



**UFOP**

Universidade Federal  
de Ouro Preto

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**



**ESCOLA DE MINAS**

**CARACTERIZAÇÃO DO KIMBERLITO DIAMANTÍFERO DOURADINHO-11  
LOCALIZADO NO OESTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS**

**NATHAN VICENTE ALMEIDA**

**OURO PRETO - MG**

**Setembro de 2024**

NATHAN VICENTE ALMEIDA

**CARACTERIZAÇÃO DO KIMBERLITO DIAMANTÍFERO DOURADINHO-11  
LOCALIZADO NO OESTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. **Área de concentração:** Pesquisa Mineral/Geoquímica

**Orientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cassandra Terra Barbosa (*DEGEO/EM/UFOP*)

**Coorientador:** Prof. Dr. Elton Destro (*DEMIN/EM/UFOP*)

**OURO PRETO - MG**

**Setembro de 2024**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A447c Almeida, Nathan Vicente.

Caracterização do kimberlito diamantífero Douradinho-11 localizado no oeste do estado de Minas Gerais. [manuscrito] / Nathan Vicente Almeida. - 2024.

72 f.

Orientadora: Profa. Dra. Cassandra Terra Barbosa.

Coorientador: Prof. Dr. Elton Destro.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Pesquisa mineral. 2. Geoquímica. 3. Prospecção. 4. Kimberlito. 5. Diamantes. 6. Minerais indicadores. I. Barbosa, Cassandra Terra. II. Destro, Elton. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 552.323:550.84

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Nathan Vicente Almeida**

### **Caracterização do kimberlito diamantífero Douradinho-11 localizado no oeste do estado de Minas Gerais**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 11 de setembro de 2024

#### Membros da banca

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cassandra Terra Barbosa - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Prof. Dr. Elton Destro - Coorientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cristiane Paula de Castro Gonçalves (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cláudia do Santos (Universidade Federal de Ouro Preto)

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cassandra Terra Barbosa, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 11/10/2024



Documento assinado eletronicamente por **Cassandra Terra Barbosa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/10/2024, às 10:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0793643** e o código CRC **EF1FE85D**.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por tudo,

Aos meus pais, Geraldo e Maria Inês, pelo apoio, amor e educação que recebi muito abundantemente ao longo da vida,

Aos meus professores, verdadeiros mestres, que compartilharam seu conhecimento comigo no decorrer da graduação,

Aos amigos e familiares outros que torceram genuinamente pelo meu sucesso,

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho,

Ao laboratório de mineralogia do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto (DEGEO/EM/UFOP), que disponibilizou o ácido clorídrico (HCl) para verificar a presença de carbonato nas amostras,

Ao laboratório de microscopia do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (DEMIN/EM/UFOP), que permitiu o uso da lupa no estudo macroscópico do kimberlito,

Ao laboratório de laminação do DEGEO, que confeccionou as lâminas delgadas,

Aos laboratórios de microscopia do DEGEO, que possibilitaram o estudo das lâminas delgadas ao microscópio petrográfico,

Ao Laboratório de Microscopia e Microanálises (LMic) do DEGEO, que integra a Rede de Microscopia e Microanálises de Minas Gérias (RMic/FAPEMIG), pelas fotomicrografias das lâminas e análises com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV/EDS).

*“A natureza ama esconder-se”*

**Heráclito**

## RESUMO

Kimberlitos são rochas ígneas que raramente apresentam teores econômicos de xenocristais de diamante. No contexto geológico brasileiro, insere-se a Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP), da qual faz parte o kimberlito diamantífero Douradinho-11, aflorante na porção oeste do Estado de Minas Gerais. Este trabalho teve como objetivo caracterizar esse corpo, realizando estudos petrográficos e de química mineral. Nos laboratórios da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), amostras de mão foram descritas, sete seções delgadas estudadas ao microscópio petrográfico, das quais foram selecionados alguns minerais para determinar a sua composição química com Microscopia Eletrônica de Varredura associada a um detector de Energia Dispersiva de Raios X (MEV/EDS). Com base na composição química da olivina, sugeriu-se que a intrusão, cuja mineralogia é compatível com kimberlitos, contém um baixo teor de diamantes. Os minerais indicadores estudados detalhadamente foram os cristais de olivina, ilmenita e Cr-espinélio. Uma parcela dos cristais de ilmenita possui uma composição que indica a preservação do diamante, mas, por outro lado, os espinélios não confirmaram a possibilidade de mineralização, apresentando teores baixos de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Além disso, a olivina também apresentou uma composição diferente daquelas coexistentes com diamantes. Sendo assim, observou-se que a interpretação da química mineral na prospecção geoquímica deve ser feita cautelosamente, porque os resultados podem ser controversos, mesmo em kimberlitos diamantíferos. Também, imagens de elétrons retroespalhados demonstraram diferentes texturas da ilmenita, o que deve ser considerado em trabalhos de pesquisa, tendo em vista que a análise do mesmo cristal pode levar a diferentes conclusões sobre o potencial diamantífero devido à sua heterogeneidade química.

**Palavras-chave:** Pesquisa mineral; Prospecção de kimberlito; Prospecção de diamante; Geoquímica; Minerais indicadores

## ABSTRACT

Kimberlites are igneous rocks that rarely contain economic amounts of diamond xenocrysts. In the Brazilian geological context, a diamondiferous kimberlite named Douradinho-11 outcrops in the west of Minas Gerais, belonging to an alkaline province known as Alto Paranaíba Igneous Province (APIP). The aim of this work was to characterize this body, carrying out petrographic and mineral chemistry studies. In the laboratories of the Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), hand samples were described, thin sections studied under petrographic microscopes and the chemical composition of some minerals was obtained by Scanning Electron Microscopy equipped with an Energy Dispersive X-ray detector (SEM/EDS). The intrusion shows a mineralogy commonly associated with kimberlites and it was suggested that it contains a low diamond grade based on the chemical composition of the olivine. The indicator minerals studied in detail were olivine, ilmenite and Cr-spinel. Some ilmenite crystals exhibit a composition that indicates diamond preservation, but the spinels, in turn, did not confirm the possibility of mineralization, presenting low  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  contents. In addition, olivine crystals presented a composition different from those found as inclusions in diamonds. Hence, it was observed that the interpretation of mineral chemistry in geochemical prospecting must be done cautiously, because the results can be controversial, even in diamond-bearing kimberlites. Moreover, backscattered electron images demonstrated different textures of ilmenite, which must be considered in mineral research, considering that the composition of the same crystal can lead to different conclusions on diamond potential due to its chemical heterogeneity.

Keywords: Mineral research; Kimberlite prospecting; Diamond prospecting; Geochemistry; Indicator minerals



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo idealizado do kimberlito.....	14
Figura 2 – Influência da espessura da litosfera e da intensidade do metassomatismo sobre o teor de diamantes em kimberlitos.....	16
Figura 3 – Diagrama MgO# x Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> com o campo que engloba inclusões de olivina em diamante.....	21
Figura 4 – Diagrama MgO# x Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> com o campo que engloba inclusões de ortopiroxênio em diamante.....	22
Figura 5 – (A) Diagrama Mg/(Mg+Fe) x Ca/(Ca+Mg) para distinguir granadas mantélicas das crustais. (B) Diagrama CaO x Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> para a classificação das granadas.....	23
Figura 6 – Diagrama TiO <sub>2</sub> x Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> aplicado no estudo de cristais de espinélio em campanhas de prospecção de kimberlito/diamante.....	24
Figura 7 – Diagrama MgO x Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> usado no estudo de cristais de cromita em campanhas de prospecção de kimberlito/diamante.....	24
Figura 8 – Diagramas (A) MgO x Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e (B) Fe <sup>2+</sup> /(Fe <sup>2+</sup> +Mg) x Cr/(Cr+Al) para espinélio.....	25
Figura 9 – Curva para definir a origem da ilmenita.....	26
Figura 10 – Gráfico MgO x Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> para avaliar as condições de preservação ou não do diamante com base na composição química da ilmenita.....	27
Figura 11 – Gráfico MgO x Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> para avaliar as condições de preservação ou não do diamante com base na composição química da ilmenita.....	27
Figura 12 - Província Ígnea do Alto Paranaíba.....	30
Figura 13 – Mapa litoestratigráfico.....	31
Figura 14 – Amostras do Douradinho-11.....	34
Figura 15 – Fotomicrografias óticas, sob luz plana, em que (A) é um fragmento de xenólito crustal rico em carbonato, (B) (C) e (D) são magmaclastos em que o núcleo é constituído de agregado de carbonato.....	38
Figura 16 – Fotomicrografias óticas, sob luz plana. Note a distribuição de cristais de olivina (ol) de diferentes tamanhos, formas e graus de alteração. (A) veios de carbonato, (B) cristais angulosos de olivina (C) cristal euédrico de olivina e flogopita, (D) olivina com as bordas alteradas para iddingsita (setas vermelhas) com leve a médio pleocroísmo entre vermelho e laranja, (E) olivina euédrica com borda de iddingsita (seta vermelha) e (F) piroxênio com borda de reação amarelada.....	39
Figura 17 – Fotomicrografias óticas, sob luz plana. (A) Cristais arredondados de olivina (ol) alterados para bowlingita em meio a cristais de carbonato, (B) agregado de cromita vermelha, (C) flogopita com borda alterada, (D) olivina angulosa, (E) olivina com núcleo fresco e (F) cristais de olivina com diferentes graus de alteração e olivina arredondada.....	40
Figura 18 – Fotomicrografias óticas demonstrando o pleocroísmo na flogopita (indicada pelas setas vermelhas) observado sob luz plana.....	41

Figura 19 – Fotomicrografias óticas, sob luz plana. (A) Agregado de carbonato (seta vermelha) e cristais de olivina (ol) alterados para bowlingita, (B) xenólito mantélico (seta vermelha), (C) xenólito mantélico arredondado e (D) macrocristal de olivina (ol).....	41
Figura 20 – Fotomicrografias óticas, sob luz plana, de cristais de espinélio. O cristal em (A) tem a borda mais alterada do que em (B).....	42
Figura 21 – Espectros de EDS de pontos da matriz.....	43
Figura 22 - (A) $TiO_2 \times Cr_2O_3$ , (B) $TiO_2 \times FeO$ , (C) $FeO \times Cr_2O_3$ (D) $V_2O_3 \times Cr_2O_3$ , (E) $MgO \times MnO$ e (F) $FeO \times MgO$ para os cristais de ilmenita.....	45
Figura 23 - $MgO \times TiO_2$ para a classificação da Mg-ilmenita.....	46
Figura 24 – $MgO \times Fe_2O_3$ para avaliar as condições de preservação do diamante.....	47
Figura 25 – Gráfico $MgO \times Cr_2O_3$ , em que a condição de redução favorece a preservação de diamantes.....	47
Figura 26 - Imagem de elétrons retroespalhados (MEV) do cristal de ilmenita zonado. À direita, os espectros de EDS.....	48
Figura 27 - Imagem de elétrons retroespalhados (MEV) da ilmenita. Ao lado, espectro de EDS da titanita, que está presente na interface borda/matriz.....	48
Figura 28 – De (A) até (F): Imagens de elétrons retroespalhados (MEV/EDS) exibindo as texturas de cristais de ilmenita do Douradinho-11, demonstrando, qualitativamente, variações na composição química.....	49
Figura 29 – (A) Gráfico $MgO \times FeO$ expando a correlação fortemente negativa entre Fe e Mg nos cristais de olivina. (B) $Fe\# \times Mg\#$ para a classificação da olivina.....	52
Figura 30 - (A), (B) e (C) Imagens de elétrons retroespalhados (MEV) de cristais de olivina relativamente homogêneos.....	53
Figura 31 - Diagrama ternário de classificação do espinélio.....	54
Figura 32 – Diagramas (A) $MgO \times Cr_2O_3$ e (B) $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg) \times Cr/(Cr+Al)$ para espinélios.....	55
Figura 33 – Gráficos (A) $FeO \times Cr_2O_3$ , (B) $Al_2O_3 \times Cr_2O_3$ e (C) $FeO \times MgO$ para os espinélios.....	56
Figura 34 – (A) e (B) Imagens de elétrons retroespalhados (MEV/EDS) dos espinélios.....	56
Figura 35 – Diagrama ternário de classificação de piroxênio com os membros finais Wo, En e Fs.....	58
Figura 36 – Espectros de EDS para diferentes regiões da borda de reação do piroxênio.....	58
Figura 37 – (A) e (B) são imagens de elétrons retroespalhados (MEV) de cristais de flogopita. À direita de (A), pode-se analisar os espectros de EDS de diferentes regiões do mineral, destacando a composição química do núcleo fresco e da borda alterada. À direita de (B), encontram-se os espectros de EDS da região fresca e da alteração entre as placas da flogopita.....	59
Figura 38 – Imagem de elétrons retroespalhados (MEV) do veio de carbonato com os pontos referentes aos espectros de EDS.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos componentes do kimberlito Douradinho-11.....	35
Tabela 2 – Intervalos de composição química de cristais de ilmenita, em % de peso dos óxidos, provenientes de kimberlitos e como inclusões em diamantes brasileiros.....	46
Tabela 3 – Composição química dos macrocristais de olivina (análises do núcleo), em % do peso dos óxidos.....	50
Tabela 4 – Composição química de inclusão de olivina em diamantes brasileiros e dos cristais do Douradinho-11.....	53
Tabela 5 – Composição química do núcleo dos cristais de Cr-espínélio avermelhados, em peso dos óxidos %.....	54
Tabela 6 – Intervalos de composição dos cristais de Cr-espínélio do Douradinho-11 e de inclusões em diamantes.....	57
Tabela 7 – Composição química, em peso dos óxidos (%), do piroxênio e membros finais em %.....	57

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS.....	12
2.1 Objetivo geral.....	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 Kimberlitos: fontes primárias de cristais de diamante.....	13
3.2 Técnicas aplicadas à pesquisa de kimberlito/diamante.....	16
3.3 Minerais indicadores.....	20
3.3.1 Olivina.....	21
3.3.2 Piroxênio.....	22
3.3.3 Granada.....	22
3.3.4 Espinélio.....	24
3.3.5 Ilmenita.....	25
3.4 Breve panorama brasileiro da prospecção de kimberlitos/diamantes.....	27
3.5 Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP) e o kimberlito Douradinho-11...	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1 Amostragem e confecção das lâminas delgadas.....	32
4.2 Descrição macroscópica e teste com ácido clorídrico.....	32
4.3 Descrição ao microscópio petrográfico, fotomicrografias e ImageJ.....	32
4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
5.1 Petrografia.....	34
5.2 Química Mineral.....	43
5.2.1 Matriz.....	43
5.2.2 Ilmenita.....	44
5.2.3 Olivina.....	50
5.2.4 Cr-espinélio.....	54
5.2.5 Piroxênio.....	57
5.2.6 Flogopita.....	59
5.2.7 Veio de carbonato.....	59
6. CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

## 1. INTRODUÇÃO

Kimberlitos são rochas ígneas derivadas de magmas gerados na astenosfera, que podem conter diamante e fragmentos de diferentes litologias de camadas do interior da Terra, do manto à crosta (SCOTT SMITH *et al.*, 2018) (*e.g.*, xenólitos estudados por SILVA, 2008 e NANNINI 2011, 2016). A procura por kimberlito, que é a principal fonte primária de diamante, tem se destacada na Rússia, Canadá, Botsuana e Austrália, o que se deveu ao grande avanço nos campos, especialmente, da geofísica e da geoquímica, que possibilitou novos rastreamentos de depósitos (PEREIRA, 2001).

No Brasil, no fim da década de 1960, houve os primeiros trabalhos de prospecção de fontes primárias (CHAVES *et al.*, 2008), mas muitos dados foram tratados como sigilosos (*e.g.*, SILVA, 2008) e boa parte das informações que se tem sobre as intrusões brasileiras, com amplo acesso ao público, deve-se a pesquisas realizadas principalmente no âmbito acadêmico, como Silva (2008), Provenzano (2016), Nascimento *et al.* (2018), Barbosa (2018) e Andrade (2012).

Existem intrusões kimberlíticas em diferentes áreas do Brasil, com registros em Minas Gerais, Bahia, Mato Grosso, Rondônia, entre outros estados (*e.g.*, GIBSON *et al.*, 1995; MASUN e SCOTT SMITH, 2008; DONATTI-FILHO *et al.*, 2013; NANNINI *et al.*, 2017; SVISERO e CHIEREGATI, 1990), das quais muitas já foram estudadas. No entanto, as possibilidades de novas descobertas sobre o tema estão longe de se esgotar, considerando a natureza extremamente complexa dessa rocha, gerando, em alguns casos, discussões e revisões em torno da sua classificação petrográfica e do seu real potencial diamantífero (*e.g.*, CHAVES *et al.*, 2009; CHAVES, 2012; PISANI *et al.*, 2001).

Dentro do contexto geológico brasileiro desenhado pelas rochas alcalinas, há a Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP), que contém centenas de corpos (SVISERO e CHIEREGATI, 1990) e tem sido estudada por diversos autores, tais como, Gibson *et al.* (1995), Gomes e Comin-Chiaromont (2005), Araujo *et al.* (2001) e Guarino *et al.* (2013). Na PIAP, insere-se a intrusão Douradinho-11, que é um kimberlito diamantífero, cujo afloramento localiza-se na porção oeste de Minas Gerais (CABRAL NETO *et al.*, 2017). Ao considerar a complexa e ainda em aberto questão envolvendo o potencial diamantífero das rochas kimberlíticas em geral, fez-se uso desta intrusão

portadora de diamantes, da PIAP, para avaliar as possíveis limitações das tradicionais metodologias de prospecção geoquímica, contribuindo, portanto, com o avanço da pesquisa de kimberlito no país, que é uma área ainda bastante controversa.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Descrever o kimberlito diamantífero Douradinho-11 localizado no oeste do Estado de Minas Gerais, levantando suas características petrográficas e a composição química dos principais minerais que compõem sua assembleia mineralógica.

### **2.2 Objetivos específicos**

Verificar a classificação do Douradinho-11 como kimberlito por meio da análise integrada de seus dados petrográficos e de química mineral;

Expandir os dados publicadas sobre as intrusões diamantíferas do país, contribuindo com a prospecção/exploração dessas rochas;

Avaliar as limitações da metodologia aplicada a trabalhos de pesquisa mineral, com ênfase na prospecção geoquímica que engloba os minerais indicadores de kimberlito/diamante, baseando-se nos resultados obtidos para o Douradinho-11.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Kimberlitos: fontes primárias de cristais de diamante

Segundo Mitchell (1986), na sua clássica obra, kimberlitos são rochas híbridas, petrograficamente complexas, com componentes oriundos da suíte de nódulos discretos e dos xenólitos mantélicos, que estão associados às fases primárias (*e.g.*, olivina, cromita, flogopita, ilmenita, apatita, calcita, entre outras) formadas pela cristalização do líquido magmático. Essas rochas ígneas, de textura inequigranular, são ricas em olivina (atingindo 50 %modal), subsaturadas em sílica, potássicas (<0,5% de Na<sub>2</sub>O e ≤ 3% K<sub>2</sub>O), ricas em H<sub>2</sub>O (≥ 5%) e CO<sub>2</sub> (~10%) e, por outro lado, deficientes em Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (< 3%), em peso. Além disso, formam-se pela fusão parcial do manto sob elevada pressão (superior a 10 GPa) ou a uma profundidade maior do que 300 km (MITCHELL *et al.*, 2019; McCLENAGHAN e KJARSGAARD, 2007).

Para auxiliar na compreensão deste trabalho, é importante definir outros termos que comumente aparecem em trabalhos envolvendo kimberlito, tais como, lamproíto, orangeíto e magmaclasto. Orangeítos são rochas ígneas ultrapotássicas (K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O > 3) peralcalinas, ricas em H<sub>2</sub>O, subsaturadas em sílica, derivadas da fusão parcial do manto litosférico profundo metassomatizado, cuja mineralogia é caracterizada pela presença marcante de flogopita associada com diopsídio (SCOTT SMITH *et al.*, 2018; MITCHELL, 1995). O uso da palavra orangeíto foi desaconselhado por Scott Smith *et al.* (2018), que sugerem a sua substituição pelo termo lamproíto (var. Kaapvaal).

Os lamproítos são rochas ígneas, subsaturadas em sílica, derivadas do manto, ultrapotássicas e peralcalinas que contêm, por exemplo, flogopita, leucita, diopsídio, sanidina, K-richterita e tetra-ferriflogopita. A olivina não é uma fase característica, mas quando presente como fenocristais (~25 %modal) e macrocristais (25 %modal) pode-se configurar uma rocha petrograficamente semelhante aos kimberlitos (SCOTT SMITH *et al.*, 2018). Magmaclasto é um termo descritivo para clastos kimberlíticos comuns, cuja forma fluida indica um líquido magmático de baixa viscosidade. Formam-se durante eventos de *emplacement* perto da superfície, por segregação magmática (*melt segregation*) ou por fragmentação seguida pelo rápido resfriamento do fundido durante erupções vulcânicas (piroclastos portadores de magma, *melt-bearing pyroclast*) (SCOTT SMITH *et al.*, 2018).



Embora o kimberlito seja volumetricamente insignificante e de ocorrência rara, há algumas razões pelas quais se conduzem estudos sobre ele, que passam pelo fato de ser a principal fonte primária de diamante, pela presença de fragmentos de xenólitos provenientes do manto superior e por sua química que é caracterizada pelas altas concentrações de elementos incompatíveis (DAWSON, 1980). A figura 1 traz o modelo idealizado de kimberlito, representando as fácies cratera, diatrema e zona de raiz, conforme Mitchell (1986).

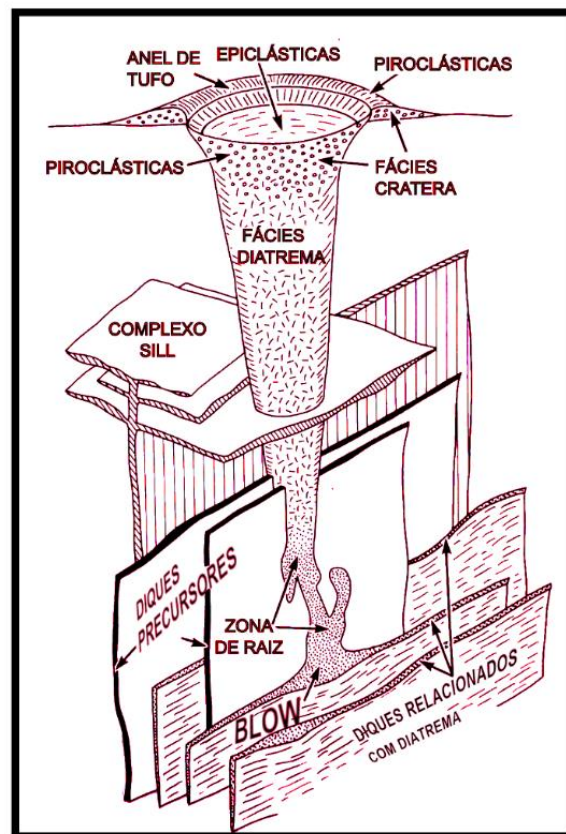


Fig. 1 – Modelo idealizado do kimberlito (fonte: modificado de MITCHELL, 1986)

O estudo dos xenólitos/xenocristais em kimberlitos tem sido conduzido em diferentes partes do mundo, principalmente para levantar informações sobre o manto e compreender processos ligados à formação dessas rochas (e.g., DAWSON, 1980; LEHTONEN *et al.*, 2009; HUNT *et al.*, 2012). Modelos petrogenéticos que envolvem a ascensão magmática têm sido propostos a partir de estudos que analisam variações composicionais, texturais e formas de ocorrência dos cristais de olivina (e.g., ARNDT *et al.*, 2010; BRETT *et al.*, 2015; ABERSTEINER *et al.*, 2022), demonstrando que,

durante a ascensão do fundido, ocorre a fragmentação de xenólitos, provocando uma mistura de materiais. Dentro do contexto brasileiro, Donatti-Filho *et al.* (2013) propõem um modelo de formação dos kimberlitos mineralizados da província de Braúna, Bahia, que, em simples termos, demonstra uma anomalia térmica do manto, a geração do líquido magmático na astenosfera, atingindo o campo de estabilidade do diamante. Os autores construíram um esquema indicando a presença de minerais, como por exemplo, granadas G10 e Cr-espinélio, a incorporação de xenólitos e a inserção de pipes, *blows* e diques na crosta superior. Detalhes outros podem ser vistos no trabalho de Donatti-Filho *et al.* (2013).

