



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
INSTITUTO DE GEOCÊNCIAS  
CURSO DE GEOLOGIA**

**CRISTINE DE ALMEIDA PEREIRA**

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA DO PALASITO  
QUIJINGUE: UMA REAVALIAÇÃO A PARTIR DA  
MINERALOGIA PRINCIPAL**

**Salvador  
2019**

**CRISTINE DE ALMEIDA PEREIRA**

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA DO PALASITO  
QUIJINGUE: UMA REAVALIAÇÃO A PARTIR DA  
MINERALOGIA PRINCIPAL**

Monografia apresentada ao Curso de Geologia,  
Instituto de Geociências, Universidade Federal  
da Bahia, como requisito parcial para obtenção  
do grau de Bacharel em Geologia

Orientadora: Profa. Dra. Débora Correia Rios  
Co-orientadora: Profa. Dra. Maria Elizabeth  
Zucolotto

**Salvador  
2019**

**TERMO DE APROVAÇÃO**

**CRISTINE DE ALMEIDA PEREIRA**

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA DO PALASITO  
QUIJINGUE: UMA REAValiaÇÃO A PARTIR DA  
MINERALOGIA PRINCIPAL**

Trabalho final de graduação aprovado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em geologia, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinada:

1º Examinador – Profa. Dra. Débora Correia Rios

Universidade Federal da Bahia – Instituto de Geociências

2º Examinador – Profa. Dra. Maria Elizabeth Zucolotto

Universidade Federal do Rio de Janeiro – Museu Nacional

3º Examinador – Profa. Dra. Simone Cerqueira Pereira Cruz

Universidade Federal da Bahia – Instituto de Geociências

4º Examinador – Dr. Wilton Pinto de Carvalho

Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado da Bahia

**Salvador, 20 de novembro de 2019**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Pereira, Cristine de Almeida  
Caracterização Petrográfica do Palasito Quijingue:  
uma reavaliação a partir da mineralogia principal /  
Cristine de Almeida Pereira. -- Salvador, 2019.  
66 f. : il

Orientadora: Débora Correia Rios.  
Coorientadora: Maria Elizabeth Zucolotto.  
TCC (Graduação - Geologia) -- Universidade Federal  
da Bahia, Instituto de Geociências, 2019.

1. Meteoritos. 2. Palasito do Grupo Principal. 3.  
Olivinas. I. Rios, Débora Correia. II. Zucolotto,  
Maria Elizabeth. III. Título.

*Para todos da minha família, sejam eles de sangue ou não.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a realização deste trabalho à Deus, pelo dom da vida, e à minha família que foi o meu pilar durante toda essa caminhada. Todos vocês foram mais do que essenciais para que eu chegasse até o presente momento. Em especial, agradeço a minha mãe Julie e a minha irmã Francine que caminharam juntamente comigo no meu aprendizado de meteorítica, aprendendo tudo o que foi possível para conseguir conversar comigo. Ao meu pai, que apesar das limitações caminhou comigo dentro de seus limites, e a minha avó que, mesmo não entendendo o que eu estudo, sempre acreditou no meu potencial.

Agradeço a todos os colegas e colaboradores do GPA, em especial à minha orientadora Débora Rios pela paciência em me ensinar e me motivar todos esses 6 anos que trabalhamos juntas. O seu exemplo me ajudou a entender que tipo de pesquisadora eu quero ser. Agradeço à professora Beth Zucolotto por aceitar me co-orientar e sempre estar pronta e disposta a ajudar. Ao Dr. Wilton Carvalho por sempre gentilmente ceder as amostras de sua coleção para que fossem estudadas.

Agradeço aos funcionários do Museu Geológico da Bahia por me propiciarem o contato com a coleção de meteoritos presentes no acervo, bem como a prestatividade para sanar as minhas dúvidas. Meus sinceros agradecimentos à Amanda Tosi, do Labsonda da UFRJ, e ao Prof. Dr. Herbert Conceição, da UFS, pelo cuidado e gentileza ao fazer as análises de Microsonda e MEV, bem como por me ensinar sobre as técnicas.

Agradeço a todos os meus professores da graduação, em especial a Angela Leal e Jailma Souza, de petrologia, Simone Cruz, de campo III, e aos professores Reinaldo Brito, André Klumb, César Correia Gomes, Flávio Sampaio e Roberto Rosa, por me darem uma noção maravilhosa dos diferentes campos da Geologia e as suas vivências.

O meu muito obrigada a todos os colegas da graduação, em especial às minhas amigas Carmen e Ayana (minhas vaquinhas) por todas as risadas, lágrimas, frustrações e dores que passamos juntas, vocês tornaram possível manter a sanidade mesmo nos momentos mais difíceis e todo o suporte que me deram nunca será esquecido. A Anderson (Bê lindo de Carmen), por me ajudar diversas vezes na minha caminhada com os cálculos, bem como me lembrar sempre de que eu sou jovem. Obrigada aos colegas Eider, Laura, Benito, Rodrigo, Magno, Verena, Bruna, Juliana, Alessandra e Amâncio pelas risadas e problemas enfrentados com sucesso nessa caminhada.

Por fim, agradeço ao CNPq, à FAPESB e à UFBA por me proporcionarem as excelentes experiências de pesquisa ao longo de todos esses anos.

---

## RESUMO

Conhecidos como rochas de origem celestial, os meteoritos estão presentes nas mais diversas épocas da história servindo tanto de anteparo para a criação da siderurgia, quanto para a construção de lendas, e posteriormente, para o desenvolvimento de um ramo específico da ciência denominado de Meteorítica. Nesta vertente, os meteoritos são classificados e estudados de acordo com suas características texturais, mineraloquímicas e isotópicas, permitindo a separação de grupos não apenas por suas propriedades físico-químicas semelhantes, mas pelas gênese em um mesmo corpo parental. Assim, a partir deste processo classificatório, foi possível o estabelecimento de três grupos principais para os meteoritos: (i) os férreos – formados majoritariamente por uma liga de Ferro-Níquel; (ii) os rochosos: condriticos e acondriticos; e (iii) os mistos – formados pela mistura da liga Fe-Ni com minerais silicáticos. Este último grupo, é subdividido em duas classes: os mesosideritos – rochas com aspecto de brechas; e os palasitos. Em função de seu aspecto exótico devido à presença de cristais de olivina bem amareladas em contato direto com a fase metálica, os palasitos são utilizados inclusive como jóias. Contudo, é no âmbito científico que essas rochas geram maior especulação, pois a classe tende a ter sua formação correlacionada com a zona de interface do manto-núcleo de planetas rochosos, como a própria Terra, sendo interpretadas como sondas indiretas e profundas, que testemunham processos geológicos inacessíveis por outros meios, uma vez que em condições de menores pressões e temperaturas, as duas fases principais - olivina e metal - não são geoquimicamente compatíveis. É neste contexto que o presente trabalho foi desenvolvido, buscando detalhar a petrografia do único palasito da coleção brasileira, o meteorito Quijingue, um palasito do grupo principal. O foco principal foram as olivinas, mas secundariamente buscou-se também identificar as fases acessórias presentes. Dados mineraloquímicos foram gerados buscando comprovar a homogeneidade destas olivinas. Os estudos investigaram duas lâminas polido-delgadas, preparadas em diferentes espessuras, em microscópio óptico com luz refletida, e uma fatia polida do meteorito. As técnicas analíticas não-destrutivas escolhidas foram a Microsonda Eletrônica (EPMA) e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que propiciaram o imageamento das fases minerais e texturas presentes. A análise do material obtido permitiu: (i) reconhecer texturas e relacionamentos entre as olivinas e o metal, fases principais da amostra; (ii) identificar a presença cromita, troilita, schreibersita, e dos raros fosfatos, como fases acessórias; (iii) estudar as diferentes morfologias dos cristais de olivina, bem como (iv) comprovar a homogeneidade composicional dos núcleos desses cristais.

Palavras-chave: Meteoritos, Palasitos, Quijingue, Olivinas.

## ABSTRACT

Meteorites are known as rocks of celestial origin and they are present in many points of history, serving for the creation of the steel industry, as well as for the construction of legends, and later, for the development of a specific branch of science called Meteoritic. In this scientific field, meteorites are classified and studied according to their textural, geochemical and isotopic characteristics, allowing the separation of groups not only by their similar chemical properties but by the genesis in the same parent body. Thus, because of this classification process, it was possible to establish three main groups for meteorites: (i) the iron - formed mainly by an Iron-Nickel alloy; (ii) stony: chondrite and achondrite; and (iii) mixed - formed by mixing Fe-Ni alloy with silicate minerals. This latter group is subdivided into two classes: the mesosiderites - breccia-like rocks; and the pallasites. Due to their exotic appearance because of the presence of well yellowish olivine crystals in direct contact with the metallic phase, the pallasites are even used as jewels. However, it is in the scientific area that these rocks generate the most speculation since the class tends to have its formation correlated with the mantle-core interface zone of rocky planets, such as Earth itself, being interpreted as deep and indirect probes that testify geological processes inaccessible by other means, since under conditions of lower pressures and temperatures, the two main phases - olivine and metal - are not geochemically compatible. It is in this context that the present work was developed, aiming to detail the petrography of the only pallasite of the Brazilian collection, the Quijingue meteorite, a pallasite of the main group. The main focus was the olivines, but secondarily it was also possible to identify the accessory phases present. Geochemical data were generated seeking to prove the homogeneity of these olivines. The studies investigated two polished-thin slides, prepared in different thicknesses, under a light-reflecting optical microscope, and a polished slice of the meteorite. The non-destructive analytical techniques chosen were the Electron Probe Microanalyzer (EPMA) and the Scanning Electron Microscopy (SEM), which provided the imaging of the mineral phases and textures present. The analysis of the obtained material allowed: (i) to recognize textures and relationships between olivines and metal, main phases of the sample; (ii) identify the presence of chromite, troilite, schreibersite, and rare phosphates as accessory phases; (iii) study the different morphologies of olivine crystals, and (iv) prove the compositional homogeneity of the cores of these crystals.

Keywords: Meteorites, Pallasites, Quijingue, Olivines.



## LISTA DE FIGURAS

Figura I Aspectos macroscópicos de meteoritos do tipo misto: (A) Mesosiderito Vaca Muerta - imagem disponível em: <https://auction.catawiki.com/>; (B) Palasito Eagle Station, Subgrupo Eagle Station – Imagem por Ludovic Ferrière; (C) Palasito Imilac, do Grupo Principal - imagem disponível em: <https://onlineonly.christies.com/> ..... 15

Figura 1 Mapa de situação do Estado da Bahia, localizando o município de Quijingue (A) e mapa simplificado de localização e acessos à área do achado, o Sítio Quijingue (B). Legenda: Cidade (1), local do achado (2), limites geográficos do município de Quijingue (3) e municípios vizinhos (4), principais vias de acesso (5)..... 22

Figura 2 Massa original do meteorito Quijingue após ser seccionado (Imagem: Beth Zucolotto, MN). 23

Figura 3 Fotos macroscópicas do meteorito Quijingue: (A) Fragmento vendido na forma de pingente; (B) Fragmento em leilão de jóias; (C) Fatia polida de 1060g na coleção Jay Piatek..... 24

Figura 4 Foto-macroscopia da seção polida e atacada com Nital 10%, Coleção Museu Nacional - UFRJ (A). Imagens Compo-SEI da lâmina polida NS3273C (B) e da fatia WCA (C), na EPMA da UofT. Os cristais de olivina foram numerados visando análise e classificação..... 28

Figura 5 Imagens em MEV-BSE da olivina e dos contatos dela com o metal, amostra NS3273C. (A) Olivina fragmentar (Ol-1) com wustite preenchendo fraturas intracristalinas; (B) Olivinas fragmentares (Ol-3, Ol-4) com borda de reação para wustite no contato com o metal kamacita. Destaque para a ocorrência de plessita no metal e de fratura intracristalina na Ol-3, preenchida por fosfeto e fosfato; (C) Mapa de varredura com sistema de falsa-cor, detalhando a zona de contato Ol-1-Wustite-Metal. Destaque para ocorrência de troilita recristalizada nas bordas da Ol-1. Ol (Olivina), Wus (Wustite), Kam (Kamacite), Pl (Plessite), Tro (Troilite)..... 29

Figura 6 Diagrama triangular para classificação das olivinas, aplicados às análises do palasito Quijingue. Todos os 115 pontos analíticos estão plotados neste diagrama. As médias são expressas como losangos: vermelho = olivinas fragmentais, roxo = olivinas arredondadas, e amarelo = olivinas angulares..... 31

Figura 7 Imagens do metal Fe-Ni e fases acessórias do palasito Quijingue. (A) Imagem de luz transmitida para região da plessita indicando o padrão de enriquecimento em níquel nas bordas da lamela

e centros empobrecidos. (B) Zona central da NS3273C na zona periférica de contato entre as olivinas 1 e 2 com o metal e troilita. O contato é marcado ocorrências subordinadas das fases acessórias: cromita, fosfeto, e fosfato..... 35

Figura 8 Mapas composicionais da fatia WCA obtidos por EPMA para enxofre (A), cromo (B) e magnésio (C)..... 36

Figura 9 Cristais de olivina em imagens obtidas por EPMA na fatia WCA. (A) Cristal de olivina 8A, completamente arredondado, imerso em kamacita e com bordas intactas; (B) Olivina 3A, com bordas com feições de corrosão e crescimento simplectítico de cristais de troilita nas bordas. Kam = Kamacita, Ol = Olivina, Scb = Scheirsbersita..... 40

Figura 10 (A) (A) Diagrama Mg# x FeO/Mn (wt.%) para as olivinas do palasito Quijingue. Campos dos palasitos do grupo principal (MGP), Mesosideritos e Diogenitos de acordo com a proposta de Greenwood et al. (2015). (B) Diagrama FeO/MgO versus FeO/MnO, em proporção molecular, segundo proposição de Goldrich et al. (2000), para as olivinas do palasito Quijingue, Quadrados vermelhos = olivinas angulares; quadrados verdes = olivinas fragmentadas; círculo azul = olivinas arredondadas. (C) Diagrama FeO/MgO versus FeO/MnO, em proporção molecular, dados de Boesenberg et al. (2012) segundo proposição de Goldrich & Delaney (2000), com os campos de variação das olivinas dos palasitos Brahim, Braham, Esquel, Imilac e Quijingue..... 44

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 Dados mineraloquímicos por EPMA dos núcleos das olivinas angulares e arredondadas (em porcentagem peso) do palasito Quijingue.....  | 32 |
| Tabela 2 Dados mineraloquímicos por EPMA dos núcleos das olivinas fragmentadas (em porcentagem peso) do palasito Quijingue.....  | 34 |
| Tabela 3 Média composicional para núcleos de olivinas em Palasitos do Grupo Principal por EPMA. Dados dos meteoritos Brahin, Brenham, Esquel, Fukang, Imilac, Seymchan por Smith et al. 1983; Wasson et al., 1999; Laurreta et al., 2006; Danielson et al.,2009; Boesenberg et al.,2012; Ali et al.,2018; Mckibbin et al.,2019)..... | 42 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>11</b> |
| <b>CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE.....</b>  | <b>13</b> |
| <b>CAPÍTULO 3 – PETROGÊNESE DO PALASITO QUIJINGUE: UMA<br/>REAValiaÇÃO A PARTIR DAS OLIVINAS .....</b> | <b>17</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>   | <b>50</b> |
| <b>ANEXO A- REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA.....</b>   | <b>54</b> |

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO GERAL

---

Meteoritos sempre foram objetos de curiosidade e temor de muitos povos da humanidade, seja por sua beleza, aplicação nas primeiras fases da siderurgia na confecção de artefatos, ou até mesmo pelas implicações catastróficas associadas aos eventos de quedas. Assim, a humanidade seguiu sempre se questionando sobre suas origens e que tipo de conhecimentos as rochas celestiais poderiam propiciar, migrando da simples observação, para a catalogação, registro, coleções e estudos científicos cada vez mais detalhados.

O Brasil, assim como muitos outros países do mundo, detém uma pequena mas importante coleção de meteoritos, que totaliza 77 espécimes reconhecidas atualmente pela Sociedade de Meteorítica Internacional (Meteoritical Society, 2019), órgão responsável pelo registro oficial destes espécimes. Dentre estes, o meteorito Quijingue, objeto deste estudo, é o único representante da classe dos meteoritos mistos, mais especificamente dos palasitos. A rocha em questão destaca-se não apenas por sua aparência, mas pela possível de associação com o que se acredita ser a litologia que ocorre na interface entre o núcleo e o manto de planetas terrestres tais como a Terra.

Segundo Coutinho et al (1999) e Zucolotto (2000), a história oficial do meteorito Quijingue informa que seu achado se deu no sítio Quijingue, no município de Quijingue, Estado da Bahia, no ano de 1984, pelo Sr. Anátasio Cosmo Soares, sendo posteriormente dado como presente ao Sr. Aparecido Crespi. A amostra original tinha massa de 59 kg, estando fortemente intemperizada e com cavidades que indicavam a pretérita presença de cristais de olivina.

Atualmente, se desconhece o paradeiro da massa principal do meteorito Quijingue, restando apenas pequenas massas com faces polidas encontradas em museus para exposição e estudos. Mediante ao cenário onde os trabalhos publicados sobre este palasito focaram apenas em sua classificação e apresentação de dados mineraloquímicos preliminares, existe uma grande vacância no que tange a dados mais detalhados sobre o Quijingue. Entre os diversos aspectos que necessitam de esclarecimento dois deles são destaque neste texto: como a olivina interage em relação às demais fases presentes e o que isso implica na sua gênese? Com base nas relações texturais entre olivina e metal, qual seria um possível processo que resultou na mistura das duas fases no corpo parental?

Visando a elucidação das questões anteriores, o presente trabalho teve por intento realizar a caracterização petrográfica das fases principais do palasito, através de estudos com lâminas

polido-delgadas e fatia polida. Para tanto, utilizou-se o Microscópio com Luz Refletida, e técnicas analíticas com a Microsonda Eletrônica (EPMA) e Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV), para gerar dados mineraloquímicos e realizar o imageamento das fases.

