

## Petrografia e potencial diamantífero do kimberlito Indaiá I, Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP), Brasil

### *Petrography and diamondiferous potential of the Indaiá I kimberlite, Alto Paranaíba Igneous Province (APIP), Brazil*

Nathan Vicente Almeida<sup>1</sup> , Cassandra Terra Barbosa<sup>1</sup>  & Cristiane Castro Gonçalves<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Geologia, Ouro Preto, Brasil. E-mails: nathan.almeida@aluno.ufop.edu.br, cassandra.terra@ufop.edu.br e cristiane.castro@ufop.edu.br.

**Resumo:** Kimberlitos são rochas ígneas, ultrabásicas, potássicas e ricas em cristais de olivina. Na Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP), no oeste de Minas Gerais, aflora a intrusão Indaiá I, cujo potencial diamantífero é considerado baixo. Sendo assim, objetivou-se realizar uma descrição petrográfica dessa rocha, bem como avaliar o seu potencial diamantífero baseando-se na composição química da olivina. Seis lâminas delgadas foram estudadas ao microscópio petrográfico, das quais foram selecionados cristais isolados de olivina e um xenólito dunítico para investigações de química mineral por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV/EDS). Este kimberlito de textura inequigranular contém muitos cristais frescos, com complexidades texturais derivadas de suas heterogeneidades químicas. Com base nos teores de forsterita, CaO e NiO, no núcleo das olivinas, observou-se que muitas delas são quimicamente diferentes daquelas coexistentes com diamantes, indicando uma intrusão estéril.

**Palavras-chave:** Intrusão Indaiá I; Mineralização de Diamante; Olivina; Pesquisa Mineral.

**Abstract:** Kimberlites are ultrabasic, potassic, olivine-rich igneous rocks. The Indaiá I intrusion outcrops in western Minas Gerais, in the Alto Paranaíba Igneous Province (APIP), and its diamondiferous potential is considered low. Hence, this study aimed to carry out a petrographic description of this rock, as well as to evaluate its diamondiferous potential based on the chemical composition of olivine. Six thin sections were observed under a petrographic microscope, from which olivine single crystals and a dunite xenolith were selected for mineral chemistry investigations by Scanning Electron Microscopy (SEM/EDS). This inequigranular kimberlite contains plenty of fresh crystals with textural complexities derived from their chemical heterogeneities. The contents of forsterite, CaO, and NiO in the olivine cores demonstrated that many of them are chemically different from those coexisting with diamonds, indicating a barren intrusion.

**Keywords:** Indaiá I Intrusion; Diamond Mineralization; Olivine; Mineral Research.

## 1. Introdução

O contexto geológico de algumas regiões brasileiras é marcado pela presença de muitos kimberlitos (p. ex., Svisero & Chierigati, 1990; Gibson *et al.*, 1995; Donatti-Filho *et al.*, 2013), que são comumente definidos como rochas ígneas complexas, inequigranulares, híbridas, ultrabásicas, potássicas, ricas em H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> e pobres em Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Eles constituem a principal fonte primária de diamantes, com origem associada a fontes mantélicas astenosféricas (Mitchell, 1986; Scott Smith *et al.*, 2018; Mitchell *et al.*, 2019). A olivina, um dos seus principais componentes (~ 50 %vol., Scott Smith *et al.*, 2018; Mitchell *et al.*, 2019), tem a sua gênese ainda controversa. Arndt *et al.* (2010) defendem que uma porcentagem relevante de olivinas kimberlíticas não é derivada do fundido, mencionando os *tablets*, que são cristais subédricos/euédricos derivados da recristalização de xenólitos, que podem ser considerados, equivocadamente, fenocristais.

Para muitas rochas ígneas, os minerais euédricos são considerados fenocristais, enquanto os macrocristais (> 0,5 mm) são classificados como xenocristais (p. ex., Mitchell, 1986; Cas *et al.*, 2008). Nos últimos anos, diversos trabalhos têm discutido a origem da olivina em rochas kimberlíticas (p. ex., Brett *et al.*, 2009; Arndt *et al.*, 2010; Giuliani, 2018; Moore *et al.*, 2021, entre outros), concentrando-se as discussões na sua composição química. Consideram a existência de um núcleo xenolítico rico em NiO, sobre o qual se cristalizou uma borda enriquecida em CaO (Brett *et al.*, 2009; Bussweiler *et al.*, 2015). Além disso, levando-se em conta o conteúdo em forsterita (Fo), Lima *et al.* (2020) propuseram duas tendências que separam os cristais de olivina mantélicos (*mantle trend*, Fo > 90%) daqueles formados pela solidificação do magma kimberlítico (*melt trend*, Fo 88 - 90%).

Na pesquisa mineral, utiliza-se da composição química de fases minerais coexistentes com diamantes para a investigação de possíveis mineralizações em kimberlitos (Pereira, 2001; Nowicki *et al.*, 2007). Neste contexto, insere-se o estudo dos cristais e gerações de olivina (p. ex., Fipke *et al.*, 1995), que pode ser usado para sugerir o teor de depósitos (p. ex., Giuliani *et al.*, 2023). No entanto, trabalhos focados em criteriosas caracterizações microquímica e microtextural desses cristais, que antecedem a projeção de potencial diamantífero de um corpo, ainda são escassos. Também, a rápida alteração dos cristais de olivina, que são substituídos por minerais secundários por se encontrarem muitas vezes em condições metaestáveis, dificulta a condução desses trabalhos, devido à perda inevitável de informações relativas à sua cristalização.