Atualmente, consolidou-se na literatura que o diamante encontrado no kimberlito representa um xenocristal que se cristaliza a pelo menos 150 km de profundidade, no manto (*e.g.*, FIPKE *et al.*, 1995; NOWICKI *et al.*, 2007; SHIREY *et al.*, 2013; SCOTT SMITH *et al.*, 2018), o qual foi incorporado ao magma kimberlítico devido à captura de xenólitos de peridotitos e eclogitos (*e.g.*, FIPKE *et al.*, 1995; AULBACH *et al.*, 2017; NOWICKI *et al.*, 2007). De acordo com Nowicki *et al.* (2007), as variáveis que definem o teor de diamantes em rochas vulcânicas estão relacionadas com a quantidade de xenólitos peridotíticos e eclogíticos diamantíferos amostrados pelo magma e seus respectivos teores, o grau de preservação dos cristais durante o seu deslocamento pelo fundido e a eficiência desse transporte rumo à superfície.

De acordo com Gurney *et al.* (1993) e Castillo-Oliver *et al.* (2017), condições redutoras favorecem a preservação dos cristais de diamante, mas, por outro lado, a ação de fluidos metassomáticos pode dissolvê-los (figura 2) (Giuliani *et al.*, 2023). Esses mesmos autores destacam ainda que condições de litosfera espessa resultam em kimberlitos ricos, concordando com o trabalho de Janse (1991). Dymshits *et al.* (2020), por sua vez, destacam a necessidade de o magma kimberlítico atingir a "janela do diamante", região em que a pressão e temperatura abrangem o campo de estabilidade desse mineral.

Além disso, um outro fator que influencia a mineralização é a velocidade de ascensão do fundido em direção à superfície (5 a 37 m/s, PESLIER *et al.*, 2008; 200 km/h, CORREIA, 1990), que tem de ser elevada (HELMSTAEDT e GURNEY, 1995; FIPKE *et al.*, 1995), a fim de evitar a grafitização ou oxidação do diamante (CORREIA, 1990; SHIREY *et al.*, 2013).

Sendo assim, tornam-se claras as razões pelas quais existem intrusões férteis e tantas outras não, necessitando de trabalhos minuciosos de prospecção para o rastreamento de novos depósitos. Ainda para ilustrar a complexa questão que se levanta na identificação dos motivos das variações nos teores de diamantes em kimberlito, menciona-se o trabalho de Dymshits *et al.* (2020), que estudaram kimberlitos da Sibéria, com diferentes teores, e perceberam que a espessura da litosfera é similar nos casos analisados e, portanto, não é a causa dessa variação, demandando mais estudos.

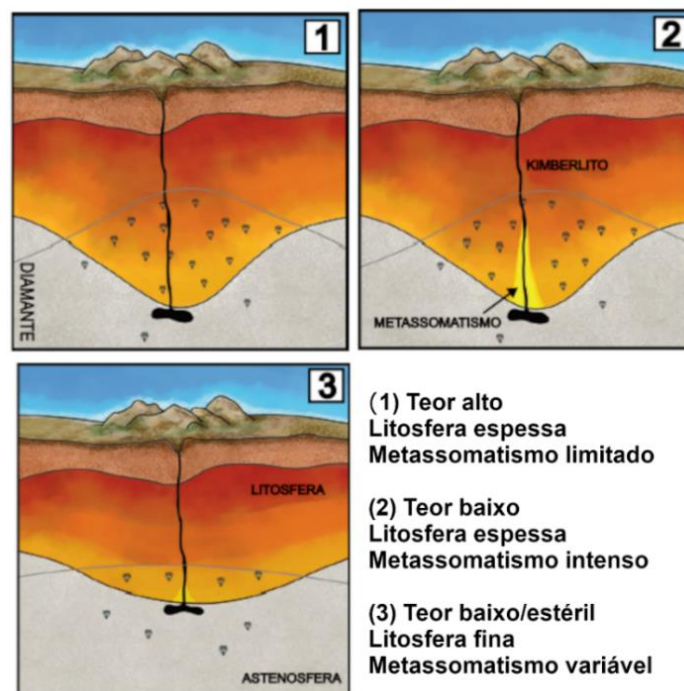


Fig. 2 – Influência da espessura da litosfera e da intensidade do metassomatismo sobre o teor de diamantes em kimberlitos (fonte: modificado de GIULIANI *et al.*, 2023).

### 3.2 Técnicas aplicadas à pesquisa de kimberlito/diamante

Um grande problema que se enfrenta ao procurar por novas fontes primárias de diamante deriva do fato de que, mesmo em kimberlitos considerados ricos, esse mineral encontra-se como constituinte raro, cujo teor (*diamond grade*) é expresso em parte por bilhão (ppb) ou por milhão (ppm) (e.g., DAWSON, 1980; SHIREY *et al.*, 2013; (< 1 ppm) NOWICKI *et al.*, 2007), encarecendo o processo de pesquisa que necessita de um grande volume de amostras para apontar o teor e valor dos diamantes

(KJARSGAARD *et al.*, 2019). Para exemplificar, pode-se mencionar o teor médio da mina a céu aberto Jwaneng, em Botsuana, considerada um grande empreendimento, que equivale a 143 quilates por 100 toneladas (FIELD *et al.*, 2008).

Alguns métodos de prospecção/exploração aplicados a kimberlitos envolvem o uso de dados geofísicos, sensoriamento remoto, geocronologia, geoquímica e geologia de superfície e, entre eles, a anomalia na vegetação é a principal forma de detectar corpos em fotografias aéreas (PEREIRA, 2001; PEREIRA *et al.*, 2017). Conforme Macnae (1995), o uso da geofísica no estudo de kimberlito ou lamproíto contribui com a detecção indireta e direta da rocha, permite o levantamento de suas heterogeneidades físicas e da área do *pipe*, a obtenção de estimativas de seu volume e de sua profundidade, bem como a distinção de múltiplas intrusões. Macnae (1995), ao destacar que o método geofísico a ser usado leva em conta o custo, menciona que as propriedades de um *pipe*, sejam elétricas, magnéticas, densidade e velocidade sísmica, geralmente contrastam significativamente com as rochas encaixantes, o que é importante para o sucesso da pesquisa. Além disso, duas técnicas de levantamento aéreo têm sido amplamente usadas na detecção de alvos, a saber, o magnético e o eletromagnético (MACNAE, 1995).

Na África do Sul, Muavhi e Tessema (2021a), por meio da geofísica com levantamento magnético aliada à geoquímica, localizaram alvos potenciais no Cráton Kaapvaal e, com a análise de solo, identificaram que um desses apresentava uma composição química compatível com aqueles derivados de kimberlito, sendo provavelmente uma intrusão. Além disso, ainda na África do Sul, Muavhi e Tessema (2021b) usaram dados de satélite e combinação de mapas derivados de levantamentos geomorfológicos, de estruturas lineares e de minerais indicadores para detectar potenciais alvos na província kimberlítica de Lesoto. Para validar esse estudo, Muavhi e Tessema (2021b) selecionaram uma das áreas com alto potencial e fizeram levantamento magnético e coleta de solo, recuperando minerais que indicam kimberlito próximo ao local. Para além desses métodos trazidos como exemplos, outros podem ser usados na pesquisa, como o radiométrico e o de refletância espectral (MACNAE, 1995).

Sob a perspectiva da geocronologia, com base na idade de vários kimberlitos de diferentes regiões, Heaman *et al.* (2003) perceberam que eles se concentram do

mesozoico ao cenozoico e que os diamantíferos têm uma grande variedade de idade. Além disso, o estudo destaca que não se observou um padrão que relacione claramente, a nível mundial, os eventos de magmatismo kimberlítico com o potencial diamantífero das intrusões, mas, por outro lado, detectaram-se algumas possíveis correlações, por exemplo, entre alguns corpos datados do Cambriano, da América do Norte e da África do Sul, e seu alto potencial diamantífero, bem como entre kimberlitos potencialmente diamantíferos em Lac de Gras, Canadá, relacionados com o Eoceno.

Em relação à utilização do contexto geotectônico, sabe-se que os kimberlitos portadores de diamantes inserem-se principalmente em regiões cratônicas estáveis e antigas, mas também em faixas móveis (e.g., kimberlito Canastra-1, Chaves *et al.*, 2008), com menos de 1% deles apresentando teores econômicos (PEREIRA, 2001). Clifford (1966) menciona que apontar o controle tectônico nos processos de mineralização de diamante é dificultado pela sua presença não apenas em kimberlitos, mas também em ambientes sedimentares, mas destaca que há uma concentração de rochas fontes em crátons antigos (Lei de Clifford). Apontando para a mesma direção, Kjarsgaard (2007) observa que as regiões onde se destaca ou se destacou a produção de diamante, a partir de kimberlito, localizam-se exclusivamente em blocos continentais arqueanos.

Janse (1991) realizou um estudo para verificar se a chamada Lei de Clifford é realmente válida baseando-se em exemplos de diferentes partes do mundo. Neste trabalho, observou-se que os kimberlitos mais ricos, de fato, estão inseridos em litosfera mais espessa, que constitui verdadeiros terrenos arqueanos e, além disso, que os diamantíferos ocorrem especialmente nas suas partes mais centrais. No entanto, não se deve desconsiderar o potencial de rochas inseridas em outros contextos geotectônicos, vide exemplo já citado do kimberlito Canastra-1, inserido na faixa Brasília (CHAVES *et al.*, 2008).

Uma outra prática usada na busca por kimberlito envolve a coleta de solo em que se objetiva a recuperação de minerais indicadores dessa rocha. Muggerridge (1995), além de trazer muitos outros detalhes sobre esse tópico, demonstra a importância de se definir bem a malha de coleta desse material numa determinada área, pois caso seja inadequada, pode resultar na detecção de apenas alguns corpos ou de nenhum, embora existentes.

Após a descoberta de alguma intrusão, é preciso verificar se é diamantífera e o seu respectivo teor. O trabalho de Kjarsgaard *et al.* (2019) demonstra como se dá o processo de exploração do diamante, com a avaliação do kimberlito, objetivando investigar a sua viabilidade econômica. Neste trabalho, destaca-se que é preciso estudar a necessidade de se continuar com a análise, pois a obtenção de *bulk sample* é muito dispendiosa. Kjarsgaard *et al.* (2019) ainda mencionam que a metodologia aplicada na coleta de amostras a fim de avaliar o teor e valor do diamante difere-se daquela usada para outras *commodities*, sendo muito desafiadora, pois esse mineral pode ser quebrado durante a sua obtenção, dificultando a avaliação de suas características.

No que se refere à determinação do teor, pode-se estudar os microdiamantes (*e.g.*, KREBS *et al.*, 2016). Sabe-se que a quantidade de quilates de diamante por tonelada pode variar consideravelmente entre os corpos, por exemplo, Vasilenko *et al.* (2002), por meio da análise de testemunhos de sondagem (*drill hole*) de diferentes kimberlitos, encontraram valores que variaram de 0 até 86 quilates por 10 toneladas.

Além disso, Vasilenko *et al.* (2002), por meio de métodos estatísticos, obtiveram equações que relacionam a composição química de rocha total, em óxidos, de kimberlitos com seus respectivos teores. Neste trabalho, observaram um papel importante dos óxidos de Ti, Ca, Mg, Na e K, em que os teores desses três últimos crescem com o aumento no teor de diamantes, contrastando com a diminuição dos dois primeiros.

Considerando os aspectos mineralógicos dos kimberlitos e a relativa escassez do diamante, a utilização de fases que são mais abundantes tem se destacado de formas diferentes no estudo dessas rochas, por exemplo, o uso da composição química dos minerais indicadores, foco deste trabalho, que será abordado na seção (3.3). Ainda, Field *et al.* (2009) observaram que é possível, por meio do estudo da variação do tamanho e da abundância da olivina, compreender as distribuições no tamanho de diamante. Portanto, à luz do que foi exposto, nota-se que as técnicas empregadas na investigação de kimberlitos são diversas e que se complementam em diferentes níveis.

### 3.3 Minerais indicadores

A utilização dos minerais indicadores não se aplica apenas no rastreamento dos corpos kimberlíticos, após a sua coleta em sedimentos e solo, mas também para sugerir a mineralização de diamantes, considerando sua composição química (e.g., MUGGERIDGE, 1995; NOWICKI *et al.*, 2007; McCLENAGHAN, 2005; McCLENAGHAN e KJARSGAARD, 2007; CHAVES *et al.*, 2014). Considerando esses diferentes usos, entende-se que minerais indicadores de kimberlito não significam, necessariamente, minerais indicadores de diamante (e.g., SCOTT SMITH *et al.*, 2018).

Para apontar a possibilidade de mineralização em rochas kimberlíticas, tem-se como base a química dos minerais singenéticos ao diamante nas paragêneses eclogítica e peridotítica (PEREIRA, 2001; NOWICKI *et al.*, 2007). Ao estudarem inclusões em diamantes brasileiros, Meyer e Svisero (1973) perceberam que a granada e a olivina representam as fases mais comuns e, por outro lado, os clinopiroxênios são raros.

Os principais minerais indicadores em campanhas de prospecção são a granada, a olivina, o Cr-diopsídio, a cromita, a picroilmenita (magnesiana) (CHAVES *et al.*, 2008; SCOTT SMITH *et al.*, 2018), a Mn-ilmenita (KAMINSKY e BELOUSOVA, 2009) e o rutilo rico em Cr (MALKOVETS *et al.*, 2016). A importância de cada um é ditada, basicamente, pela sua resistência ao intemperismo, especialmente quando se considera a coleta em ambientes secundários, tal como pela sua densidade, que a depender do seu valor, resulta na sua fácil concentração nas “armadilhas” naturais, permitindo a localização da rocha fonte dentro da área em estudo (e.g., MUGGERIDGE, 1995; MAHON *et al.*, 2022). Chaves *et al.* (2008) mencionam que a granada é a mais resistente e que o Cr-diopsídio altera-se mais facilmente, colocando a ilmenita numa posição intermediária. Complementarmente, pode-se determinar a composição de fases recuperadas diretamente da rocha fresca, o que poderia facilitar a interpretação dos dados, visto que a coleta foi realizada diretamente da fonte, mas, no entanto, deve-se considerar que o kimberlito pode conter diferentes proporções de materiais de múltiplas origens.

Antes de abordar o uso de cada mineral indicador nas seções (3.3.1) a (3.3.5), ressalta-se que a interpretação da química desses constituintes do kimberlito deve ser

feita cautelosamente e tomada apenas como sugestiva, visto que pode estar sustentada sobre resultados turvos, que dificultam uma separação segura entre corpos mineralizados e estéreis. Os exemplos que ilustram essa questão são diversos, por exemplo, a tradicional interpretação singenética de algumas inclusões de olivina em diamante pode não ser a mais adequada (BRUNO *et al.*, 2016) e a complexidade textural encontrada em cristais de olivina (GIULIANI, 2018) e de ilmenita (ROBLES-CRUZ *et al.*, 2009; CASTILLO-OLIVER *et al.*, 2017), que reflete diferentes processos geológicos. De forma complementar, cita-se a dissertação de Silva (2008), que identificou cristais de ilmenita no kimberlito Indaiá I, do oeste de Minas Gerais, que indicavam a mineralização de diamantes, mas outras evidências mineralógicas e geoquímicas apontavam no sentido contrário.

### 3.3.1 Olivina

Para a olivina, que é uma fase abundante em kimberlito (~ 50 %modal, SCOTT SMITH *et al.*, 2018; MITCHELL *et al.*, 2019), aplica-se um gráfico que relaciona o conteúdo em forsterita (%) com a concentração de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (% em peso) (FIPKE *et al.*, 1995). Na figura 3, observa-se que o campo que engloba inclusões desse mineral em diamantes apresenta elevados teores de  $\text{MgO}\#$  (> 90 %) e  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  mais baixo. No entanto, o fato desses cristais serem facilmente intemperizados dificulta sua utilização como um mineral indicador, tornando-se menos comuns em concentrados provenientes de ambientes secundários e, quando presentes na rocha matriz, podem estar substituídos em diferentes intensidades.

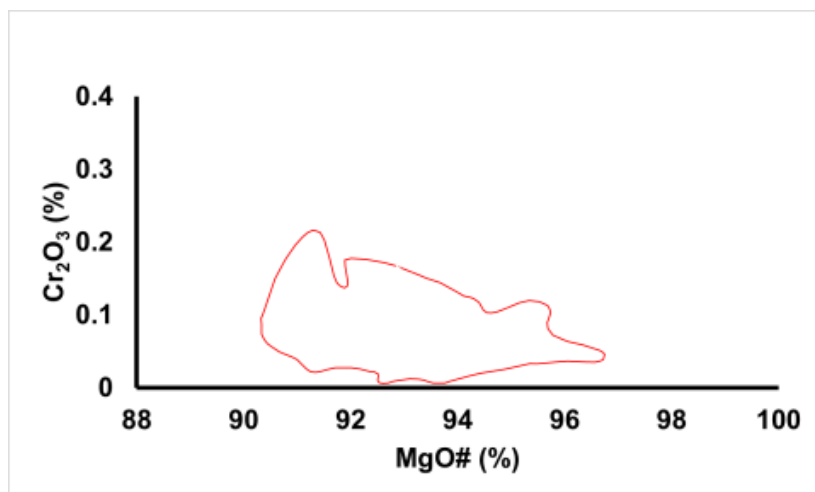


Fig. 3 – Diagrama  $\text{MgO}\#$  x  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  com o campo que engloba inclusões de olivina em diamante (fonte: modificado de FIPKE *et al.*, 1995).



Giuliani *et al.* (2023) propõem o uso da composição química da olivina para sugerir o teor de diamantes. Eles observaram que os cristais enriquecidos em Mg# e pobres em CaO são correlacionáveis com kimberlitos ricos, que refletem uma litosfera pouco metassomatizada. Esta análise torna-se bastante útil, podendo ser usada preliminarmente em corpos reconhecidamente diamantíferos, mas ainda com seu teor desconhecido. Assim, no caso de apontar para um depósito rico, embasará argumentos que defendem maiores investimentos em projetos de pesquisa mineral.

### 3.3.2 Piroxênio

Entre os piroxênios, o Cr-diopsídio esverdeado assume um importante papel como mineral indicador, embora a variação nos tons de verde e sua presença em outras litologias possam dificultar a procura por kimberlitos (QUIRT, 2004; SIMANDL *et al.*, 2005). Além do clinopiroxênio, sabe-se que o ortopiroxênio também pode ser uma fase mineral importante para os trabalhos de prospecção de diamante por meio, por exemplo, da análise da relação entre as concentrações de MgO# e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, como mostrada por Fipke *et al.* (1995) (figura 4).

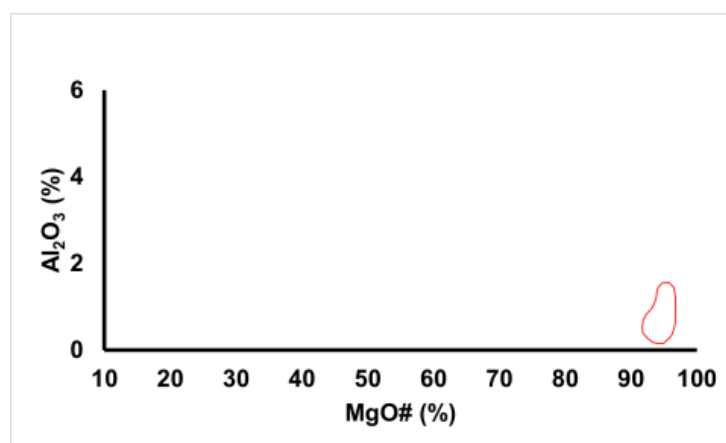


Fig. 4 – Diagrama MgO# x Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com o campo que engloba inclusões de ortopiroxênio em diamante (fonte: modificado de FIPKE *et al.*, 1995).

### 3.3.3 Granada

Sabe-se que a granada é um dos principais indicadores de kimberlito/diamante (*e.g.*, GURNEY, 1984; TOMPKINS, 1987; SIMAKOV e STEGNITSKIY, 2021; MUAVHI e TESSEMA, 2021b; MAHON *et al.*, 2022) e, de acordo com Provenzano (2016), esse

mineral ocorre em diferentes porcentagens, tamanhos e cores no kimberlito. Além disso, considera-se o piropo rico em Cr, cuja cor varia entre vermelha, laranja e lilás/roxa de grande interesse para as campanhas de prospecção (PROVENZANO, 2016).

Schulze (2003) publicou um estudo que permite a classificação de granadas, tendo como base a análise química de milhares de amostras provenientes de xenólitos ultramáficos de kimberlito e centenas de análises de amostras crustais. A partir deste trabalho, é possível determinar a sua proveniência avaliando os elementos Mg, Fe e Ca (figura 5A), auxiliando nos trabalhos de investigação que desejam excluir granadas crustais, buscando por granadas mantélicas eclogíticas e hazburgíticas de baixo Ca. O trabalho de Grütter *et al.* (2004), com base na % de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e CaO (figura 5B), divide os cristais em G10, G9, G12, G1, G4, G5, G3 e G0. Os autores observaram que as granadas do tipo G10, G5, G4 e G3 podem ser interessantes para trabalhos de pesquisa, pois refletem uma forte associação geoquímica e petrológica com os cristais de diamante.

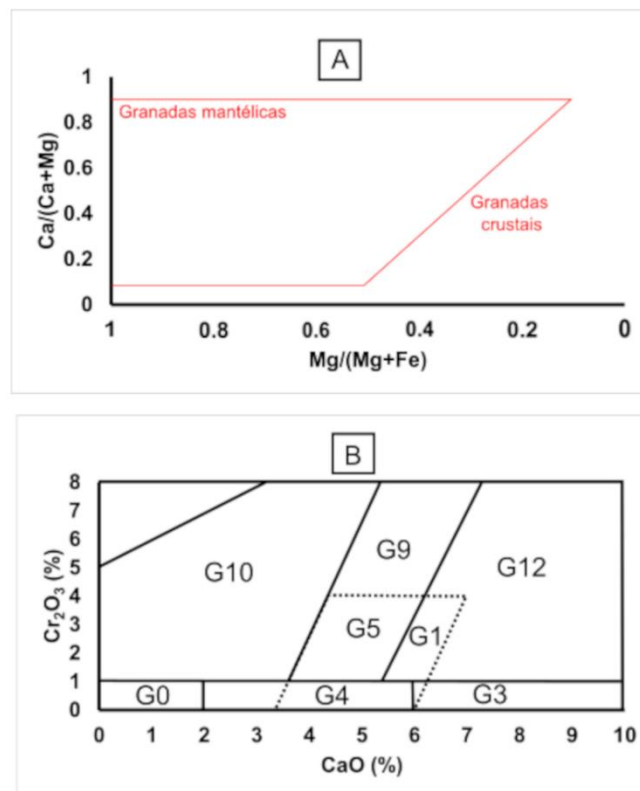


Fig. 5 – (A) Diagrama  $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}) \times \text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Mg})$  para distinguir granadas mantélicas das crustais (fonte: modificado de SCHULZE, 2003). (B) Diagrama  $\text{CaO} \times \text{Cr}_2\text{O}_3$  para a classificação das granadas (fonte: modificado de GRÜTTER *et al.*, 2004).

### 3.3.4 Espinélio

Na procura por kimberlito/diamante, usam-se também cristais de espinélios, especialmente de cromita. Aplicam-se os diagramas  $\text{TiO}_2 \times \text{Cr}_2\text{O}_3$  (figura 6) e  $\text{MgO} \times \text{Cr}_2\text{O}_3$  (figura 7), ambos de Fipke *et al.* (1995). Também, pode-se usar o trabalho de Nowicki *et al.* (2007), que delimita dois campos com base na concentração de  $\text{MgO}$  e  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (figura 8A), um para minerais de concentrado kimberlítico e o outro para inclusões em diamantes, sendo este último caracterizado pelo elevado teor de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Além disso, há o diagrama  $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg}) \times \text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$  montado por Mitchell (1986) (figura 8B), em que a região que engloba os cristais de espinélios, que indicam a ocorrência de diamante, apresenta elevados valores de  $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ .

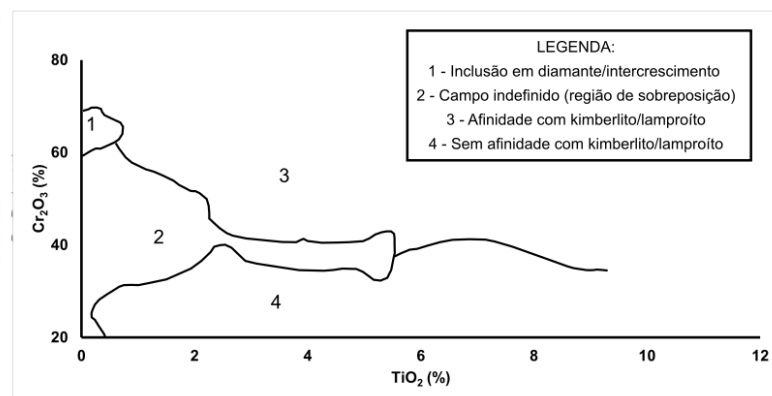


Fig. 6 – Diagrama  $\text{TiO}_2 \times \text{Cr}_2\text{O}_3$  aplicado no estudo de cristais de espinélio em campanhas de prospecção de kimberlito/diamante (fonte: modificado de FIPKE *et al.*, 1995).