Acredita-se que o trabalho desenvolvido permite não apenas o detalhamento sobre o palasito Quijingue. Por sua origem atribuída à zona de contato manto-núcleo, o seu estudo propicia a ampliação do conhecimento sobre rochas e processos mantélicos. Entende-se assim que Quijingue é uma amostra chave para todos os petrologistas e geoquímicos de alta temperatura, interessados no estudo da Terra Primitiva e dos processos mantélicos. Sendo assim, a revista escolhida para a submissão do artigo é o *Brazilian Journal of Geology* (Anexo 1).

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DA ARTE

---

Meteoritos são fragmentos de corpos do Sistema Solar que vagam por bilhões de anos pelo espaço, entram na atmosfera terrestre e atingem nossa superfície (Zucolotto, 2013; Krot *et al.*, 2014). A relevância dessas rochas vai desde a compreensão de como o Sistema Solar passou a existir - a nébula que deu origem (Wasson, 1974) - até como o planeta Terra foi diferenciado ao longo de seus estágios iniciais de formação. Assim, conhecer mais sobre essas rochas também implica em conhecer mais sobre o planeta em termos de composição e processos que não são passíveis de estudos diretos.

Mediante a composição e textura da massa rochosa, inicialmente os meteoritos são classificados em dois grupos: condritos e não-condritos, sendo o último ainda subdividido em três subgrupos principais: mistos, acondritos e férreos (Krot *et al.*, 2014). Posteriormente, novas classificações têm sido com base na química, na mineralogia, na petrografia e nos isótopos de oxigênio, todas elas visando normatizar informações sobre as classes de meteoritos com origens ou histórias de formação similares, revelando possíveis conexões genéticas entre as várias classes (Krot *et al.*, 2014).

Para fins didáticos e científicos, é recorrente a associação de que cada tipo de meteorito a uma parte da específica da estrutura do planeta Terra como, por exemplo, o entendimento de que os meteoritos férreos sejam representantes do material presente no núcleo terrestre. Neste tipo de contexto é comum que os meteoritos sejam designados muitas vezes como sondas indiretas.

#### 2.1 Tipos de Meteoritos Mistos

Dentre os diversos tipos de meteoritos, o grupo que permite inferências sobre as condições da zona de interface manto-núcleo são os meteoritos mistos, aqueles que contêm uma matriz metálica composta de uma liga ferro-níquel, na qual o material silicático, essencialmente olivina magnesiânica, está disperso. Em termos de número de amostras contudo, os meteoritos mistos são os mais raros, representando menos de 1% de todos os meteoritos já encontrados (Zucolotto, 2013). Dentre os meteoritos mistos, existem dois grupos principais: (i) os mesosideritos ; (ii) os palasitos.

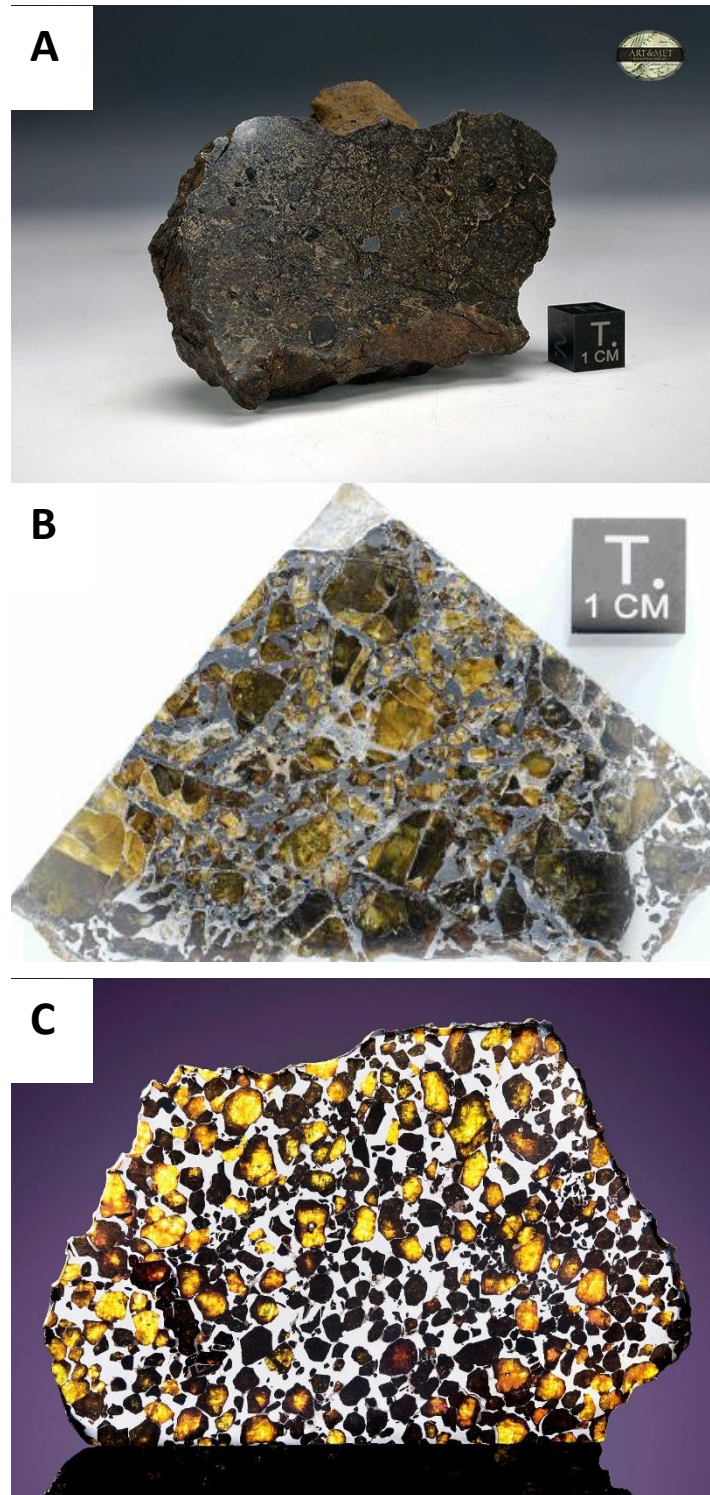
Os mesosideritos são representados por 256 amostras (Meteoritical Bulletin 10/11/2019) de brechas compostas de silicatos e metal em proporções que variam de 20-80%, com quantidades

adicionais de troilita (FeS) (Figura IA). Nestes espécimes a porção silicática consiste em minerais e clastos em uma matriz ígnea de textura fina (Krot *et al.*, 2014; Figura 1). Os meteoritos mesosideritos são subdivididos em três classes petrológicas, de acordo com o conteúdo de ortopiroxênio (Hewins, 1984, 1988), e classificados em quatro subtipos distintos, com base nas texturas silicáticas apresentadas (Powell, 1971 *apud* Krot *et al.*, 2014).

Os palasitos são ainda mais raros que os mesosideritos e contam com apenas 125 amostras na coleção mundial (Meteoritical Bulletin 10/11/2019). Isto equivale a cerca de 0,3% da coleção. Apesar da raridade, os palasitos representam o principal tipo de meteoritos mistos (Righter *et al.*, 1990). De acordo com Buseck (1977), os palasitos contêm apenas duas fases maiores: a fase silicática - composta quase que unicamente por olivina - e a liga Fe-Ni. Este fato por si é bastante peculiar, visto que tais fases minerais não são fisicamente ou geoquimicamente similares e, portanto, não costumam estar associadas na natureza. Além desta mineralogia principal, os diversos de estudos de palasitos indicam uma mineralogia acessória também bastante simples, que inclui sulfeto (troilita), fosfeto (schreibersita) e óxido (cromita). Raramente tem sido observados fosfatos (Buseck & Holdsworth, 1977) e mesmo piroxênios. Os palasitos possuem atualmente três agrupamentos (Boesenberg *et al.*, 2000): (i) o grupo principal (PMG), que inclui a maioria absoluta das rochas catalogadas como palasitos (Figura IC); (ii) o subgrupo Eagle Station (Figura IB); e (iii) os palasitos com piroxênio. Estes três tipos representam as diferenças na composição e mineralogia das fases silicáticas e estão relacionados com variações no tipo de metal e composição isotópica de oxigênio, as quais são comumente interpretadas como representativas de corpos parentais distintos (Krot *et al.*, 2014). Contudo, vários palasitos são ainda muito pouco estudados e são ditos "não-agrupados" pela ausência de informações essenciais para seu agrupamento.

Os palasitos do subgrupo Eagle Station (Figura 1) são similares em termo de mineralogia aos PMG, mas a olivina possui maiores teores de ferro e cálcio (Buseck, 1977). Além disso, o metal tem composição similar ao dos meteoritos férreos do tipo IIF, com conteúdo de níquel e de irídio mais elevados do que os PMG (Wasson e Choi, 2003).





**Figura I** Aspectos macroscópicos de meteoritos do tipo misto: (A) Mesosiderito Vaca Muerta - imagem disponível em: <https://auction.catawiki.com/>; (B) Palasito Eagle Station, Subgrupo Eagle Station – Imagem por Ludovic Ferrière; (C) Palasito Imilac, do Grupo Principal - imagem disponível em: <https://onlineonly.christies.com/>

O grupo dos palasitos com piroxênio, incluem apenas 7 (sete) representantes, sendo os mais estudados os palasitos Vermillion, Yamato 8451, e Zinder (Krot *et al.*, 2014). A ocorrência de grãos milimétricos de piroxênio é o principal aspecto de distinção deste grupo (Boesenberg *et al.*, 2000). Existem dentro do grupo variações significantes de mineralogia modal, composição química e/ou composição dos isótopos de oxigênio. Por exemplo, Vermillion e Yamato 8451 possuem ~14-63% de olivinas, 30-43% de metal, 0.7-3% de piroxênios, 0-1% de troilita e uma fase menor composta de fosfato, enquanto que o palasito Zinder apresenta 28% de ortopiroxênio, 27% de olivina, 44% de metal e troilita e cromita como fases acessórias (Boesenberg *et al.*, 2000; Bunch *et al.*, 2005).

Os PMG, ou palasitos do grupo principal, categoria onde está classificado o palasito Quijingue objeto deste estudo - são numericamente os mais abundantes (59 palasitos tipo PMG registrados no Meteoritical Bulletin até 10/11/2019). Os PMGs possuem grãos angulares a arredondados de olivina e liga ferro-níquel (**Figura 1**), além de cromita, troilita, schreibersita e fosfatos como fases acessórias (Buseck, 1977). A olivina apresenta composição forsterítica (~Fo 88), enquanto o metal tem composição próxima ao dos meteoritos férreos do grupo IIIAB (Wasson e Choi, 2003). Os palasitos do grupo principal, assim como os outros palasitos, não apresentam estruturas como brechas, uma vez que o metal cristaliza ao redor da olivina (Krot *et al.*, 2014).

**CAPÍTULO 3**  
**PETROGENESE DO PALASITO QUIJINGUE: UMA**  
**REAVALIAÇÃO A PARTIR DAS OLIVINAS**

(Artigo submetido ao *Brazilian Journal of Geology*)

---

**Petrogênese do Palasito Quijingue: uma reavaliação a partir das olivinas**  
*Petrogenesis of Quijingue Pallasite: a reevaluation of the olivine crystals*

Cristine de Almeida Pereira<sup>1\*</sup>; Débora Correia Rios<sup>1,2</sup>; Maria Elizabeth Zucolloto<sup>3,4</sup>; Donald Wayne Davis<sup>2</sup>; Amanda Tosi<sup>4</sup>; Wilton Pinto de Carvalho<sup>1</sup> & Herbet Conceição<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências. Grupo de Pesquisa Laboratório de Petrologia Aplicada a Pesquisa Mineral (GPA). Programa de Pós-Graduação em Geologia. Rua Barão de Geremoabo, s/n, Campus Universitário de Ondina. 40.170-290, Salvador, Bahia – Brasil. E-mails: cristinepereira1@gmail.com; dcrios@ufba.br; doutor.wilton@gmail.com

<sup>2</sup> University of Toronto. Earth Sciences Department. 22 Russell St., M5S 3B1, Toronto, ON, Canada. E-mail: dond@es.utoronto.ca

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro. Departamento de Geologia e Paleontologia. Setor de Meteorítica. Quinta da Boa Vista, São Cristóvão. 20.940-040, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Brasil. E-mail: meteoritos@mn.ufrj.br

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Geociências. Departamento de Geologia. Laboratório de Difração de Raios X e Microsonda Eletrônica – Labsonda. Avenida Athos da Silveira Ramos, 274, Cidade Universitária – Ilha do Fundão. 21.941-916, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Brasil. E-mail: amandatosi@hotmail.com

<sup>5</sup> Universidade Federal de Sergipe. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análises de Bacias, Complexo Laboratorial Multiusuário. Avenida Marechal Rondon, s/n, Jardim Rosa Elze, São Cristóvão. 49.100-000, Aracaju, Sergipe – Brasil. E-mail: herbet@ufs.br

\* Corresponding author

**ABSTRACT**

The Quijingue meteorite is the only pallasite of the Brazilian collection. Therefore, except by the classification work back in the 80', it was still not object of any detailed petrographic and/or geochemical studies. Aiming to fill this gap, this work presents a petrographic evaluation of olivines, the main silicate phase of Quijingue, associating their textural and morphological aspects with the mineralochemistry. These olivine crystals present all the possible morphologies for pallasites: angular, rounded and fragmental, with the prevalence of the latter category. The mineralochemistry data allows correlate these olivines with those of other pallasites in the main group, ratifying its classification as a PMG. Furthermore, it was observed that the contact zones between olivine and metal exhibit varied behaviors: (i) fully isolated crystals tend to be rounded, ellipsoidal, sub-millimeter, and show no reaction zone; (ii) small crystals and or fragments closer to larger specimens tend to have corrosion textures and/or to develop symplectic borders with blebs of sulfide; (iii) the larger milimetric, mostly centimetric, olivine crystals form clusters, are close to other similar grains, have angular to fragmental morphologies and presence of a wustite border in the contact zone with the Fe-Ni metal. The formation/preservation of the three different morphologies proposed so far, especially the rounded morphology, can not be attributed to the classical genesis proposed on the current literature. Quijingue's textural features, in special the corrosion of the smaller fragmental/crystals, suggest a process of rounding off the reaction edges with metal. The chemical data obtained here show that these olivine silicate cores are homogeneous, disregard of their morphologies, and may be related to a ferrovolcanism process.

**Keywords:** Main Group Pallasite, Olivine, ferrovolcanism.

## 1 INTRODUÇÃO

No senso comum, os palasitos - integrantes do grupo dos meteoritos mistos - são definidos como rochas de mineralogia bastante limitada, onde mais de 95% do volume modal é restrito a uma fase silicática - essencialmente composta por olivinas magnesianas - e uma fase metálica Fe-Ni. Os palasitos diferem dos mesosideritos pois este segundo grupo que possui aspecto brechado característico representantes de fragmentos de corpos parentais distintos que foram aglutinados durante um evento colisional. Por sua vez, os palasitos representam fração originada em um asteróide diferenciado e único (Rayleigh, 1942; Buseck, 1977; Wason & Choi, 2003; Hutchinson, 2007; Boesenberg *et al.*, 2012; Zucolotto *et al.*, 2013). Adicionalmente, palasitos são os mais raros dos meteoritos recuperados na Terra, representando atualmente menos de 1% em volume da coleção.

Apesar desta sugestiva “simplicidade”, os palasitos são rochas especiais não apenas por sua aparência e beleza peculiares, mas por em sua composição coexistirem duas fases que são tidas como geoquimicamente incompatíveis, o metal e o silicato (Goldschmidt, 1937; Buseck, 1977). Desta forma, até hoje o fato suscita curiosidade, com várias teorias sendo propostas para explicar a sua origem (Quitté *et al.*, 2004; Boesenberg *et al.*, 2012), já que a formação desse tipo de rocha é usualmente utilizada no modelo evolutivo dos planetas rochosos. Incluindo-se aí o planeta Terra, mais especificamente a zona de contato entre o manto e o núcleo de tais corpos, regiões ainda inacessíveis à observação direta.

Encontrado no Município de Quijingue, na Bahia, em 1984, o palasito Quijingue tornou-se conhecido da comunidade científica brasileira na década de 90, quando foram realizadas as avaliações preliminares que levaram à sua catalogação oficial em 1999 (Grossman, 1999). Nos últimos vinte anos, os avanços tecnológicos disponibilizaram novos equipamentos que permitem investigações pontuais e não destrutivas de amostras raras e em tamanhos diminutos, mesmo aquelas pertencentes a coleções e museus. Apesar disto, nenhum novo estudo foi realizado sobre o palasito Quijingue desde então.

O presente artigo visa ampliar o estudo das olivinas do meteorito Quijingue, utilizando como base a metodologia proposta por Buseck (1977), comparando-a com os termos utilizados atualmente para a descrição petrográfica de rochas ígneas e metamórficas. Incluímos nesta discussão dados mineraloquímicos para os componentes principais (metal Fe-Ni e olivina) destas rochas a partir de imageamento composicional e análises por microsonda e microscopia eletrônica e a discussão sobre as implicações dos diferentes tipos de olivina descritos.

### 1.1 Palasitos no Mundo e no Brasil: Importância Cultural e Científica

A primeira rocha a ser reconhecida como meteorito foi exatamente um palasito, proveniente de uma queda testemunhada e reportada em 1776, na Sibéria, por Peter Simon Pallas, e por este motivo denominado posteriormente de “Pallas Iron” (Rayleigh, 1942; Chaladni, 1794 apud Buseck, 1977). Desde esta amostra-marco inicial, na coleção mundial de meteoritos figuram apenas 122 rochas classificadas como palasitos (Meteoritical Bulletin, 17/09/2019), cujos achados se deram em diversas localizações do globo. Nesta listagem está incluído o único palasito recuperado em solo brasileiro: Quijingue.