O kimberlito Indaiá I é uma intrusão hipoabissal do grupo I (Meyer *et al.*, 1991; Lima *et al.*, 2020) datada do Cretáceo (80 ± 5 Ma, Guarino *et al.*, 2013), que aflora no oeste do Estado de Minas Gerais, na Província Ígnea do Alto Paranaíba (PIAP) (Gibson *et al.*, 1995). De acordo com Silva (2008), esse corpo apresenta características que sugerem uma intrusão estéril, embora existam cristais de ilmenita cuja composição química indica condições favoráveis à preservação do diamante. Objetivou-se, a partir da caracterização petrográfica do kimberlito Indaiá I, com foco na análise microquímica de cristais de olivina, discutir o seu potencial diamantífero.

## 2. Materiais e Métodos

No Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto (DEGEO/UFOP), a petrografia do kimberlito Indaiá I foi realizada através da observação, ao microscópio petrográfico ZEISS, de seis seções delgadas confeccionadas no Serviço Geológico do Brasil (SGB). Além disso, fotomicrografias das lâminas foram tiradas com uma câmera ZEISS Axiocam MRc 5 acoplada ao microscópio LEICA DMLP, permitindo a medição do tamanho dos seus componentes no *software* ImageJ (<https://imagej.net/ij/>) a partir da análise de mosaicos.

O Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM-6510, com detector de energia dispersiva de raios X Pentaflex-INCA EDS-Oxford Instruments (MEV/EDS), foi utilizado para determinar a composição química de 39 cristais isolados de olivina, bem como de 1 cristal de piroxênio e 4 cristais de olivina provenientes de xenólito dunítico. Os resultados foram obtidos como porcentagem em peso dos óxidos dos elementos químicos detectados. Adicionalmente, geraram-se as imagens de elétrons retroespalhados. O equipamento operou com a voltagem de 20 kV, *spot size* de 70 e a distância de trabalho de 13 mm. Os valores das análises foram confrontados com os dados de Silva (2008) para macrocristais e fenocristais de olivina oriundos da mesma intrusão kimberlítica.

Para apontar o potencial diamantífero do Indaiá I, comparou-se a composição química dos seus cristais de olivina com aquelas encontradas como inclusões em diferentes diamantes (mina Kelsey Lake, no Colorado, EUA, Schulze *et al.*, 2008; regiões da Sibéria, Sobolev *et al.*, 2008). Plotaram-se os dados nos gráficos Fo x CaO e Fo x NiO, aos quais foram adicionados os campos genéticos definidos por Lima *et al.* (2020). Dessa forma, analisou-se o potencial diamantífero da intrusão, inserindo também uma discussão sobre as possíveis gênese da olivina.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Petrografia

A intrusão Indaiá I exibe uma textura inequigranular (Figs. 1A - F), que é caracterizada pela existência de 25 - 42 vol.% de cristais isolados de olivina com diferentes graus de alteração, variando de pseudomorfos constituídos de serpentina a cristais altamente preservados. Além disso, há flogopita, xenólitos, magmaclastos (Fig. 1A), minerais opacos e raros cristais de ortopiroxênio inseridos numa matriz finamente granulada de coloração verde acinzentada que contém olivina, serpentina, opacos, carbonatos, apatita e perovskita (também monticellita e badeleíta, Lima *et al.*, 2020). A granada não foi identificada, embora Svisero & Haralyi (1984) tenham mencionado a sua presença nesta rocha. Os xenólitos são representados tanto por agregados com diferentes proporções de olivina, piroxênio, opacos, flogopita quanto por misturas complexas de carbonatos.

Os cristais isolados de olivina têm diversas formas, variando de anédricos a euédricos, com tamanho variando de 0,27 a 6,24 mm. Observaram-se seções arredondadas e fraturadas (Fig. 1B), como também se notou a existência de extinção ondulante e cor de interferência anômala. Essas feições estão de acordo com a literatura, uma vez que cristais arredondados são comuns em rochas kimberlíticas (p. ex., Brett *et al.*, 2009, 2015), sendo provavelmente moldados durante a ascensão do magma por abrasão e reabsorção (p. ex., Arndt *et al.*, 2006; Moore, 2012), enquanto a extinção ondulante está relacionada a processos locais de deformação intracristalina (p. ex., Passchier & Trouw, 2005). O xenólito descrito (Fig. 1C), por sua vez, tem tamanho igual a 3,3 mm, apresentando cerca de 95 vol.% de olivina e 5 vol.% de ortopiroxênio, classificando-se como dunito, segundo o diagrama de Streckeisen (1976).

As microfraturas formam veios preenchidos por carbonato, localmente exibindo o desenvolvimento de bowlingita no contato com os cristais de olivina (Fig. 1D). Os raros ortopiroxênios, tanto os macrocristais isolados quanto em xenólitos, comumente exibem uma borda de reação acastanhada (Figs. 1C, 1E e 1F), o que mostra que pertencem a uma mesma geração e que estavam fora de equilíbrio com o fundido (p. ex., Arndt *et al.*, 2010). Portanto, consolida-se a ideia de que, durante a ascensão do magma, esses xenólitos e cristais foram fragmentados (p. ex., Jerram *et al.*, 2009; Jones *et al.*, 2014; Brett *et al.*, 2015) e protegidos da assimilação pelo líquido magmático. Deve-se estudar o papel

desempenhado pela borda de reação na preservação das regiões internas dos ortopiroxênios, visto que são geralmente consumidos pelo magma, resultando na sua raridade nos kimberlitos (p. ex., Arndt *et al.*, 2006; Kamenetsky *et al.*, 2009; Arndt *et al.*, 2010; Stone & Luth, 2016).

