto (GX-01) podem ser visualizados na Tabela 8.

**Tabela 8** - Resultados de análise granuloquímica de óxidos, carbono e enxofre para o GX-01

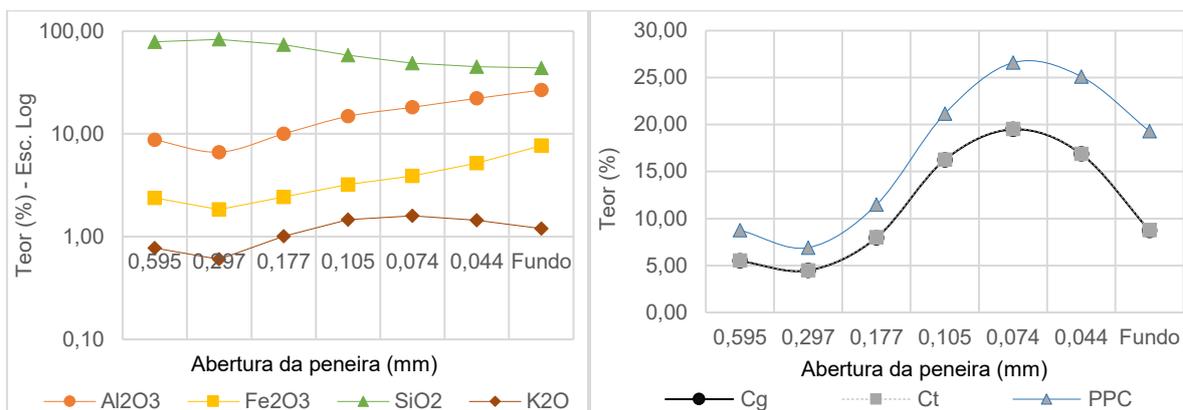
GX-01											
Abertura da peneira (mm)	Ensaio (%)										
	Grav.	Fluorescência de Raios-X							Infravermelho		
	PPC 1000°C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cg	Ct	St
0,595	8,76	8,74	2,37	0,78	0,18	0,10	78,56	0,48	5,49	5,52	0,03
0,297	6,91	6,64	1,84	0,60	0,14	0,10	83,06	0,67	4,48	4,49	0,03
0,177	11,47	10,01	2,44	1,01	0,15	0,10	73,82	0,90	7,96	8,00	0,03
0,105	21,15	14,82	3,22	1,46	0,20	0,10	58,08	0,63	16,25	16,29	0,04
0,074	26,59	18,16	3,89	1,59	0,21	0,10	48,76	0,46	19,49	19,55	0,04
0,044	25,11	22,16	5,20	1,44	0,19	0,10	44,98	0,47	16,87	16,9	0,05
Fundo	19,29	26,68	7,67	1,20	0,19	0,10	43,83	0,59	8,72	8,75	0,06

Assim como na amostra de Grafita-Gnaiss, dentre as variações de teor que apresentaram um certo grau de relevância por fração analisada pela granuloquímica, cabe destacar o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>, PPC, carbono grafítico e carbono total. Na Tabela 9 e na Figura 6 são apresentados os dados estatísticos gerais, indicando as variações de teor para estes elementos e as representações gráficas da variação de teor, respectivamente.

**Tabela 9** - Dados estatísticos indicando as variações de teores como resultado da análise granuloquímica da amostra de Grafita-Xisto (GX-01)

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	PPC	Cg	Ct
<b>Média (%)</b>	15.32	3.80	1.16	61.59	17.04	11.32	11.36
<b>Mínimo (%)</b>	6.64	1.84	0.60	43.83	6.91	4.48	4.49
<b>Máximo (%)</b>	26.68	7.67	1.59	83.06	26.59	19.49	19.55
<b>Desvio padrão (%)</b>	7.43	2.04	0.37	16.67	7.96	6.06	6.08

**Figura 6** - Gráficos indicando as variações granuloquímicas para a amostra GX-01.



Assim como observado na amostra de Grafita-Gnaïsse, os teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no Grafita-Xisto mostram uma leve queda entre as frações de 0,595mm e 0,297mm, seguida por um aumento constante até 0,044mm, possivelmente devido à concentração de argilominerais em granulometrias mais finas. O teor de K<sub>2</sub>O oscilou entre mínimo em 0,297mm e máximo em 0,074mm, refletindo a distribuição granulométrica dos minerais potássicos. Já o teor de SiO<sub>2</sub> apresentou um breve aumento até 0,297mm seguida de uma redução constante até a peneira de fundo.