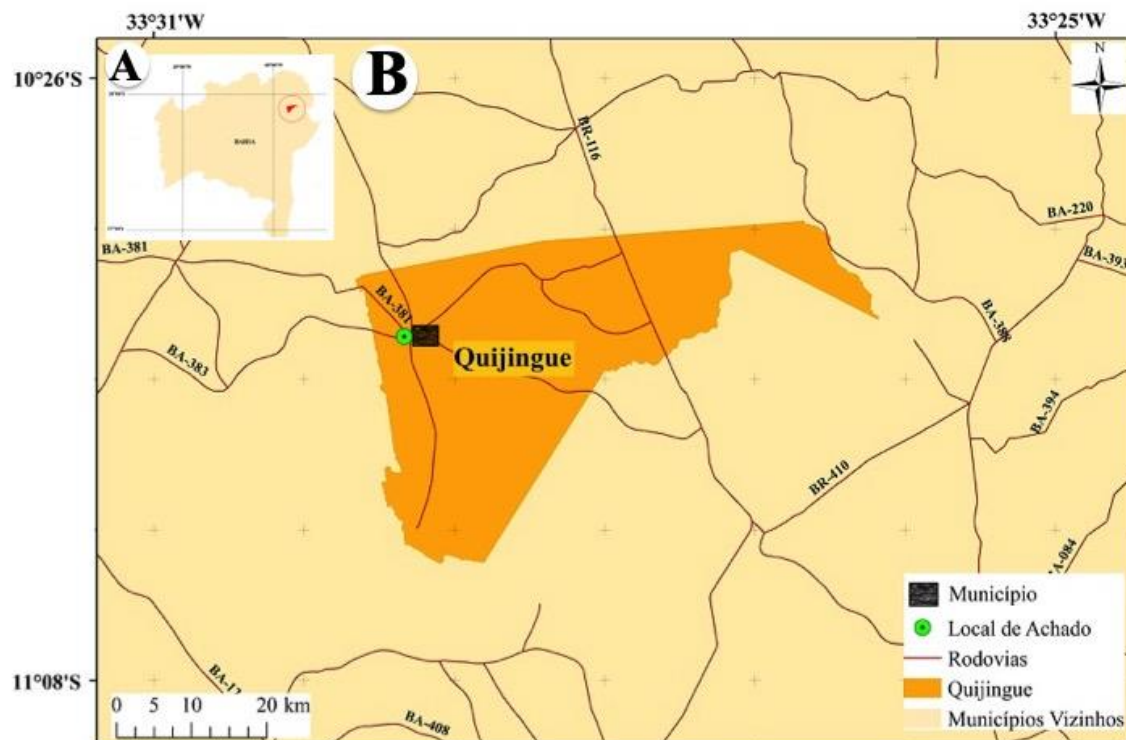
A coleção brasileira de meteoritos dispõe de 77 exemplares oficiais até o momento (Meteoritical Bulletin, 17/09/2019). A singularidade de Quijingue à primeira se torna relevante devido ao pequeno número de palasitos na coleção mundial e à singularidade deste ser o único exemplar de meteorito misto na coleção nacional.

Os palasitos são fundamentais aos estudos dos processos de formação e diferenciação planetária por representarem o elo entre os meteoritos rochosos (crosta/manto) e os férreos (núcleo). Oriundos da interface manto-núcleo, estas rochas trazem registros dos processos geológicos que ocorram em zonas muito profundas, durante a diferenciação primitiva dos seus asteróides parentais. Buseck (1977) associa a importância destas rochas à coexistência de duas fases essenciais (metal e silicato) que são geoquimicamente incompatíveis (siderófilos e litófilos) e ainda, à existência da troilita, um sulfeto de ferro (calcófilo), como fase acessória relativamente abundante. Assim, os palasitos se constituem em testemunhos de um momento singular onde três fases imiscíveis – siderófilos (metal), calcófilos (troilita) e litófilos (olivina) - coexistiram em um mesmo ambiente no planetesimal de origem.

## 2 ASPECTOS HISTÓRICOS

A história do achado do palasito Quijingue é bastante controversa. Desde sua descoberta até o início dos estudos pelos pesquisadores no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e do Museu Nacional (MN-UFRJ) existem algumas divergências e imprecisões, em especial em termos de datas. Tentaremos aqui apresentar uma coletânea dos dados disponíveis até o presente momento.

O palasito foi encontrado no sítio Quijingue, próximo à cidade de Quijingue, Estado da Bahia pelo Sr. Atanásio Cosmo Soares, proprietário rural. As coordenadas que constam do registro oficial são latitude 10° 45'S, e longitude 39° 13'W (**Figura 1**; Grossman, 1999).



**Figura 1.** Mapa de situação do Estado da Bahia, localizando o Município de Quijingue (A) e mapa simplificado de localização e acessos à área do achado, o Sítio Quijingue (B).

Além do artigo de Grossman (1999), existem apenas duas outras publicações científicas sobre este palasito: Coutinho et al. (1999), representando os pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), que primeiro receberam a amostra, apresentam um breve histórico, dados petrográficos e análises semi-quantitativas preliminares, comprovando a natureza palasítica da amostra. Um fragmento foi então direcionado ao Museu Nacional na Universidade Federal do Rio de Janeiro (MN-UFRJ), onde foram realizadas as análises para caracterização e registro do meteorito, incluindo estudos geoquímicos da fase metálica do Quijingue por ativação neutrônica e a descrição preliminar das fases acessórias: cromita, troilita e schresbersita (Zucolotto, 2000). Os relatos de Coutinho *et al.* (1999) e Zucolotto (2000) não fornecem informações precisas sobre quando a rocha foi encontrada, indicando apenas que o achado teria ocorrido entre 15 a 40 anos antes de 1999, o que nos remete ao final da década de 60. Contudo, nos dados oficiais do Meteoritical Bulletin, o ano de achado estimado é o de 1984 (Grossman,1999), provavelmente a data em que o meteorito foi re-descoberto na pequena fazenda no interior da Bahia.

Quanto às circunstâncias nas quais a rocha foi encontrada, existem pequenas variações na história oficial, pois Coutinho *et al.* (1999) relatam que o Quijingue foi descoberto durante



escavações para um plantio de árvores, em uma profundidade de aproximadamente 1 m, enquanto que o boletim oficial da Meteoritical Society (Grossman, 1999), bem como relatos em textos jornalísticos da época (Jornal A TARDE, 07/03/1999), sugerem que a escavação ocorreu em virtude da construção de uma cerca viva de macambira na propriedade. Macambira é uma espécie de bromélia com muitos espinhos, um cactus típico da caatinga nordestina, o que pode justificar o uso do termo *tree* na tradução para a língua inglesa.

A retirada da rocha de 59 kg do solo foi o primeiro capítulo de uma história de algumas décadas até que o Quijingue viesse a ser reconhecido como uma rocha espacial. O Sr. Atanásio, o descobridor, por muito anos utilizou o meteorito como superfície para amolar instrumentos da fazenda (Coutinho *et al.*, 1999; Zucolotto, 2000). Este uso gerou uma superfície mais lisa em uma pequena porção do espécime, devido ao desgaste provocado pelo atrito.

Posteriormente, a rocha foi dada como um presente pelo filho do Sr. Anatócio ao Sr. Aparecido Crespi, um paulista conhecido por seu trabalho como minerador/garimpeiro na região. Foi a partir do Sr. Crespi, mais especificamente de sua desconfiança sobre a natureza daquela amostra, que a rocha chegou até ao IPT, onde foi cortada (**Figura 2**), polida, confeccionadas lâminas delgadas e realizados os primeiros estudos, passando então ao MN-UFRJ onde deu-se continuidade às análises para o processo de certificação e reconhecimento junto ao órgão internacional (Grossman, 1999).



**Figura 2.** Massa original do meteorito Quijingue após ser seccionado (Imagem: Beth Zucolotto, MN).

Com o corte, três fragmentos com massas de aproximadamente 700g foram doados ao MN-UFRJ, ao IPT-SP, e ao Museu Geológico da Bahia. A massa principal (**Figura 2**; com ~52 – 55 kg) foi devolvida ao dono, o Sr. Crespi (Coutinho *et al.*, 1999; Zucolotto, 2000) e não há mais nenhum registro oficial a respeito do destino do único palasito brasileiro, o Quijingue.

Posteriormente surgiram relatos sobre a existência e recuperação de um outro possível fragmento deste meteorito, com cerca de 32 kg (Zucolotto, 2000). O destino oficial dessa nova massa também é desconhecido. Contudo, atualmente ainda é possível rastrear pequenas massas do palasito em questão através da internet, em sites especializados na venda de meteoritos em geral, onde o grama desta amostra está sendo comercializado por cerca de US\$26 (**Figura 3A**; Disponível em: <https://www.ferbers.com/a-palosite-meteorite-from-imilac-chile-2055.html>).



**Figura 3.** Fotos macroscópicas do meteorito Quijingue: (A) Fragmento vendido na forma de pingente; (B) Fragmento em leilão de jóias; (C) Fatia polida de 1060g na coleção Jay Piatek.

Foram localizados fragmentos do palasito Quijingue também em sites de leilões para gemas, onde são avaliados em termos de carats (unidade de medida de gemas, como diamantes), com 1 carat custando entre US\$7 - US\$20 (**Figura 3B**; Disponível em: <https://www.gemrockauctions.com/auctions/pallasite-large-brazilian-quijingue-specimen-carats-rt401-260209>). Coleções particulares também apresentam fragmentos do Quijingue.

De acordo com o banco de dados do site “Encyclopedia of Meteorites” (<http://www.encyclopedia-of-meteorites.com/collections.aspx>), cerca de 19 colecionadores declaram possuir pedaços deste palasito em suas coleções, com massas que variam entre 0,20g até porções bem maiores, como é o caso dos dois fragmentos da coleção do Dr. J. Piatek, com massa estimada de 1060g (**Figura 3C**) e 307g, respectivamente.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Além da observação e descrição macroscópica de uma face polida da amostra da coleção Museu Geológico da Bahia (5,0 x 5,0 x 0,7 cm), para a realização do presente trabalho foram utilizadas duas (2) lâminas delgadas-polidas do palasito Quijingue. A primeira lâmina foi preparada na espessura convencional para descrição em microscópio de luz polarizada (~0,3 mm, NS3273T) e a segunda, mantida em maior espessura (~1 mm, NS3273C).

A estas lâminas acrescentou-se o estudo de uma fatia polida de 5 x 6 x 0,5 cm da coleção Wilton Carvalho (WCA). Estas amostras foram utilizadas para estudos no microscópio de luz refletida e análises mineraloquímicas por microscopia eletrônica de varredura e microsonda eletrônica.

#### **3.1 Descrição Petrográfica**

Inicialmente utilizou-se o microscópio ótico com luz polarizada e refletida, marca/modelo Nikon Japan 146408, do Laboratório de Metalogênese da Universidade Federal da Bahia (UFBA). Foram adotados os parâmetros descritivos para estudo de rochas ígneas e metamórficas, considerando: grau de cristalinidade, visibilidade e tamanho dos grãos, formas geométricas dos grãos, contatos com outros minerais, pleocroísmo, relevo, entre outros. O imageamento foi realizado no MN-UFRJ, utilizando o microscópio Axioskop 40 Zeiss com câmera conectada a um computador, e o programa Axiovision 4.8.2 SP3 08-13 para apresentação das imagens na tela. Para criação dos fotomosaicos foram utilizados os programas Adobe Bridge Creative Suite © e ImageJ ©.

#### **3.2 Análises e Imageamento por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Foram realizadas análises: (i) no MEV do Complexo Laboratorial Multiusuários (LMU) da Universidade Federal de Sergipe - equipamento Tescan modelo Vega3, com catodoluminescência (CL), elétrons retroespalhados (BSE) e elétrons secundários (SE) acoplados. As condições operacionais foram correntes de 15kV e 17mA de intensidade do feixe de elétrons. (ii) utilizando o MEV JEOL, modelo 6610LV, com o SEI Scintillator detector e

detectores BSEI diode no Departamento de Earth Sciences da Universidade de Toronto (Canadá). A resolução espacial de 6610LV permite imageamento SE de frações de 50 nanômetros ou menos, ou uma magnificação de até 60.000 vezes. A ampla câmera deste MEV permite a análise de espécimes de até 10 x 10 x 6 cm<sup>3</sup>, facultando a análise da fatia polida do meteorito. As amostras foram metalizadas a carbono. As condições operacionais foram correntes de 12kV e 15kV e 20mA de intensidade do feixe de elétrons.

### **3.3 Análise por Microsonda Eletrônica (WDS/EPMA)**

As análises iniciais por Microsonda Eletrônica foram realizadas no Labsonda do Instituto de Geociências da UFRJ, através do equipamento JXA8230 da Jeol, em sala com temperatura controlada de 24°C. As lâminas foram metalizadas com carbono previamente, bem como fotografadas com uma lupa localizadora conectada ao stage da microsonda. As condições analíticas foram: voltagem de 15kV e corrente de 16.4 micro-ampéres. No total foram realizados 104 pontos utilizando o WDS, que cobriram tanto a parte silicática (84 pontos) quanto a metálica (20 pontos) na lâmina NS3273C. Nesta fase as análises de olivina foram realizadas no grão OI-1 - o maior cristal nesta lâmina - e distribuídos aleatoriamente em toda a área de abrangência do cristal.

Adicionalmente foi utilizada a microsonda eletrônica JEOL JXA8230 5-WDS do Departamento de Earth Sciences da Universidade de Toronto. O equipamento conta com 5 (cinco) espectrômetros WDS; um sistema EDS melhorado que permite detectar do B~U; sistemas WDS e EDS completamente integrados, permitindo análise de elementos maiores por EDS e traços por WDS, reduzindo o tempo de análise; softwares de imageamento integrados que facilitam a localização os pontos e movimentação da sonda na amostra, além de permitir o mapeamento com WDS; detector de Xenônio e um espectrômetro especial com menor círculo de Rowland, aprimorando as taxas de contagem de metais. Além disto possui um grande suporte de amostras, ampliando a capacidade e tolerância e permitindo imageamento e análises adicionais diretamente na fatia polida WCA, uma análise não destrutiva e que permite preservar o fragmento para exposições. Isto foi necessário devido à granulação grossa a muito-grossa dos cristais de olivina no palasito Quijingue, permitindo ampliar a área de análise e conseqüentemente o número de cristais/fragmentos distintos analisados. As condições analíticas foram: voltagem de 20kV e corrente de 30 micro-ampéres. No total foram analisados 27 distintos grãos de olivina e realizados 31 pontos analíticos nas regiões centrais destes cristais.

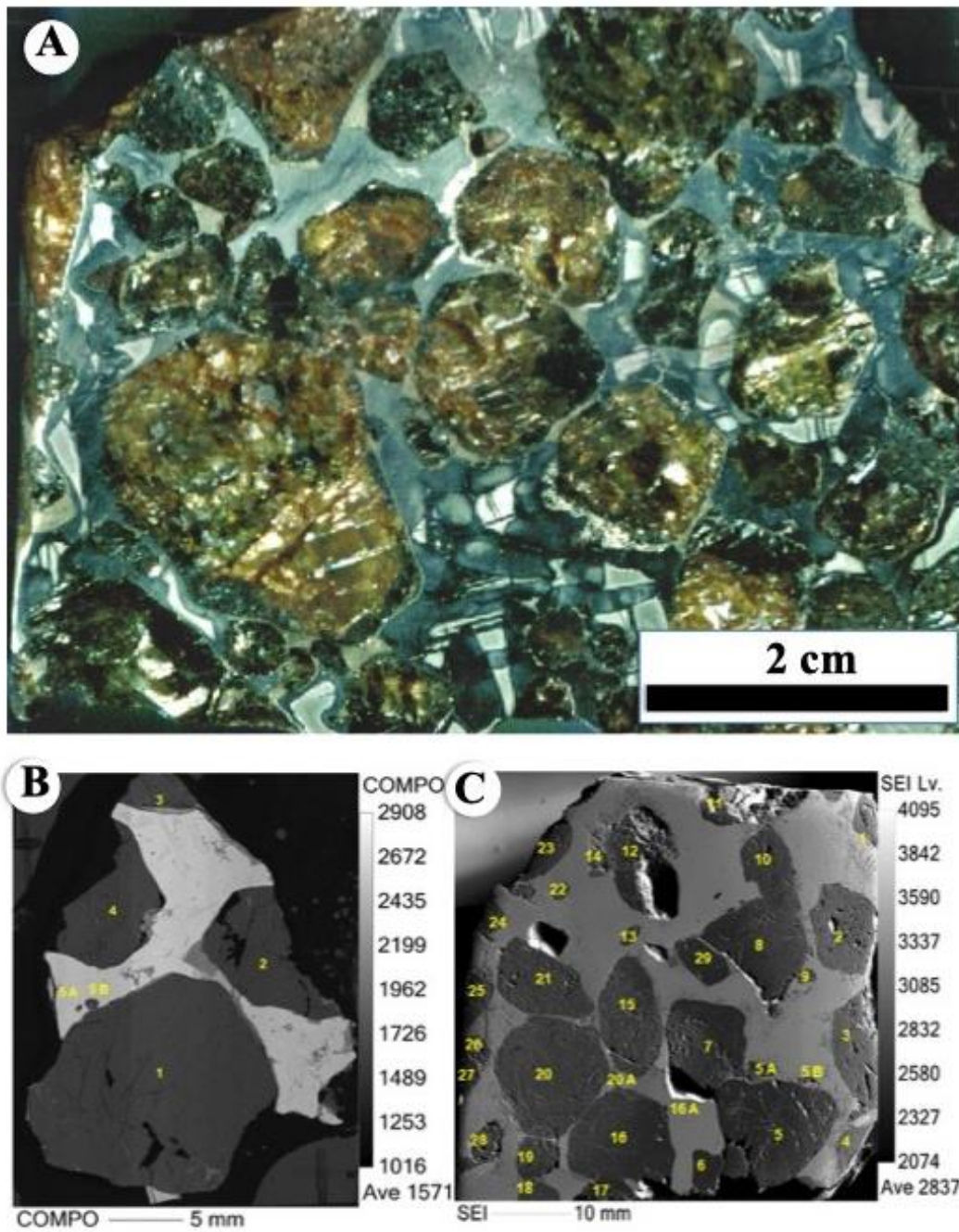
## 4 ASPECTOS PETROGRÁFICOS E MINERALOQUÍMICOS

Macroscopicamente, o palasito Quijingue é composto basicamente por cristais centimétricos de olivina em contato direto com a fase metálica. Em menor proporção foram observados cristais menores (milimétricos) de olivinas dispostos nas bordas destes cristais maiores ou completamente imersos na fase metálica. Como fases acessórias foram identificados em microscopia eletrônica troilita (FeS), cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), Níquel- fosfeto ( $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$ ), fosfato, e Cu-nativo.