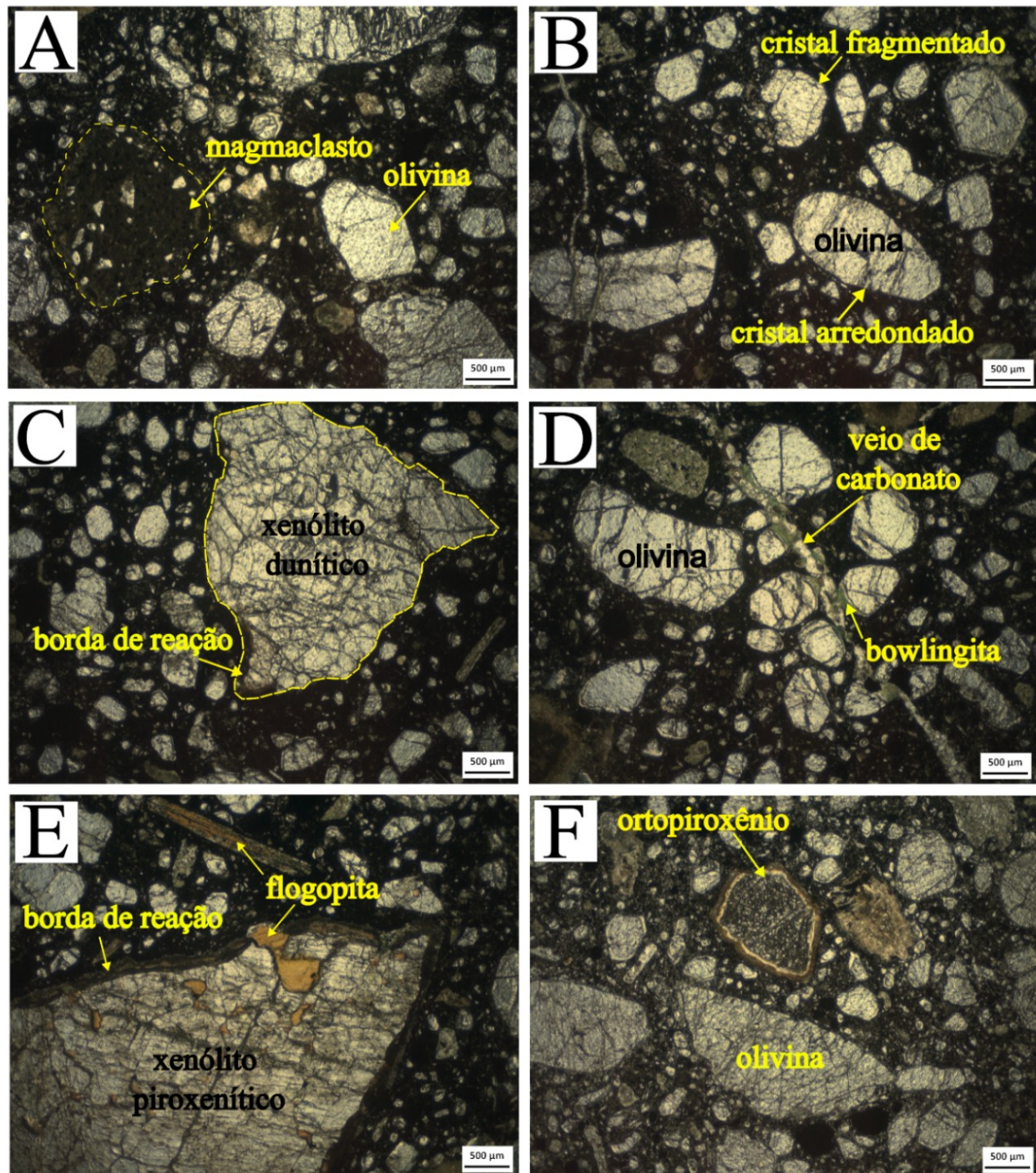


Figura 1. Fotomicrografias ópticas do Indaiá I sob luz plana. A) Magmaclasto; B) Olivina arredondada e outro cristal quebrado; C) Dunito com piroxênio apresentando a borda de reação acastanhada; D) Veio de carbonato e cristais de olivina alterados para bowlingita (verde); E) Piroxenito com seus cristais de piroxênio com a borda de reação acastanhada; F) Seção basal de um piroxênio.

Figure 1. Optical photomicrographs taken under plane light of the Indaiá I. A) Magmaclast; B) Rounded olivine and another broken crystal; C) Dunite with pyroxene showing a brownish reaction rim; D) Vein filled with carbonate and olivine crystals altered to bowlingite (green in colour); E) Pyroxene crystals exhibiting the brownish reaction rim in a pyroxenite fragment; F) Basal section of a pyroxene.

## 3.2 Química Mineral

### 3.2.1 Xenólito Dunítico

A composição dos cristais de olivina e piroxênio encontrados no xenólito dunítico está disponível na Tabela 1. Pode-se analisar outros detalhes nos dados suplementares. O piroxênio é enriquecido em MgO (34,34 %), contém pouco FeO (6,99 %) e é pobre em CaO (0,75 %). Com base na concentração dos seus membros finais wollastonita (1,39 %), enstatita (88,51 %) e ferrossilita (10,1%), classificou-se como enstatita (ortopiroxênio) no diagrama proposto por Morimoto (1988).

O conteúdo em forsterita dos cristais de olivina variou de 86,28 a 88,67 mol.%, atingindo valores similares aos reportados por Lima *et al.* (2020) para olivinas provenientes de dunito. Além disso, eles exibiram teores maiores de NiO (até 0,52 %) do que os de CaO (até 0,11 %), o que remete à sua origem mantélica.

Tabela 1. Composição química dos cristais do xenólito dunítico (%). FeO<sub>T</sub> (ferro total), n.d. (não detectado), Ol (olivina), Px (piroxênio), Fo (conteúdo em forsterita) = 100Mg/(Mg+Fe<sub>T</sub>), Wo (wollastonita) = 100Ca/(Ca+Mg+Fe<sub>T</sub>), En (enstatita) = 100Mg/(Ca+Mg+Fe<sub>T</sub>), Fs (ferrossilita) = 100(Fe<sub>T</sub>)/(Ca+Mg+Fe<sub>T</sub>). Fórmula estrutural com base em 4 e 6 oxigênios, para olivina e piroxênio, respectivamente.