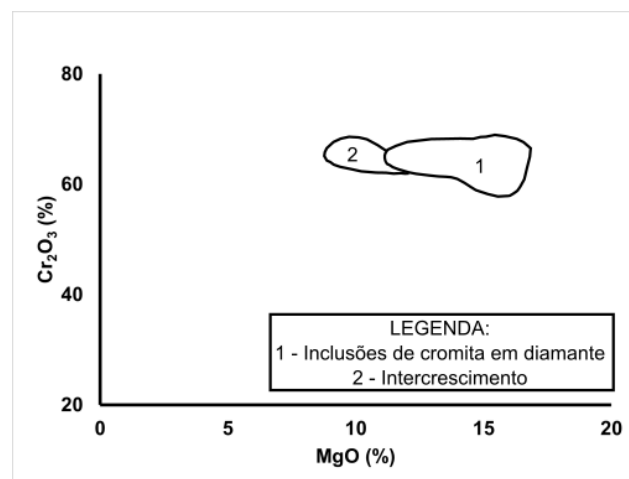


Fig. 7 – Diagrama  $\text{MgO} \times \text{Cr}_2\text{O}_3$  usado no estudo de cristais de cromita em campanhas de prospecção de kimberlito/diamante (fonte: modificado de FIPKE *et al.*, 1995).

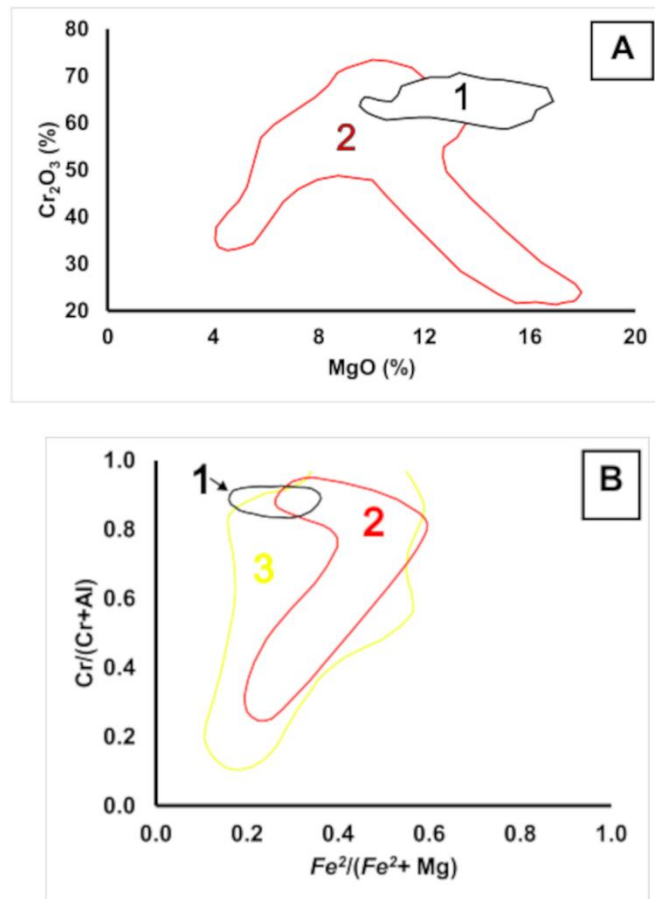


Fig. 8 - (A) Diagrama MgO x Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para espinélio (legenda: (1) espinélios como inclusões em diamante e (2) espinélios oriundos de kimberlito) (fonte: modificado de NOWICKI *et al.*, 2007) (campo das inclusões em diamante (1) desenhado manualmente com base nos dados de NOWICKI *et al.*, 2007). (B) Diagrama Fe<sup>2</sup>/(Fe<sup>2</sup>+Mg) x Cr/(Cr+Al) (legenda: (1) inclusões de espinélio em diamante e espinélios provenientes de (2) kimberlito e (3) de xenólitos em kimberlito (fonte: modificado de MITCHELL, 1986).

Em Griffin *et al.* (1993), é possível notar a composição de inclusões de espinélios em diamantes levando em conta as concentrações (%) de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> e Mg/(Mg+Fe). Neste trabalho, observou-se que a porcentagem de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é elevada nessas inclusões e, em contrapartida, o TiO<sub>2</sub> é mais baixo.

### 3.3.5 Ilmenita

A ilmenita é um alvo muito almejado em campanhas de prospecção e tornou-se um dos principais minerais usados para rastrear kimberlitos e eventuais mineralizações de diamante (*e.g.*, CASTILLO-OLIVER *et al.*, 2017; NASCIMENTO *et al.*, 2018; ROBLES-CRUZ *et al.*, 2009; CARMODY *et al.*, 2014; KARGIN *et al.*, 2020;

MUAVHI e TESSEMA, 2021b; MAHON *et al.*, 2022). Se houver a recuperação de grãos do mineral de fontes secundárias, isto é, que foram removidos da rocha matriz, é importante definir sua origem e, neste sentido, pode-se usar o trabalho de Wyatt *et al.* (2004) (figura 9), que permite separar os cristais de origem não kimberlítica daqueles encontrados em kimberlitos, baseando-se nas suas concentrações de MgO e TiO<sub>2</sub>. Adicionalmente, esses autores também mencionam que o teor de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é mais baixo em ilmenita não kimberlítica.

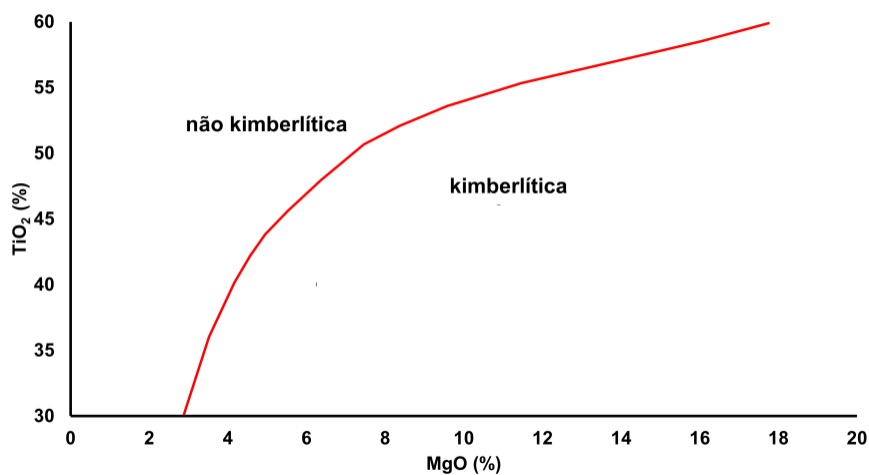


Fig. 9 – Curva para definir a origem da ilmenita (fonte: modificado de WYATT *et al.*, 2004)

Um estudo empírico foi realizado por Carmody *et al.* (2014) no qual observaram que a relação Nb/Ta versus Zr/Nd em cristais de ilmenita pode ser usada para indicar o potencial diamantífero, destacando que  $Zr/Nd = 0,37$  é o limite acima do qual se encontram os kimberlitos ricos. Além disso, usa-se a relação MgO x Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na qual se definem duas tendências: de oxidação e de redução, destacando que a preservação do diamante é favorecida nesta última (*e.g.*, SIMAKOV e STEGNITSKIY, 2022) (figura 10). De forma complementar, cita-se a proposta de Gurney e Zweistra (1995), que se baseia nos teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MgO (figura 11), indicando campos favoráveis ou não à mineralização. Neste trabalho, foram delimitadas diferentes regiões que avaliam o grau de preservação do diamante, que é máximo quando são detectados altos teores de MgO e baixos teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. De acordo com Gurney *et al.* (1993), cristais de ilmenita cuja composição é caracterizada por uma baixa relação Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> podem ser associados a altos teores de diamante.

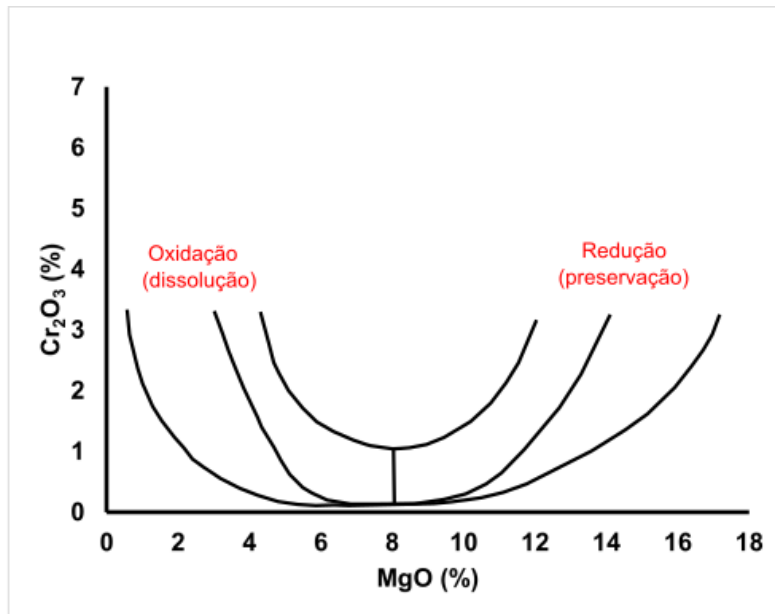


Fig. 10 – Gráfico MgO x Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para avaliar as condições de preservação ou não do diamante com base na composição da ilmenita (fonte: modificado de SIMAKOV e STEGNITSKIY, 2022).

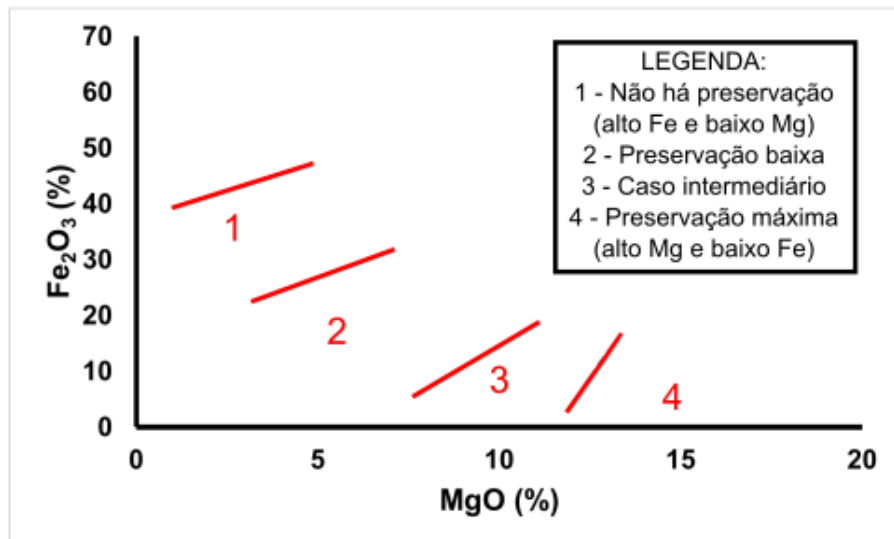


Fig. 11 – Gráfico MgO x Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para avaliar as condições de preservação ou não do diamante baseando-se na composição da ilmenita (fonte: modificado de GURNEY e ZWEISTRA, 1995).

### 3.4 Breve panorama brasileiro de prospecção de kimberlitos/diamantes

O quadro de prospecção/exploração de kimberlitos brasileiros ainda tem várias lacunas a serem preenchidas, apesar dos muitos esforços para expandir as informações sobre a localização e características das intrusões do país, visando apontar as possíveis fontes primárias do diamante. A exploração do diamante no Brasil

teve início no século XVIII e sua extração ocorreu primordialmente a partir de depósitos detríticos na região de Diamantina, em Minas Gerais (SVISERO e CHIEREGATI, 1990; CHAVES *et al.*, 2009). Considera-se tardio o rastreamento de fontes primárias, mesmo com mais de uma dezena de províncias já conhecidas espalhadas pelo país (SVISERO e CHIEREGATI, 1990).

No século XX, no fim da década de 1960, iniciou-se a busca por fontes primárias no país com a criação da SOPEMI, culminando, nove anos depois, no rastreamento de intrusões kimberlíticas na região de Coromandel. Em 1980, a SOPEMI foi incorporada ao grupo De Beers, encontrando novos corpos aparentemente sem importância econômica. Este grupo, de 1968 a 2005, foi responsável pela descoberta de boa parte das intrusões brasileiras (CHAVES *et al.*, 2008, 2009, 2014). O desenvolvimento do projeto “Diamante Brasil” (e.g., CABRAL NETO *et al.*, 2017) pelo Serviço Geológico do Brasil é, certamente, um dos trabalhos mais importantes dentro do campo de pesquisa de rochas kimberlíticas no país. De acordo com Cabral Neto *et al.* (2017), existem pelo menos nove empresas que podem ser relacionadas com a busca por rochas brasileiras, sendo De Beers, CPRM, BP, Prospec, Rio Tinto, Blackswan, Brazillian Diamonds, Vendome Mine e Vaaldiam.

No campo de Braúna, Bahia, mais de duas dezenas de kimberlitos do pré-cambriano foram encontradas por meio de dados geofísicos, que envolvem, por exemplo, propriedades magnéticas e gravimetria, aliados ao uso de minerais indicadores de kimberlito (DONATTI-FILHO *et al.*, 2013).

Em Rondônia, Mahon *et al.* (2022) estudaram a composição química de minerais indicadores (granada e ilmenita) provenientes de sedimentos de corrente e solos a fim de verificar a fertilidade da intrusão kimberlítica de Ariqueemes, concluindo que é estéril.

Além disso, no sudoeste de Goiás, Tompkins (1987) coletou minerais de sedimentos de corrente e, com base no teor de Cr e Ca da granada piropo, indicou-se a presença de um provável kimberlito sem importância econômica (estéril). Complementarmente, pode-se citar o trabalho de Chaves (2012) sobre o kimberlito Vargem-1, localizado a sudeste de Coromandel, MG, que apresentava uma composição química que não sugeria mineralização e, todavia, recuperou-se diamante ao coletar *bulk sample* de uma cava.

A pesquisa de kimberlito no Brasil ainda é um tópico controverso e, talvez um dos principais exemplos que alimentam a ideia de que se deve reavaliar o potencial diamantífero de algumas intrusões do país seja o trabalho de Pisani *et al.* (2001), que investigou a província kimberlítica de Braúna, na Bahia. Os autores reportam que a fase inicial de pesquisa ocorreu em 1980 pela De Beers Brasil e a metodologia adotada, que envolvia amostras de baixa densidade e baixo volume, retornou um resultado negativo. No entanto, com alterações na metodologia de investigação, identificaram-se os corpos Braúna 1, Braúna 2 e Braúna 3, cuja química já indicava a mineralização de diamante.

De modo geral, tem sido usada a integração de métodos de prospecção no país. Em Minas Gerais, devido à utilização do método aeromagnético, identificaram-se muitos corpos de kimberlito e rochas afins (PEREIRA, 2001) e um dos métodos mais empregados consistiu na recuperação dos chamados minerais indicadores de kimberlito (MIK) (CABRAL NETO *et al.*, 2017). Um outro exemplo é o trabalho de Silva *et al.* (2016) que estudaram a origem do diamante do Distrito Diamantífero Abaeté, em MG, por meio de levantamentos magnéticos e estudos de campo e da geologia. Os resultados desse trabalho reforçaram a teoria de fontes primárias na região, apontando a possível localização dos kimberlitos.

Além disso, uma outra questão que se levanta sobre as intrusões brasileiras diz respeito aos critérios usados nos estudos petrográficos, abrindo possibilidades de se rever sua classificação, vide intrusão Abel Régis, em MG, que foi considerada kimberlito, mas que carrega características de lamproíto (CHAVES *et al.*, 2009).

### **3.5 Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP) e o kimberlito Douradinho-11**

Às margens do Cráton do São Francisco, localiza-se a Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP) (figura 12), que é desenhada por um contexto geológico datado do cretáceo, com um volume superior a  $20 \times 10^5 \text{ km}^3$ , que se formou a partir de um dos maiores eventos de magmatismo potássico/máfico do mundo (GIBSON *et al.*, 1995; GOMES e COMIN-CHIARAMONT, 2005). Há diversos corpos ígneos de idades variadas, como *pipes*, diatremas, diques, entre outros, com litotipos que incluem kimberlitos (~ 91 a 80 Ma, GUARINO *et al.*, 2013), lamproítos, carbonatitos, kamafugitos (~ 81 a 78 Ma, GUARINO *et al.*, 2013) e melilititos (GIBSON *et al.*, 1995).



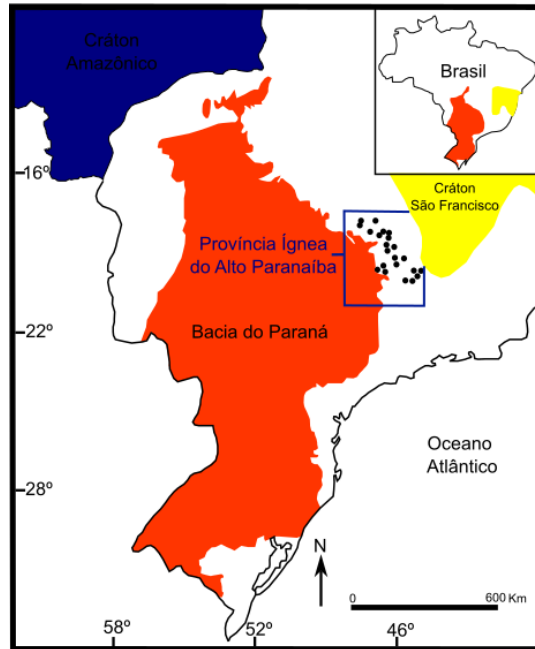


Fig. 12 - Província Ígnea do Alto Paranaíba (legenda: círculos representam complexos do Cretáceo) (fonte: modificado de GIBSON *et al.*, 1995).

De acordo com Araujo *et al.* (2001), que nomeiam a PIAP como Província Alcalina do Alto Paranaíba, das dezenas de amostras analisadas, os kamafugitos predominam fortemente (atingindo 85%) em relação aos kimberlitos (15%) e, além disso, esses autores mencionam que dados isotópicos sugerem que essas rochas estão conectadas geneticamente. Também, há indícios de assimilação crustal em corpos da província, gerando kimberlitos anômalos (*e.g.*, AZZONE *et al.*, 2022).

As fontes mantélicas dessas rochas, cuja formação foi relacionada com a pluma mantélica de Trindade, foram associadas ao manto litosférico subcontinental, devido às razões baixas de  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  e altas de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  juntamente com as elevadas concentrações de elementos-traço incompatíveis e razões La/Yb (GIBSON *et al.*, 1995). Segundo Guarino *et al.* (2013), as rochas da PIAP apresentam características que sugerem uma origem na zona de baixa velocidade do manto superior, com influências variadas do manto litosférico, sem conexão geoquímica ou isotópica com as plumas Tristão da Cunha ou Trindade-Martin Vaz.

No contexto da PIAP, O kimberlito diamantífero Douradinho-11 aflora em drenagem no oeste do estado de Minas Gerais, no Supercampo Kimberlítico Coromandel - Três Ranchos (SCKCTR), cuja área é de 11.600 km<sup>2</sup>, próximo a garimpos de diamante (CABRAL NETO *et al.*, 2017). O corpo tem a forma de um

dique, com área não determinada, encaixado em xisto, apresentando como minerais indicadores (KIM, *Kimberlite Indicator Minerals*) a ilmenita, a granada e o próprio diamante (CABRAL NETO *et al.*, 2017). A intrusão está inserida na Faixa Brasília, na província tectônica Tocantins (CABRAL NETO *et al.*, 2017), exibe uma textura brechada com cristais de olivina arredondados e flogopita subarredondada, cuja mineralogia da matriz, obtida por difração de raios X, é formada por lizardita, magnetita e flogopita (PASIN, 2008). No mapa litoestratigráfico da figura 13, pode-se visualizar a localização do kimberlito em relação à cidade de Coromandel, no oeste de MG.

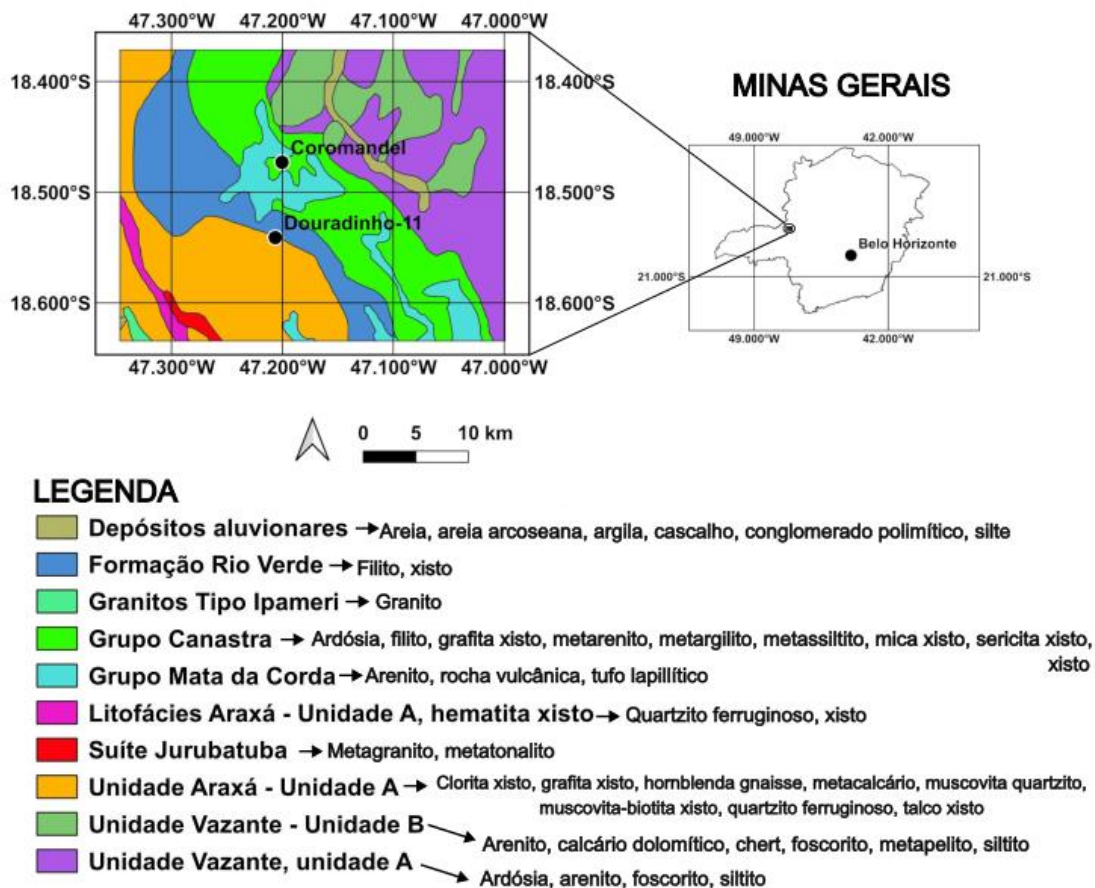


Fig. 13 – Mapa litoestratigráfico (escala original 1:1.000.000) da região na qual se localiza o Douradinho-11. Base de dados: Serviço Geológico do Brasil – CPRM – GeoSGB, 2004 (adaptado), disponível em: <https://geosgb.sgb.gov.br/>, acesso em 18 de agosto de 2024). O limite de Minas Gerais (adaptado) foi extraído de <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>, acesso em 18 de agosto de 2024).

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Amostragem e confecção das lâminas delgadas**

Para o desenvolvimento deste trabalho, amostras do kimberlito foram cedidas pela professora Cassandra Terra Barbosa (DEGEO/EM/UFOP), que as coletou em campo. Confeccionaram-se sete (7) lâminas delgadas no laboratório de laminação do DEGEO.

### **4.2 Descrição macroscópica e teste com ácido clorídrico**

As amostras foram descritas observando suas características macroscópicas e, no laboratório de microscopia do DEMIN/EM/UFOP, utilizou-se do microscópio estereoscópio QUIMIS (lupa) para auxiliar na descrição. No laboratório de mineralogia do DEGEO, fez-se um teste simples com ácido clorídrico 10% (HCl), a frio, para verificar a existência de carbonatos.