### 4.1 Olivina

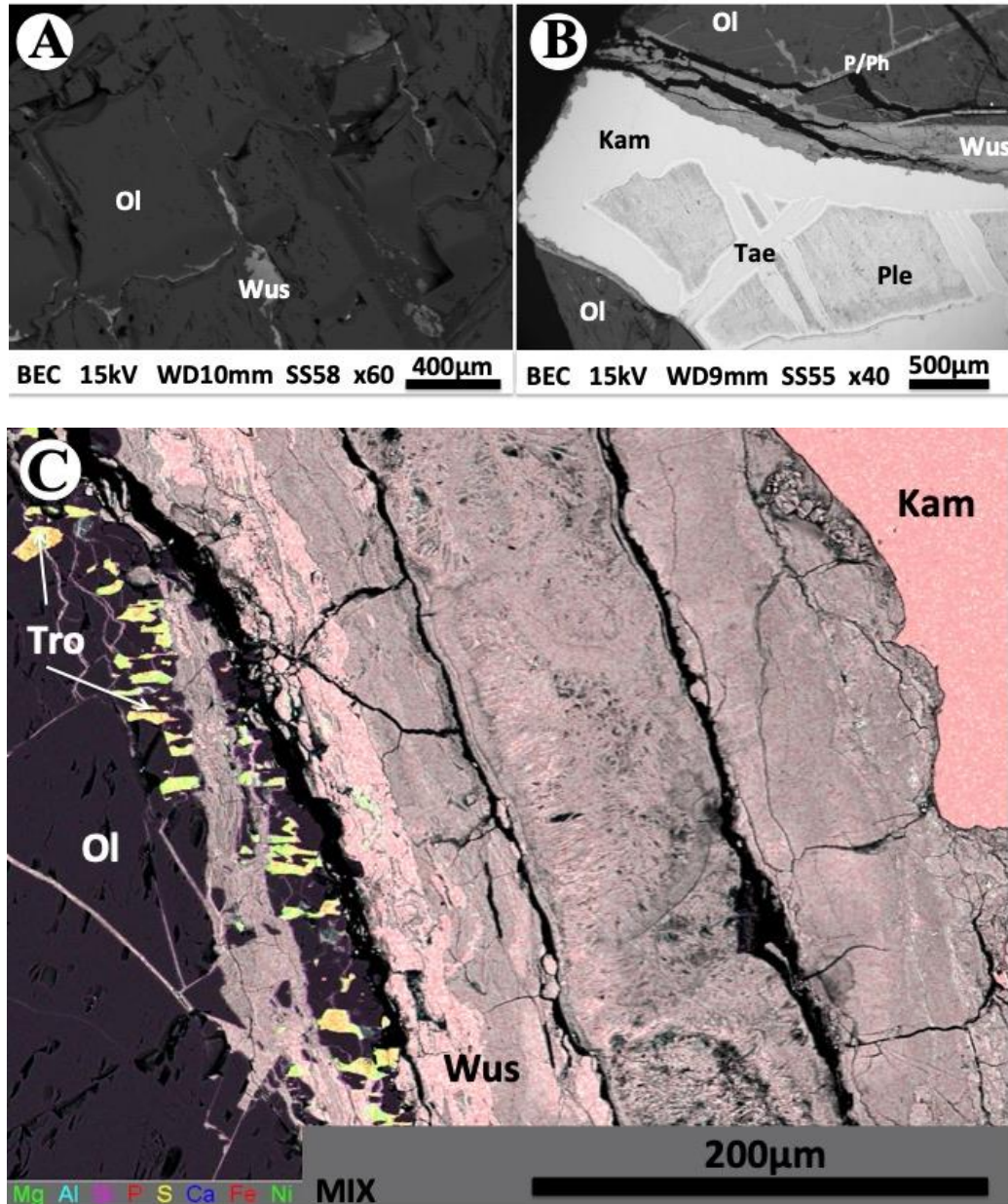
Macroscopicamente as frações da amostra analisada corresponde a aproximadamente 50-60% olivina, e 40-50% metal (**Figura 4A**). Nas lâminas, os cristais de olivina representam cerca de 70% da área avaliada (**Figura 4B**). Nas placas polidas há zonas mais ricas em metal e zonas mais ricas no silicato, os quais chegam a formar *clusters* (**Figura 4C**) A olivina faz contato com troilita, com a cromita, com fosfeto e, principalmente, com a matriz metálica Fe-Ni.

A olivina tem de cor amarela, por vezes alaranjada, tonalidade apresentada tanto em luz refletida quando em luz plana (**Figura 4A**). Três tipos de cristais de olivinas foram observados (**Figura 4B**): (i) angulares (A – 10,26%): cristais subédricos a euédricos, com tamanhos que variam 0,5 cm a 1,5 cm, apresentando contatos predominantemente retilíneos e angulares com o metal; (ii) fragmentais (F – 56,41%): fragmentos dos cristais angulares, com tamanhos de 1,2 mm a 2 cm; (iii) arredondados (R – 33,33%): cristais menores de olivina, dispostos nas bordas dos cristais angulares ou fragmentais, tendem a ser anédricos e elipsoidais ou arredondados, apresentando contatos arredondados com a fase metálica e/ou acessórias.



**Figura 4.** Foto-macroscopia da seção polida e atacada com Nital 10%, Coleção Museu Nacional - UFRJ (A). Imagens Compo-SEI da lâmina polida NS3273C (B) e da fatia WCA (C), na EPMA da UofT. Os cristais de olivina foram numerados visando análise e classificação.

De forma geral, a olivina se destaca em relação aos outros minerais no palasito em função do seu alto relevo, bem como pelo forte fraturamento intragranular, presente principalmente nos grãos fragmentais (**Figura 5A**).



**Figura 5.** Imagens em MEV-BSE da olivina e dos contatos dela com o metal, amostra NS3273C. (A) Olivina fragmentar com wustite preenchendo fraturas intracristalinas; (B) Olivina fragmentar com wustite no contato com o metal kamacita. Destaque para a ocorrência de plessita (Ple) no metal e de fratura intracristalina, preenchida por fosfeto e fosfato; (C) Mapa de varredura com sistema de falsa-cor, detalhando a zona de contato Olivina-Wustite-Metal. Destaque para ocorrência de troilite recristalizada nas bordas da Olivina. Ol (Olivina), Wus (Wustite), Kam (Kamacite), Ple (Plessite), Tro (Troilite), Tae (Taenite).

O contato entre os cristais de olivina angulares e fragmentais são retos e justapostos, com aspecto de mosaico e junções triplícies de  $120^\circ$ , característicos de olivinas policristalinas (Scott,1977). As fraturas intracristalinas são semelhantes a venulações e encontram-se preenchidas, principalmente, por metal. Com frequência este mesmo material das fraturas contornam os cristais de olivina angulares e fragmentais, formando uma espécie de zona de reação (**Figura 5B e 5C**). Inclusões milimétricas a sub-milimétricas e esféricas de cromita e/ou troilita tendem a se distribuir nas proximidades nestas bordas de reação com o metal. Alguns veios intragranulares estão preenchidos por fosfeto e neles podem ocorrer pequenos cristais de fosfatos associados (**Figura 5C**).

Os cristais de olivina arredondada estão dispostos em toda a massa do fragmento estudado, onde encontram-se cercadas e isoladas de outros cristais de olivina por metal, geralmente Fe-Ni ou dispostas nas bordas das olivinas fragmentais e angulares e delas separadas pelo metal Fe-Ni ou fosfeto. Internamente estes cristais arredondados possuem aspecto mais homogêneo, com nenhuma ou apenas poucas finas fraturas e não apresentam borda de reação.

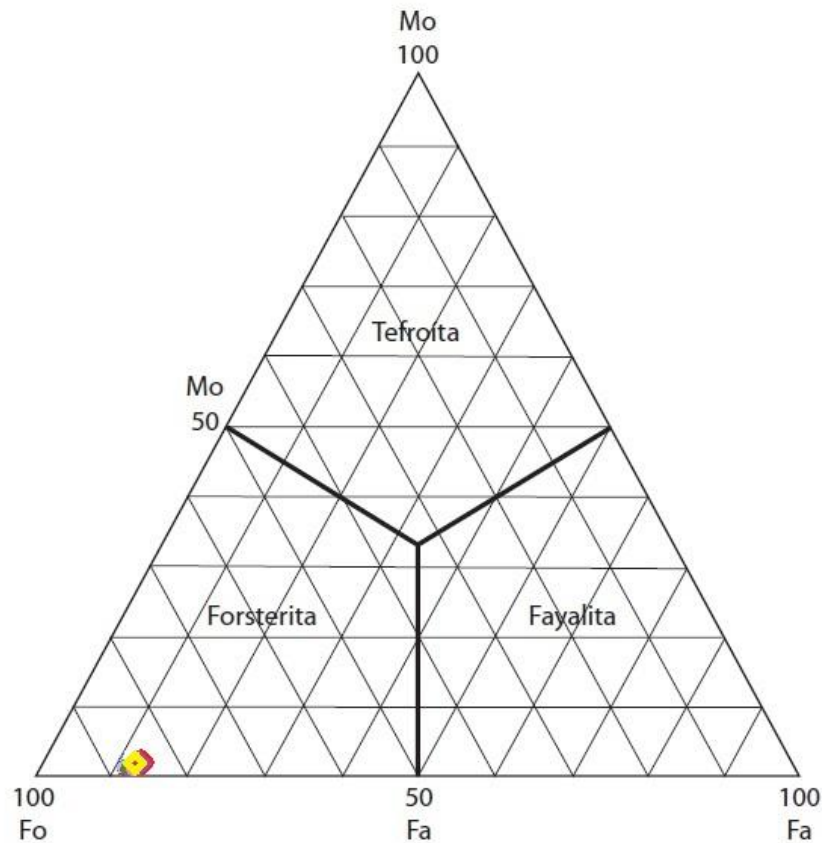
Um aspecto distintivo dos palasitos do grupo principal é evidente nesta amostra é a homogeneidade química dos seus cristais de olivina, confirmados microscopicamente na ausência de zoneamentos composicionais.

As análises por microsonda (**Tabelas 1 e 2**) utilizaram como padrão uma olivina forsterítica (Fo=89%). Elementos menores e alguns traços também foram dosados. Os dados plotam todos no campo da Forsterita, indicando uma composição de núcleo fortemente forsterítica, com teor de forsterita médio de Fo = 86,81 (variando entre 85,85 a 87,73) e fórmula estrutural calculada como  $Mg_{1,782}Fe_{0,266}Si_{1,055}O_4$ . (**Figura 6**).

As investigações dos mapas composicionais por EDS/WDS (COMPO/SEI) possibilitaram a classificação de 9 cristais como arredondados: 3, 3A e 8Frag (lâmina NS3273C) e 16B,16A, 23A, 9, 13, 22 (fatia WCA) (**Figura 4 B e C**). Foram realizadas análises por EPMA em 6 cristais arredondados: (lâmina NS3273C) 3 e 3A; e 16B, 16A, 9 e 8Frag (fatia WCA) (**Figura 4 B e C**), num total de 7 análises (**Tabela 1**). Neste grupo, o teor de  $SiO_2$  varia de 36,78 até 41,87%; MgO varia de 45,56 a 49,27%, FeO de 11,82 a 12,14%. Estes três elementos somam cerca de 99% do total de análises, comprovando a homogeneidade química destas olivinas arredondadas. Os elementos menores mais significativos são MnO (0,26 a 0,33%) e  $Cr_2O_3$  (0,01 a 0,28%), enquanto os óxidos de  $Al_2O_3$ , CaO, NiO,  $P_2O_5$  e  $Zr_2O$  ocorrem em quantidades traço (<0,03%). A análise visual nas fatias macroscópicas em conjunto com a investigação das imagens de EPMA Compo por combinação EDA/WDS (**Figura 4B e C**) permitiram classificar 6 cristais como angulares: os cristais 1 e 2 na lâmina NS3273C e os cristais 3, 10, 12 e 15 na fatia WCA



(**Figura 4 B e C**). Desses, foram analisados por EPMA 3 cristais angulares: as olivinas 1 e 2 na lâmina NS3273C e a olivina 10 da fatia WCA, em um total de 5 análises (**Tabela 1**). O teor de  $\text{SiO}_2$  varia de 39,94 a 41,25%;  $\text{MgO}$  varia de 45,06 a 46,75%,  $\text{FeO}$  de 11,61 a 12,30%. Estes três elementos perfazem cerca de 99% do total de análises, o que também indica a homogeneidade química dessa classe morfológica. Os elementos menores mais significativos são  $\text{MnO}$  (0,28 a 0,30%) e  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (0,05 a 0,11%), enquanto os óxidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{Zr}_2\text{O}$  ocorrem em quantidades traço (<0,03%). Os óxidos de  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{SrO}$  e  $\text{SnO}$  foram analisados, mas seus resultados estavam abaixo ou muito próximos do limite de detecção da técnica (<0,003%).



**Figura 6.** Diagrama triangular para classificação das olivinas, aplicados às análises do palasito Quijingue. Todos os 115 pontos analíticos estão plotados neste diagrama. As médias são expressas como losangos: vermelho = olivinas fragmentais, roxo = olivinas arredondadas, e amarelo = olivinas angulares.

**Tabela 1** Dados mineraloquímicos por EPMA dos núcleos das olivinas angulares e arredondadas (em porcentagem peso) do palasito Quijingue (**Figura 4 B e C**).

| Sample  | NS3273C          |              |              |              |               |                  |              |              |              |              | Rounded Olivines |              |              |              |               |                  |               |               |              |  |
|---|------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------------|---------------|---------------|--------------|--|
|   | Angular Olivines |              |              |              |               | Rounded Olivines |              |              |              |              | Angular Olivines |              |              |              |               | Rounded Olivines |               |               |              |  |
|   | WCA              | NS3273C      | NS3273C      | NS3273C      | WCA           | WCA              | NS3273C      | NS3273C      | NS3273C      | WCA          | WCA              | NS3273C      | NS3273C      | NS3273C      | WCA           | WCA              | WCA           | WCA           | Average (#7) |  |
| MAJOR ELEMENTS (wt.%)                                       | Ol-10            | Ol-1         | Ol-2         | Ol-1         | Ol-10         | Ol-10            | Ol-1         | Ol-2         | Ol-1         | Ol-10        | Ol-3             | Ol-4A        | Ol-3A        | Ol-16B       | Ol-23A        | Ol-16A           | Ol-23A        | Ol-8A         | Average (#7) |  |
| SiO <sub>2</sub>  | 39,942           | 39,945       | 40,212       | 40,332       | 41,250        | 36,775           | 39,838       | 40,602       | 40,727       | 40,748       | 36,775           | 39,838       | 40,602       | 40,727       | 40,748        | 41,100           | 41,867        | 40,237        |              |  |
| MgO   | 46,077           | 46,748       | 45,061       | 45,117       | 46,540        | 48,129           | 46,424       | 45,555       | 45,736       | 45,573       | 48,129           | 46,424       | 45,555       | 45,736       | 45,573        | 49,272           | 47,317        | 46,858        |              |  |
| FeO   | 11,613           | 12,249       | 12,159       | 12,301       | 11,984        | 11,821           | 12,185       | 11,903       | 12,140       | 12,048       | 11,821           | 12,185       | 11,903       | 12,140       | 12,048        | 12,098           | 11,874        | 12,010        |              |  |
| Subtotal  | <b>97,63</b>     | <b>98,94</b> | <b>97,43</b> | <b>97,75</b> | <b>99,77</b>  | <b>96,73</b>     | <b>98,45</b> | <b>98,06</b> | <b>98,60</b> | <b>98,37</b> | <b>96,73</b>     | <b>98,45</b> | <b>98,06</b> | <b>98,60</b> | <b>98,37</b>  | <b>102,47</b>    | <b>101,06</b> | <b>99,10</b>  |              |  |
| MINOR ELEMENTS (wt.%)                                       |                  |              |              |              |               |                  |              |              |              |              |                  |              |              |              |               |                  |               |               |              |  |
| MnO   | 0,292            | 0,290        | 0,283        | 0,295        | 0,296         | 0,273            | 0,305        | 0,263        | 0,327        | 0,308        | 0,273            | 0,305        | 0,263        | 0,327        | 0,308         | 0,311            | 0,294         | 0,297         |              |  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 0,068            | 0,087        | 0,084        | 0,108        | 0,053         | 0,275            | 0,035        | 0,027        | 0,058        | 0,067        | 0,275            | 0,035        | 0,027        | 0,058        | 0,067         | 0,033            | 0,011         | 0,072         |              |  |
| NiO   | 0,003            | 0,002        | 0,000        | 0,003        | 0,000         | 0,008            | 0,019        | 0,000        | 0,011        | 0,000        | 0,008            | 0,019        | 0,000        | 0,011        | 0,000         | 0,013            | 0,000         | 0,007         |              |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 0,023            | 0,027        | 0,021        | 0,017        | 0,023         | 3,904            | 0,012        | 0,000        | 0,018        | 0,012        | 3,904            | 0,012        | 0,000        | 0,018        | 0,012         | 0,031            | 0,000         | 0,568         |              |  |
| TiO <sub>2</sub>  | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000         | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000         | 0,000            | 0,000         | 0,000         |              |  |
| CaO   | 0,002            | 0,024        | 0,014        | 0,013        | 0,008         | 0,031            | 0,017        | 0,003        | 0,005        | 0,000        | 0,031            | 0,017        | 0,003        | 0,005        | 0,000         | 0,015            | 0,000         | 0,010         |              |  |
| Na <sub>2</sub> O   | 0,006            | 0,000        | 0,000        | 0,010        | 0,000         | 0,070            | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,070            | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000         | 0,047            | 0,000         | 0,017         |              |  |
| K <sub>2</sub> O  | 0,000            | 0,002        | 0,000        | 0,000        | 0,000         | 0,028            | 0,000        | 0,008        | 0,000        | 0,000        | 0,028            | 0,000        | 0,008        | 0,000        | 0,000         | 0,006            | 0,000         | 0,006         |              |  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                               | 0,011            | 0,000        | 0,012        | 0,000        | 0,000         | 0,000            | 0,000        | 0,020        | 0,014        | 0,013        | 0,000            | 0,000        | 0,020        | 0,014        | 0,018         | 0,022            | 0,012         | 0,012         |              |  |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                               | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000         | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000         | 0,000            | 0,000         | 0,000         |              |  |
| Zr <sub>2</sub> O   | 0,000            | 0,014        | 0,000        | 0,000        | 0,002         | 0,000            | 0,015        | 0,000        | 0,000        | 0,035        | 0,000            | 0,015        | 0,000        | 0,000        | 0,024         | 0,000            | 0,011         | 0,011         |              |  |
| HfO <sub>2</sub>  | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,003        | 0,000         | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,022        | 0,000        | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,022        | 0,018         | 0,000            | 0,000         | 0,007         |              |  |
| SO <sub>3</sub>   | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,002         | 0,039            | 0,000        | 0,000        | 0,001        | 0,000        | 0,039            | 0,000        | 0,000        | 0,001        | 0,000         | 0,000            | 0,000         | 0,007         |              |  |
| SrO   | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000         | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000         | 0,000            | 0,000         | 0,000         |              |  |
| SnO <sub>2</sub>  | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000         | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000            | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000         | 0,000            | 0,010         | 0,002         |              |  |
| TOTAL   | <b>98,04</b>     | <b>99,39</b> | <b>97,85</b> | <b>98,20</b> | <b>100,16</b> | <b>101,35</b>    | <b>98,85</b> | <b>98,38</b> | <b>99,06</b> | <b>98,80</b> | <b>101,35</b>    | <b>98,85</b> | <b>98,38</b> | <b>99,06</b> | <b>102,99</b> | <b>101,40</b>    | <b>100,12</b> | <b>100,12</b> |              |  |
| End members (These data are plotted on the Olivine diagram) |                  |              |              |              |               |                  |              |              |              |              |                  |              |              |              |               |                  |               |               |              |  |
| Fo (Forsterite)   | 87,242           | 86,814       | 86,467       | 86,334       | 87,050        | 87,278           | 86,818       | 86,889       | 86,636       | 86,707       | 87,278           | 86,818       | 86,889       | 86,636       | 86,707        | 87,473           | 87,331        | 87,019        |              |  |
| Fa (Fayalite)   | 12,333           | 12,759       | 13,087       | 13,203       | 12,572        | 12,024           | 12,781       | 12,734       | 12,898       | 12,857       | 12,024           | 12,781       | 12,734       | 12,898       | 12,857        | 12,047           | 12,292        | 12,519        |              |  |
| Te (Tefroite)   | 0,314            | 0,306        | 0,308        | 0,321        | 0,315         | 0,281            | 0,324        | 0,285        | 0,352        | 0,333        | 0,281            | 0,324        | 0,285        | 0,352        | 0,333         | 0,314            | 0,308         | 0,314         |              |  |
| Mo (Monticellite)   | 0,003            | 0,032        | 0,019        | 0,018        | 0,011         | 0,040            | 0,023        | 0,004        | 0,007        | 0,000        | 0,040            | 0,023        | 0,004        | 0,007        | 0,000         | 0,019            | 0,000         | 0,013         |              |  |
| Li (Liebenbergite)  | 0,003            | 0,002        | 0,000        | 0,003        | 0,000         | 0,008            | 0,019        | 0,000        | 0,011        | 0,000        | 0,008            | 0,019        | 0,000        | 0,011        | 0,000         | 0,012            | 0,000         | 0,007         |              |  |