Table 1. Chemical composition of crystals from dunite xenolith (%). FeO<sub>T</sub> (total iron), n.d. (not detected), Ol (olivine), Px (pyroxene), Fo (forsterite content) = 100Mg/(Mg+Fe<sub>T</sub>), Wo (wollastonite) = 100Ca/(Ca+Mg+Fe<sub>T</sub>), En (enstatite) = 100Mg/(Ca+Mg+Fe<sub>T</sub>), Fs (ferrosilite) = 100Fe<sub>T</sub>/(Ca+Mg+Fe<sub>T</sub>). Structural formula based on 4 and 6 oxygen atoms for olivine and pyroxene, respectively.

| Óxidos (%)                     | Ol-01  | Ol-02  | Ol-03  | Ol-04 | Px-01  |
|--------------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|
| SiO <sub>2</sub>               | 39,11  | 39,59  | 39,37  | 39,69 | 56,80  |
| TiO <sub>2</sub>               | n.d.   | n.d.   | n.d.   | n.d.  | 0,2    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | n.d.   | n.d.   | n.d.   | n.d.  | 0,37   |
| FeO <sub>T</sub>               | 13,31  | 11,69  | 12,19  | 11,08 | 6,99   |
| MnO                            | 0,13   | 0,2    | 0,21   | 0,15  | 0,16   |
| MgO                            | 46,93  | 48,09  | 47,66  | 48,64 | 34,34  |
| CaO                            | n.d.   | 0,08   | 0,11   | 0,07  | 0,75   |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | n.d.   | n.d.   | n.d.   | n.d.  | 0,39   |
| NiO                            | 0,52   | 0,36   | 0,47   | 0,36  | n.d.   |
| Total                          | 100,00 | 100,01 | 100,01 | 99,99 | 100,00 |
| Fo %                           | 86,28  | 88,00  | 87,45  | 88,67 |        |
| Wo %                           |        |        |        |       | 1,39   |
| En %                           |        |        |        |       | 88,51  |
| Fe %                           |        |        |        |       | 10,1   |

### 3.2.2 Olivina

A variação composicional dos cristais isolados de olivina analisados e seus tamanhos foram organizados na Tabela 2, segundo a perfeição da forma observada, em cristais euédricos, subédricos e anédricos. Maiores detalhes das análises para cada cristal estão disponíveis nos dados suplementares. Entre os óxidos detectados, destacaram-se os teores de MgO, FeO<sub>T</sub> e SiO<sub>2</sub>, os quais refletem a composição geral da olivina. Os teores de

MgO assumiram os maiores valores em relação aos teores de  $\text{FeO}_T$ , demonstrando o caráter fortemente magnesiano de parte dos cristais. O conteúdo em forsterita (Fo) variou entre 76,64 e 95,98 mol.%, enquanto o NiO de 0,02 a 0,48 %, o MnO de 0,09 a 0,66 %, o  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  de 0,11 a 0,13 % e o CaO de 0,05 a 1,57 %. Muitos resultados obtidos neste trabalho corroboram os intervalos composicionais determinados por Silva (2008) (Tab. 2).

Tabela 2. Intervalos de tamanho e da composição química dos cristais de olivina encontrados no kimberlito Indaiá I. Fo (conteúdo em forsterita) =  $100\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}_T)$ ,  $\text{FeO}_T$  (ferro total), n = número de análises. Fórmula estrutural com base em 4 oxigênios.

Table 2. Ranges of size and chemical composition of olivine crystals found in the Indaiá I kimberlite. Fo (forsterite content) =  $100\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}_T)$ ,  $\text{FeO}_T$  (total iron), n = number of analyses. Structural formula based on 4 oxygen atoms.

|                         | 9 cristais<br>anédricos |                  | 14 cristais subédricos |               | 16 cristais<br>euédricos | Cristais de<br>olivina<br>(Silva,<br>2008) |                  |                  |
|-------------------------|-------------------------|------------------|------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------------------------|------------------|------------------|
| Tamanho<br>(mm)         | 1,80 - 4,62             |                  | 0,69 - 1,70            |               | 0,41 - 1,26              |                                            |                  |                  |
|                         |                         |                  | Zona                   |               |                          |                                            |                  |                  |
|                         | Núcleo                  | Borda            | Núcleo                 | intermediária | Borda                    | Núcleo                                     | Borda            |                  |
| Óxidos (%)              | n = 9                   | n = 9            | n = 14                 | n = 1         | n = 14                   | n = 16                                     | n = 16           |                  |
| $\text{SiO}_2$          | 38,12 -<br>40,54        | 38,43 -<br>39,26 | 37,19 -<br>40,40       | 38,75         | 38,38 -<br>41,00         | 37,80 -<br>40,31                           | 38,10 -<br>38,91 | 39,11 -<br>41,42 |
| $\text{TiO}_2$          |                         |                  |                        |               |                          |                                            |                  | 0,01 - 0,11      |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ |                         |                  |                        |               |                          |                                            |                  | 0,01 - 0,06      |
| $\text{FeO}_T$          | 7,9 -<br>17,87          | 13,55 -<br>16,93 | 8,33 -<br>21,95        | 15,92         | 3,95 -<br>16,80          | 8,49 -<br>18,98                            | 15,35 -<br>17,41 | 6,91 -<br>16,43  |
| MnO                     | 0,12 -<br>0,29          | 0,15 -<br>0,35   | 0,13 -<br>0,29         | 0,19          | 0,19 -<br>0,66           | 0,09 -<br>0,28                             | 0,18 -<br>0,38   | 0,07 - 0,91      |
| MgO                     | 43,42 -<br>51,01        | 44,11 -<br>46,76 | 40,39 -<br>50,75       | 44,96         | 44,13 -<br>52,83         | 42,54 -<br>50,69                           | 43,76 -<br>45,06 | 43,68 -<br>51,44 |
| CaO                     |                         |                  |                        |               | 0,09 -<br>1,57           | 0,05 -<br>0,12                             | 0,08 -<br>0,20   | 0,01 - 0,28      |
| $\text{Na}_2\text{O}$   |                         |                  |                        |               |                          |                                            |                  | 0,01 - 0,04      |
| $\text{K}_2\text{O}$    |                         |                  |                        |               |                          |                                            |                  | 0,01 - 0,03      |
| $\text{Cr}_2\text{O}_3$ |                         |                  |                        |               | 0,11                     |                                            | 0,12 -<br>0,13   | 0,01 - 0,15      |
| NiO                     | 0,23 -<br>0,48          | 0,02 -<br>0,38   | 0,2 -<br>0,45          | 0,17          | 0,12 -<br>0,26           | 0,17 -<br>0,44                             | 0,13 -<br>0,30   | 0,07 - 0,94      |
| Fo mol. %               | 81,25 -<br>92,01        | 82,29 -<br>86,02 | 76,64 -<br>91,57       | 83,43         | 82,40 -<br>95,98         | 79,98 -<br>91,41                           | 81,76 -<br>83,94 | 83 - 95          |