### **4.3 Descrição ao microscópio petrográfico, fotomicrografias e ImageJ**

Nos laboratórios de microscopia do DEGEO, estudaram-se as sete lâminas delgadas com microscópios petrográficos das marcas ZEISS e OLYMPUS, luz transmitida, plana e plano-polarizada. No microscópio OLYMPUS, trabalhou-se também com luz refletida para o estudo dos minerais opacos. No Laboratório de Microscopia e Microanálises (LMic) do DEGEO, fotomicrografias das lâminas foram obtidas com uma câmera ZEISS AxioCam MRc 5 acoplada ao microscópio LEICA DMLP. Por meio do aplicativo gratuito ImageJ (<https://imagej.net/>), determinou-se o tamanho dos cristais, enquanto a análise modal foi feita de forma qualitativa, por estimativas visuais.

### **4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Selecionaram-se áreas específicas das seções delgadas que abrangem cristais de olivina, ilmenita, flogopita, espinélio, piroxênio, veio de carbonato e a matriz para a determinação de sua composição química com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), do modelo JSM6510 JEOL, ao qual tem-se acoplado um detector de Energia Dispersiva de Raios X (EDS), Pentaflex - INCA EDS - *Oxford Instruments*. As amostras foram cobertas com uma fina camada de carbono, uma vez que não se

trata de material condutor, a fim de que as análises pudessem ser realizadas. O MEV/EDS, no LMic (DEGEO), operou nas seguintes condições: *spot size*: 66 ou 67, distância de trabalho: 15 mm e voltagem: 20 kV. Realizaram-se análises químicas pontuais no núcleo e borda dos cristais, obtendo-se resultados na forma de % em peso dos óxidos dos elementos identificados, além dos espectrogramas gerados em cada ponto analisado e das imagens de elétrons retroespalhados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Petrografia

As amostras de mão do kimberlito (figura 14) estão relativamente frescas, exibindo uma camada delgada de alteração amarelada, com algumas cavidades possivelmente derivadas da dissolução de carbonatos. A matriz rochosa finamente granulada e de coloração verde acinzentada está associada a macrocristais de olivina, opacos e agregados maiores de cristais brancos e verdes, caracterizando um kimberlito de textura inequigranular. Não foram registrados diamantes. Observaram-se xenólitos crustais (enclaves brancos a esverdeados com carbonatos (figura 14A) de até 4,2 cm e, eventualmente, registrou-se um agregado com moscovita de ~ 1,5 cm). A identificação precisa de alguns componentes do kimberlito foi dificultada pela sua alteração e/ou por sua granulação fina. Muitos cristais arredondados de olivina apresentam um material mais escuro, provavelmente óxidos de Fe derivados do seu intemperismo (figuras 14A e 14B). Os opacos estão presentes em tamanhos variados. A utilização de HCl demonstrou a presença de carbonato na matriz e em agregados, os quais incluem os xenólitos crustais já mencionados.

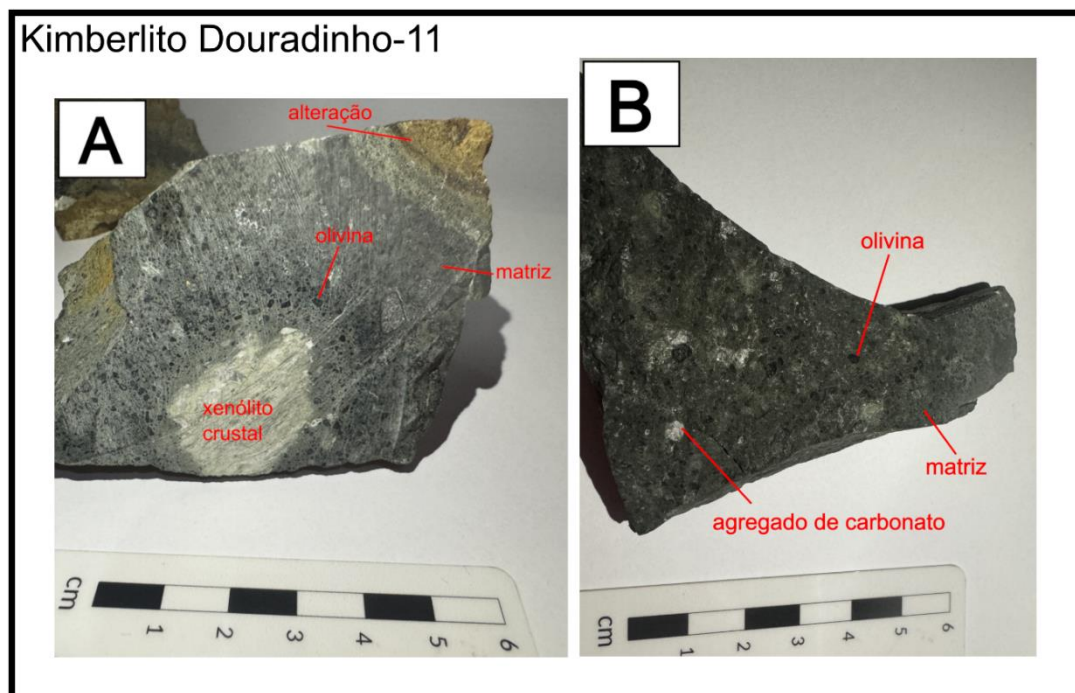


Fig. 14 – Amostras do Douradinho-11 com (A) xenólito crustal e (B) agregado de carbonato

Ao microscópio petrográfico, a textura inequigranular do kimberlito ficou mais evidenciada e identificaram-se cristais de flogopita, olivina, opacos, piroxênio, carbonatos e espinélio avermelhado. As fases minerais que constituem a matriz, que se apresenta amarelada/esverdeada ao microscópio, foram identificadas por microanálises químicas (MEV/EDS).

Os xenólitos crustais ricos em carbonatos (figura 15) têm um formato mais anguloso e, em contrapartida, os xenólitos mantélicos formados principalmente por olivina, flogopita e opacos são mais arredondados. A presença de flogopita pode ser associada ao metassomatismo (e.g., NANNINI, 2011). Foram observados veios de carbonato secundário que atravessam algumas seções da rocha.

Os componentes do kimberlito foram descritos na tabela 1.

Tabela 1 - Descrição dos componentes do kimberlito Douradinho-11

Componente	Descrição
Olivina	Os cristais de olivina (figuras 16 e 17) exibem diversas formas, variando entre euédricos, subédricos a anédricos (incluindo os arredondados). Os níveis de alteração são muito variados, podendo encontrar núcleos frescos com bordas alteradas, bem como numerosos pseudomorfos constituídos de uma mistura complexa de serpentina, carbonato e opacos. Além disso, registraram-se alterações como bowlingita e iddingsita. Sob luz plana, a bowlingita se mostra verde e a iddingsita exibe um pleocroísmo entre vermelho e laranja. Há cristais isolados e em xenólitos mantélicos. Algumas olivinas apresentaram extinção ondulante, indicando deformação. - Intervalo de tamanho: 0,124 – 3,36 mm - Porcentagem: 19 %vol.
Flogopita	Os raros cristais de flogopita (figuras 17C e 18) são caracterizados por um pleocroísmo entre amarelo-pálido e amarelo-escuro (figura 18). As bordas geralmente estão alteradas. Há cristais

	<p>isolados e como constituintes de xenólitos mantélicos (figuras 19B e 19C).</p> <p>- Intervalo de tamanho: 0,422 – 0,624 mm.</p> <p>- Porcentagem: &lt; 1 %vol.</p>
Piroxênio	<p>O piroxênio (figura 16F) tem uma borda de reação amarelada. Os cristais estão isolados e em xenólito.</p> <p>Ao microscópio, a borda amarelada é muito comum entre os piroxênios, indicando que pertencem a uma mesma geração.</p> <p>- Intervalo de tamanho: 0,408 – 2,16 mm.</p> <p>- Porcentagem: &lt; 1 %vol.</p>
Carbonato	<p>Os cristais de carbonato estão presentes em microestruturas distintas (figuras 15A e 19A), aparecendo isolados, em agregados e em veios.</p> <p>- Porcentagem: 10 %vol.</p>
Espinélio avermelhado	<p>São cristais raros, cuja cor varia entre vermelha e laranja (figuras 17B e 20). Apresentam-se isolados ou em agregado, com núcleo fresco e, em algumas seções, com bordas alteradas.</p> <p>- Intervalo de tamanho: 0,181 – 1,161 mm.</p> <p>- Porcentagem: &lt; 1 %vol.</p>
Opacos	<p>Os opacos têm tamanhos distintos, mas se destacam os cristais de granulação muito fina. Apresentam-se isolados ou em agregados. Usando luz refletida e com auxílio do MEV, identificaram-se a ilmenita e a cromita.</p> <p>- Intervalo de tamanho: 0,128 – 0,876 mm</p> <p>- Porcentagem: 6 %vol.</p>
Xenólitos crustais	<p>Os xenólitos crustais observados em lâmina são constituídos principalmente por carbonatos (figura 15A). Não foram registrados xenólitos crustais ricos em moscovita como na amostra de mão. Apresentam-se angulosos.</p> <p>- Intervalo de tamanho: 0,713 – 21,04 mm.</p> <p>- Porcentagem: 8 %vol.</p>

Xenólitos mantélicos	Os xenólitos mantélicos (figuras 19B e 19C) são formados basicamente por olivina, flogopita e opacos, em diferentes proporções. Apresentam-se arredondados. - Intervalo de tamanho: 0,788 – 3,68 mm. - Porcentagem: < 1 %vol.
Magmaclastos	Os chamados magmaclastos (figuras 15B, 15C e 15D) não são muito abundantes na rocha e os poucos que foram encontrados têm núcleo formado por fragmentos dos xenólitos crustais circundado principalmente por material mais fino e escuro com cristais maiores de olivina alterados, com algum grau de alinhamento. - Intervalo de tamanho: 2,88 – 4,88 mm - Porcentagem: ~ 2 %vol.
Matriz	A matriz (~ 59 %vol.) é finamente granulada e os seus minerais constituintes foram apresentados na seção (5.2.1).

A mineralogia do Douradinho-11 é compatível com o que se espera para rochas classificadas como kimberlito (*e.g.*, SCOTT SMITH *et al.*, 2018; MITCHELL, 1986; MITCHELL, 1995), pois inclui fases como olivina, espinélio, carbonatos e opacos (ilmenita e cromita). Com base em Mitchell (1995), uma importante evidência mineralógica que afasta a possibilidade de a intrusão ser um orangeíto, apontando para a sua natureza kimberlítica, é a raridade da flogopita (< 1% vol.) que é mais comum nos orangeítos.

Sobre a presença de carbonatos, que representam um constituinte comumente encontrado em kimberlitos (*e.g.*, SILVA, 2008; MITCHELL, 1986), Castillo-Oliver *et al.* (2018) observam que a separação entre os cristais de origem primária e secundária, em alguns casos, pode não ser trivial, mesmo com a utilização de análise isotópica de Sr. Pode-se encontrá-los em diferentes texturas, como veios, carbonatos cristalizados em pseudomorfos de olivina, cristais que substituíram gerações anteriores, constituintes da matriz fina, ripas e segregações (CASTILLO-OLIVER *et al.*, 2018). No



Douradinho-11, os carbonatos foram identificados nos veios, isolados, nos produtos de alteração da olivina, na matriz, nos xenólitos crustais e em outros agregados.

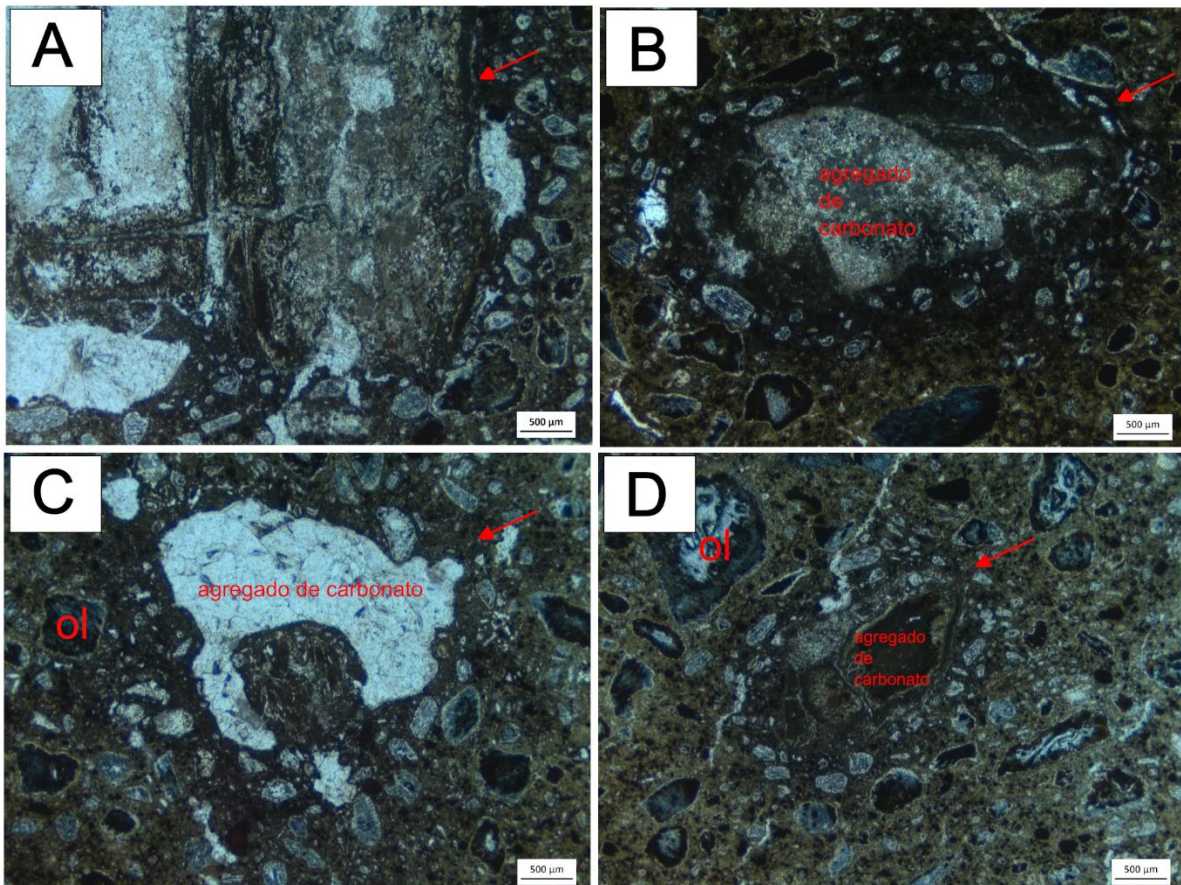


Fig. 15 – Fotomicrografias óticas, sob luz plana, em que (A) é um fragmento de xenólito crustal rico em carbonato, (B) (C) e (D) são magmaclastos em que o núcleo é constituído de agregado de carbonato. Note o alinhamento de alguns cristais de olivina (ol) alterados em redor de alguns núcleos. O núcleo em 15C difere-se do núcleo em 15B e 15D, que é constituído de carbonato muito fino. Pode-se ver a semelhança do xenólito crustal (A) com o núcleo dos magmaclastos.

Além disso, há uma conexão fortemente estabelecida entre os xenólitos crustais ricos em carbonatos com os magmaclastos encontrados na rocha (figura 15), os quais são formados por um núcleo derivado da fragmentação desses xenólitos, que foi envolvido por um material mais fino, de origem magmática, com cristais maiores de olivina, por vezes orientados. De acordo com Scott Smith *et al.* (2018), magmaclastos nucleados são corpos comuns em kimberlitos e representam uma associação entre o magma solidificado com os xenólitos, fenocristais e macrocristais. Também, Scott Smith *et al.* (2018) destacam que nem sempre é simples a separação dos magmaclastos de outros clastos kimberlíticos. Portanto, faz-se necessária uma

descrição mais aprofundada dessas estruturas enigmáticas do Douradinho-11, pois são muito relevantes na exploração de kimberlitos/diamantes, conforme Webb e Hetman (2021).

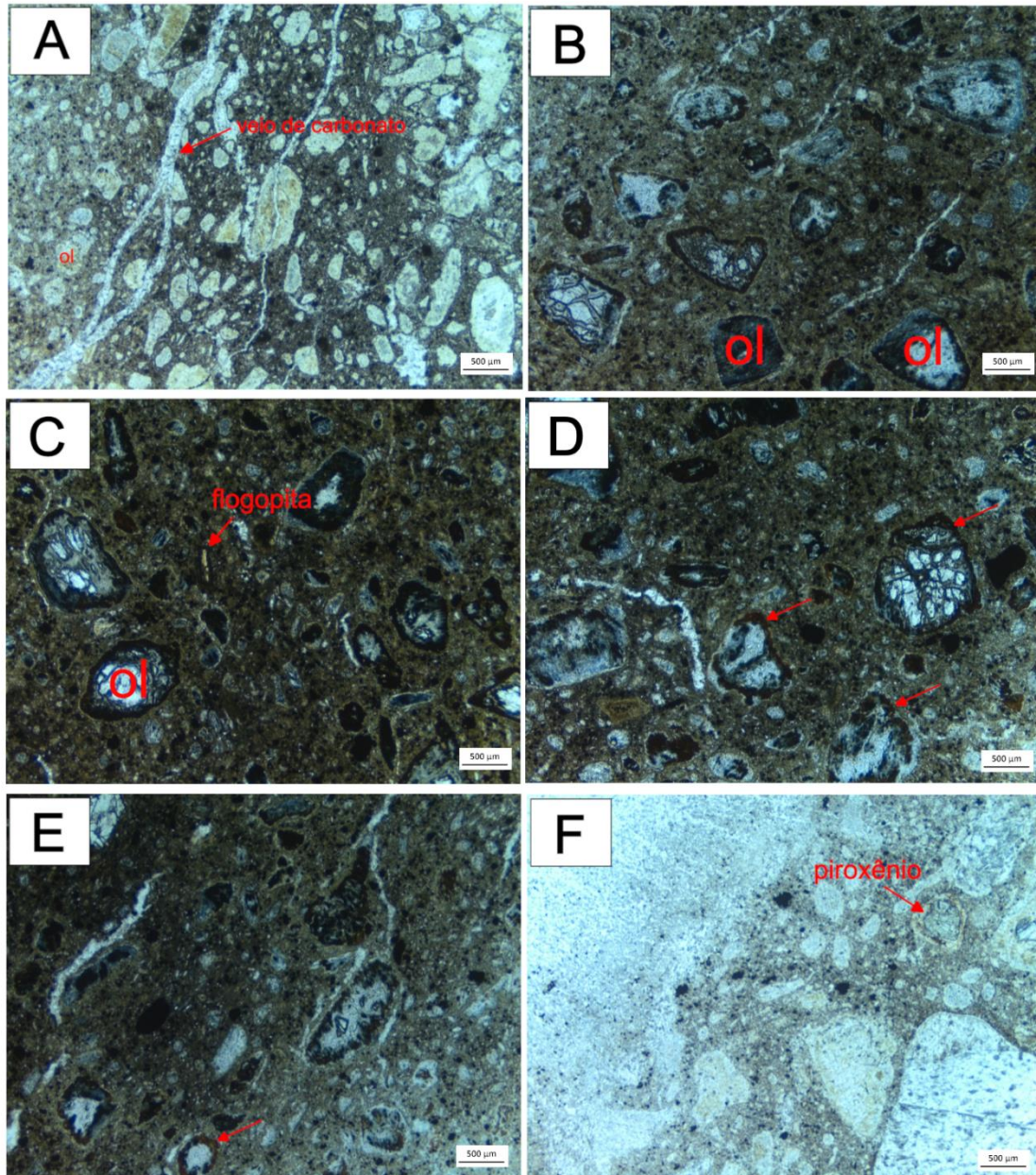


Fig. 16 – Fotomicrografias óticas, sob luz plana. Note a distribuição de cristais de olivina (ol) de diferentes tamanhos, formas e graus de alteração. (A) veios de carbonato, (B) cristais angulosos de olivina (C) cristal euédrico de olivina e flogopita, (D) olivina com as bordas alteradas para iddingsita (setas vermelhas) com leve a médio pleocroísmo entre vermelho e laranja, (E) olivina euédrica com borda de iddingsita (seta vermelha) e (F) piroxênio com borda de reação amarelada.

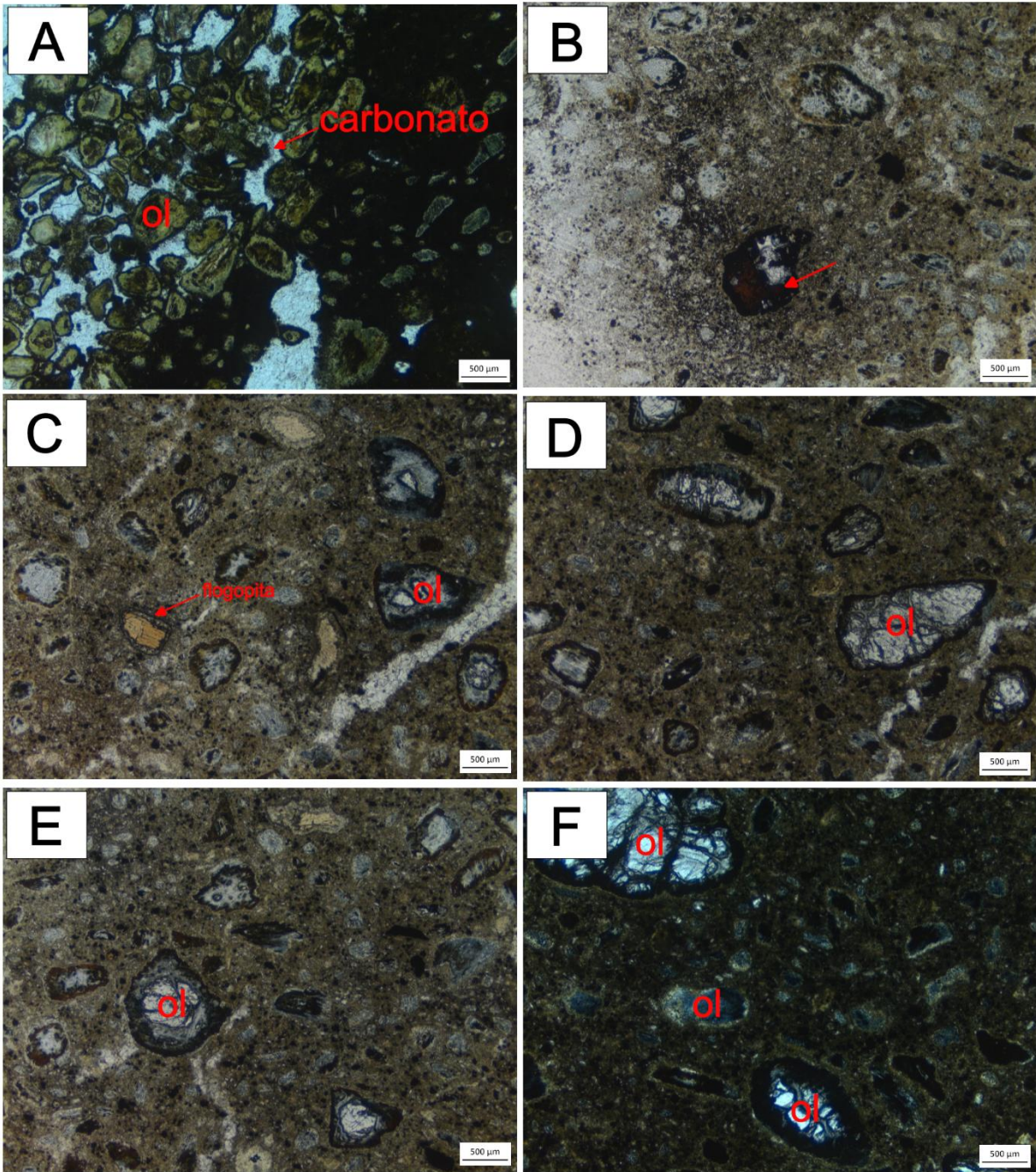


Fig. 17 – Fotomicrografias óticas, sob luz plana. (A) Cristais arredondados de olivina (ol) alterados para bowlingita em meio a cristais de carbonato, (B) agregado de cromita vermelha, (C) flogopita com borda alterada, (D) olivina angulosa, (E) olivina com núcleo fresco e (F) cristais de olivina com diferentes graus de alteração e olivina arredondada.