Assim como nas olivinas angulares, para as arredondadas os óxidos de  $K_2O$ ,  $TiO_2$ ,  $HfO_2$ ,  $SO_3$ ,  $SrO$  e  $SnO$  foram analisados, mas seus resultados estavam abaixo ou muito próximos do limite de detecção da técnica ( $<0,003\%$ ).

Por fim, 17 cristais foram classificados como fragmentais: 17, 2, 8, 5, 9, 21, 16, 19 na fatia WCA e 2A, 2B, 2C, 2D, 2E, 2F, 2G, 4, 5 na lâmina NS3273C. Realizaram-se 17 análises por EPMA para 15 cristais distintos (**Tabela 2**). Os resultados indicam que o teor de  $SiO_2$  varia de 39,59 até 41,53%;  $MgO$  varia de 44,82 a 46,71%,  $FeO$  de 11,96 a 12,85%. Como observado anteriormente, estes três elementos compõem estas olivinas fragmentais e não apresentam teores distintos dos dois grupos anteriores, atestando a homogeneidade química das olivinas deste palasito, independentemente do agrupamento.

Os elementos menores mais significativos são  $MnO$  (0,27 a 0,32%) e  $Cr_2O_3$  (0,03 a 0,09%), enquanto os óxidos de  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $NiO$ ,  $P_2O_5$  e  $Zr_2O$  ocorrem em quantidades traço ( $<0,03\%$ ). Os óxidos de  $K_2O$ ,  $TiO_2$ ,  $HfO_2$ ,  $SO_3$ ,  $SrO$  e  $SnO$  também foram analisados, mas seus resultados estavam abaixo ou muito próximos do limite de detecção da técnica ( $<0,003\%$ ).

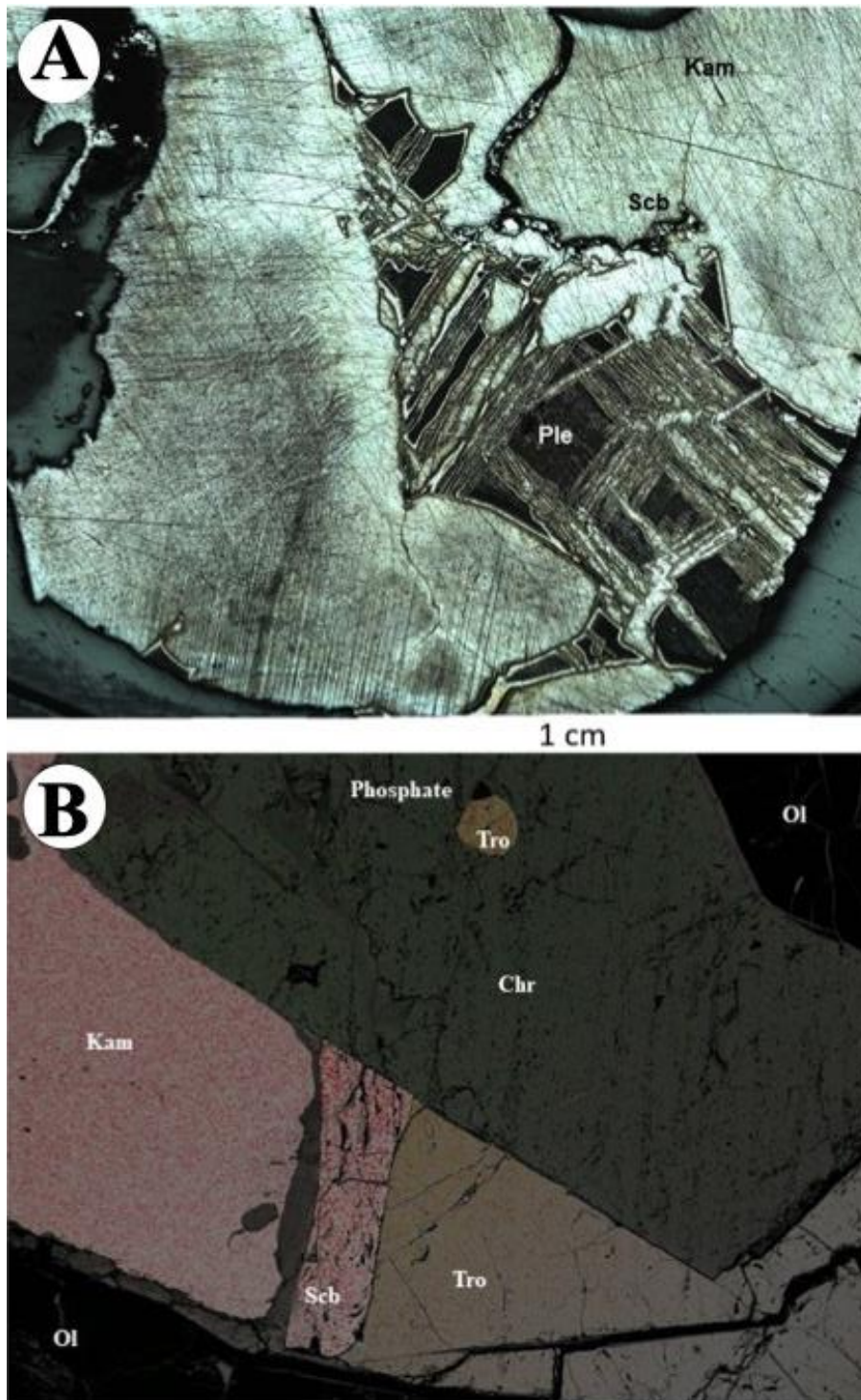
#### 4.2 Fase metálica Fe-Ni e Fases Acessórias

A liga metálica Fe-Ni é a segunda fase mais abundante em volume nestas amostras. Em Quijingue a liga metálica é composta, em ordem de abundância, por kamacita ( $\alpha$ -FeNi), e taenita ( $\gamma$ -FeNi), com a ocorrência subordinada de anti-taenita ( $\%_{Ni}=25\%$ ). Localmente, estas fases formam uma textura de ex-solução denominada de plessita, também conhecida como campo plessítico, e visível principalmente após o ataque ácido com Nital (**Figura 5B, Figura 7A**).

As lamelas de kamacita do palasito Quijingue apresentam em média 1,2 mm de espessura e teor de níquel de 6,4 %, permitindo que a fase metálica deste palasito seja classificada como de textura octaedrito grosso a muito grosso. Esta fase metálica não apresenta fraturamento e preenche as fraturas nas olivinas. Isto indica que a liga metálica ainda tinha alguma fluidez quando entrou em contato com a fase silicática, uma vez que percolou por entre as fraturas das olivinas já solidificadas e reagiu com elas.

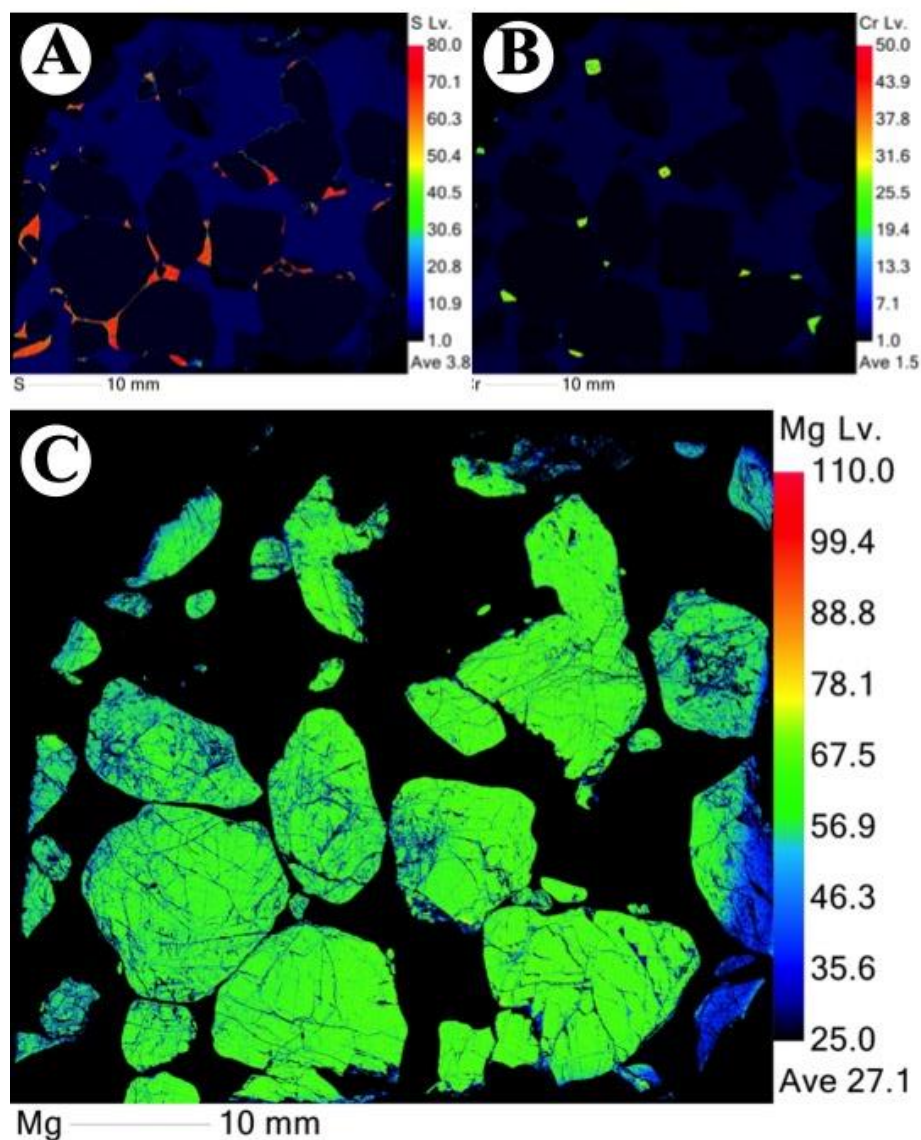
**Tabela 2** Dados mineraloquímicos por EPMA dos núcleos das olivinas fragmentadas (em porcentagem peso) do palasito Quijingue (**Figura 4 B e C**).

| Sample                         | Fragmental Olivines |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |               |              |               |               |               | Average (#19) |     |     |  |
|--------------------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----|-----|--|
|                                | NS3273C             | NS3273C      | NS3273C      | NS3273C      | NS3273C      | NS3273C      | NS3273C      | NS3273C      | NS3273C      | NS3273C      | NS3273C      | NS3273C      | NS3273C      | NS3273C       | NS3273C       | NS3273C      | NS3273C       | NS3273C       | NS3273C       |               |     |     |  |
| MAJOR ELEMENTS (wt.%)          | O1-4                | O1-5         | O1-4         | O1-2A        | O1-17        | O1-2         | O1-2B        | O1-2C        | O1-2D        | O1-2E        | O1-8         | O1-2F        | O1-5         | O1-8          | O1-9          | O1-21        | O1-2G         | O1-16         | O1-19         | WCA           | WCA | WCA |  |
| SiO <sub>2</sub>               | 39,586              | 39,873       | 39,968       | 40,026       | 40,172       | 40,231       | 40,397       | 40,439       | 40,439       | 40,556       | 40,690       | 40,793       | 40,854       | 41,139        | 41,239        | 41,375       | 41,534        | 41,821        | 42,491        | 40,717        |     |     |  |
| MgO                            | 46,269              | 46,294       | 46,505       | 45,341       | 45,214       | 46,401       | 44,935       | 45,201       | 45,265       | 45,454       | 46,369       | 44,819       | 46,128       | 46,718        | 47,203        | 45,225       | 45,985        | 46,021        | 46,593        | 45,892        |     |     |  |
| FeO                            | 11,964              | 12,045       | 11,966       | 12,461       | 12,004       | 12,842       | 12,465       | 12,115       | 12,852       | 12,512       | 12,033       | 12,611       | 12,131       | 12,081        | 11,932        | 12,092       | 12,781        | 12,304        | 12,307        | 12,289        |     |     |  |
| Subtotal                       | <b>97,82</b>        | <b>98,21</b> | <b>98,44</b> | <b>97,83</b> | <b>97,39</b> | <b>99,47</b> | <b>97,80</b> | <b>97,76</b> | <b>98,56</b> | <b>98,52</b> | <b>99,09</b> | <b>98,22</b> | <b>99,11</b> | <b>99,94</b>  | <b>100,37</b> | <b>98,69</b> | <b>100,30</b> | <b>100,15</b> | <b>101,39</b> | <b>98,90</b>  |     |     |  |
| MINOR ELEMENTS (wt.%)          | MnO                 | 0,313        | 0,297        | 0,302        | 0,300        | 0,301        | 0,306        | 0,294        | 0,295        | 0,293        | 0,301        | 0,277        | 0,300        | 0,294         | 0,312         | 0,294        | 0,268         | 0,319         | 0,317         | 0,299         |     |     |  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,026               | 0,031        | 0,035        | 0,067        | 0,030        | 0,059        | 0,064        | 0,054        | 0,066        | 0,042        | 0,047        | 0,062        | 0,047        | 0,039         | 0,032         | 0,050        | 0,089         | 0,041         | 0,051         | 0,049         |     |     |  |
| NiO                            | 0,000               | 0,011        | 0,000        | 0,030        | 0,001        | 0,004        | 0,021        | 0,002        | 0,022        | 0,036        | 0,006        | 0,100        | 0,000        | 0,005         | 0,002         | 0,000        | 0,019         | 0,007         | 0,009         | 0,014         |     |     |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,000               | 0,024        | 0,026        | 0,360        | 0,000        | 0,012        | 0,018        | 0,001        | 0,046        | 0,005        | 0,002        | 0,159        | 0,002        | 0,000         | 0,016         | 0,013        | 0,014         | 0,000         | 0,002         | 0,037         |     |     |  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,016               | 0,007        | 0,004        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000         | 0,000         | 0,000        | 0,000         | 0,000         | 0,000         | 0,001         |     |     |  |
| CaO                            | 0,009               | 0,016        | 0,012        | 0,015        | 0,000        | 0,016        | 0,016        | 0,008        | 0,020        | 0,007        | 0,004        | 0,028        | 0,015        | 0,005         | 0,000         | 0,017        | 0,018         | 0,014         | 0,008         | 0,012         |     |     |  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,002               | 0,000        | 0,000        | 0,004        | 0,004        | 0,015        | 0,000        | 0,018        | 0,000        | 0,004        | 0,000        | 0,023        | 0,004        | 0,000         | 0,035         | 0,000        | 0,001         | 0,000         | 0,000         | 0,006         |     |     |  |
| K <sub>2</sub> O               | 0,000               | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,001        | 0,003        | 0,000        | 0,000        | 0,004        | 0,001        | 0,001        | 0,003        | 0,000        | 0,000         | 0,001         | 0,000        | 0,000         | 0,000         | 0,000         | 0,001         |     |     |  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,000               | 0,029        | 0,005        | 0,026        | 0,000        | 0,013        | 0,000        | 0,018        | 0,017        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,018        | 0,000         | 0,027         | 0,000        | 0,007         | 0,000         | 0,017         | 0,009         |     |     |  |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,000               | 0,000        | 0,013        |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |               |              |               |               |               | 0,004         |     |     |  |
| Zr <sub>2</sub> O              | 0,000               | 0,007        | 0,001        |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |               |              |               |               |               | 0,004         |     |     |  |
| HfO <sub>2</sub>               |                     |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |               |              |               |               |               | 0,004         |     |     |  |
| SO <sub>3</sub>                |                     |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |               |              |               |               |               | 0,004         |     |     |  |
| SrO                            |                     |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |               |              |               |               |               | 0,000         |     |     |  |
| SnO <sub>2</sub>               |                     |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |              |               |               |              |               |               |               | 0,001         |     |     |  |
| TOTAL                          | <b>98,19</b>        | <b>98,63</b> | <b>98,84</b> | <b>98,64</b> | <b>97,76</b> | <b>99,99</b> | <b>98,22</b> | <b>98,15</b> | <b>99,04</b> | <b>98,93</b> | <b>99,47</b> | <b>98,89</b> | <b>99,50</b> | <b>100,28</b> | <b>100,81</b> | <b>99,07</b> | <b>100,73</b> | <b>100,53</b> | <b>101,80</b> | <b>99,34</b>  |     |     |  |
| End members (Theoretical)      | Fo (Forsterite)     | 87,006       | 86,866       | 87,051       | 86,195       | 86,721       | 86,164       | 86,164       | 86,531       | 85,848       | 86,263       | 86,961       | 85,905       | 86,761        | 87,017        | 86,616       | 86,135        | 86,605        | 86,704        | 86,562        |     |     |  |
| Fa (Fayalite)                  | 12,619              | 12,677       | 12,563       | 13,287       | 12,914       | 13,375       | 13,406       | 13,009       | 13,671       | 13,318       | 12,657       | 13,558       | 12,798       | 12,621        | 12,359        | 12,990       | 13,428        | 12,987        | 12,845        | 13,004        |     |     |  |
| Te (Tephroite)                 | 0,334               | 0,317        | 0,321        | 0,324        | 0,328        | 0,323        | 0,320        | 0,321        | 0,316        | 0,325        | 0,323        | 0,302        | 0,321        | 0,311         | 0,327         | 0,320        | 0,285         | 0,341         | 0,335         | 0,321         |     |     |  |
| Mo (Monticellite)              | 0,012               | 0,022        | 0,016        | 0,020        | 0,000        | 0,021        | 0,022        | 0,011        | 0,027        | 0,010        | 0,005        | 0,039        | 0,020        | 0,007         | 0,000         | 0,023        | 0,024         | 0,019         | 0,011         | 0,016         |     |     |  |
| Li (Liebenbergite)             | 0,000               | 0,011        | 0,000        | 0,031        | 0,001        | 0,004        | 0,022        | 0,002        | 0,023        | 0,037        | 0,006        | 0,103        | 0,000        | 0,005         | 0,002         | 0,000        | 0,019         | 0,007         | 0,009         | 0,015         |     |     |  |