As fotomicrografias geradas pela detecção de elétrons retroespalhados (Figs. 2A - F) ilustram a existência de pelo menos três grupos texturais de olivina, sendo representados pelos cristais com zoneamento normal (Figs. 2B, 2C e 2E) ou reverso (Fig. 2D) e pelos cristais homogêneos quimicamente (Figs. 2A e 2F). Considera-se um padrão de zoneamento normal aquele caracterizado pelo aumento de FeO e diminuição de MgO do núcleo em direção à borda, enquanto o reverso apresenta variações opostas para ambos os óxidos. Algumas bordas dos cristais apresentaram inclusões (Fig. 2D) que

provavelmente são da matriz do kimberlito, indicando sua provável origem na cristalização do magma. Além disso, Arndt *et al.* (2010) mencionaram fenocristais de olivina com inclusões de cromita.

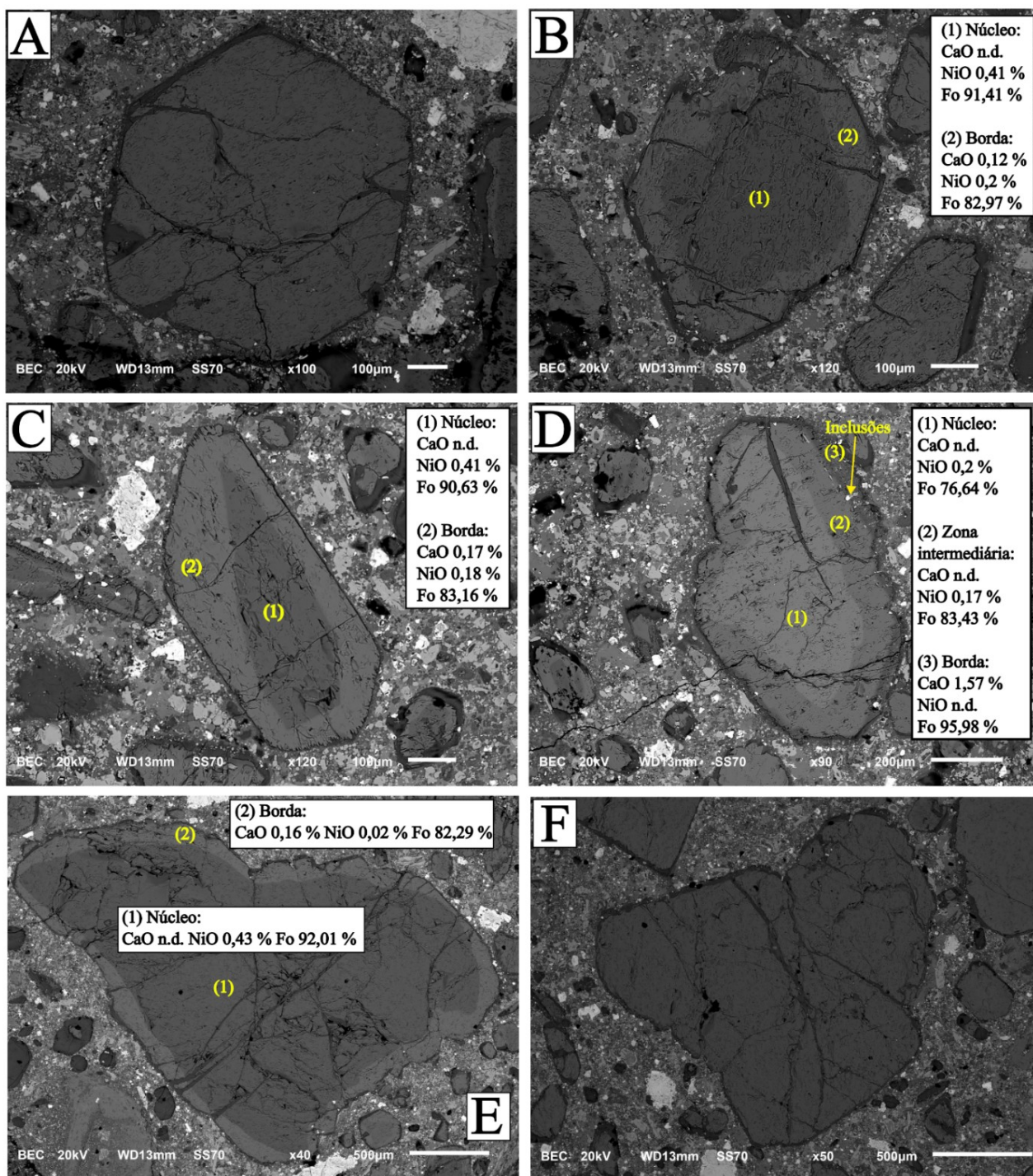


Figura 2. Fotomicrografias pela detecção de elétrons retroespalhados de cristais isolados de olivina encontrados no kimberlito Indaiá I (MEV/EDS). A) Cristal euédrico sem zoneamento visível; B) e C) Cristais euédricos com zoneamento normal; D) Cristal subédrico com zoneamento reverso; E) Cristal anédrico com zoneamento normal; F) cristal anédrico sem zoneamento visível.