A PPC, carbono grafítico (Cg) e carbono total (Ct) exibiram padrões similares, com mínimo em 0,297mm e máximo em 0,074mm, indicando baixo conteúdo de outras fontes de carbono no minério.

No minério de Grafita-Xisto, o aumento mais notável ocorreu entre as granulometrias de 0,105mm e 0,044mm que, comparando com a amostra global, essa fração revelou um adicional médio de 8% em carbono grafítico. Isto pode ser explicado pelas propriedades dos *flakes* de grafita nesse tipo de mineralização, que tendem a ter dimensões menores do que os do Grafita-Gnaïsse.

### 3.5 Análise por correlação

Com o objetivo de se identificar possíveis correlações entre os teores apresentados pela granuloquímica, foi desenvolvido uma matriz de correlação utilizando o Coeficiente de Pearson por meio do software Excel. Esse coeficiente varia de -1 a 1, indicando correlação perfeita positiva ( $r=1$ ) quando as variáveis são diretamente proporcionais, perfeita negativa ( $r=-1$ )

quando são inversamente proporcionais, e nenhuma correlação ( $r=0$ ) quando não há relação linear entre as variáveis. A fórmula é expressa pela Equação 1.

$$r = \frac{\Sigma(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{[\Sigma(x-\bar{x})^2\Sigma(y-\bar{y})^2]}} \quad (1)$$

Onde  $\bar{X}$  e  $\bar{Y}$  são as médias de amostra MÉDIA (matriz1) e MÉDIA(matriz2).

As matrizes de correlação para as análises granuloquímicas das amostras de Grafita-Gnaisse e Grafita-Xisto podem ser visualizadas pela Tabela 10. Nestas, são demonstradas apenas os elementos que possuem correlações relevantes entre si, estando em destaque as que apresentaram um coeficiente maior do que 0,95 (cor laranja) e menor do que -0,95 (cor vermelha).

**Tabela 10** - Matriz de correlação linear por Pearson. Amostra GX-01 (em branco) e GG-01 (em cinza)

	PPC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	C <sub>grafi</sub>	C <sub>total</sub>	S <sub>total</sub>
PPC	1,00	0,97	0,22	0,96	0,45	0,91	-0,98	0,47	-0,78	-0,78	0,38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,78	1,00	0,12	0,99	0,33	0,91	-0,99	0,68	-0,91	-0,91	0,33
CaO	0,32	0,83	1,00	0,03	0,91	0,26	-0,21	-0,22	0,19	0,17	-0,39
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,59	0,96	0,95	1,00	0,23	0,89	-0,98	0,67	-0,93	-0,93	0,41
K <sub>2</sub> O	0,97	0,70	0,21	0,49	1,00	0,47	-0,43	-0,11	0,03	0,02	-0,28
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,70	0,98	0,89	0,98	0,58	1,00	-0,92	0,55	-0,75	-0,76	0,46
SiO <sub>2</sub>	-0,93	-0,96	-0,65	-0,85	-0,86	-0,91	1,00	-0,61	0,86	0,86	-0,31
ZrO <sub>2</sub>	0,34	0,84	0,98	0,95	0,24	0,88	-0,67	1,00	-0,88	-0,88	0,04
C <sub>grafi</sub>	0,94	0,54	-0,01	0,29	0,96	0,43	-0,75	0,01	1,00	1,00	-0,34
C <sub>total</sub>	0,94	0,54	-0,01	0,29	0,96	0,43	-0,75	0,01	1,00	1,00	-0,33
S <sub>total</sub>	0,66	0,97	0,89	0,98	0,56	0,98	-0,89	0,90	0,39	0,39	1,00

A análise da matriz do Grafita-Gnaisse revelou um menor número de correlações em comparação com o Grafita-Xisto. Na GG-01, foi observada uma associação direta entre PPC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e uma relação inversa com o SiO<sub>2</sub>. Isso pode ser justificado pelo fato desses óxidos serem os principais constituintes dos argilominerais com granulometria mais fina, enquanto o quartzo mais presente em frações mais grossas indica uma proporcionalidade inversa.