**Figura 7.** Imagens do metal Fe-Ni e fases acessórias do palasito Quijingue. (A) Imagem de luz transmitida para região da plessita indicando o padrão de enriquecimento em níquel nas bordas da lamela e centros empobrecidos. (B) Zona central da NS3273C na zona periférica de contato entre as olivinas 1 e 2 com o metal e troilita. O contato é marcado ocorrências subordinadas das fases acessórias: cromita, fosfeto, e fosfato.

O sulfeto de ferro - troilita (FeS) pode ser considerada uma fase varietal nesta amostra, com distribuição volumétrica entre 3-5% (**Figura 8A**), estando disposto principalmente nas zonas periféricas das olivinas, preenchendo os espaços entre dois grãos próximos (**Figura 7B**). A troilita, em luz refletida, apresenta coloração tendendo ao marrom, relevo mais baixo que o da olivina, mas ligeiramente diferenciado do metal, e formato predominantemente anédrico. Os cristais são inequigranulares e os contatos entre o sulfeto, olivina e o metal são prioritariamente retilíneos, mas por vezes curvos. Com a cromita, a troilita forma contatos retos.



**Figura 8** Mapas composicionais da fatia WCA obtidos por EPMA para enxofre (A), cromo (B) e magnésio (C) indicando a presença da troilita e da cromita na região periférica dos cristais de olivina.

A cromita ocorre em quantidades em torno de 2% em volume nas amostras analisadas (**Figura 8B**). Os grãos observados são milimétricos, ocorrem dispostos nas bordas da olivina, e são subédricos a euédricos. Apresentam coloração cinza escuro em luz refletida, sendo identificada principalmente por seu hábito bastante característica do sistema isométrico. Apresenta relevo alto, maior que o do metal, mas inferior ao da olivina. Em termos de fraturamento possui algumas fraturas internas, bem como a presença de microinclusões de troilita (~150 microns) e de fosfato (<50 microns, **Figura 7B**). A cromita forma contato curvo, por vezes reto, com a olivina, e contatos predominantemente retilíneos com o metal.

O fosfeto ocorre com formas irregulares, dimensões milimétricas a sub-milimétrica, estando completamente imerso na fase metálica, ou distribuído ao longo das bordas da olivina (**Figura 7B**), compondo cerca de 2-3% da amostra. Análises de EDS permitem classificar este fosfeto como Níquel-fosfeto. Diferem da matriz metálica Fe-Ni por seu formato irregular (alongado /vermicular), relevo acentuado e dimensões variando de 0,25mm a 2 mm. Este mineral ocorre frequentemente nas bordas da olivina, separando-a da fase metálica. Seu contato com o metal tende a ser reto, com terminações arredondadas.

O fosfato é um mineral acessório raro em palasitos, por isto a ocorrência destes cristais no palasito Quijingue deve ser digna de nota aqui. O fosfato ocorre incluso na cromita e em contato com uma inclusão arredondada de troilita (**Figura 7B**). Este cristal tem tamanho inferior a 30 microns ao longo do eixo maior.

## 5 DISCUSSÕES

Palasitos são classificados como pertencentes ao grupo principal (PMG) em função das assinaturas isotópicas de oxigênio e do teor de forsterita de suas olivinas (Scott, 1977). Quijingue foi classificado como um palasito do grupo principal em função da relação volumétrica olivina-metal e do teor de Forsterita de suas olivinas (Grossman, 1999; Coutinho et al., 1999; Zucolotto, 2000). Dados de isótopos de oxigênio em olivina para 24 palasitos do tipo PMG, incluindo Quijingue, foram apresentados por Greenwood et al. (2015) que sugerem a derivação dos PMGs a partir de um único corpo parental. Os valores isotópicos observados em Quijingue ( $\Delta 17O$ : Quijingue =  $1,226 \pm 0,078$ , #2; média PMG =  $1,364 \pm 0,065$ , #103; Greenwood et al., 2015) estão de acordo com a classificação no PMG, apesar da faixa de erro extrapolar a média do grupo.

### 5.1 Implicações genéticas das variações morfológicas dos cristais de olivina

O primeiro aspecto de distinção entre os cristais de olivina de um PMG é a sua morfologia. No geral são descritos três tipos de ocorrências: angulares (também chamadas de euedrais),

fragmentais e arredondadas (Buseck, 1977; Scott, 1977; Bosenberg et al., 2012; McKibbin et al., 2019). De acordo com Buseck (1977) e McKibbin et al. (2019), em escala microscópica, é comum que as margens dos tipos petrográficos angular e fragmental também apresentem algum grau de arredondamento. Além disto, Bosenberg et al. (2012) chamam atenção para o fato da maioria dos palasitos apresentar uma combinação de morfologias de olivinas, e em sua maioria os cristais do tipo angular/euédrico.

O estudo aqui desenvolvido demonstrou que a morfologia dos cristais de olivina no palasito Quijingue (**Figura 8C**, **Figura 4C**) aponta para a existência dos três grupos propostos na literatura e caracterizados como cristais centimétricos (~1cm) de olivinas angulares (tipo i), cristais fragmentais (tipo ii) de dimensões ainda maiores que os angulares (até 2 cm), e cristais de olivina milimétricos a sub-milimétricos (<1-3mm), arredondados (tipo iii).

Cristais angulares ocorrem principalmente em agregados ou "*clusters*" (Buseck, 1977; Scott, 1977a). Estas feições são indicativas de que esses cristais foram nucleados e passaram por desenvolvimento em uma condição de equilíbrio representado pelo "equilíbrio textural". Tais autores sugerem que tais agregados de olivinas ocorrem em meteoritos onde assembleias de olivinas angulares formam uma zona quase que totalmente livre de metal. Na proposta de Bosenberg et al. (2012), tais cristais seriam quebrados/fragmentados ao longo do limite dos grãos quando da invasão do metal no agregado. Contudo, os fragmentais também são descritos na literatura como espécimes milimétricos, interpretados como relíquias dos euedrais maiores, que foram fragmentados antes mesmo da mistura com a fase metálica, ou seja, sua presença favoreceriam a ideia de um processo de fragmentação anterior à "mistura" com a fase metálica. Trabalhos mais recentes (McKibbin et al., 2019) demonstram que as olivinas angulares e as fragmentais ocorrem, em sua maioria, próximas umas das outras e é precisamente pela formação dessa rede e dessa proximidade entre os cristais que elas conseguem exibir essa morfologia.

O palasito Quijingue amplia esta discussão, mediante as três morfologias principais encontradas simultaneamente na amostra é necessário considerar duas possibilidades: (i) os cristais menores e arredondados são oriundos pela reabsorção parcial de cristais maiores no presentes no magma silicático, consumidos pela reação quando entram em contato com a fase metálica, e que já encontraram o equilíbrio com estes, resultando em seu arredondamento ou, tal como proposto por Scott (2017), (ii) eles apenas são grãos que se formam desta maneira, desenvolvendo-se a partir da separação entre a fase silicática e o líquido metálico. A proposta de Scott (2017) é as texturas de olivinas arredondadas se formariam apenas pela migração do limite dos grãos, reduzindo a alta energia superficial no contato olivina metal, ampliando a área de contato entre

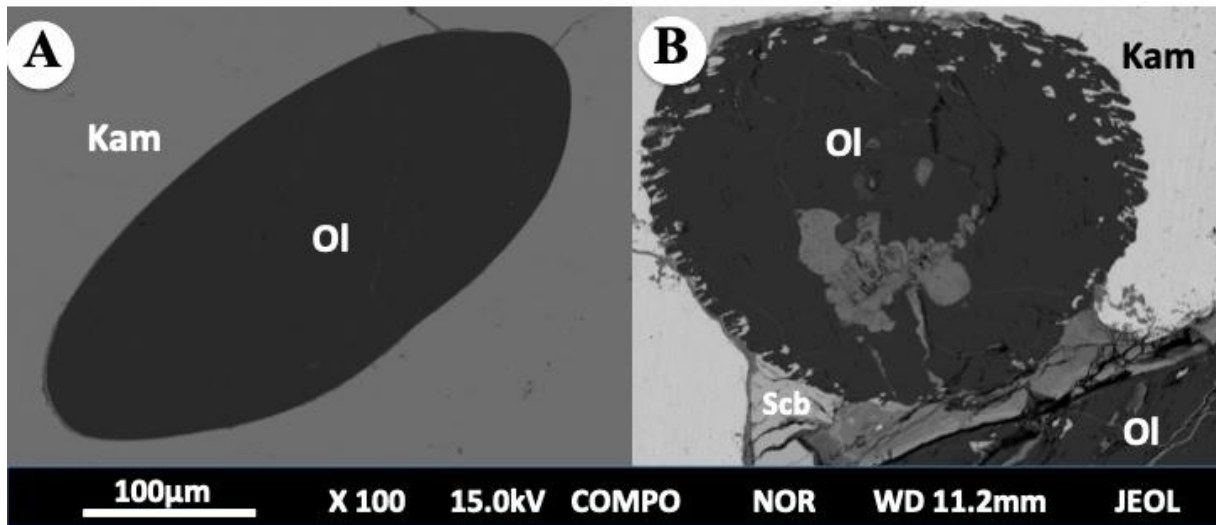


diferentes cristais de olivina, e assim arredondando-os. Ou seja, Scott (2017) reforça a idéia original (Scott, 1977) de que as olivinas arredondadas não se formariam pela reabsorção parcial de cristais angulares/fragmentais no melt silicático.

Solferino et al. (2015) propõem que o crescimento de cristais de olivina é significativamente mais rápido em um fundido metálico Fe-S do que em um metal Fe-Ni sem enxofre. Estes autores consideram que as texturas tipo-Brenham - um palasito com olivinas centimétricas predominantemente arredondadas - poderiam ser geradas experimentalmente a partir de misturas de pó de olivina e um fundido de Fe-S, e que texturas de arredondamento de cristais similares seriam possíveis em metal fundido em uma escala de tempo adequada e compatível com modelos termais propostos atualmente para a formação de asteróides. Ou seja, a presença do enxofre seria o que viabiliza a formação das olivinas arredondadas no modelo proposto por Scott (1977), e assim retomado por Scott (2017).

Quijingue é uma amostra rara, pouco conhecida na literatura internacional, e que ainda carece de muitos estudos. Nesta discussão, há de se considerar que as olivinas arredondadas observadas no palasito Quijingue podem ser encontradas completamente imersas no metal (**Figura 8C, Figura 9A**), relativamente distantes dos contatos com olivinas angulares ou fragmentais, e não apresentam as fraturas intragranulares e/ou as bordas de reação com o metal, sugerindo que o argumento de Scott (2017) seria válido. Contudo, como explicar a co-existência dos grãos angulares? Ou como justificar que grãos se formando em equilíbrio com um líquido não resultariam em formas euedrais?

McKibbin et al. (2019) colaboram com esta discussão ao demonstrar que a ausência de fraturas e de bordas de reação na olivina arredondada indicam que as reações com a fase metálica já teriam cessado e o cristal atingido o equilíbrio com o metal. Para considerar que o arredondamento das olivinas em Quijingue fosse decorrente de reações com o metal seria necessário cogitar que os produtos dessas reações estivessem dispersos pela fase metálica. McKibbin et al. (2019) admitem que essa situação seria impossível pois os componentes das olivinas são extremamente insolúveis no metal e os dados geoquímicos - tal como a ausência de magnésio nas análises da liga metálica Fe-Ni - corroboram com esse aspecto. Pareceria assim mais provável que, como Saiki et al. (2003), Solferino et al. (2015) e Scott (2017) afirmam, o arredondamento das olivinas resulte da redução da energia interfacial entre os grãos, que é alcançado com um constante volume e implica apenas na mudança na forma.



**Figura 9** Cristais de olivina em imagens obtidas por EPMA na fatia WCA. (A) Olivina 8A, completamente arredondada, imersa em kamacita e com bordas intactas; (B) Olivina 3A, com bordas com feições de corrosão e crescimento simplectítico de cristais de troilita nas bordas. Kam = Kamacita, Ol = Olivina, Scb = Scheirsbersita.

Para além das observações de forma e fraturamento, durante o trabalho de imageamento com o MEV foram identificados em Quijingue processos de corrosão ou a formação de coroas de reação no contato olivina-metal (**Figura 5**). Sobre este aspecto Buseck (1977) já reportava que nas regiões periféricas de contato silicato-metal ocorre o crescimento simplectítico de minerais com presença de metal, fosfato, troilita e cromita.

Em Quijingue foram observadas feições sugestivas deste tipo de crescimento simplectítico, em especial quando dois ou mais cristais de olivina estão próximos ou formam junções tríplices. Nestas regiões o metal parece ter sido aprisionado e isolado, o que parece criar uma zona de proteção das bordas da olivina. Imediatamente nas bordas dos cristais angulares/fragmentais há o surgimento de uma zona de reação olivina-metal. Estas zonas não parecem cristalizar minerais específicos, apresentando aspecto similar ao de uma borda de resfriamento rápido. Contudo, nas junções o metal cede lugar a fosfato ou sulfeto, sendo estas também a zonas de ocorrência para espinelio/cromita. Nas proximidades destas regiões, nos limites dos cristais angulares e fragmentais, cristais milimétricos a sub-milimétricos de olivina, com formatos arredondados/elipsoidais, sugestivos de terem se originado como fragmentos destes cristais angulares/fragmentais, muito próximos desses cristais centimétricos, e geralmente imersos em uma zona de fosfato que bordejia os cristais maiores.

Nesta situação as olivinas arredondadas preservam uma marcante textura de corrosão, formando simplectitos (**Figura 9B**), com a cristalização/recristalização de diminutos cristais de

sulfeto - preservando assim o líquido Fe-S proposto por Solferino (2015) - nas suas bordas. Ou seja, a imersão no fosfeto parece impedir que a reação com o metal Fe-Ni se complete e alcance o equilíbrio, ficando aí preservada uma fase intermediária do processo. Esta textura reliquiar de corrosão sugere que a hipótese de reabsorção parcial de cristais angulares/fragmentais quando da mistura entre o melt/sólido silicático e um melt metálico precisa reavaliada a partir do estudo dos simplectitos em palasitos.

## 5.2 Fraturas intragranulares, veios e fendas

Outro aspecto muito observado nas olivinas de palasitos é a presença constante de um expressivo fraturamento intragranular, cujas fendas criadas são preenchidas pelo metal ou por minerais acessórios (**Figura 5B**). A origem dessas fraturas pode estar relacionada à fragmentação do corpo parental por impacto, ou até mesmo à queda do meteorito. O primeiro a propor uma explicação para este fraturamento foi Buseck (1977), que sugere que os cristais fragmentados também podem ocorrer devido, entre outros aspectos, ao intemperismo nas fases do metal, sulfeto e fosfeto, cuja alteração levaria à expansão dos minerais e, portanto, poderiam ser a possível causa da fragmentação dos cristais de olivina.

É interessante observar que conquanto este fraturamento intragranular seja frequente nos cristais fragmentais e nos angulares do palasito Quijingue ele é inexistente ou incipiente nos arredondados/elipsoidais menores. Isto sugere que a percolação de uma rocha tipo "cumulato" de olivinas seria a causa mais provável para este fraturamento. Uma colisão ou outro processo de despressurização, poderia ser o estopim para a entrada de um fluido metálico Fe-Ni, que reagiria com as olivinas previamente formadas - fragmentando alguns desses cristais e reagindo com outros em busca do equilíbrio. O tamanho dos cristais seria essencial para a sua preservação - com a formação de bordas de reação - ou a sua parcial assimilação/reabsorção, gerando os arredondados. Fragmentos menores poderiam se desprender e afastar dos cristais originários, desenvolvendo reações simplectíticas que posteriormente seriam reabsorvidos pelo metal e gerando formas arredondadas, ou preservados em zonas mais ricas em fosfetos e protegidos pela proximidade das olivinas maiores, onde desenvolveriam texturas simplectíticas que ainda se encontram preservadas. Óxidos (espinélio/cromita) e fosfato absorveriam o oxigênio liberado na reação e se cristalizariam precocemente gerando cristais euedrais. A questão ainda sem resposta é: o que ocorre com o magnésio e o silício liberados nesta reação?