Figure 2. Backscattered electron images of olivine single crystals found in the Indaiá I kimberlite (SEM/EDS). A) Euhedral crystal without visible zoning; B) and C) Euhedral crystals with normal zoning; D) Subhedral crystal with reverse zoning; E) Anhedral crystal with normal zoning; F) Anhedral crystal without visible zoning.

No que se refere à morfologia da olivina, observou-se um cristal com núcleo anguloso, mas que se tornou euédrico com o sobrecrecimento (Fig. 2C), o que corrobora o trabalho de Brett *et al.* (2009). Esses autores observaram que a cristalização de bordas volumosas pode levar à alteração da forma original do cristal, tornando-o euédrico. Sendo assim, a separação entre xenocristais e fenocristais em rochas kimberlíticas, que se baseia exclusivamente em critérios morfológicos, pode ser considerada inadequada.

Os cristais caracterizados pelo zoneamento reverso, em que o teor de FeO se destaca no núcleo, podem ser antecristais que foram adicionados ao magma, sobre os quais houve nova cristalização (p. ex., Lima *et al.*, 2020). Um cristal subédrico de olivina zonada exibiu três regiões quimicamente distintas (Fig. 2D), as quais foram denominadas de núcleo (Fo = 76,64 mol.%), zona intermediária (Fo = 83,43 mol.%) e borda (Fo = 95,98 mol.%; CaO = 1,57 %). Esta última região enriquecida em CaO contém numerosas inclusões, o que sugere uma cristalização magmática. Além disso, o seu elevado teor em forsterita é compatível com a porção mais externa da olivina chamada de *rind* por Giuliani (2018). Essas variações na composição química ao longo do mesmo cristal dificultam a determinação do potencial diamantífero de kimberlitos.

Na Figura 3, têm-se os gráficos Fo x CaO e Fo x NiO para os cristais de olivina, que consideram os campos genéticos definidos por Lima *et al.* (2020). No que se refere à composição química do núcleo dos cristais analisados (Fig. 3), observou-se que, apesar do amplo intervalo composicional determinado, a maioria das análises não remete a composições tipicamente mantélicas, uma vez que os cristais do Indaiá I são mais enriquecidos em CaO e com menor conteúdo em Fo, principalmente em suas bordas.

Os dados de composição química de inclusões de olivina nos diamantes estudados por Schulze *et al.* (2008) e Sobolev *et al.* (2008) foram inseridos na Fig. 3 para efeito comparativo e são caracterizados pelo conteúdo em forsterita superior a 90% e por teores de NiO que se destacam mais do que CaO. Também, acumularam-se no campo que remete a uma origem no manto, o que é uma indicação já esperada por serem fases coexistentes com o diamante.

Os maiores teores de NiO foram obtidos para os núcleos dos cristais estudados, enquanto o CaO foi detectado principalmente em suas bordas, corroborando outros trabalhos que defendem um núcleo xenolítico envolvido por uma borda cristalizada a partir do líquido magmático, baseando-se nos teores desses óxidos (p. ex., Brett *et al.*, 2009; Bussweiler *et al.*, 2015).

Notou-se que as análises de núcleo (Fig. 3B) foram as que mais se assemelharam à composição química das olivinas coexistentes com diamante, o que não foi identificado nas análises de borda, cuja composição mais se distancia das inclusões, por exemplo, com teores maiores de CaO. Sendo assim, espera-se que as regiões interpretadas como derivadas da cristalização magmática não sejam capazes de sugerir a presença do diamante, pois foram geradas em condições diferentes.

As evidências geoquímicas e texturais já mencionadas, tais como, variações nos teores de NiO, CaO, conteúdo em forsterita e inclusões nas bordas (Fig. 2D), demonstram a natureza híbrida de muitas olivinas. Dessa forma, as investigações de potencial diamantífero de kimberlito que objetivam realizar uma abordagem integrada da composição química e da gênese desses cristais são complexas, trazendo resultados de difícil interpretação.

Ademais, considerando a existência desses cristais zonados, nos quais há um núcleo xenolítico envolvido por uma borda cristalizada a partir do magma, observa-se que

as análises dessa primeira região interna podem ser as mais adequadas para sugerir a presença ou não de diamantes numa intrusão. No entanto, não se deve desconsiderar a possibilidade de haver cristais homogêneos, isto é, que não apresentam diferenças significativas entre a composição da borda e do núcleo, embora possam ser exceções. Sendo assim, levando-se em conta que a maioria das análises do núcleo está distante dos valores assumidos pelas inclusões de olivina, que são muito mais enriquecidas em forsterita do que a maioria dos cristais do Indaiá I, fortalece-se a ideia de que se trata de um kimberlito de baixo potencial diamantífero, podendo ser estéril, tal como Silva (2008) havia observado.