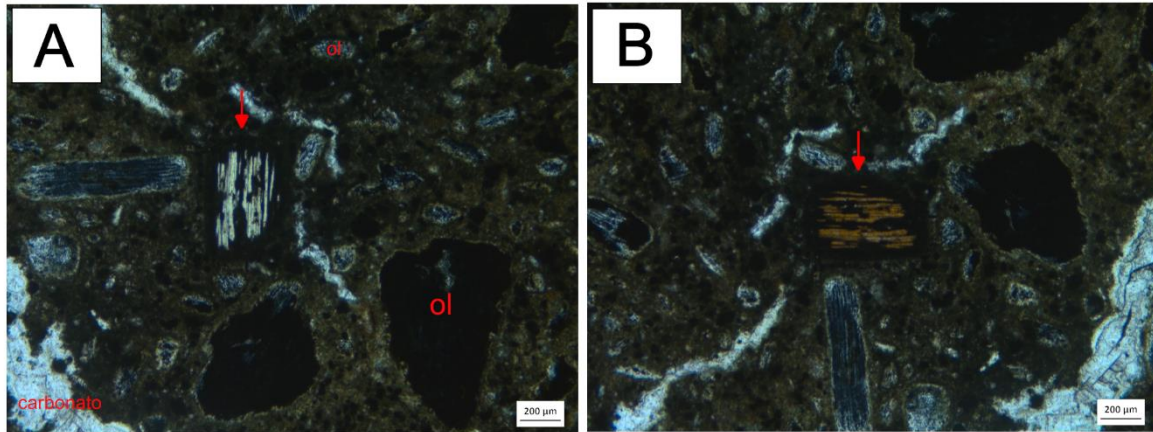


Fig. 18 – Fotomicrografias óticas demonstrando o pleocroísmo na flogopita (indicada pelas setas vermelhas) observado sob luz plana. (A) Flogopita com sua cor amarelo-pálido e (B) amarelo-escuro. Ao lado, alguns cristais de olivina (ol) alterados para serpentina, carbonato e opacos.

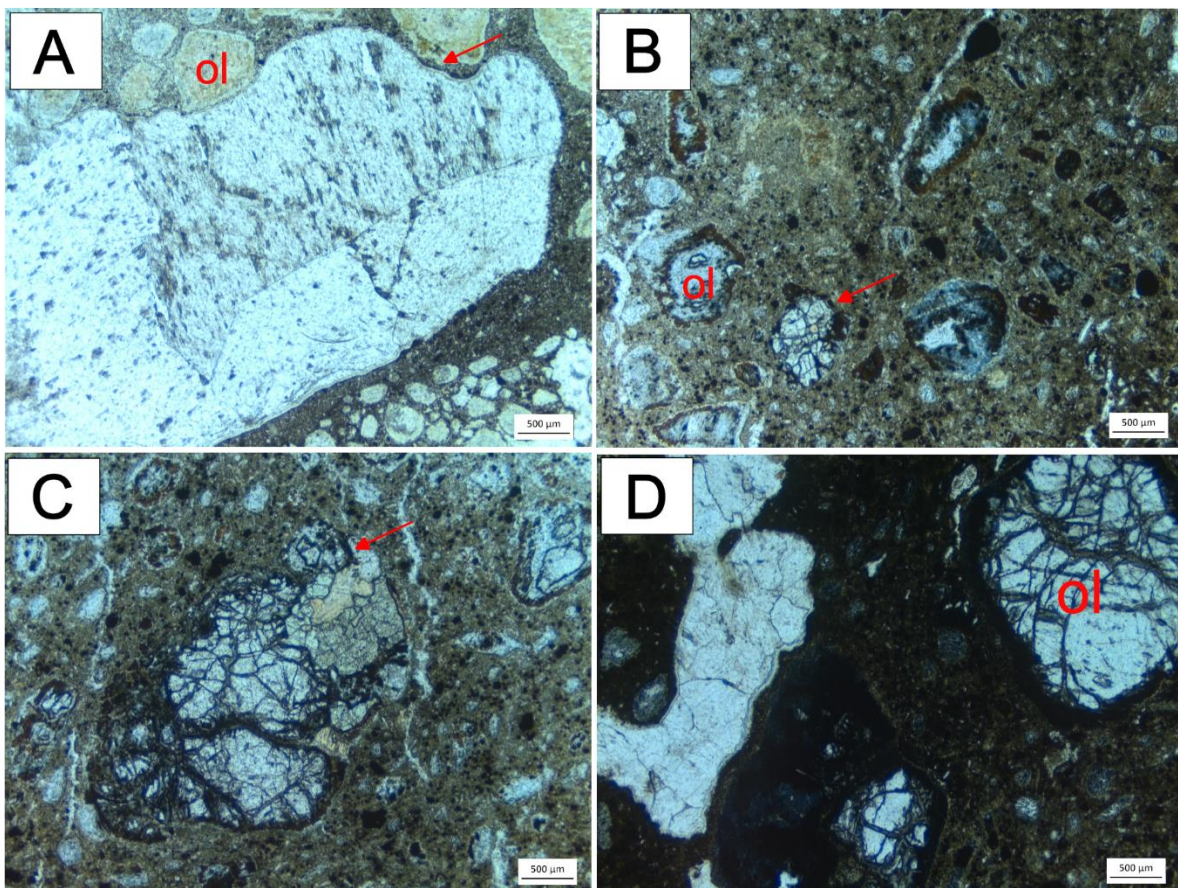


Fig. 19 – Fotomicrografias óticas, sob luz plana. (A) Agregado de carbonato (seta vermelha) e cristais de olivina (ol) alterados para bowlingita, (B) xenólito mantélico (seta vermelha), (C) xenólito mantélico arredondado e (D) macrocristal de olivina (ol).

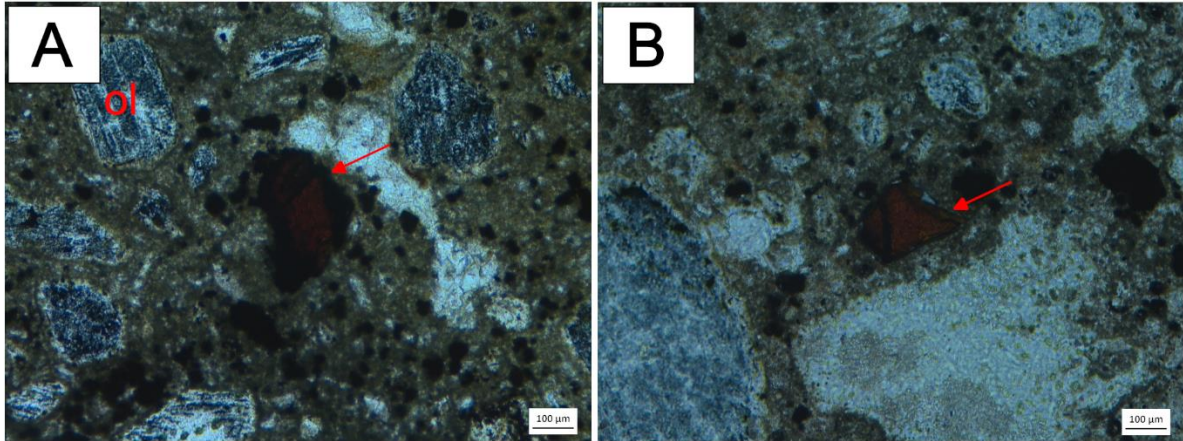


Fig. 20 – Fotomicrografias óticas, sob luz plana, de cristais de espinélio. O cristal em (A) tem a borda mais alterada do que em (B).

## 5.2 Química Mineral

### 5.2.1 Matriz

Microanálises químicas por MEV/EDS em minerais da matriz (figura 21) levaram à identificação de monticellita, apatita, badeleíta, calcita, cromita, magnetita, ilmenita e Mg-olivina. Um componente rico em Zn e Mg não foi identificado, podendo ser produto de alteração ou derivado de contaminação. Observou-se que o teor de Fe se destaca na Mg-ilmenita da matriz. A olivina apresenta elevada concentração de Mg.

Na monticellita, destacaram-se o Ca e o Mg e foram detectados os elementos Mn, Fe, Yb e P. A cromita encontra-se enriquecida em Fe, a magnetita contém elevado teor de Ca e de Mg e a calcita tem quantidades menores de Yb, W, Re, Si e Mg. A badeleíta contém Mg, Fe, Ca, Nb, Ir, Hf, Ti, Al e Si. Na apatita, também foram identificados os elementos Yb e Si.

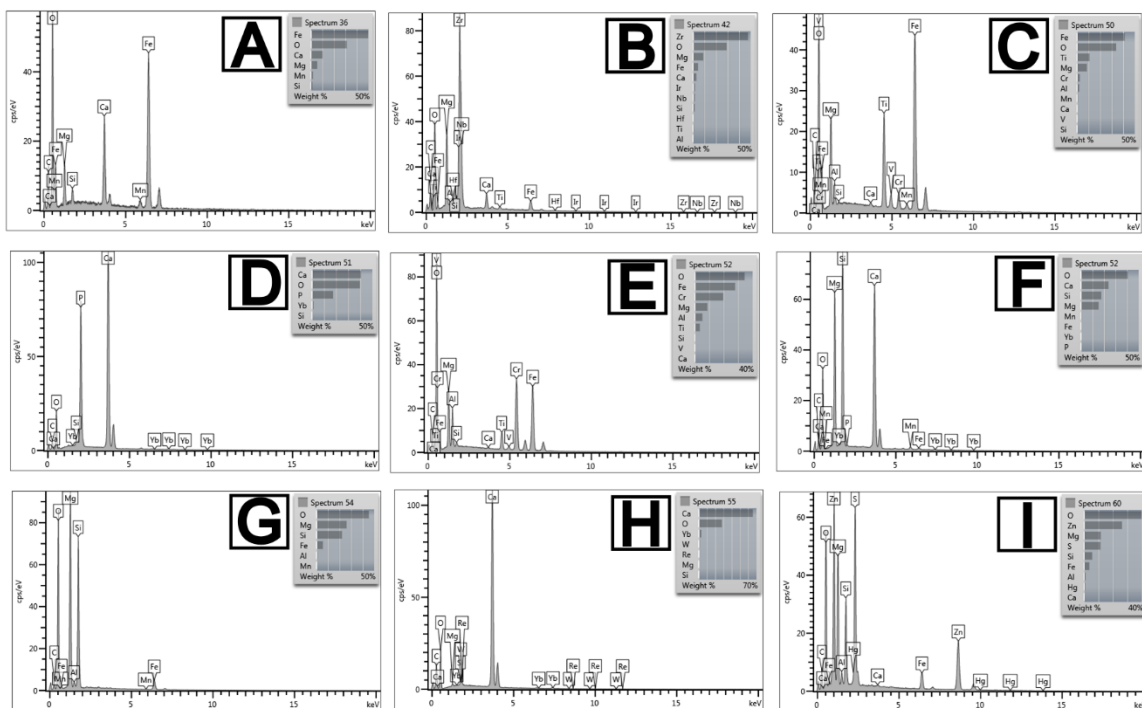


Fig. 21 – Espectros de EDS de pontos da matriz (A – magnetita; B – badeleíta; C – ilmenita; D – apatita; E – cromita; F – monticellita; G – Mg-olivina; H – calcita; I = fase rica em Zn e Mg).

Fipke *et al.* (1995) mencionam que a monticellita (Ca-olivina) é uma fase exclusiva do kimberlito, comparando-o com o lamproíto e, portanto, a identificação desse mineral na matriz do Douradinho-11 aponta para a sua natureza kimberlítica.

A badeleíta, um óxido de zircônio que pode ser usado na datação de rochas (*e.g.*, HUTTNER *et al.*, 2019), parece ser uma fase relativamente comum na matriz de kimberlitos da PIAP, pois também foi encontrada na intrusão Indaiá I (LIMA *et al.*, 2020). Além disso, com base em Mitchell (1995), a ausência de minerais como barita, quartzo e sanidina soma-se às evidências que levam à classificação do Douradinho-11 como kimberlito.

### 5.2.2 Ilmenita

O intervalo de composição do núcleo dos cristais pode ser verificado na tabela 2. O teor de MgO é elevado, atingindo 17,87 %. Ademais, notou-se que parte dos intervalos dos teores dos óxidos da ilmenita do Douradinho-11, exceto Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, sobrepõe-se àqueles encontrados por Chaves *et al.* (2008) em cristais de ilmenita oriundos do kimberlito diamantífero Canastra-1.

As figuras 22A, B, C, D, E e F trazem a relação entre os óxidos TiO<sub>2</sub> x Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> x FeO, FeO x Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> x Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO x MnO e FeO x MgO, respectivamente. Observou-se uma correlação positiva entre os elementos Mg e Mn e, por outro lado, uma correlação negativa entre Fe x Mg e Ti x Fe.

Além disso, a concentração de nitrogênio se destacou em várias análises (9,1 a 15,28 %), o que torna as ilmenitas deste kimberlito atípicas. Madiba *et al.* (1998), ao analisarem alguns cristais desse mineral provenientes de um *pipe* kimberlítico, encontraram uma elevada quantidade desse elemento (até 2%), que pode estar substituindo o oxigênio.

Madiba *et al.* (1998) cogitaram que a ilmenita pode ser a principal reserva de nitrogênio do manto terrestre, o que pode ter sido confirmado com os dados deste trabalho. No entanto, tendo em vista os elevados teores detectados, chegando a ultrapassar 10 % em peso do óxido em muitos cristais, recomendam-se estudos estruturais, bem como a confirmação desses resultados com o uso de microsonda eletrônica, pois o MEV/EDS pode sobrepor a concentração de diferentes elementos que apresentam o mesmo pico de energia.

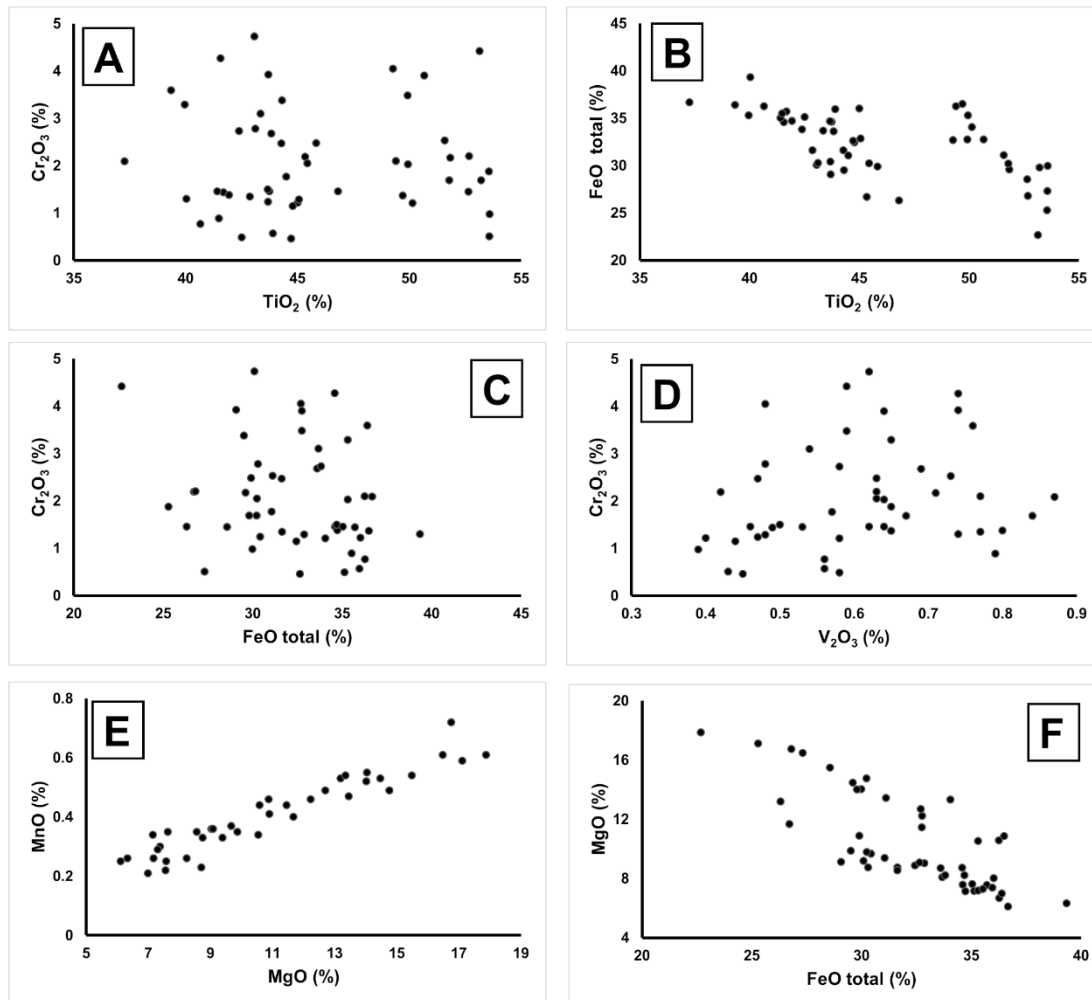


Fig. 22 - (A) TiO<sub>2</sub> x Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (B) TiO<sub>2</sub> x FeO, (C) FeO x Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (D) V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> x Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (E) MgO x MnO e (F) FeO x MgO para os cristais de ilmenita.

Para complementar, comparou-se a composição química da ilmenita do Douradinho-11 com inclusões em diamantes brasileiros (MEYER e SVISERO, 1973; KAMINSKY *et al.*, 2009) (tabela 2). O conteúdo em MgO é bem mais elevado nos cristais do kimberlito em estudo (alcançam 17,87 %) do que na inclusão estudada por Meyer e Svisero (1973), que nem atingiu 1%.

Por outro lado, a inclusão estudada por Kaminsky *et al.* (2009) não apenas apresentou o teor de MgO dentro do intervalo dos cristais do Douradinho-11, mas também contém V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Os teores de TiO<sub>2</sub> são compatíveis com a inclusão, porém o Cr e o Ca apresentaram-se fora do intervalo (teores mais baixos) em relação às ilmenitas desse estudo.



Tabela 2 – Intervalos de composição química de cristais de ilmenita, em % de peso dos óxidos, provenientes de kimberlitos e como inclusões em diamantes brasileiros.

%	<i>Douradinho-11</i> (Este trabalho)	<i>Ilmenitas do kimberlito Canastra-1</i> (CHAVES et al., 2008)	<i>Inclusão de ilmenita em diamante</i> (MEYER e SVISERO, 1973)	<i>Inclusão de ilmenita em diamante</i> (KAMINSKY et al., 2009)
MgO	6,11 – 17,87	8,61 – 14,11	0,16	9,33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2 – 0,4	0,44 – 0,53	0,15	0,86
TiO <sub>2</sub>	37,26 – 53,58	47,71 – 54,61	50,1	49,08
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,39 – 0,87			0,43
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,46 – 4,73	0,11 – 1,60	0,03	0,29
MnO	0,21 – 0,72	0,24 – 0,31	0,74	0,27
FeO	22,67 – 39,34	28,94 – 41,48	48	38,92
CaO	0,11 – 0,69	n.d.	<0,01	0,02
SiO <sub>2</sub>	0,17 - 0,21	n.d.	0,22	0,03
WO <sub>3</sub>	0,25 – 0,38			
BaO	0,76 – 1,26			
K <sub>2</sub> O				0,01
Na <sub>2</sub> O				0,02
ZnO				0,02
NiO				0,05
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,45			
Nitrogênio	9,1 – 15,28			

Na figura 23, pode-se notar que os teores de MgO e TiO<sub>2</sub> são compatíveis com a ilmenita oriunda de kimberlito, conforme a curva definida por Wyatt *et al.* (2004).

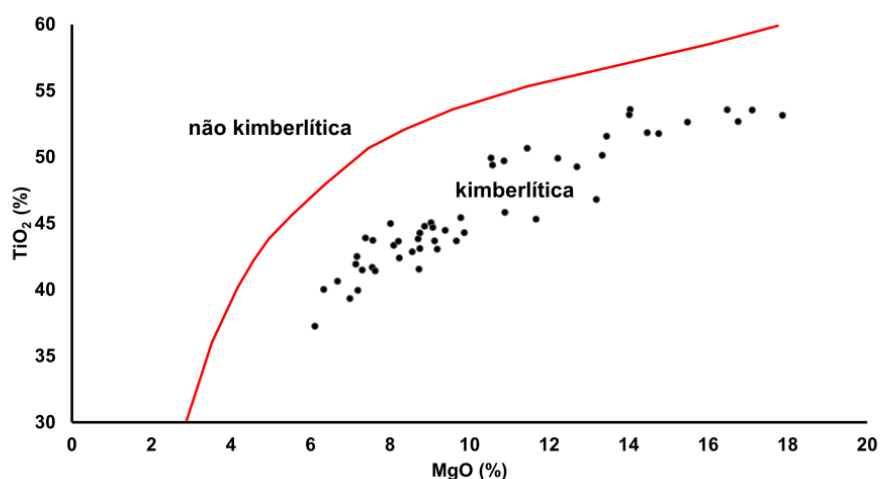


Fig. 23 - MgO x TiO<sub>2</sub> para a classificação da Mg-ilmenita em kimberlítica e não kimberlítica (fonte: modificado de WYATT *et al.*, 2004)

Além disso, com base na figura 24, que relaciona os teores de MgO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a fim de avaliar o potencial diamantífero, percebe-se que algumas análises caíram no campo de preservação do diamante e outras dentro do caso intermediário.

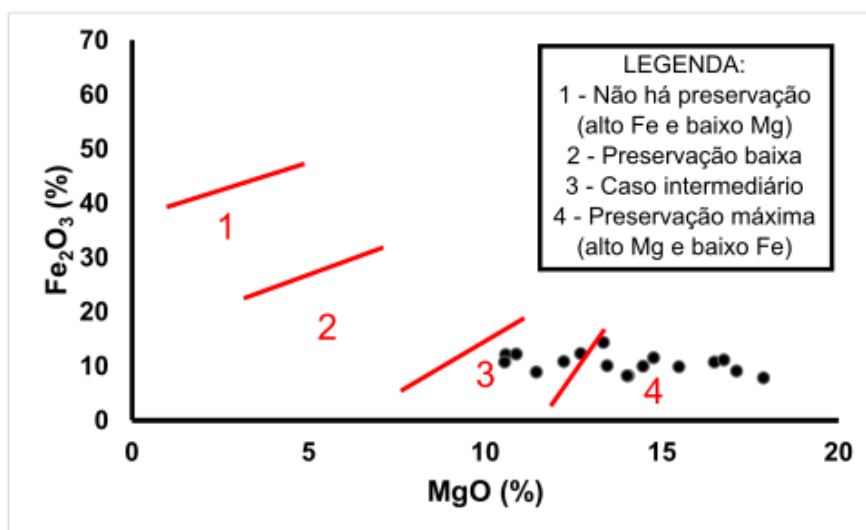


Fig. 24 – MgO x Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para avaliar as condições de preservação do diamante. Apenas os cristais nos quais não se detectou nitrogênio foram considerados. Calculou-se o teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a partir do FeO total (fonte: modificado de GURNEY e ZWEISTRA, 1995).

Na figura 25, utilizou-se da relação MgO e Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para avaliar a possibilidade de dissolução ou preservação dos diamantes. Observou-se que alguns cristais de ilmenita inserem-se no campo da redução, que favorece a preservação do diamante, o que corrobora a interpretação do gráfico da figura 24.

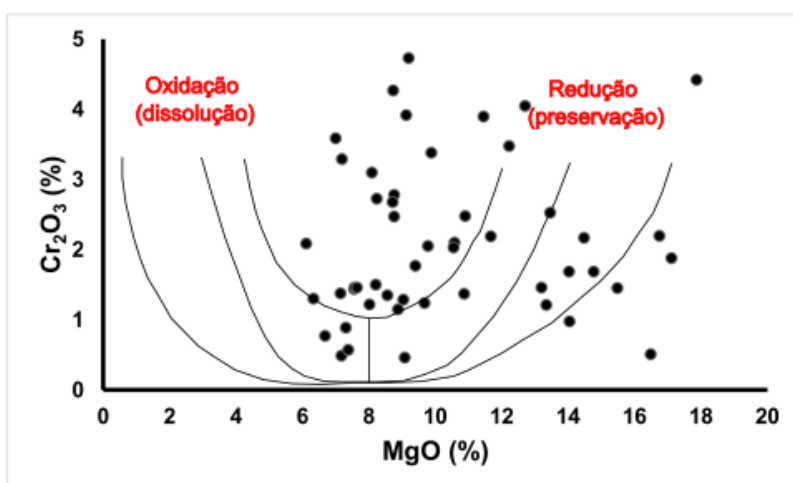


Fig. 25 – Gráfico MgO x Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, em que a condição de redução favorece a preservação de diamantes (Fonte: modificado de SIMAKOV e STEGNITSKIY, 2022).

Na figura 26, nota-se a presença de inclusão de badeleíta na borda e, na figura 27, a formação de titanita na região mais externa do cristal em contato com a matriz. A badeleíta apresentou, numa concentração mais baixa, os elementos Ir, Ti, Au, Fe e Hf. Na figura 26, nota-se que o FeO se destacou mais na borda do que no núcleo.