### 5.3 Implicações Mineraloquímicas

De uma forma geral, os dados composicionais dos núcleos dos grãos olivinas de Quijingue são comparáveis e apresentam boa correlação com olivinas de outros palasitos do grupo principal (**Tabela 3**).

**Tabela 3.** Média composicional para núcleos de olivinas em Palasitos do Grupo Principal por EPMA. Dados dos meteoritos Brahin, Brenham, Esquel, Fukang, Imilac, Seymchan por Smith et al. 1983; Wasson et al., 1999; Laurretta et al., 2006; Danielson et al., 2009; Boesenberg et al., 2012; Ali et al., 2018; Mckibbin et al., 2019). Quijingue (este trabalho). Dados de isótopos de oxigênio, Greenwood et al. (2015)

| Sample                         | Brahin<br>(n=16) | Brenham<br>(n=18) | Esquel<br>(n=31) | Fukang<br>(n=16) | Imilac<br>(n=20) | Seymchan<br>(n=19) | Quijingue<br>(n=115) |
|--------------------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|----------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 40,15            | 39,96             | 40,17            | 39,84            | 40,20            | 40,00              | 40,63                |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,004            | 0,002             | 0,024            | 0,022            | 0,009            | 0,002              | 0,204                |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,015            | 0,017             | 0,052            | 0,044            | 0,024            | 0,015              | 0,068                |
| FeO                            | 10,98            | 11,6              | 11,14            | 13,2             | 11,77            | 10,78              | 12,11                |
| MnO                            | 0,205            | 0,195             | 0,271            | 0,309            | 0,275            | 0,256              | 0,295                |
| MgO                            | 48,19            | 48,25             | 47,79            | 46,6             | 47,54            | 49,1               | 46,30                |
| CaO                            | 0,01             | 0,008             | 0,028            | 0,022            | 0,012            | 0,008              | 0,011                |
| Total                          | 99,55            | 100,03            | 99,48            | 100,04           | 99,83            | 100,16             | 99,62                |
| $\delta^{17}\text{O}\text{‰}$  | 1,413 (6)        | 1,335 (14)        | 1,404 (5)        | 1,333 (6)        | 1,424 (6)        |                    | 1,226 (2)            |
| $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$  | 3,069 (6)        | 2,913 (14)        | 3,043 (5)        | 2,878 (6)        | 3,064 (6)        |                    | 2,690 (2)            |

Mckibbin et al. (2019) sugerem que os teores de fayalita nos PMGs permitem subdividi-los em três sub-grupos: (i) Baixo Fe, ~Fa 11,5, representados pelos palasitos Brahin, Esquel e Seymchan; (ii) Fe intermediário, ~Fa 12, incluindo os palasitos Brenham e Imilac; e (iii) Alto Fe, ~Fa 13,7, representado pelo palasito Fukang. Além disto, estes mesmos autores sugerem ser possível, a partir do conteúdo de fayalita, identificar dois conjuntos distintos de PMGS: (i)

~Fa 12-13 – que contempla a maior parte dos PMGs ou (ii) ~Fa 16-18 – denominados de silicatos anômalos (as) ou PMGs de alto-FeO.

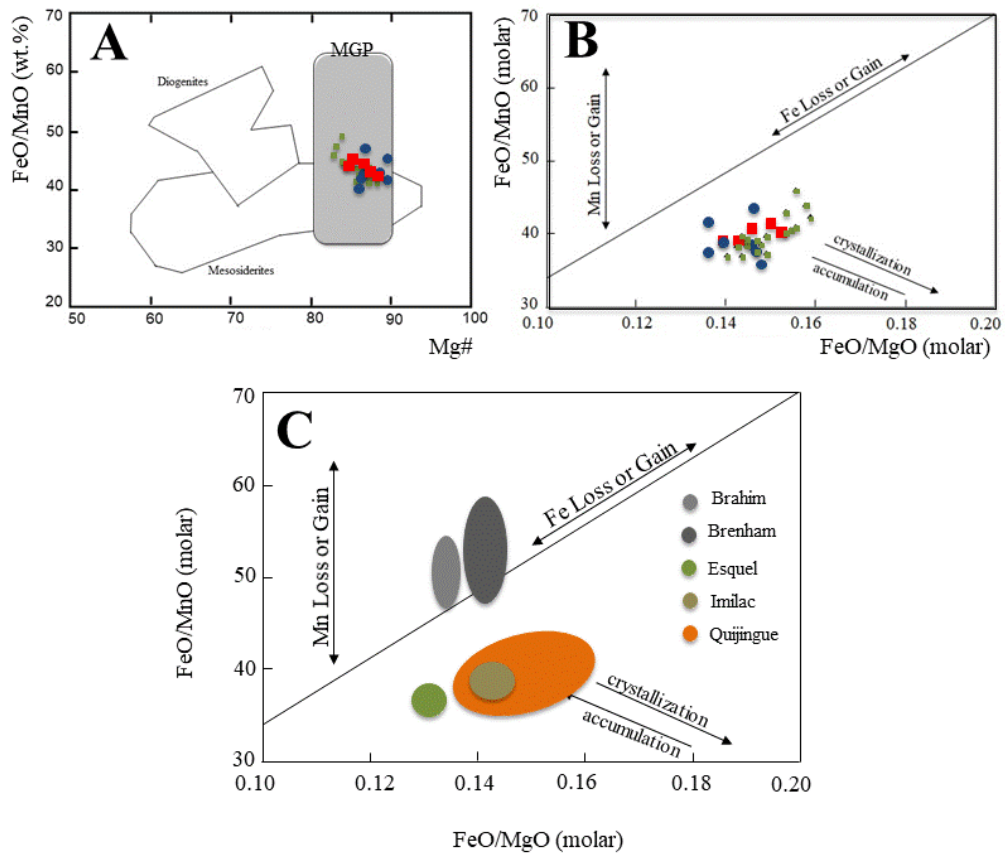
O palasito Quijingue apresenta teor médio de fayalita ~12,8% (12,46% a 13,01%, **Tabelas 1 e 2**), sendo portanto correlacionável aos palasitos de teor de fayalita intermediário. Além disto, como o teor de fayalita em Quijingue não ultrapassa os 13%, seu comportamento é compatível com a maioria dos palasitos conhecidos.

Além do FeO, o teor de MnO também permite delinear populações distintas entre os integrantes dos palasitos do grupo principal. Segundo McKibbin *et al.* (2019), a maior parte das olivinas dos PMG tem teor médio de MnO de ~0,30 wt.%, mas alguns espécimes são mais empobrecidos neste elemento, apresentando valores em torno de ~0,20 wt%. Isto permite identificar dois subgrupos: o de ocorrência mais comum (MnO~0,30 wt.%) e o empobrecido em MnO (~0,20wt.%).

Os dados comparativos para os palasitos mais estudados do PMG (**Tabela 3**) demonstram que os meteoritos Brenham e Brahin encaixam-se no grupo de baixos teores de óxido de manganês (0,195 e 0,205), enquanto os demais possuem teor médio mais próximo de ~0,3 wt%. McKibbin *et al.* (2019) chamam a atenção para o fato dos palasitos de teor mais comum de MnO apresentarem, predominantemente, cristais de olivina angulares e/ou fragmentares, consideradas decorrentes do fraturamento e quebra de cristais angulares durante um evento de impacto, sendo rara a ocorrência de cristais arredondados. O palasito Quijingue, por sua vez, possui teor de MnO comum, próximo a 0,3 wt.% (**Tabelas 1, 2**). Predominam em tamanho e em número os cristais angulares e fragmentados, contudo é difícil considerar que a ocorrência de olivinas arredondadas esteja relacionada aos teores de MnO visto que não se observa mudanças significativas nos teores de Fa e de MnO nestes cristais.

Apesar das olivinas do palasito Quijingue apresentarem teores composicionais para os elementos maiores similares aos de outros palasitos do grupo principal, em relação aos elementos menores, observa-se um enriquecimento em Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e em Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em relação aos outros integrantes do grupo amostral. A análise com mais alto teor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foi realizada em um núcleo de olivina arredondada, enquanto para o Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o valor representa o enriquecimento no grupo das olivinas angulares (**Tabela 1**). Este enriquecimento em alumínio pode ser uma característica primitiva deste palasito já que se reflete também na abundância de cromita/espinélio nesta amostra (**Figura 8B**). Isto é ratificado pelo enriquecimento em cromo (média = 0,068%) que ocorre principalmente nos cristais angulares. Os cristais de cromita tendem a ser euedrais e distribuem-se sempre nas bordas das olivinas angulares (**Figura 8B**).

Greenwood et al. (2015) utilizaram a relação Mg#  $[\frac{Mg}{Mg+Fe} \cdot 100]$  versus FeO/MnO (wt.%) para comparar as olivinas de palasitos do grupo principal com aquelas de mesosideritos, dunitos e diogenitos. As olivinas de Quijingue apresentam valores de Mg# variando de 86,3 a 87,9 e razões FeO/MnO entre ~37,0 e 47,9. Esta relação ratifica a classificação de Quijingue no PMGs, apesar de suas olivinas plotarem predominantemente no campo de superposição com os mesosideritos (**Figura 10A**).



**Figura 10** (A) Diagrama Mg# x FeO/Mn (wt.%) para as olivinas do palasito Quijingue. Campos dos palasitos do grupo principal (MGP), Mesosideritos e Diogenitos de acordo com a proposta de Greenwood et al. (2015). (B) Diagrama FeO/MgO versus FeO/MnO, em proporção molecular, segundo proposição de Goldrich & Delaney (2000), para as olivinas do palasito Quijingue, Quadrados vermelhos = olivinas angulares; quadrados verdes = olivinas fragmentadas; círculo azul = olivinas arredondadas. (C) Diagrama FeO/MgO versus FeO/MnO, em proporção molecular, dados de Boesenberg et al. (2012) segundo proposição de Goldrich & Delaney (2000), com os campos de variação das olivinas dos palasitos Brahim, Braham, Esquel, Imilac e Quijingue.

Buscando investigar as variações composicionais apresentadas por olivinas de palasitos do grupo principal, Boesenberg et al. (2012) utiliza as razões molares FeO/MgO versus FeO/MnO, propostas por Goodrich & Delaney (2000), para investigar os enriquecimentos relativos em Fe, Mg e Mn nestas amostras. Nestas relações, trends horizontais resultam de processos de fracionamento ígneo, que resultam em grandes variações de FeO/MgO, sem alterações significativas das razões FeO/MnO. Os trends verticais por sua vez implicam em perda ou adição de manganês, considerando o ferro constante, sendo indicativos de um processo de fracionamento do Mn em relação ao Mg. Um padrão diagonal, implica em variações simultâneas nas razões FeO/MgO e FeO/MnO, sugestivas de (i) um reequilíbrio da olivina no melt residual ou (ii) um processo de fracionamento da olivina em um cumulato. Neste caso, a razão FeO/MnO sofreria um lento decréscimo, simultâneo ao acréscimo da razão FeO/MgO. Aplicando-se a Quijingue (**Figura 10B**), observa-se um padrão diagonal, com uma maior dispersão das olivinas fragmentadas - talvez fruto de sua maior representatividade estatística. As olivinas angulares apresentam um trend bastante definido, com um claro alinhamento. Novamente não se observam comportamentos composicionais significativamente distintos em função da classe morfológica destas olivinas. Entende-se portanto que este padrão apresentado reflita características primitivas deste cumulato e ratifica a hipótese de que as olivinas arredondadas resultam simplesmente da reabsorção das olivinas angulares/fragmentadas pela reação com o fundido metálico.

Comparando o trend obtido para as amostras do Quijingue com os de outros PMG (**Figura 10C**), observa-se que surgem dois grupos diferentes: palasitos com padrão vertical e acima da linha de ganha/perda de ferro (Brahim e Brenham); e palasitos com trend diagonal/horizontal e que estão abaixo da linha de perda/ganho de ferro (Esquel, Imilac e Quijingue). Para o caso do grupo ao qual o Quijingue se encontra, os dados indicam um comportamento cumulático, confirmando que os processos que atuaram nesse meteorito foram essencialmente ígneos, com pouca interferência de processos secundários.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudos em isótopos de oxigênio realizados por Greenwood et al. (2015), apresentaram valores para 24 (vinte e quatro) espécimes de palasitos classificados no PMG, incluindo Quijingue (**Tabela 3**). Apesar dos valores ligeiramente inferiores aos palasitos utilizados nesta comparação, Quijingue encontra-se na média esperada para os PMGs. Vale ressaltar aqui que o meteorito Quijingue é um espécime de palasito bastante singular, apresentando uma série de aspectos que ainda carecem de uma avaliação mais detalhada. Em termos mineraloquímicos, o

presente estudo comprovou a correlação do meteorito Quijingue aos clássicos palasitos do grupo principal (PMG), confirmando sua classificação.

As olivinas presentes neste palasito apresentam todos os três tipos de morfologias descritas na literatura, sendo o tipo fragmental considerado mais abundante no Quijingue. Além disso, a existência de bordas de reação nas zonas de contato olivina-metal - que por vezes lembram margens de resfriamento - e a formação de texturas de corrosão em zonas de crescimento simplectítico, implicam em processos posteriores aos de formação/acumulação destas olivinas, sendo testemunhas, principalmente, da interação entre estas e o metal Fe-Ni.

As relações texturais e as características composicionais destes cristais sugerem a possibilidade de origem relacionada a processos de ferrovulcanismo do núcleo no corpo parental (Johnson et al., 2019). Nesta hipótese, em um cenário onde bolsões de melt residual de ferro-níquel se enriquecem em enxofre e atingem elevadas pressões, o material metálico tenderá a se propagar como "diques" invadindo o manto e interagindo com a camada de rochas mantélicas imediatamente superiores ao núcleo, ou até mesmo causando "erupções" na superfície do planetesimal (Johnson et al., 2019). Este raciocínio traz uma explicação plausível para a quebra dos clusters de olivina, bem como para as reações de consumo nas bordas dos cristais que estão mais isolados dos outros, pois a passagem abrupta do material metálico - em maior temperatura e pressão - tenderia a romper a camada de cumulos de olivina, e os cristais/fragmentos menores seriam dispersos no conduto e tenderiam a ser consumidos até se reequilibrarem. Esta proposição é relativamente nova e precisa ser testada. Estudo dos sulfetos (troilita) e dos óxidos (cromita) de Quijingue, em andamento, devem trazer luz a tais questionamentos.

## **7 AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Museu Nacional e ao Museu Geológico da Bahia pela disponibilização das amostras que compõem este estudo. Ao Complexo Laboratorial Multiusuários, Galpão das Geociências, do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias, Universidade Federal de Sergipe; ao Labsonda, da Universidade Federal do Rio de Janeiro; e ao Departamento de Earth Sciences da Universidade de Toronto, pelo apoio e infra-estrutura laboratorial, que deu suporte às etapas analíticas. Este trabalho contou com recursos dos projetos GeoLogar: Ciências da Terra para a Sociedade (Processos 559013/2009-4 do CNPq e TO: PES 0056/2011 da FAPESB). Débora Rios (Processo 307554/2015-5) e Herbet Conceição (311008/2017-8) agradecem ao CNPq pelas bolsas de produtividade em



pesquisa. Cristine Pereira agradece as bolsas de iniciação científica (CNPq, PIBIC-UFBA, Pibiex-UFBA) que permitiram o despertar de seu interesse pelo campo da meteorítica. Este trabalho integra as atividades de conclusão de Curso de Graduação em Geologia de Cristine Pereira na Universidade Federal da Bahia.

## 8 REFERÊNCIAS

- Boesenberg J.S., Delaney J.S., Hewins R.H. 2012. A petrological and chemical reexamination of Main Group pallasite formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **89**: 134-158.
- Buseck, P.R. 1977. Pallasites meteorites – mineralogy, petrology and geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **41**: 711-740.
- Carvalho W.P., Rios D.C., Zucolotto M.E., Conceição H., Araújo A.J.S., Tosi A.A. 2018. O meteorito Palmas de Monte Alto: aspectos petrográficos e mineraloquímicos. *Revista do Instituto de Geociências – USP*, **18**: 15-31.
- Coutinho J.M.V., Quitete E.B., Oliveira M.C.B. 1999. The Quijingue Meteorite: A Pallasite from Bahia, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **29**: 447-448.
- Desrousseaux A., Doukhan J.C., Leroux H., Van Duysen J.C. 1997. An analytical electron microscope investigation of some pallasites. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **103**: 101-115.
- Donohoue P.H., Hill E., Huss G.R. 2018. Experimentally determined subsolidus metal-olivine element partitioning with applications to pallasites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **222**: 149-160.
- Goodrich C.A., Delaney J.S. 2000. Fe/Mg-Fe/Mn relations of meteorites and primary heterogeneity of primitive achondrite parent bodies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**: 305-318.
- Goodrich C.A., Delaney J.S. 2000. Petrology of unique achondrite Queen Alexandra Range 93148: A piece of the Pallasite (howardite-eucrite-diogenite?) parent body? *Meteoritics & Planetary Science*, **35**: 521-535.
- Goldschmidt V. 1937. The principles of distribution of chemical elements in mineral and rocks. *Journal of the Chemical Society*: 655–673.