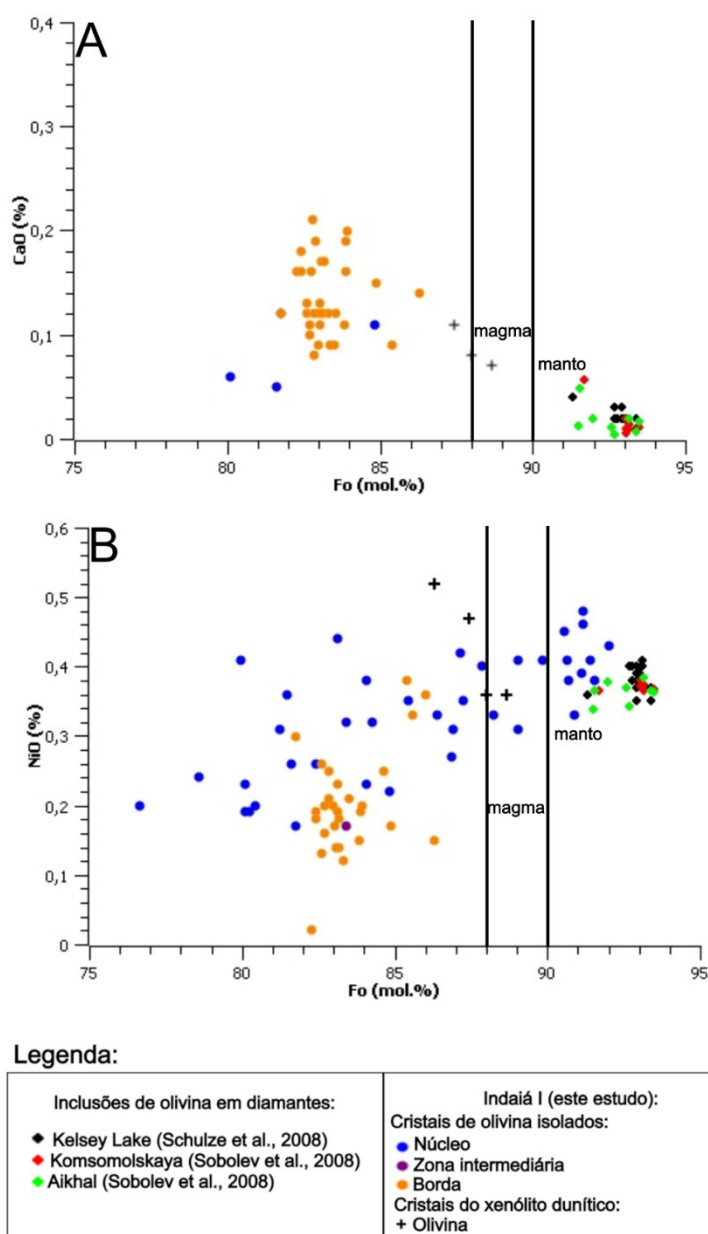


Figura 3. Gráficos A) Fo x CaO e B) Fo x NiO para os cristais de olivina (com exceção da borda rica em CaO = 1,57 %). Os campos genéticos que separam os cristais mantélicos daqueles formados pela cristalização do magma, com base no conteúdo em forsterita, foram extraídos de Lima *et al.* (2020).

Figure 3. A) Fo x CaO and B) Fo x NiO plots for olivine crystals (except for the CaO-rich rim = 1.57 %). The genetic fields that separate mantle crystals from those formed by magma crystallization, based on forsterite content, were extracted from Lima *et al.* (2020).

#### 4. Conclusões

Realizou-se a caracterização petrográfica do kimberlito Indaiá I e avaliou-se o seu potencial diamantífero com base na composição química da olivina, que está presente em grande porcentagem e com grau de alteração geralmente baixo. Entre os componentes dessa rocha de textura inequigranular, citam-se os macrocristais de olivina, flogopita, xenólitos, minerais opacos, magmaclastos e raros cristais de ortopiroxênio inseridos numa matriz finamente granulada constituída de olivina, serpentina, carbonatos, opacos, perovskita e apatita.

Os cristais de olivina exibem heterogeneidades químicas, gerando diferentes texturas que dificultam a análise do potencial diamantífero da intrusão. Além disso, muitos dados ficaram fora dos campos genéticos delimitados por Lima *et al.* (2020), demonstrando a existência de uma química mineral muito mais diversa e complexa. De modo geral, notou-se que o elevado conteúdo em forsterita associado aos expressivos teores de NiO indicam uma origem mantélica para o núcleo dos cristais, enquanto a presença de CaO, inclusões e teores menores tanto de NiO quanto de forsterita refletem uma possível cristalização da borda a partir da solidificação do magma kimberlítico, reforçando o caráter híbrido da olivina.

Portanto, nos trabalhos de pesquisa mineral, as análises químicas realizadas no núcleo dos cristais podem ser as mais adequadas para sugerir a mineralização de diamantes em kimberlitos. Baseando-se nos teores de NiO, CaO e forsterita, observou-se que a composição dessa região de vários cristais de olivina do Indaiá I é muito diferente daquelas inclusões em diamantes provenientes de contextos geológicos distintos, o que aponta para uma intrusão de baixo potencial diamantífero, podendo ser estéril.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) a bolsa de iniciação científica, ao Serviço Geológico do Brasil (SGB) a confecção das lâminas delgadas, ao Laboratório de Microscopia do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto (DEGEO/UFOP) a disponibilização do microscópio petrográfico, ao Laboratório de Microscopia e Microanálises (LMic) do DEGEO/UFOP, integrante da Rede de Microscopia e Microanálises de Minas Gerais - RMic/Brasil/FAPEMIG e financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG (projeto APQ-02529-24), as fotomicrografias e as análises químicas com MEV/EDS. Também, os autores agradecem as sugestões enviadas na etapa de revisão, que contribuíram para a melhoria deste trabalho.