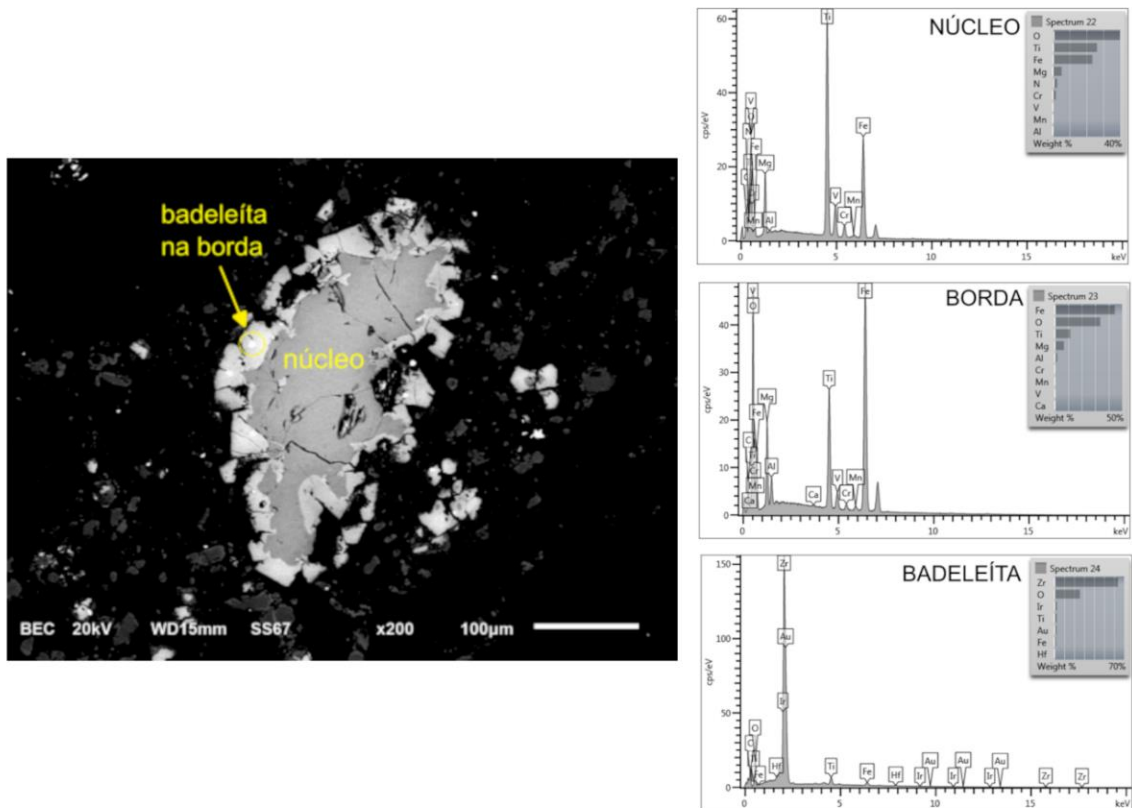


Fig. 26 - Imagem de elétrons retroespalhados (MEV) do cristal de ilmenita zonado. À direita, os espectros de EDS mostram a composição do núcleo, da borda e da inclusão de badeleíta.

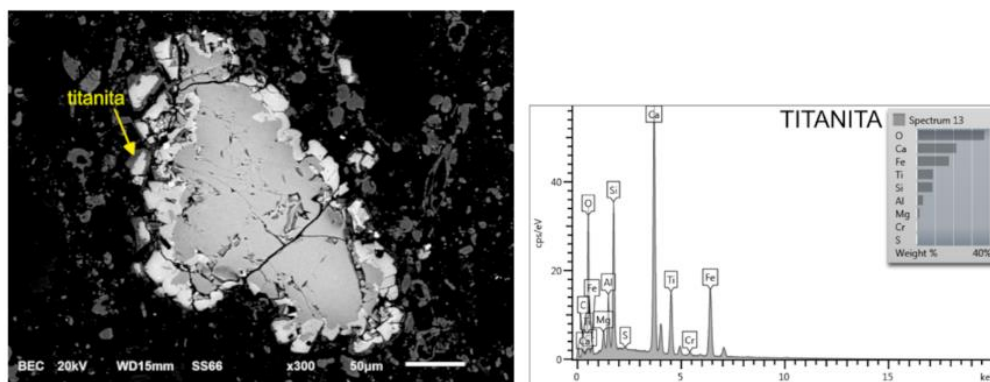


Fig. 27 - Imagem de elétrons retroespalhados (MEV) da ilmenita. Ao lado, espectro de EDS da titanita, que está presente na interface borda/matriz.

Não foram registrados cristais cujo teor de MnO ultrapassasse 1 % (máximo de 0,72 %, tabela 2). Sabe-se que a Mn-ilmenita pode ser usada em trabalhos de prospecção (KAMINSKY e BELOUSOVA, 2009), porém sua ocorrência está mais associada aos carbonatitos do que a kimberlitos ou lamproítos (MITCHELL, 1995). Além disso, a complexa química que o mesmo cristal de ilmenita pode conter, gerando diferentes texturas (figura 28), deve ser um fator a ser considerado nos trabalhos de pesquisa mineral, determinando em que região a análise foi realizada. Esta questão já tem sido explorada por outros trabalhos (e.g., CASTILLO-OLIVER *et al.*, 2017).

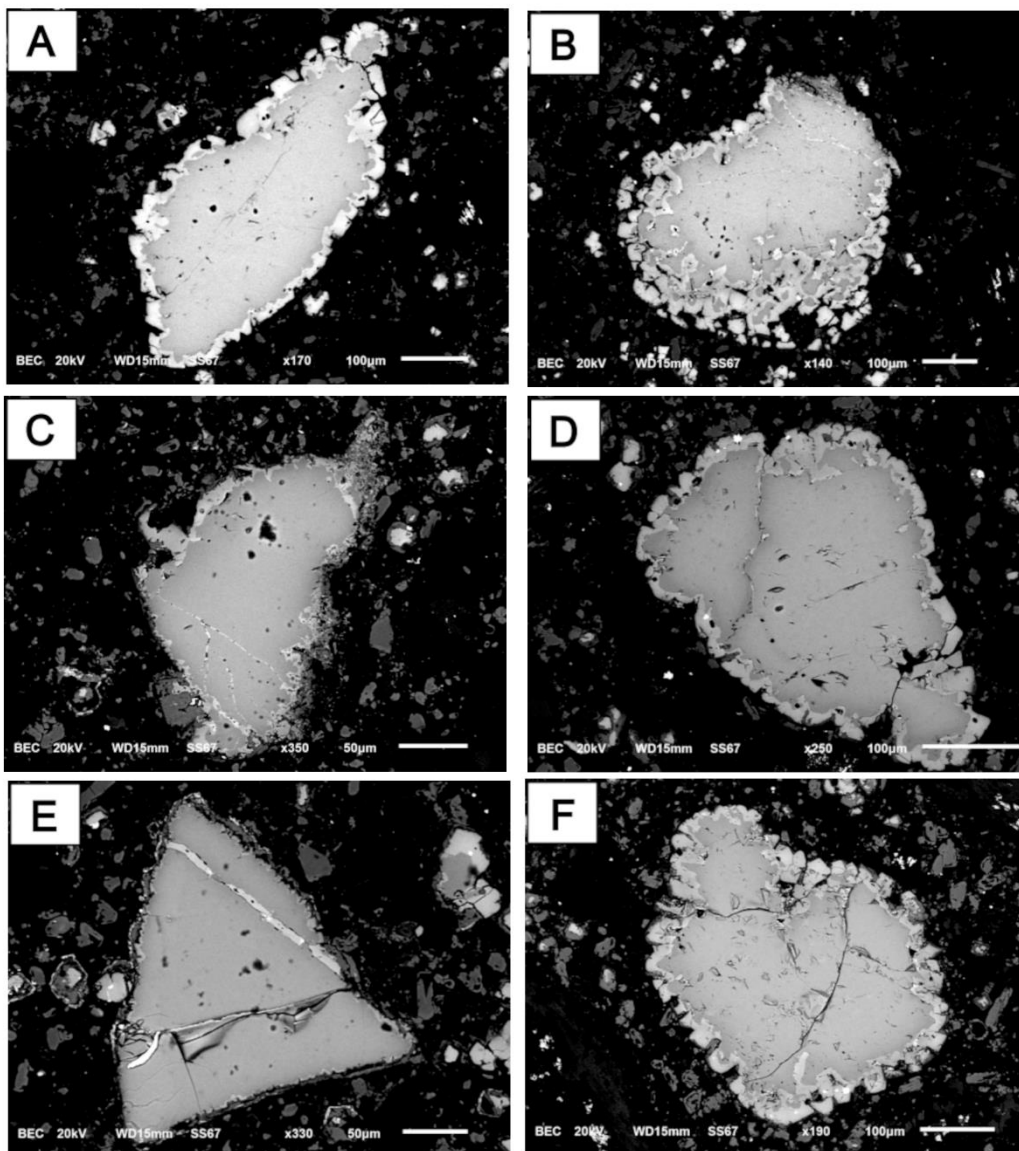


Fig. 28 – De (A) até (F): Imagens de elétrons retroespalhados (MEV/EDS) exibindo as texturas de cristais de ilmenita do Douradinho-11, demonstrando, qualitativamente, variações na composição química. (A), (B), (D) e (F) mostram claramente as bordas corroídas pelo magma.

### 5.2.3 Olivina

A tabela 3 mostra a composição química do núcleo fresco dos cristais de olivina, em porcentagem de peso dos óxidos. Na figura 29A, é possível observar a esperada correlação negativa entre o Mg e Fe, também detectada por Pasin (2008) em olivinas provenientes de kimberlitos, indicando a substituição que ocorre entre esses elementos. O conteúdo em forsterita (Fo) variou de 78,34 a 91,87 %mol., destacando-se o membro crisolita (figura 29B). O NiO variou de 0,26 a 0,34 % e detectou-se 0,34 % de CaO em um dos cristais. O MnO permaneceu entre 0,17 e 0,27 %. A concentração mais elevada de NiO foi encontrada no cristal com Fo > 90 %, o que demonstra uma afinidade do Ni com olivina rica em Mg.

Tabela 3 – Composição química dos macrocristais de olivina (análises do núcleo), em % do peso dos óxidos. Calculou-se a fórmula estrutural com base em 4 oxigênios e o conteúdo em forsterita está em % mol. Considerou-se o ferro total (legenda: n.d. – não detectado; a.p.f.u. = átomos por fórmula unitária).

%	01	02	03	04	05	06	07	08	09
MgO	50,01	44,64	47,48	43,91	48,45	44,3	46,5	42,82	50,8
FeO	8,92	15,85	12,37	16,64	10,71	16,26	13,38	18,13	8,02
SiO <sub>2</sub>	40,76	39,51	39,93	39,23	40,34	39,22	39,66	38,82	40,84
NiO	0,3	n.d.	n.d.	n.d.	0,29	n.d.	0,3	n.d.	0,34
CaO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
MnO	n.d.	n.d.	0,22	0,22	0,2	0,22	0,17	0,23	n.d.
TiO <sub>2</sub>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
TOTAL	99,99	100	100	100	99,99	100	100,01	100	100
<i>a.p.f.u.</i>									
Si	0,996	0,995	0,991	0,993	0,994	0,991	0,990	0,990	0,994
Mg	1,821	1,676	1,757	1,657	1,781	1,669	1,731	1,628	1,843
Fe	0,182	0,334	0,257	0,352	0,221	0,344	0,279	0,387	0,163
Ni	0,006	-	-	-	0,006	-	0,006	-	0,007
Ca	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	-	-	0,005	0,005	0,004	0,005	0,004	0,005	-
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL	3,004	3,005	3,009	3,007	3,006	3,009	3,010	3,010	3,006
Fo (%)	90,91	83,39	87,25	82,47	88,97	82,93	86,10	80,81	91,87

Tabela 3 (continuação)

%	10	11	12	13	14	15	16	17	18
MgO	48,86	43,68	41,11	45,17	43,63	41,24	46,98	48,2	44,96
FeO	10,47	17,01	20,12	15,1	17,02	20,33	12,76	10,56	15,42
SiO <sub>2</sub>	40,41	39,13	38,17	39,54	39,15	38,22	40,1	41,05	39,42
NiO	0,26	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
CaO	n.d.	n.d.	0,34	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
MnO	n.d.	0,19	0,27	0,2	0,19	0,21	0,16	0,19	0,2
TiO <sub>2</sub>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
TOTAL	100	100,01	100,01	100,01	99,99	100	100	100	100
<i>a.p.f.u.</i>									
Si	0,994	0,992	0,985	0,993	0,993	0,986	0,996	1,008	0,992
Mg	1,792	1,651	1,581	1,692	1,649	1,586	1,740	1,764	1,687
Fe	0,215	0,361	0,434	0,317	0,361	0,438	0,265	0,217	0,325
Ni	0,005	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	-	-	0,009	-	-	-	-	-	-
Mn	-	0,004	0,006	0,004	0,004	0,005	0,003	0,004	0,004
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL	3,006	3,008	3,015	3,007	3,007	3,014	3,004	2,992	3,008
Fo (%)	89,27	82,07	78,46	84,21	82,05	78,34	86,78	89,06	83,87

As imagens de elétrons retroespalhados (figura 30) demonstraram que os cristais não estão zonados ou, provavelmente, perderam o zonamento das bordas devido à sua alteração. Muitos trabalhos, como Brett *et al.* (2009), Arndt *et al.* (2010) e Giuliani (2018) têm demonstrado que a olivina kimberlítica é comumente zonada, sendo caracterizada por um núcleo derivado da fragmentação de xenólitos envolvido por regiões cristalizadas do líquido magmático e, portanto, manifesta uma natureza híbrida.

Para campanhas de prospecção/exploração, o caráter híbrido da olivina não deve ser negligenciado, especialmente porque se deseja determinar sua composição química, que pode apresentar variações consideráveis entre as regiões do cristal, levando a diferentes interpretações. Tratando em separado a composição do núcleo e da borda, Giuliani *et al.* (2023) relacionaram a composição química de cristais de olivina com o teor de diamante de kimberlitos de diferentes localidades, demonstrando

que as fases com alto Mg# ( $\geq 90,3$  %mol.) e baixo teor de CaO ( $\leq 0,06$  %), no núcleo, encontram-se, representativamente, em kimberlitos ricos. O conteúdo em forsterita da olivina do Douradinho-11 (tabela 3) se concentra abaixo desse valor (figura 29B) e um alto teor de CaO foi detectado em uma análise (0,34 %), sugerindo que o depósito apresenta um baixo teor de diamante.

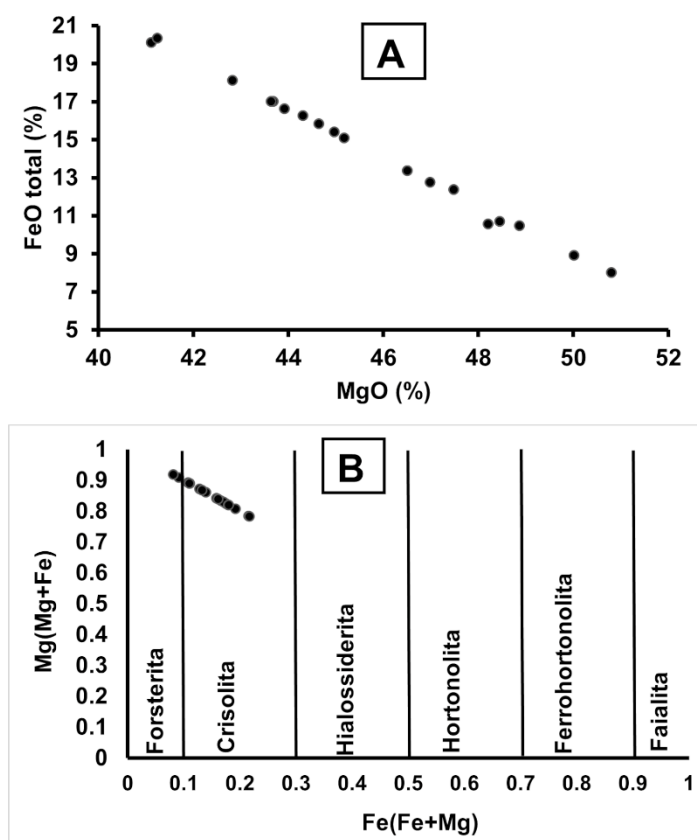


Fig. 29 – (A) Gráfico MgO x FeO expondo a correlação fortemente negativa entre Fe e Mg nos cristais de olivina. (B) Fe# x Mg# para a classificação da olivina (fonte: modificado de DEER *et al.*, 2000 e SALAVERRY *et al.*, 2017).

Na tabela 4, fez-se uma comparação entre os intervalos de composição das olivinas do Douradinho-11 com inclusão de olivina em diamantes brasileiros do trabalho de Meyer e Svisero (1973). Assim, observou-se que, nos cristais do kimberlito, os teores de FeO atingem valores bem mais elevados, o NiO encontra-se mais baixo e o CaO mais elevado em relação à inclusão. Esse distanciamento pode indicar uma baixa amostragem de cristais provenientes de rochas posicionadas no campo de estabilidade do diamante, resultando num depósito de baixo teor. No que

se refere ao conteúdo de MgO, a inclusão apresentou elevado teor, próximo ao máximo valor do intervalo das olivinas deste estudo.

Tabela 4 – Composição química de inclusão de olivina em diamantes brasileiros e dos cristais do Douradinho-11

%	<i>Intervalo da composição dos cristais de olivina (Este trabalho)</i>	<i>Composição representativa de inclusão de olivina em diamante (MEYER e SVISERO, 1973)</i>
MgO	41,11 – 50,8	50,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	< 0,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	---	0,05
FeO	8,02 – 20,33	7,98
SiO <sub>2</sub>	38,17 – 41,05	41,3
NiO	0,26 – 0,34	0,40
CaO	0,34	0,03
MnO	0,16 – 0,27	0,11
TiO <sub>2</sub>	---	< 0,01

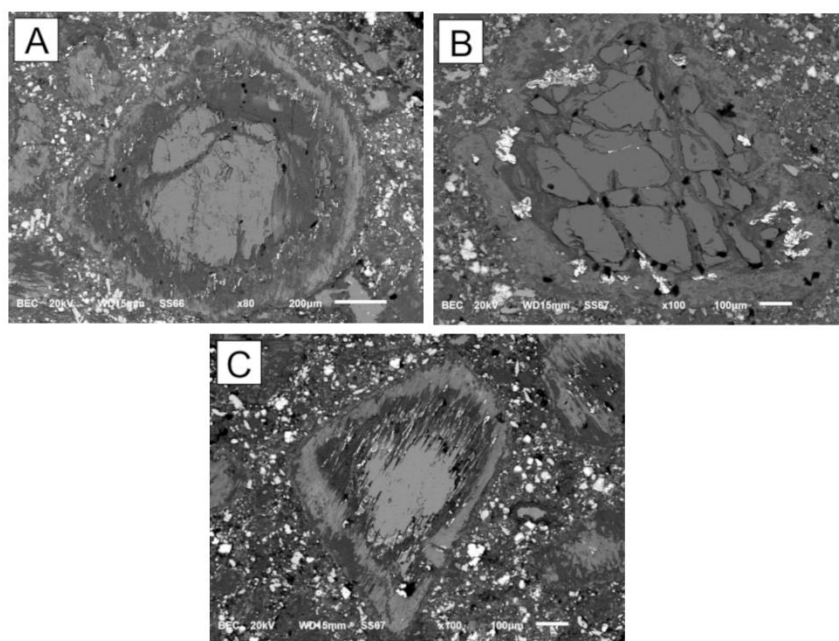


Fig. 30 - (A), (B) e (C) Imagens de elétrons retroespalhados (MEV) de cristais de olivina relativamente homogêneos. Observou-se que o núcleo está preservado, com exceção das partes fraturadas, contrastando com a borda profundamente alterada.



### 5.2.4 Cr-espinélio

Na tabela 5, verifica-se a composição química do núcleo dos cristais de Cr-espinélio. A presença de  $P_2O_5$  (até 0,4 %), provavelmente, deve-se à contaminação crustal ou a pequenas inclusões de apatita presentes nas regiões analisadas. Os cristais são caracterizados pelo seu alto teor de Mg, Fe, Al e Cr.

Tabela 5 – Composição química do núcleo dos cristais de Cr-espinélio avermelhados, em peso dos óxidos %. Legenda: n.d. - não detectado.

%	01	02	03	04	05	06
MgO	14,41	14,36	13,14	14,37	12,77	15,62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,88	29,69	30,57	37,2	28,78	40,23
CaO	0,11	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
FeO	18,3	16,99	18,36	17,37	17,81	15,89
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,3	38,96	37,15	30,4	40,64	28
ZnO	n.d.	n.d.	0,5	n.d.	n.d.	n.d.
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	n.d.	n.d.	0,28	n.d.	n.d.	n.d.
MnO	n.d.	n.d.	n.d.	0,26	n.d.	n.d.
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	n.d.	n.d.	n.d.	0,4	n.d.	0,26
TOTAL	100	100	100	100	100	100

A figura 31 traz a classificação dos espinélios no diagrama Cr, Al e  $Fe^{3+}$ .

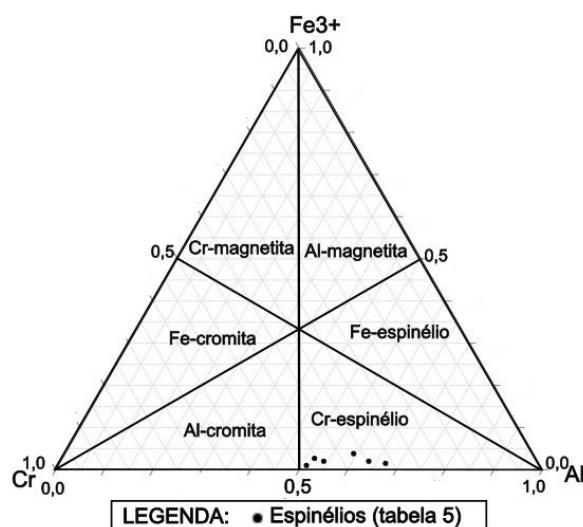


Fig. 31 - Diagrama ternário de classificação do espinélio (Fonte: modificado de STEVENS, 1944). Observou-se que os dados se acumularam no campo do Cr-espinélio. Os vértices do triângulo foram calculados com os valores em átomos ( $Cr = Cr/(Cr+Fe^{3+}+Al)$ ;  $Al = Al/(Al+Fe^{3+}+Cr)$  e  $Fe^3 = Fe^3/(Fe^3+Al+Cr)$ ). Desconsiderou-se o  $P_2O_5$  no cálculo da fórmula estrutural e o  $Fe_{3+}$  foi calculado.

O espinélio é um importante alvo na prospecção de kimberlitos/diamantes, sendo um importante mineral indicador, principalmente a cromita (elevado teor de Cr) (e.g., FIPKE *et al.*, 1995). Nas figuras 32A e 32B, pode-se observar que os espinélios apresentam uma composição química compatível com outros cristais provenientes de kimberlito, porém não se concentram nos campos de inclusões em diamantes. Essa constatação mostra uma tendência contrária em relação às ilmenitas, que mostram um ambiente favorável à mineralização. Assim, expõe-se uma complexidade na interpretação dos dados, pois embora o kimberlito seja diamantífero (CABRAL NETO *et al.*, 2017), nem todo mineral indicador apontou para a mesma conclusão. Tal observação pode indicar que esses diagramas devem ser interpretados cuidadosamente, sempre associados a outras evidências.

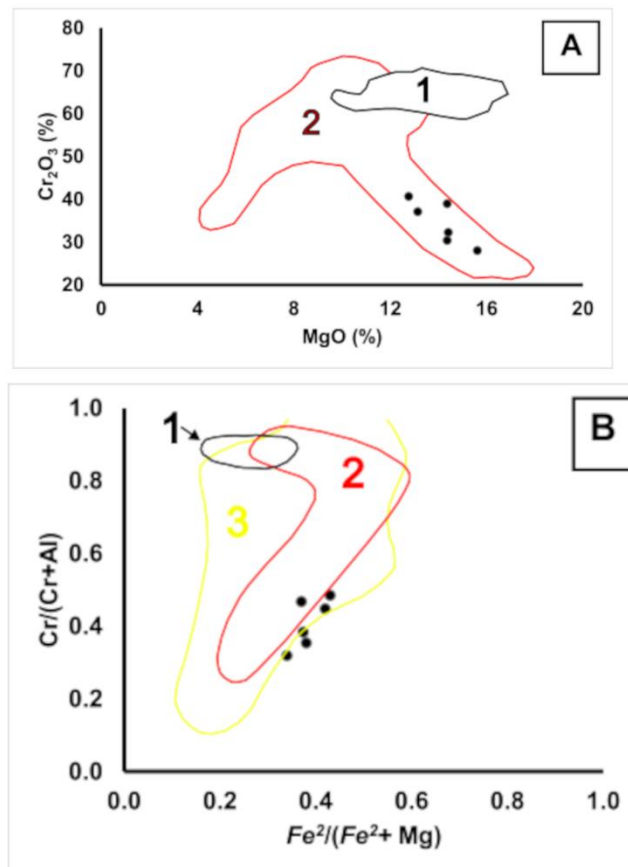


Fig. 32 – (A) Diagrama MgO x Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (legenda: (1) espinélios como inclusões em diamante e (2) – espinélios oriundos de kimberlito) (fonte: modificado de NOWICKI *et al.*, 2007). (B) Diagrama Fe<sup>2+</sup>/(Fe<sup>2+</sup>+Mg) x Cr/(Cr+Al), em que se calculou o Fe<sup>2+</sup> a partir de FeO total. Desconsiderou-se o P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no cálculo da fórmula estrutural (legenda: (1) inclusões de espinélio em diamante e espinélios provenientes de (2) kimberlito e (3) de xenólitos em kimberlito (fonte: modificado de MITCHELL, 1986).