No caso da GX-01, além da relação direta entre o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e inversa com o SiO<sub>2</sub>, houve também uma associação destes óxidos com os traços de S<sub>total</sub> e o P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

No que diz respeito ao carbono grafítico, na amostra de Grafita-Gnaisse, observou-se uma correlação significativa apenas com o carbono total. Por outro lado, para o Grafita-Xisto, além

do carbono total, destaca-se a associação com a PPC e o  $K_2O$ . Essa similaridade de padrão foi identificada pelas curvas granuloquímicas e pode ser justificada pela semelhança granulométrica entre os *flakes* de Grafita e os minerais de Feldspato potássico (K-feldspato).

#### 4 CONCLUSÕES

As amostras de Grafita-Xisto (GX-01) e Grafita-Gnaiss (GG-01) foram coletadas em regiões distintas da Província, sendo o Xisto à noroeste (NW) e Gnaiss à sudeste (SE). Apesar da expectativa de diferenças na granulometria, estas apresentaram uma distribuição em frações semelhante que pode ser justificado pelo método de amostragem e grau de intemperismo. Em outras palavras, quando se trata do horizonte dessas rochas ao nível de saprolito, ambas tendem a demonstrar um comportamento granulométrico similar.

Ambas as amostras são compostas principalmente por Quartzo, Caulinita, K-feldspato, Goethita e Grafita, com indicações de diferentes graus metamórficos evidenciados pelos minerais Sanidina no Gnaiss, Anortoclásio e Moscovita no Xisto. Isto sugere temperaturas de cristalização distintas, corroborando com Belém (2006) e Faria (1999).

No que diz respeito à granuloquímica, o GX-01 demonstrou ter um teor mais elevado de Cg na faixa de granulometria entre 0,105mm e 0,044mm. Isso se torna significativo para o planejamento dos equipamentos de classificação e moagem, pois para o Gnaiss seria necessário um processo de moagem mais branda, como forma de preservar os flakes maiores, enquanto para o Xisto é necessário um processo de moagem mais agressivo e uma classificação mais precisa entre as frações de 0,105mm e 0,044mm.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMISANO-CANESI, A. CHIARI, G. FERRARIS, G. IVALDI, G. SOBOLEVA, S. V. Muscovite- and phengite-3T: crystal structure and conditions of formation. **European Journal of Mineralogy**, 6: 489-496, 1994.

BELÉM, J. **Caracterização Mineralógica, Física e Termobarométrica de Minérios de Grafita da Província Grafítica Bahia-Minas**. Dissertação de Mestrado em Geologia Econômica. UFMG, Belo Horizonte. 165p, 2006.

CPRM. Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. **Folha SE.24-Y-D-IV – Itarantim, Carta geológica, escala 1:100.000**. 2014.

FARIA, L.F. **Controle e tipologia de mineralizações de grafita flake do nordeste de Minas Gerais e sul da Bahia: uma abordagem regional**. Dissertação de Mestrado em Geologia, UFMG, Belo Horizonte. 102p, 1997.

KLEIN, C; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais; tradução e revisão técnica: Rualdo Menegat**. 23. Ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2012. 716p.

PEDROSA-SOARES, A. C. Grafita (Sul da Bahia e Nordeste de Minas Gerais) e Lítio (Distrito Pegmatítico de Araçuaí, MG): **Livro de campo de curso promovido pela ADIMB**, 31 p. 2022 [acesso em 05 de março de 2024]; Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/363780189>

PEDROSA-SOARES, A.C., NOCE, C.M., WIEDEMANN, C.M. & PINTO, C.P. The Araçuaí–West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly. **Precambrian Research**, 110: 307-323. 2001.

PEDROSA-SOARES, A.C.; Faria L F; Reis, L.B. The Minas-Bahia Graphite Province, Eastern Brazil: Mineralization Controls and Types. *In*: EUG 10, 1999, Strasbourg. **Journal of Conference**. Cambridge, v. 4. p. 493. 1999.

RIBEIRO, T.M.G. **Caracterização de minério de grafita de Almenara – MG**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Mineral – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 108p. 2016.