**Contribuições dos Autores:** N.V.A., C.T.B. e C.C.G.: Escrita do Artigo, Metodologia, Análise de Dados e Revisão; N.V.A.: *Software* e Elaboração de Figuras/Tabelas. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

**Conflito de Interesse:** Os autores declaram não haver conflito de interesse.

#### Referências

- Arndt, N.T.; Boullier, A.-M.; Clement, J.P.; Dubois, M.; Schissel, D. 2006. What olivine, the neglected mineral, tells us about kimberlite petrogenesis. *eEarth*, 1: 15-21. <https://doi.org/10.5194/ee-1-15-2006>
- 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*, 51(3): 573-602. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp080>
- Brett, R.C.; Russell, J.K.; Moss, S. 2009. Origin of olivine in kimberlite: Phenocryst or impostor? *Lithos*, 112(1): 201-212. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.030>
- 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*, 424: 119-131. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.05.024>

- Bussweiler, Y.; Foley, S.F.; Prelević, D.; Jacob, D.E. 2015. The olivine macrocryst problem: New insights from minor and trace element compositions of olivine from Lac de Gras kimberlites, Canada. *Lithos*, 220-223: 238-252. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.02.016>
- Cas, R.A.F.; Hayman P.; Pittari, A.; Porritt, L. 2008. Some major problems with existing models and terminology associated with kimberlite pipes from a volcanological perspective, and some suggestions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 174(1-3): 209-225. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.12.031>
- 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*, 353:19-35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.06.004>
- 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, 86p.
- 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*, 36(1):189-229. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.1.189>
- Giuliani, A. 2018. Insights into kimberlite petrogenesis and mantle metasomatism from a review of the compositional zoning of olivine in kimberlites worldwide. *Lithos*, 312-313: 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(1): 6999. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42888-x>
- 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*, 353: 65-82. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.06.016>
- Jerram, D.A.; Mock, A.; Davis, G.R.; Field, M.; Brown, R.J. 2009. 3D crystal size distributions: A case study on quantifying olivine populations in kimberlites. *Lithos*, 112: 223-235. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.05.042>
- Jones, T.J.; Russell, J.K.; Porritt, L.A.; Brown, R.J., 2014. Morphology and surface features of olivine in kimberlite: implications for ascent processes. *Solid Earth*, 5: 313-326. <https://doi.org/10.5194/se-5-313-2014>
- Kamenetsky, V.S.; Kamenetsky, M.B.; Sobolev A.V.; Golovin A.V.; Sharygin V.V.; Pokhilenko N.P.; Sobolev, N.V. 2009. Can pyroxenes be liquidus minerals in the kimberlite magma? *Lithos*, 112(1): 213-222. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.03.040>
- 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*, 58(5): 563-585. <https://doi.org/10.3749/canmin.2000031>
- Meyer, H.O.A.; Garwood, B.L.; Svisero, D.P.; Smith, C.B. 1991. Alkaline ultrabasic intrusions in western Minas Gerais, Brazil. In: PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL KIMBERLITE CONFERENCE, 5., 1991, Araxá. *Annals...* Araxá, v. 1, p. 140-155.
- Mitchell, R.H. 1986. *Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*. New York, Plenum Press, 442p.
- Mitchell, R.H.; Giuliani, A.; O'Brien, H. 2019. What is a Kimberlite? Petrology and Mineralogy of Hypabyssal Kimberlites. *Elements*, 15(6): 381-386. <https://doi.org/10.2138/gselements.15.6.381>
- Moore, A.E. 2012. The case for a cognate, polybaric origin for kimberlitic olivines. *Lithos*, 128-131: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.11.002>
- Moore, A.; Costin, G.; Proyer, A. 2021. Cognate versus xenocrystic olivines in kimberlites – A review. *Earth-Science Reviews*, 221: 103771. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103771>
- Morimoto, N. 1988. Nomenclature of Pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, 39: 55-76. <https://doi.org/10.1007/BF01226262>

- Nowicki, T.E.; Moore, R.O.; Gurney, J.J.; Baumgartner, M.C. 2007. Chapter 46 Diamonds and Associated Heavy Minerals in Kimberlite: A Review of Key Concepts and Applications. *Developments in Sedimentology*, 58: 1235-1267. [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(07\)58046-5](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(07)58046-5)
- Passchier, C.W. & Trouw, R.A.J. 2005. *Microtectonics*. 2nd Edition. Berlin, Springer, 366p.
- Pereira, R.S. 2001. Técnicas exploratórias na prospecção de kimberlitos - estudo de caso. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(4): 405-416. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2001314405416>
- Schulze, D.J.; Coopersmith, H.G.; Harte B.; Pizzolato, L.A. 2008. Mineral inclusions in diamonds from the Kelsey Lake Mine, Colorado, USA: Depleted Archean mantle beneath the Proterozoic Yavapai province. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(6): 1685-1695. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.09.037>
- 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*. North Vancouver, BC, Canadá, Scott-Smith Petrology Inc., 144p.
- Silva, S. da. 2008. *Petrografia e química mineral das intrusões Indaiá I e Indaiá II, oeste do Estado de Minas Gerais*. São Paulo, 113p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Sobolev, N.V.; Logvinova, A.M.; Zedgenizov, D.A.; Pokhilenko N.P.; Kuzmin, D.V.; Sobolev, A.V. 2008. Olivine inclusions in Siberian diamonds: high-precision approach to minor elements. *European Journal of Mineralogy*, 20(3): 305-315. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2008/0020-1829>
- Stone, R.S. & Luth, R.W. 2016. Orthopyroxene survival in deep carbonatite melts: implications for kimberlites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171(7): 63. <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1276-2>
- Streckeisen, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, 12(1): 1-33. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(76\)90052-0](https://doi.org/10.1016/0012-8252(76)90052-0)
- Svisero, D.P. & Chierigati, L.A. 1990. Contexto geológico das ocorrências diamantíferas e de rochas kimberlíticas do Brasil. In: BOLETIM ESPECIAL TRABALHOS APRESENTADOS, 1990, São Paulo. *Anais...* São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, p. 132-138.
- Svisero, D.P. & Haralyi, N.L.E. 1984. O kimberlito Indaiá, Monte Carmelo - MG. In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., Rio de Janeiro, RJ. *Anais...* Rio de Janeiro, v. 10, p. 5014-5026.