Na figura 33A, nota-se que não há uma relação estabelecida entre os elementos Cr e Fe, mas, por outro lado, na figura 33B, tem-se marcada a relação inversa entre o Cr e Al. Na figura 34, observam-se as imagens de elétrons retroespalhados dos espinélios.

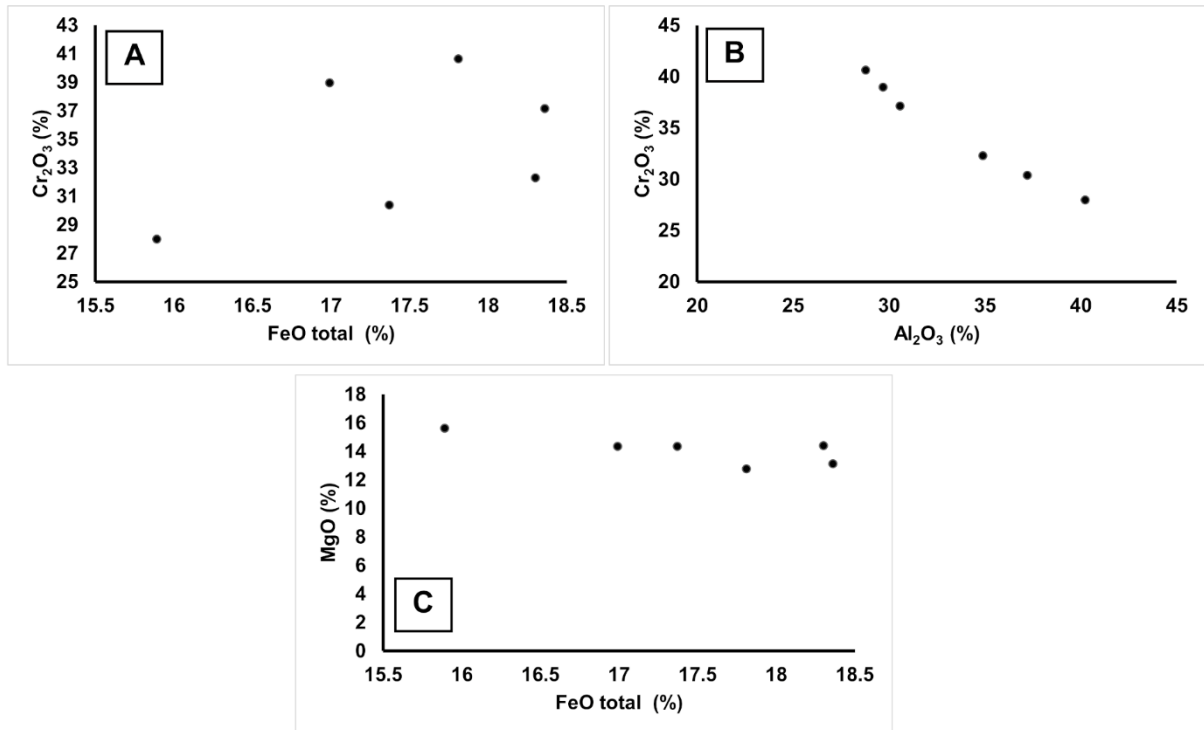


Fig. 33 – Gráficos (A) FeO x Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (B) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> x Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e (C) FeO x MgO para os espinélios

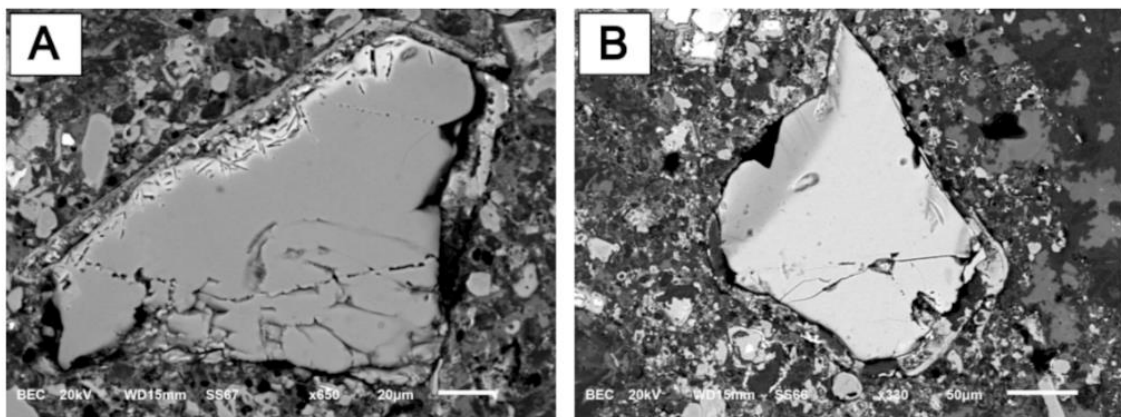


Fig. 34 – (A) e (B) Imagens de elétrons retroespalhados (MEV/EDS) dos espinélios. (A) Cristal com textura exótica na borda.

Na tabela 6, fez-se uma comparação entre a composição dos espinélios do kimberlito Douradinho-11 com inclusões do mesmo mineral em diamantes brasileiros dos *pipes* kimberlíticos de Juína, Mato Grosso (KAMINSKY *et al.*, 2009). Foram avaliados os óxidos MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO e Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Destes, registraram-se diferenças marcantes entre o Al e o Cr. O Al é mais baixo e o Cr mais alto nas inclusões do que nos cristais do kimberlito. Nem mesmo o teor mais alto de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (40,64 %) atingiu o teor mais baixo das inclusões (45,93 %). Esse resultado soma-se ao que já indicavam os diagramas da figura 32.

Tabela 6 – Intervalos de composição dos cristais de Cr-espinélio do Douradinho-11 e de inclusões em diamantes.

%	<i>Espinélios do Douradinho-11 (Este trabalho)</i>	<i>Inclusões de Cr-espinélios em diamantes (KAMINSKY et al., 2009)</i>
MgO	12,77 – 15,62	9,2 – 13,81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28,78 – 40,23	15,10 – 19,75
FeO	15,89 - 18,36	14,11 - 22,29
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28 - 40,64	45,93 – 58,16

### 5.2.5 Piroxênio

Na tabela 7, pode-se analisar a composição química do piroxênio (augita, figura 35) que apresentou um teor considerável de CaO (21,37 %) e MgO (17,78 %) mas, por outro lado, o Na<sub>2</sub>O foi detectado numa baixa concentração (< 1%).

Tabela 7 – Composição química, em peso dos óxidos (%), do piroxênio e membros finais em %. A fórmula estrutural foi calculada com base em 6 oxigênios. O FeO = FeO total. Legenda: a.p.f.u = átomos por fórmula unitária.

%	SiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeOt	MgO	Na <sub>2</sub> O	TOTAL
	55,18	1,92	21,37	2,81	17,78	0,94	100
<i>a.p.f.u</i>	Si	Cr	Ca	Fe	Mg	Na	TOTAL
	2,0016	0,05506	0,83053	0,08524	0,96146	0,06611	4,000
Membros finais: Wo = 100Ca/(Ca+Mg+Fe <sub>t</sub> ) = 44,24 %							
En = 100Mg/(Ca+Mg+Fe <sub>t</sub> ) = 51,22 %							
Fs = 100(Fe <sub>t</sub> )/(Ca+Mg+Fe <sub>t</sub> ) = 4,54%							

O piroxênio apresenta uma borda de reação que é caracterizada por silicatos de Mg, Fe e Ca associados a cristais de cromita, conforme demonstram os espectros de

EDS da figura 36. A composição do piroxênio analisado, que contém Cr ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 1,92\%$ ) se aproxima do campo do diopsídio (figura 35).

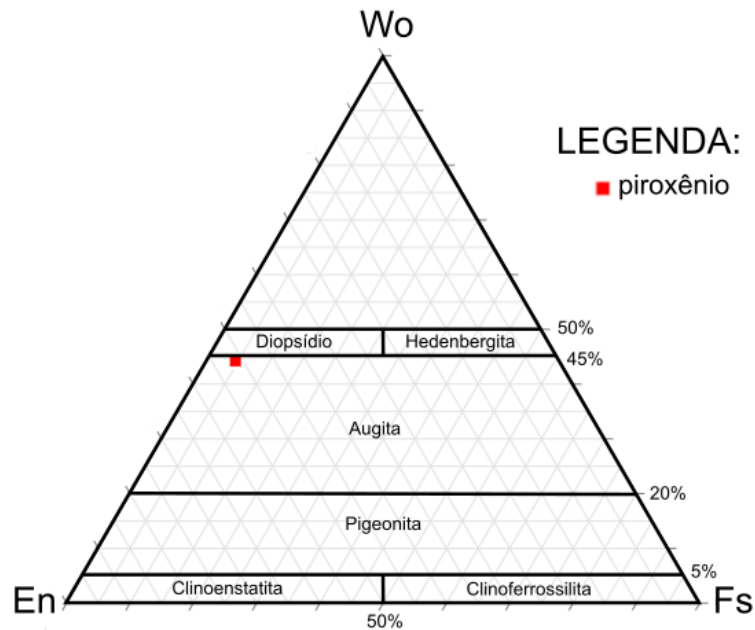


Fig.35 – Diagrama ternário de classificação de piroxênio com os membros finais Wo ( $\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ ), En ( $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ ) e Fs ( $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ ) (fonte: modificado de MORIMOTO, 1989).

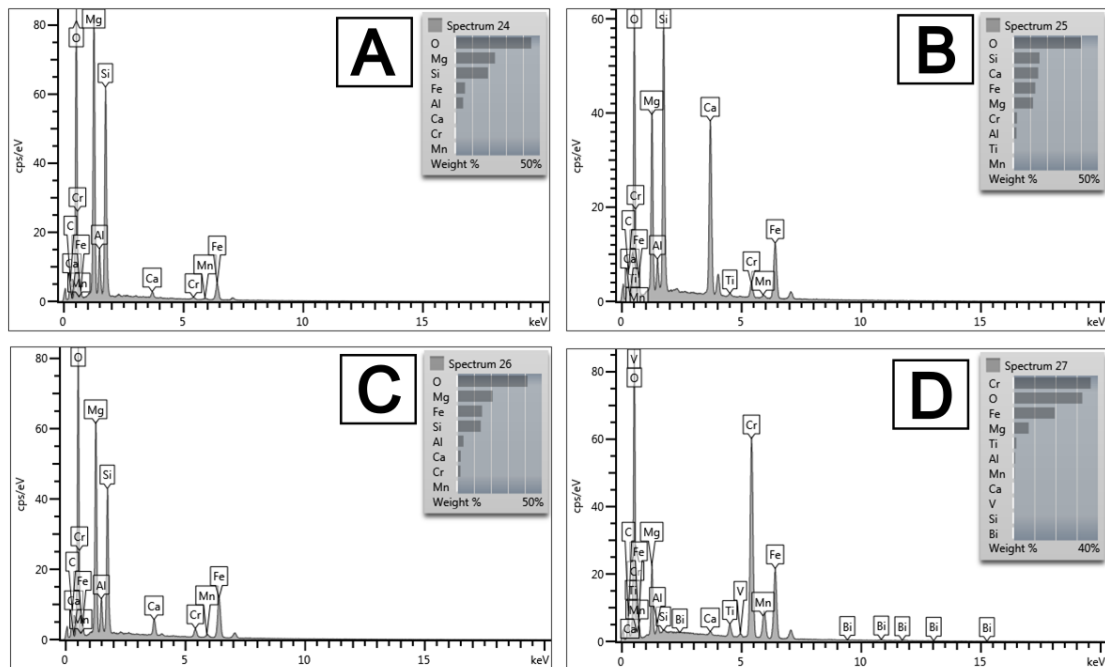


Fig. 36 – Espectros de EDS para diferentes regiões da borda de reação do piroxênio. (A - C) Silicatos principalmente de Fe, Mg e Ca em diferentes proporções e (D) cromita.

### 5.2.6 Flogopita

Entre os elementos que constituem os dois cristais de flogopita analisados (figura 37), destacam-se o Mg e o K, seguidos pelo Al, Fe, Ti e Cr. As bordas e regiões no interior dos cristais, especialmente entre as placas da mica, estão alteradas e caracterizam-se pela perda de K e aumento de fases enriquecidas em Ca, como calcita e olivina. Segundo Mitchell (1986), flogopitas ricas em BaO (> 3%) estão ausentes em kimberlitos e presentes em lamproítos, o que está de acordo com os espectros da figura 37, que não detectaram picos desse elemento.

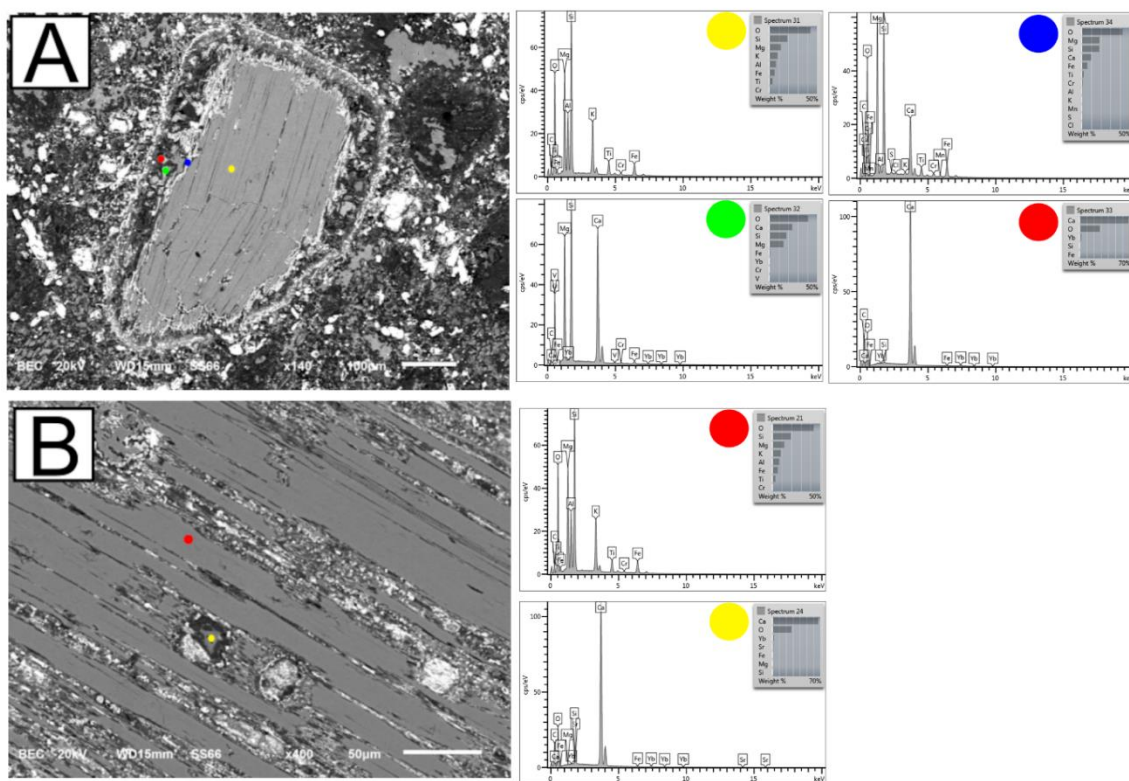


Fig. 37 – (A) e (B) são imagens de elétrons retroespalhados (MEV) de cristais de flogopita. À direita de (A), pode-se analisar os espectros de EDS de diferentes regiões do mineral, destacando a composição química do núcleo fresco e da borda alterada. À direita de (B), encontram-se os espectros de EDS da região fresca e da alteração entre as placas da flogopita.

### 5.2.7 Veio de carbonato

O veio de carbonato é constituído predominantemente por calcita e apresenta, eventualmente, cristais de olivina de granulação fina. Pode-se analisar a composição química desses minerais na figura 38, que contém os espectros de EDS e a imagem

de elétrons retroespalhados da região analisada. Esses veios de carbonato são de origem secundária, tendo em vista que cortam diferentes seções da rocha. Além disso, a calcita contém os elementos Yb e Sr.

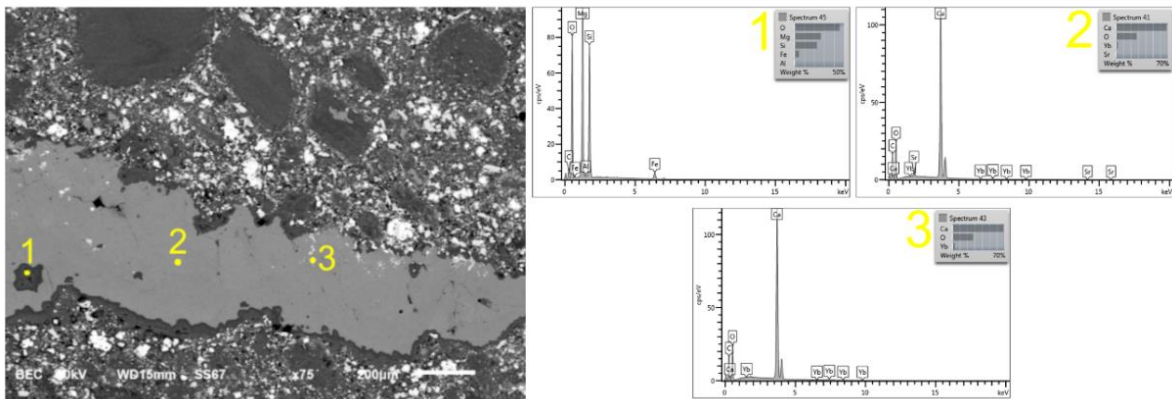


Fig. 38 – Imagem de elétrons retroespalhados (MEV) do veio de carbonato com os pontos referentes aos espectros de EDS dispostos ao lado, em que 1 – olivina; 2 e 3 – cristais de calcita.

## 6. CONCLUSÕES

O Brasil ainda apresenta lacunas importantes a serem preenchidas no campo de prospecção/exploração de rochas kimberlíticas, apesar dos avanços registrados nos últimos anos. Parte das controvérsias encontradas nesta área deve-se à complexa natureza desse litotipo, ao baixo teor de diamantes nas intrusões férteis e às limitações dos métodos usados em trabalhos de investigação, os quais, mesmo apresentando muitos casos exitosos, podem terminar com o descarte de intrusões potencialmente férteis.

O Douradinho-11 é uma rocha caracterizada pela presença de olivina, carbonato, opacos (ilmenita e cromita), xenólitos crustais e mantélicos, magmaclastos, flogopita, augita e espinélio avermelhado. Esses componentes estão associados a uma matriz constituída de Mg-olivina, monticellita, calcita, ilmenita, apatita, cromita, badeleíta, magnetita e uma fase desconhecida que contém Zn e Mg. Com base na sua assembleia mineralógica, destaca-se que a intrusão possui características de um kimberlito. Além disso, sugere-se, a partir da composição química da olivina, que se trata de um depósito com baixo teor de diamantes.

Sobre o potencial diamantífero, o melhor resultado entre os minerais indicadores foi obtido para a ilmenita, que além de ser compatível com outros cristais provenientes de rochas kimberlíticas, também apresentou uma composição química favorável à mineralização. Além disso, parte dos intervalos dos seus principais elementos constituintes assemelha-se aos encontrados para ilmenitas oriundas do kimberlito diamantífero Canastra-1, estudado por Chaves *et al.* (2008). No entanto, deve-se ressaltar que esses cristais podem exibir zonamentos químicos complexos, resultando em diferentes texturas, que podem dificultar os trabalhos de pesquisa mineral.

No que se refere à composição química da olivina, notou-se que ela é diferente daquelas encontradas como inclusões em diamantes, especialmente considerando os teores de NiO, CaO e FeO. Sobre o Cr-espinélio, boa parte das análises inseriu-se no campo relacionado com outros cristais de kimberlito, porém devido ao seu baixo teor de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, afastou-se da região associada a inclusões em diamantes, o que se contrapõe à conclusão baseada na composição da ilmenita. Sendo assim, a metodologia empregada mundialmente, que inclui a associação da composição dos



minerais indicadores com o potencial diamantífero, jamais pode ser vista como infalível, tendo em vista que o Douradinho-11 é diamantífero conforme Cabral Neto *et al.* (2017) e, no entanto, há evidências apontando o contrário. Nesse sentido, torna-se importante coletar um volume maior de amostras da rocha para que mais minerais indicadores sejam recuperados. Sabe-se que há uma mistura de materiais de diversas origens no kimberlito e, portanto, com mais análises, aumenta-se a chance de encontrar outros cristais provenientes do campo de estabilidade do diamante.

Para trabalhos futuros, recomenda-se uma investigação mais robusta sobre a presença de nitrogênio nas ilmenitas, abrangendo um estudo composicional, com microsonda eletrônica, e estrutural. Além disso, outras análises químicas podem contribuir com a classificação da rocha, por exemplo, rocha total.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABERSTEINER, A.; KAMENETSKY, V. S.; GOEMANN, K.; GOLOVIN, A.; KAMENETSKY, M., 2022. **Olivine in Kimberlites: Magma Evolution from Deep Mantle to Eruption**. *Journal of Petrology*, v. 63 (7), p. 1 – 32, <https://doi.org/10.1093/petrology/egac055>.
- ANDRADE, K. W., 2012. **Química de minerais indicadores de intrusões kimberlíticas com ênfase na província diamantífera Serra da Canastra (MG): importância na prospecção de intrusões férteis**. Dissertação de Mestrado em Geologia, UFMG, Belo Horizonte, 154 p.
- ARAUJO, A. L. N.; CARLSON, R. W.; GASPAR, J. C.; BIZZI, L. A., 2001. **Petrology of kamafugites and kimberlites from the Alto Paranaíba Alkaline Province, Minas Gerais, Brazil**. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 142(2), p. 163 - 177.
- ARNDT, N. T.; GUITREAU, M.; BOULLIER, A. M.; LE ROEX, A.; TOMMASI, A.; CORDIER, P.; SOBOLEV, A., 2010. **Olivine, and the origin of kimberlite**. *Journal of Petrology*, v. 51, p. 573 – 602, doi:10.1093/petrology/egp080.
- AULBACH, S.; JACOB, D. E.; CARTIGNY, P.; STERN R. A.; SIMONETTI S. S.; WÖRNER G.; VILJOEN, K. S., 2017. **Eclogite xenoliths from Orapa: Ocean crust recycling, mantle metasomatism and carbon cycling at the western Zimbabwe craton margin**. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 213, p. 574 – 592.
- AZZONE, R. G.; PEARSON, D. G.; SARKAR, C.; CHMYZ, L.; SHIBATA, C. S. V.; LUO, Y.; RUBERTI, E., 2022. **Tracking crustal assimilation processes in kimberlites from the Alto Paranaíba Igneous Province, Brazil: Petrographic and geochemical controls and the role of perovskites**. *Lithos*, v. 432-433, 106888, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106888>.
- BARBOSA, C. T., 2018. **Geologia e petrologia de kimberlitos da região Oeste de Minas Gerais: Charneca, Grota do Cedro, Régis e Indaiá**. Tese (Doutorado em Petrologia Ígnea e Metamórfica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 389 p., doi:10.11606/T.44.2018.tde-14092022-090819.
- BRETT, R. C.; RUSSELL, J. K.; ANDREWS, G. D. M.; JONES, T. J., 2015. **The ascent of kimberlite: insights from olivine**. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 424, p.119 – 131.
- BRUNO, M.; RUBBO, M.; AQUILANO, D.; MASSARO, F. R.; NESTOLA, F., 2016. **Diamond and its olivine inclusions: A strange relation revealed by ab initio simulations**. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 435, p. 31 – 35, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2015.12.011>.
- CABRAL NETO, I.; NANNINI, F.; SILVEIRA, F. V.; CUNHA, L. M., 2017. **Projeto Diamante Brasil: áreas kimberlíticas e diamantíferas do Estado de Minas Gerais e regiões adjacentes**. Brasília: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 230 p.
- CARMODY, L.; TAYLOR, L. A.; THAISEN, K. G.; TYCHKOV N.; BODNAR R. J.; SOBOLEV N. V.; POKHILENKO L. N.; POKHILENKO N. P., 2014. **Ilmenite as a diamond indicator mineral in the Siberian Craton: a tool to predict diamond potential**. *Economic Geology*, v. 109, p. 775 – 783, <https://doi.org/10.2113/econgeo.109.3.775>.
- CASTILLO-OLIVER, M.; MELGAREJO, J. C.; GALÍ, S.; PERVOV, V.; GONÇALVES, A. O; GRIFFIN, W. L.; PEARSON, N. J.; O'REILLY, S. Y., 2017. **Use and misuse of Mg- and Mn-rich ilmenite in diamond exploration: A petrographic and trace element approach**. *Lithos*, v. 292–293, p. 348 – 363, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.09.021>.

- CASTILLO-OLIVER, M.; GIULIANI, A.; GRIFFIN, W. L.; O'REILLY, S. Y., 2018. **Characterisation of primary and secondary carbonates in hypabyssal kimberlites: an integrated compositional and Sr-isotopic approach.** *Mineralogy and Petrology*, v. 112 (Suppl 2), p. S555 – S567, <https://doi.org/10.1007/s00710-018-0626-3>.
- CHAVES, M. L. de S. C.; ANDRADE, K. W.; AZZI, A. de A.; SILVEIRA, F. V., 2014. **Minerais indicadores kimberlíticos e prospectividade diamantífera da intrusão Alfeu-01 (Canguçu, RS).** São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 33, n. 4, p. 535 - 548.
- CHAVES, M. L. S. C., 2012. **Kimberlito Vargem-1 (Coromandel, MG): Bulk sample confirma mineralização diamantífera.** REM: Revista Escola Minas, Ouro Preto, v. 65(4), p. 509 - 511.
- CHAVES, M. L. S. C.; ANDRADE, K. W.; MOREIRA, L. A., 2009. **A intrusão diamantífera Abel Régis (Carmo do Paranaíba, MG): kimberlito ou lamproíto?** REM: Revista Escola de Minas, v. 62(4), p. 431 - 438.
- CHAVES, M. L. S. C.; BRANDÃO, P. R. G.; GIRODO, A. C.; BENITEZ, L., 2008. **Kimberlito Canastra-1 (São Roque de Minas, MG): geologia, mineralogia e reservas diamantíferas.** REM: Revista Escola de Minas, v. 61(3), p. 357 - 364.
- CLIFFORD, T. N., 1966. **Tectono-metallogenic units and metallogenic provinces of Africa.** *Earth and Planetary Science Letters* v. 1, p. 421 - 434.
- CORREIA, E. A., 1990. **Diamantes e Kimberlitos do Sul e Leste da Bacia do Parnaíba (Brasil).** Tese de Doutorado. Universidade do Porto, Porto, 167 p.
- DAWSON, J. B., 1980. **Kimberlites and their xenoliths.** Berlin, Springer-Verlag, 252p.
- DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J., 2000. **Minerais constituintes das rochas uma introdução.** 2. ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 727 p.
- DONATTI-FILHO, J. P.; TAPPE, S.; OLIVEIRA, E. P.; HEAMAN, L. M., 2013. **Age and origin of the Neoproterozoic Brauna Kimberlites: Melt generation within the metasomatized base of the São Francisco Craton, Brazil.** *Chemical Geology*, v. 353, p. 19 - 35.
- DYMSHITS, A. M.; SHARYGIN, I. S.; MALKOVETS, V. G.; YAKOVLEV, I. V.; GIBSHER, A. A.; ALIFIROVA, T. A.; VOROBEL, S. S.; POTAPOV, S. V.; GARANIN, V. K., 2020. **Thermal State, Thickness, and Composition of the Lithospheric Mantle beneath the Upper Muna Kimberlite Field (Siberian Craton) Constrained by Clinopyroxene Xenocrysts and Comparison with Daldyn and Mirny Fields.** *Minerals*, v. 10, 549; doi: 10.3390/min10060549.
- FIELD, M.; GERNON, T. M.; MOCK, A.; WALTERS, A.; SPARKS, R. S. J.; JERRAM, D. A., 2009. **Variations of olivine abundance and grain size in the Snap Lake kimberlite intrusion, Northwest Territories, Canada: A possible proxy for diamonds.** *Lithos*, v. 112, p. 23 – 35, doi:10.1016/j.lithos.2009.04.019.
- FIELD, M.; STIEFENHOFER, J.; ROBEY, J.; KURSZLAUKIS, S., 2008. **Kimberlite-hosted diamond deposits of southern Africa: A review.** *Ore Geology Reviews*, v. 34, p. 33 – 75, doi:10.1016/j.oregeorev.2007.11.002.
- FIPKE, C. E.; GURNEY, J. J.; MOORE, R. O., 1995. **Diamond exploration techniques emphasising indicator mineral geochemistry and Canadian examples.** Geological Survey of Canada, Bulletin 423 86 p.
- GIBSON, S. A.; THOMPSON, R. N.; LEONARDOS, O. H.; DICKIN, A. P.; MITCHELL, J. G., 1995. **The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume: Evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil.** *Journal of Petrology*, v. 36(1), p.189 - 229.

- GIULIANI, A., 2018. **Insights into kimberlite petrogenesis and mantle metasomatism from a review of the compositional zoning of olivine in kimberlites worldwide**. *Lithos*, v. 312–313, p. 322 – 342, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.04.029>.
- GIULIANI, A.; PHILLIPS, D.; PEARSON, D. G.; SARKAR, S.; MÜLLER, A. A.; WEISS, Y.; PRESTON, R.; SELLER, M.; SPETSIUS, Z., 2023. **Diamond preservation in the lithospheric mantle recorded by olivine in kimberlites**. *Nature Communications* 14, 6999, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42888-x>.
- GOMES, C. B.; COMIN-CHIARAMONTI, P., 2005. **Some notes on the Alto Paranaíba Igneous Province**. In: COMIN-CHIARAMONTI P; GOMES C. B., (eds.). *Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform EdUSP/Fapesp*, 2005, p. 317 - 340.
- GRIFFIN, W. L.; SOBOLEV, N. V.; RYAN, C. G.; POKHILENKO, N. P.; WIN, T. T.; YEFIMOVA, E. S., 1993. **Trace elements in garnets and chromites: Diamond formation in the Siberian lithosphere**. *Lithos*, v. 29, p. 235 - 256.
- GRÜTTER, H. S.; GURNEY, J. J.; MENZIES, A. H.; WINTER, F., 2004. **An updated classification scheme for mantle-derived garnet, for use by diamond explorers**. *Lithos*, v. 77, p. 841 - 857.
- GUARINO, V.; WU, F. Y.; LUSTRINO, M.; MELLUSO, L.; BROTZU, P.; GOMES, C. B.; RUBERTI, E.; TASSINARI, C. C. G.; SVISERO, D. P., 2013. **U-Pb ages, Sr-Nd- isotope geochemistry, and petrogenesis of kimberlites, kamafugites and phlogopite-picrites of the Alto Paranaíba Igneous Province, Brazil**. *Chemical Geology*, v. 353, p. 65 – 82, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.06.016>.
- GURNEY, J. J., 1984. **A correlation between garnets and diamonds in kimberlites**. In: GLOVER, J. E.; HARRIS, P. G. (Eds.), *Kimberlite occurrence and origins: a Basis for Conceptual Models in Exploration*. Geology Department and University Extension, University of Western Australia, Publication 8, p. 143 – 166.
- GURNEY, J. J., ZWEISTRA, P., 1995. **The interpretation of the major element composition of mantle minerals in diamond exploration**. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 53, p. 293 - 309.
- GURNEY, J. J.; HELMSTAEDT, H.; MOORE, R. O., 1993. **A review of the use and application of mantle mineral geochemistry in diamond exploration**. *Pure & Appl. Chem.*, v. 65, n. 12, p. 2423 - 2442.
- HEAMAN, L. M.; KJARSGAARD, B. A.; CREASER, R. A., 2003. **The timing of kimberlite magmatism in North America: implications for global kimberlite genesis and diamond exploration**. *Lithos*, v. 71, p. 153 – 184, doi:10.1016/j.lithos.2003.07.005.
- HELMSTAEDT, H. H.; GURNEY, J. J., 1995. **Geotectonic controls of primary diamond deposits: implications for area selection**. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 53, p. 125 - 144.
- HUNT, L.; STACHEL, T.; GRÜTTER, H.; ARMSTRONG, J.; McCANDLESS, T. E.; SIMONETTI, A.; TAPPE, S., 2012. **Small Mantle Fragments from the Renard Kimberlites, Quebec: Powerful Recorders of Mantle Lithosphere Formation and Modification Beneath the Eastern Superior Craton**. *Journal of Petrology*, v. 53, n. 8, p. 1597 – 1635, <https://doi.org/10.1093/petrology/egs027>.
- HUTTNER, M. B.; RIOS, D. C.; CARVALHO, C. M. B. de.; ROSA, M. de L. da S., 2019. **Geocronologia U-Pb em Rochas Subsaturadas em Sílica – da Descoberta da Badeleíta ao seu uso Potencial como Geocronômetro no Brasil**. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, v. 42 – 3, p. 361 - 370.
- JANSE, A. J. A., 1991. **Is Clifford's Rule Still Valid? Affirmative Examples from Around the World**. In: *International Kimberlite Conference: Extended Abstracts*, [S. l.], v. 5, p. 196 – 198. DOI: 10.29173/ikc2510.

- KAMINSKY, F. V.; BELOUSOVA, E. A., 2009. **Manganoan ilmenite as kimberlite/diamond indicator mineral**. *Russian Geology and Geophysics*, v. 50, p. 1212 – 1220, doi:10.1016/j.rgg.2009.11.019.
- KAMINSKY, F. V.; KHACHATRYAN, G. K.; ANDREAZZA, P.; ARAUJO, D.; GRIFFIN, W. L., 2009. **Super-deep diamonds from kimberlites in the Juina area, Mato Grosso State, Brazil**. *Lithos*, v. 112, p. 833–842, doi:10.1016/j.lithos.2009.03.036.
- KARGIN, A. V.; NOSOVA, A. A.; SAZONOVA, L. V.; PERESETSKAYA, E. V.; GOLUBEVAD, Y. Y.; LEBEDEVA, N. M.; TRETYACHENKO, V. V.; KHVOSTIKOV, V. A.; BURMII, J. P., 2020. **Ilmenite from the Arkhangelsk Diamond Province, Russia: Composition, Origin and Indicator of Diamondiferous Kimberlites**. *Petrology* v. 28, no. 4, p. 315 – 337. <https://doi.org/10.1134/S0869591120040050>.
- KJARSGAARD, B. A., 2007. **Kimberlite diamond deposits**, in Goodfellow, W.D., ed., *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5*, p. 245 - 272.
- KJARSGAARD, B. A.; JANUSZCZAK, N.; STIEFENHOFER, J., 2019. **Diamond Exploration and Resource Evaluation of Kimberlites**. *Elements*, v. 15, p. 411 – 416, DOI: 10.2138/gselements.15.6.411.
- KREBS, M. Y.; PEARSON, D. G.; STACHEL, T.; STERN, R. A.; NOWICKI, T.; CAIRNS, S., 2016. **Using Microdiamonds in Kimberlite Diamond Grade Prediction: A Case Study of the Variability in Diamond Population Characteristics Across the Size Range 0.2 to 3.4 mm in Misery Kimberlite, Ekati Mine, NWT, Canada**. *Economic Geology*, v. 111, p. 503 – 525, <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.2.503>.
- LEHTONEN, M.; O'BRIEN, H.; PELTONEN, P.; KUKKONEN, I.; USTINOV, V.; VERZHAK, V., 2009. **Mantle xenocrysts from the Arkhangelskaya kimberlite (Lomonosov mine, NW Russia): Constraints on the composition and thermal state of the diamondiferous lithospheric mantle**. *Lithos* v. 112, p. 924 - 933.
- LIMA, N. M.; AZZONE, R. G.; CHMYZ, L.; GUARINO, V.; RUBERTI, E.; SILVA, S.; SVISERO, D. P., 2020. **Petrographic, geochemical, and isotopic evidence of crustal assimilation processes in the Indaiá-II kimberlite, Alto Paranaíba Province, southeast Brazil**. *The Canadian Mineralogist*, v. 58, n. 5, p. 563 - 585, <https://doi.org/10.3749/canmin.2000031>.
- MACNAE, J., 1995. **Applications of geophysics for the detection and exploration of kimberlites and lamproites**. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 53, p. 213 - 243.
- MADIBA, C. C. P.; POLLAK, H.; CAWTHORN, R. G.; VILJOEN, F., 1998. **Ilmenite: mantle reservoir for nitrogen?** *Hyperfine Interactions*, v. 111, p. 319 – 327.
- MAHON, K.; MARTINS, M. V. A.; GERALDES, M. C., 2022. **Chemical composition of garnet and ilmenite from stream sediments and soil applied to diamond fertility investigation: the kimberlite intrusion of Ariquemes, Rondonia (Brazil)**. *Journal of Sedimentary Environments*, v. 7, p. 317 – 334, <https://doi.org/10.1007/s43217-022-00095-6>.
- MALKOVETS, V. G.; REZVUKHIN, D. I.; BELOUSOVA, E. A.; GRIFFIN, W. L.; SHARYGIN, I. S.; TRETIKOVA, I. G.; GIBSHER, A. A.; O'REILLY, S. Y.; KUZMIN, D. V.; LITASOV, K. D.; LOGVINOVA, A. M.; POKHILENKO, N. P.; SOBOLEV, N. V., 2016. **Cr-rich rutile: A powerful tool for diamond exploration**. *Lithos*, v. 265, p. 304 – 311, <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2016.08.017>.
- MASUN, K. M., SCOTT SMITH, B. H., 2008. **The Pimenta Bueno kimberlite field, Rondonia, Brazil: Tuffisitic kimberlite and transitional textures**. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 174, p. 81 - 89.

- McCLENAGHAN, M. B., 2005. **Indicator mineral methods in mineral exploration**. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, v. 5, p. 233 – 245.
- McCLENAGHAN, M. B.; KJARSGAARD, B. A., 2007. **Indicator mineral and surficial geochemical exploration methods for kimberlite in glaciated terrain; Examples from Canada**, in Goodfellow, W.D., ed., *Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods*: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, p. 983 - 1006.
- MEYER, H. O. A.; SVISERO, D. P., 1973. **Mineral inclusions in Brazilian diamonds**. In: *International Kimberlite Conference: Extended Abstracts*, [S. l.], v. 1, p. 225 – 228, DOI: 10.29173/ikc891.
- MITCHELL, R. H., 1986. **Kimberlites - Mineralogy, Geochemistry, and Petrology**. New York: Plenum Press, 442 p.
- MITCHELL, R. H., 1995. **Kimberlites, orangeites, and related rocks**. Plenum Press, N.Y., 410 p.
- MITCHELL, R. H.; GIULIANI, A.; O'BRIEN, H., 2019. **What is a Kimberlite? Petrology and Mineralogy of Hypabyssal Kimberlites**. *Elements*, v. 15, p. 381 – 386, <https://doi.org/10.2138/gselements.15.6.381>.
- MORIMOTO, N., 1989. **Nomenclature of Pyroxenes**. *Canadian Mineralogist*, v. 27, p. 143 - 156.
- MUAVHI, N.; TESSEMA, A., 2021a. **Application of ground magnetic and soil geochemical surveys for mapping potential kimberlite bodies in the southern margin of the Archaean Kaapvaal Craton, South Africa**. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 231, 106877, <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106877>.
- MUAVHI, N.; TESSEMA, A., 2021b. **Identification of potential targets for kimberlite exploration using satellite imagery and map combination approach in the Lesotho Kimberlite Province**. *Ore Geology Reviews*, v. 132, 104001, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104001>.
- MUGGERIDGE, M. T., 1995. **Pathfinder sampling techniques for locating primary sources of diamond: Recovery of indicator minerals, diamonds and geochemical signatures**. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 53, p. 183-204.
- NANNINI, F., 2011. **Petrografia e química mineral de xenólitos mantélicos da intrusão kimberlítica Indaiá, Monte Carmelo, MG**. Dissertação (Mestrado em Petrologia Ígnea e Metamórfica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011, 99 p., doi:10.11606/D.44.2011.tde-17082011-111449.
- NANNINI, F., 2016. **Geologia e petrologia de xenólitos mantélicos da província ígnea do alto Paranaíba, Minas Gerais**. Tese (Doutorado em Petrologia Ígnea e Metamórfica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016, 288 p., doi:10.11606/T.44.2016.tde-04052016-112733.
- NANNINI, F.; CABRAL NETO, I.; SILVEIRA, F. V.; CUNHA, L. M.; DE OLIVEIRA, R. G.; WESKA, R. K., 2017. **Áreas kimberlíticas e diamantíferas do estado de Mato Grosso**. Brasília: CPRM, 42 p. il.
- NASCIMENTO, M. A.; RIOS, D. C.; SANTOS, I. P. L.; CONCEIÇÃO, H., 2018. **Ilmenitas Manganésíferas e suas Implicações para Kimberlitos Diamantíferos: Estudo de Caso no Dique Kimberlítico de Aroeira, Província Kimberlítica Nordestina, Bahia**. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ* – v. 41-3, p. 658 – 671, [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_3\\_658\\_671](http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_658_671).
- NOWICKI, T. E.; MOORE, R. O.; GURNEY, J. J.; BAUMGARTNER, M.C., 2007. **Diamonds and associated heavy minerals in kimberlite: a review of key concepts and applications**, *Developments in Sedimentology*, v. 58, p. 1235 – 1267, [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(07\)58046-5](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(07)58046-5).

PASIN, D. A. B., 2008. **Alteração hidrotermal nos kimberlitos do distrito diamantífero de Coromandel, Minas gerais, Brasil**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 236 p.

PEREIRA, R. S., 2001. **Técnicas exploratórias na prospecção de kimberlitos - estudo de caso**. Revista Brasileira de Geociências, v. 31, n. 4, p. 405 - 416.

PEREIRA, R. S.; FUCK, R. A.; FRANÇA, O. S.; LEITE, A. A., 2017. **Evidence of young, proximal and primary (YPP) diamond source occurring in alluviums in the Santo Antônio do Bonito, Santo Inácio and Douradinho rivers in Coromandel region, Minas Gerais**. Brazilian Journal of Geology, v. 47(3), p. 383 - 401, DOI: 10.1590/2317-4889201720170047.

PESLIER, A. H.; WOODLAND, A. B.; WOLFF, J. A., 2008. **Fast kimberlite ascent rates estimated from hydrogen diffusion profiles in xenolithic mantle olivines from southern Africa**. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 72, p. 2711 – 2722, doi:10.1016/j.gca.2008.03.019.

PISANI, J. R. T.; TANTON, K. M.; ALLAN, A. F.; SILVA, S. B.; MIRANDA, J. V., 2001. **Geology and exploration of the Brauna Diamondiferous Kimberlites, Serrinha Block, Bahia, Brazil**. Revista Brasileira de Geociências, v. 31, p. 663 – 664.

PROVENZANO, C. A. S., 2016. **Caracterização petrográfica, química mineral e petrogênese do kimberlito Alfeu 1 - Canguçu/RS e uma revisão conceitual de magmatismo e rochas kimberlíticas**. Dissertação de mestrado – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 215 p.

QUIRT, D. H., 2004. **Cr-diopside (clinopyroxene) as a kimberlite indicator mineral for diamond exploration in glaciated terrains**. In: Summary of Investigations 2004, v. 2, Saskatchewan Geological Survey, Sask. Industry Resources, Misc. Rep. 2004 - 4.2, CD-ROM, Paper A-10, 14 p.

ROBLES-CRUZ, S. E.; WATANGUA, M.; ISIDORO, L.; MELGAREJO, J. C.; GALÍ, S.; OLIMPIO, A., 2009. **Contrasting compositions and textures of ilmenite in the Catoca kimberlite, Angola, and implications in exploration for diamond**. Lithos, v. 112, p. 966 – 975, doi:10.1016/j.lithos.2009.05.040.

SALAVERRY, R. N.; ZUCOLOTO, M. E.; MENDES, J. C.; KEIL, K.; GATTACCECA, J.; VASQUES, F. de S. G., 2017: **The Buritzal meteorite: classification of a new Brazilian chondrite**. REM, Int. Eng. J., Ouro Preto, v. 70(2), p. 175-180, <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672016700081>.

SCHULZE, D. J., 2003. **A classification scheme for mantle-derived garnets in kimberlite: a tool for investigating the mantle and exploring for diamonds**. Lithos, v. 71, p. 195 – 213, doi:10.1016/S0024-4937(03)00113-0.

SCOTT SMITH, B. H.; NOWICKI, T. E.; RUSSELL, J. K.; WEBB, K. J.; MITCHELL, R. H.; HETMAN, C.M.; ROBEY, J.V., 2018. **A Glossary of Kimberlite and Related Terms Part 1**. Published by Scott-Smith Petrology Inc., North Vancouver, BC, Canada, 144 p.

Serviço Geológico do Brasil (SGB), 2004. **Mapa litoestratigráfico 1:1.000.000**. Disponível em: <<https://geosgb.sgb.gov.br/>>. Acesso em 18 de agosto de 2024.

SHIREY, S. B.; CARTIGNY, P.; FROST, D. J.; KESHAV, S.; NESTOLA, F.; NIMIS, P.; PEARSON, D. G.; SOBOLEV, N. V.; WALTER, M. J., 2013. **Diamonds and the Geology of Mantle Carbon**, Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Mineral. Soc. Am, v. 75 (1), p. 355 – 421, <https://doi.org/10.2138/rmg.2013.75.12>.

SILVA, G. M.; ENDO, I.; BARBOSA, M. S. C., 2016. **Magnetic analysis of Abaeté Diamondiferous District (Minas Gerais, Brazil) and its possible primary sources**. Brazilian Journal of Geophysics, v. 34(4), p. 523 - 531, <http://dx.doi.org/10.22564/rbqf.v34i4.874>.

- SILVA, S. da., 2008. **Petrografia e química mineral das intrusões Indaiá I e Indaiá II, oeste do Estado de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Petrologia Ígnea e Metamórfica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008, 113 p., doi:10.11606/D.44.2008.tde-15082008-145504.
- SIMAKOV, S. K.; STEGNITSKIY, Y. B., 2022. **On the presence of the postmagmatic stage of diamond formation in kimberlite**. Journal of Mining Institute. v. 255, p. 319 – 326, DOI: 10.31897/PMI.2022.22.
- SIMAKOV, S.; STEGNITSKIY, Y., 2021. **A new pyrope-based mineralogical-petrological method for identifying the diamond potential of kimberlite/lamproite deposits**. Ore and Energy Resource Geology, v. 7, 100013, <https://doi.org/10.1016/j.oreoa.2021.100013>.
- SIMANDL, G. J.; FERBEY, T.; LEVSON V. M.; ROBINSON, N. D.; LANE, R.; SMITH, R.; DEMCHUK, T. E.; RAUDSEPP, I. M.; HICKIN, A. S., 2005. **Kimberlite and diamond indicator minerals in Northeast British Columbia, Canada** – A Reconnaissance Survey, British Columbia Ministry of Energy, Mines Petroleum Resources GeoFile 2005 – 25, 25 p.
- STEVENS, R. E., 1944. **Composition of some chromites of the western hemisphere**. The American Mineralogist, v. 29(1–2), p. 1– 34.
- SVISERO, D. P.; CHIEREGATI, L. A., 1990. **Contexto geológico das ocorrências diamantíferas e de rochas kimberlíticas do Brasil**. Anais... São Paulo: Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo, p. 132 - 138.
- TOMPKINS, L. A., 1987. **Exploration for Kimberlites in the Southwest Goiás Region, Brazil: Mineral Chemistry of Stream Sediment Samples**. Journal of Geochemical Exploration, v. 27, p. 1 - 28.
- VASILENKO, V. B.; ZINCHUK, N. N.; KRASAVCHIKOV, V. O.; KUZNETSOVA, L. G.; KHLESTOV, V. V.; VOLKOVA, N. I., 2002. **Diamond potential estimation based on kimberlite major element chemistry**. Journal of Geochemical Exploration, v. 76, p. 93 – 112, [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(02\)00219-4](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00219-4).
- WEBB, K., HETMAN, C., 2021. **Magmaclasts in kimberlite**. Lithos, v. 396 – 397, 106197, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106197>.
- WYATT, B. A.; BAUMGARTNER, M.; ANCKAR, E.; GRÜTTER, H., 2004. **Compositional classification of “kimberlitic” and “no-kimberlitic” ilmenite**. Lithos, v. 77, p. 819 - 840.