- Greenwood R.C., Franchi I.A., Jambon A., Barrat J.A., Burbine T.H. 2006. Oxygen Isotope Variation in Stony-Iron Meteorites. *Science*, **313**: 1763-1765.
- Greenwood R.C., Barrat J., Scott E.R.D., Haack H., Buchanan P.C., Franchi I.A., Yamaguchi A., Johnson D., Bevan A. W.R., Burbine T.H. 2015. Geochemistry and oxygen isotope composition of main-group pallasites and olivine-rich clasts in mesosiderites: Implications for the “Great Dunite Shortage” and HED-mesosiderite connection. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **169**: 115-136.
- Grossman J.N. 1999. The Meteoritical Bulletin, No. 83, 1999 July. *Meteoritics & Planetary Science*, **34**: A169- A186.
- IMCA: Encyclopedia of Meteorites. Disponível em: < <http://www.encyclopedia-of-meteorites.com/collections.aspx>>. Acesso em: 13 de nov. de 2019.
- Johnson B.C., Sori M.M., Evans A.J. 2019. Ferrovolcanism on metal worlds and the origin of pallasites. *Nature Astronomy*.
- Klosterman M.J., Buseck P.R. 1973. Sctructural Analysis of Olivine in Pallasitic Meteorites: Deformation in Planetary Interiors. *Journal of Geophysical Research*, **78**: 7581-7587.
- Krot A.N., Keil K., Scott E.R.D., Goodrich C.A., Weisberg M.K. 2014. Classification of Meteorites and Their Genetic Relationships. *Elsevier*, **1**: 1-63.
- Lorde Rayleigh F.R.S. 1941. The stone-iron meteorites called pallasites: a synthetic study of their structure and probable mode of formation. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **179**: 386-393.
- Massalski T.B., Park F.R. 1964. A study of four pallasites using metallographic, microhardness and microprobe techniques. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **28**: 1165-1175.
- McKibbin S.J., Pittarello L., Makarona C., Hamann C., Hecht L., Chernonozhkin S.M., Goderis S., Claeys P. 2019. Petrogenesis of main group pallasite meteorites based on relationships among texture, mineralogy, and geochemistry. *Meteoritics & Planetary Science*, 1-31.
- The Meteoritical Society: Meteoritical Bulletin Database. Disponível em: < <https://www.lpi.usra.edu/meteor/>>. Acesso em: 13 de nov. de 2019.
- Mittlefehldt D.W. 1980. The composition of mesosiderite clasts and implications for the origin of pallasites. *Earth and Planetary Science Letters*, **51**: 29-40

- Mullane E., Alard O., Gounelle M., Russell, S.S. 2004. Laser ablation ICP-MS study irons and pallasites: constrains on the behavior of highly siderophile elements during and after planetesimal core formation. *Chemical Geology*, **208**: 5-28.
- Ohtani E. 1982. Formation of olivine textures in pallasites and thermal history of pallasites in their parent body. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **32**: 182-192.
- Pallasite from Brazil, Quijingue. Disponível em: < <https://www.ferbers.com/a-palosite-meteorite-from-imilac-chile-2055.html>>. Acesso em: 13 de nov. de 2019.
- Pallasite Large Brazilian Quijingue Specimen Carats Rt401. Disponível em: <<https://www.gemrockauctions.com/auctions/pallasite-large-brazilian-quijingue-specimen-carats-rt401-260209>>. Acesso em: 13 de nov. de 2019
- Poitrasson F., Levasseur S., Teutsch N. 2005. Significance of iron isotope mineral fractionation in pallasites and iron meteorites for the core-mantle differentiation of terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, **234**: 151-164.
- Quitté G., Birck J., Allègre C.J. 2004. Stony-iron meteorites: History of the metal phase according to tungsten isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **69**: 1321-1332.
- Righter K., Arculus R.J., Delano J. W., Paslick C. 1990. Electrochemical measurements and thermodynamic calculations of redox equilibria in pallasite meteorites: Implications for the eucrite parent body. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **54**: 1803-1815.
- Scott E.R.D. 1977. Formation of olivine-metal textures in pallasite meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **41**: 639-710.
- Scott E.R.D. 1977. Pallasites – metal composition, classification and relationships with iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **41**: 349-360.
- Scott E.R.D. 2017. Pallasites: Olivine-metal textures, metal composition, minor phases, origins, and insights into processes at core-mantle boundaries of asteroids. In: 48° Lunar and Planetary Science Conference. Abstract #1037. CD-ROM.
- Solferino G.F.D., Golabek G.J., Nimmo F., Schmidt M.W. 2015. Fast grain growth of olivine in liquid Fe-S and the formation of pallasites with rounded olivine grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **162**: 259-275.
- Krot A.N., Keil K., Scott E.R.D., Goodrich C.A., Weisberg M.K. 2014. Classification of Meteorites and Their Genetic Relationships. *Elsevier*, **1**: 1-63.

- Wahl W. 1965. The pallasite problem. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **20**: 177-181.
- Wasson J.T., Choi B.G. 2003. Main-group pallasites: Chemical composition, relationship to IIIAB irons, and origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **67**: 3079-3096.
- Whitney D.L., Evans B. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, **95**: 185-187.
- Yang J., Goldstein J.I., Scott E.R.D. 2010. Main-group pallasites: Thermal history, relationship to IIIAB irons, and origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **74**: 4471-4492.
- Zucolotto M.E. 2000. Quijingue, Bahia, The First Brazilian Pallasite. *Meteoritics & Planetary Science*, **35**: A17.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Boesenberg J.S., Delaney J.S., Hewins R.H. 2012. A petrological and chemical reexamination of Main Group pallasite formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **89**: 134-158.
- Buseck, P.R. 1977. Pallasites meteorites – mineralogy, petrology and geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **41**: 711-740.
- Carvalho W.P., Rios D.C., Zucolotto M.E., Conceição H., Araújo A.J.S., Tosi A.A. 2018. O meteorito Palmas de Monte Alto: aspectos petrográficos e mineraloquímicos. *Revista do Instituto de Geociências – USP*, **18**: 15-31.
- Coutinho J.M.V., Quitete E.B., Oliveira M.C.B. 1999. The Quijingue Meteorite: A Pallasite from Bahia, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **29**: 447-448.
- Desrousseaux A., Doukhan J.C., Leroux H., Van Duysen J.C. 1997. An analytical electron microscope investigation of some pallasites. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **103**: 101-115.
- Donohoue P.H., Hill E., Huss G.R. 2018. Experimentally determined subsolidus metal-olivine element partitioning with applications to pallasites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **222**: 149-160.
- Goodrich C.A., Delaney J.S. 2000. Fe/Mg-Fe/Mn relations of meteorites and primary heterogeneity of primitive achondrite parent bodies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**: 305-318.
- Goldschmidt V. 1937. The principles of distribution of chemical elements in mineral and rocks. *Journal of the Chemical Society*: 655–673.
- Greenwood R.C., Franchi I.A., Jambon A., Barrat J.A., Burbine T.H. 2006. Oxygen Isotope Variation in Stony-Iron Meteorites. *Science*, **313**: 1763-1765.
- Greenwood R.C., Barrat J., Scott E.R.D., Haack H., Buchanan P.C., Franchi I.A., Yamaguchi A., Johnson D., Bevan A. W.R., Burbine T.H. 2015. Geochemistry and oxygen isotope composition of main-group pallasites and olivine-rich clasts in mesosiderites: Implications for the “Great Dunite Shortage” and HED-mesosiderite connection. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **169**: 115-136.

- Grossman J.N. 1999. The Meteoritical Bulletin, No. 83, 1999 July. *Meteoritics & Planetary Science*, **34**: A169- A186.
- Hewins R.H. 1983. Impact versus internal origins for mesosiderites. In: 40° Lunar and Planetary Science Conference. *Journal of Geophysical Research*, **88**: B257-B266.
- Hewins R.H. 1984. Intrinsic oxygen fugacities of diogenites and mesosiderite clasts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **48**: 1155-1160.
- Hewins R.H. 1988. Petrology and Pairing of Mesosiderites from Victoria Land, Antarctica. *Meteoritics*, **23**: 123-129.
- IMCA: Encyclopedia of Meteorites. Disponível em: < <http://www.encyclopedia-of-meteorites.com/collections.aspx>>. Acesso em: 13 de nov. de 2019.
- Johnson B.C., Sori M.M., Evans A.J. 2019. Ferrovolcanism on metal worlds and the origin of pallasites. *Nature Astronomy*.
- Klosterman M.J., Buseck P.R. 1973. Structural Analysis of Olivine in Pallasitic Meteorites: Deformation in Planetary Interiors. *Journal of Geophysical Research*, **78**: 7581-7587.
- Krot A.N., Keil K., Scott E.R.D., Goodrich C.A., Weisberg M.K. 2014. Classification of Meteorites and Their Genetic Relationships. *Elsevier*, **1**: 1-63.
- Lorde Rayleigh F.R.S. 1941. The stone-iron meteorites called pallasites: a synthetic study of their structure and probable mode of formation. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **179**: 386-393.
- Massalski T.B., Park F.R. 1964. A study of four pallasites using metallographic, microhardness and microprobe techniques. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **28**: 1165-1175.
- McKibbin S.J., Pittarello L., Makarona C., Hamann C., Hecht L., Chernonozhkin S.M., Goderis S., Claeys P. 2019. Petrogenesis of main group pallasite meteorites based on relationships among texture, mineralogy, and geochemistry. *Meteoritics & Planetary Science*, 1-31.
- The Meteoritical Society: Meteoritical Bulletin Database. Disponível em: < <https://www.lpi.usra.edu/meteor/>>. Acesso em: 13 de nov. de 2019.
- Mittlefehldt D.W., Chou C., Wasson J.T. 1979. Mesosiderites and howardites: igneous formation and possible genetic relationships. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **43**: 673-688.

- Mittlefehldt D.W. 1980. The composition of mesosiderite clasts and implications for the origin of pallasites. *Earth and Planetary Science Letters*, **51**: 29-40
- Mullane E., Alard O., Gounelle M., Russell, S.S. 2004. Laser ablation ICP-MS study irons and pallasites: constrains on the behavior of highly siderophile elements during and after planetesimal core formation. *Chemical Geology*, **208**: 5-28.
- Ohtani E. 1982. Formation of olivine textures in pallasites and thermal history of pallasites in their parent body. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **32**: 182-192.
- Pallasite from Brazil, Quijingue. Disponível em: < <https://www.ferbers.com/a-palosite-meteorite-from-imilac-chile-2055.html>>. Acesso em: 13 de nov. de 2019.
- Pallasite Large Brazilian Quijingue Specimen Carats Rt401. Disponível em: <<https://www.gemrockauctions.com/auctions/pallasite-large-brazilian-quiingue-specimen-carats-rt401-260209>>. Acesso em: 13 de nov. de 2019
- Poitrasson F., Levasseur S., Teutsch N. 2005. Significance of iron isotope mineral fractionation in pallasites and iron meteorites for the core-mantle differentiation of terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, **234**: 151-164.
- Quitté G., Birck J., Allègre C.J. 2004. Stony-iron meteorites: History of the metal phase according to tungsten isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **69**: 1321-1332.
- Righter K., Arculus R.J., Delano J. W., Paslick C. 1990. Electrochemical measurements and thermodynamic calculations of redox equilibria in pallasite meteorites: Implications for the eucrite parent body. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **54**: 1803-1815.
- Scott E.R.D. 1977. Formation of olivine-metal textures in pallasite meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **41**: 639-710.
- Scott E.R.D. 1977. Pallasites – metal composition, classification and relationships with iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **41**: 349-360.
- Scott E.R.D. 2017. Pallasites: Olivine-metal textures, metal composition, minor phases, origins, and insights into processes at core-mantle boundaries of asteroids. In: 48<sup>o</sup> Lunar and Planetary Science Conference. Abstract #1037. CD-ROM.
- Solferino G.F.D., Golabek G.J., Nimmo F., Schmidt M.W. 2015. Fast grain growth of olivine in liquid Fe-S and the formation of pallasites with rounded olivine grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **162**: 259-275.

- Krot A.N., Keil K., Scott E.R.D., Goodrich C.A., Weisberg M.K. 2014. Classification of Meteorites and Their Genetic Relationships. *Elsevier*, **1**: 1-63.
- Wahl W. 1965. The pallasite problem. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **20**: 177-181.
- Wasson J.T., Choi B.G. 2003. Main-group pallasites: Chemical composition, relationship to IIIAB irons, and origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **67**: 3079-3096.
- Whitney D.L., Evans B. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, **95**: 185-187.
- Yang J., Goldstein J.I., Scott E.R.D. 2010. Main-group pallasites: Thermal history, relationship to IIIAB irons, and origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **74**: 4471-4492.
- Zucolotto M.E. 2000. Quijingue, Bahia, The First Brazilian Pallasite. *Meteoritics & Planetary Science*, **35**: A17.



---

## **ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA “BRAZILIAN JOURNAL OF GEOLOGY”**

---

### **INSTRUCTIONS TO AUTHORS**

#### **Scope and Policy**

#### **AIMS AND SCOPE**

The Brazilian Journal of Geology (BJG) is a quarterly journal published by the Brazilian Geological Society with an electronic open access version that provides an in-ternacional medium for the publication of original scientific work of broad interest concerned with all aspects of the earth sciences in Brazil, South America, and Antarctica, including oceanic regions adjacent to these regions. The BJG publishes papers with a regional appeal and more than local significance in the fields of mineralogy, petrology, geochemistry, paleontology, sedimentology, stratigraphy, structural geology, tectonics, neotectonics, geophysics applied to geology, volcanology, metallogeny and mineral deposits, marine geology, glaciology, paleoclimatology, geochronology, biostratigraphy, engineering geology, hydrogeology, geological hazards and remote sensing, providing a niche for interdisciplinary work on regional geology and Earth history.

The BJG publishes articles (including review articles), rapid communications, articles with accelerated review processes, editorials, and discussions (brief, objective and concise comments on recent papers published in BJG with replies by authors).

Manuscripts must be written in English. Companion papers will not be accepted.

#### **ETHICS IN PUBLISHING**

The BJG follows the Code of Good Scientific Practice published by the São Paulo State Research Foundation – FAPESP, see [http://www.fapesp.br/boaspraticas/FAPESP-Code of Good Scientific Practice 2014.pdf](http://www.fapesp.br/boaspraticas/FAPESP-Code%20of%20Good%20Scientific%20Practice%202014.pdf).

#### **FUNDING SOURCES**

Authors should identify the sources of financial support for the research and/or preparation of the article and briefly describe the role of sponsor(s), if any, in study design; in the collection, analysis and interpretation of data; in the writing of the report; and in the decision to submit the article for publication.

## **COPYRIGHT AND OPEN ACCESS**

Upon acceptance of an article, authors will be asked to complete a “BJG publishing agreement” transferring the copyright to the Brazilian Geological Society.

The BJG is an open access journal which means that all articles will be freely available to the wider public and that reuse will be permitted.

## **CONFLICTS OF INTERESTS**

All authors are requested to disclose any actual or potential conflict of interest including any financial, personal or other relationships with other people or organizations that could inappropriately influence, or be perceived to influence, their work.

## **SUBMISSION DECLARATION AND VERIFICATION**

Submission of an article implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors as well as tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically, without the written consent of the copyright-holder. Authors should verify the originality of the article by checking for plagiarism with any available software.

In addition, the corresponding author must state that:

- The article has not been partitioned and that its contents are fully and independently understandable;
- The article, edited in Microsoft Word, A4 format, does not exceed 12,000 words;
- Each illustration or table is being sent in a separate file (.tif for figures);
- No text or illustration file exceeds 10 Mb;

- The authors are aware that submissions that do not comply with the “Instructions to authors” for BJG will be returned to the corresponding author;
- The authors are aware that if reviewers indicate the need for major or minor revision, they will have 30 days to make the corrections suggested by the editors;
- The authors are aware that they should carefully check and correct print proofs and return them to publishers within 48 hours to ensure the publication of the article without errors;
- The authors are aware that, should the article be accepted for publication, copyright will be transferred to the Brazilian Geological Society by sending a letter signed by all authors (“BJG publishing agreement”).

## **SUBMISSION**

Our online submission system (ScholarOne – SciELO) will guide you stepwise through the process of entering details on your article and uploading your files. The system will convert your article files to a single PDF file for use in the peer-review process. Editable files (e.g., Word, LaTeX) are required to typeset your article for final publication. All correspondence, including notification of the Editor’s decision and requests for revision, will be sent by e-mail.

## **EVALUATION**

Peer review: Articles will be submitted to critical analysis by least two reviewers.

Type of evaluation: Authors will be identified in the manuscripts received by the Reviewers.

## **Form and preparation of manuscripts**

### **Use of word processing software**

Regardless of the file format of the original submission, at revision you must provide us with an editable file of the entire article. Keep the layout of the text as simple as possible. Most formatting codes will be removed and replaced on processing the article. The electronic text should be prepared in a way very similar to that of conventional manuscripts.

To avoid errors you are strongly advised to use the ‘spell-check’ and ‘grammar-check’ functions of your word processor.

### **Article structure**

There are no strict formatting requirements, but all manuscripts must contain the essential elements needed to convey your manuscript, for example, Abstract, Keywords, Introduction, Materials and Methods, Results, Conclusions, References, Artwork and Tables with Captions.

Divide the article into clearly defined and numbered sections. Subsections should be numbered 1.1 (then 1.1.1, 1.1.2, ...), 1.2, etc. (the abstract is not included in section numbering). Use this numbering also for internal cross-referencing: do not just refer to 'the text'. Any subsection may be given a brief heading. Each heading should appear on its own separate line.

### **Introduction**

State the objectives of the work and provide an adequate background, avoiding a detailed literature survey or a summary of the results.

### **Material and methods**

Provide sufficient detail to allow the work to be reproduced. Methods already published should be indicated by a reference. Only relevant modifications should be described.

### **Theory/calculation**

A Theory section should extend, not repeat, the background to the article already dealt with in the Introduction and lay the foundation for further work. In contrast, a Calculation section represents a practical development from a theoretical basis.

### **Results**

Results should be clear and concise.

### **Discussion**

This should explore the significance of the results of the work, not repeat them. A combined Results and Discussion section is often appropriate. Avoid extensive citations and discussion of published literature.

### **Conclusions**

The main conclusions of the study may be presented in a short Conclusions section, which may stand alone or form a subsection of a Discussion or Results and Discussion section.

## **Appendices**

If there is more than one appendix, they should be identified as A, B, etc. Formulae and equations in appendices should be given separate numbering: Eq. (A.1), Eq. (A.2), etc.; in a subsequent appendix, Eq. (B.1) and so on. This also applies to tables and figures: Table A.1; Fig. A.1, etc.

## **Essential title page information**

**Title.** Concise, informative, and interesting. Titles are often used in information-retrieval systems. Avoid abbreviations and formulae where possible.

**Author names and affiliations.** Please clearly indicate the given name(s) and family name(s) of each author and check that all names are accurately spelled. Present the authors' affiliation addresses (where the actual work was done) below the names. Indicate all affiliations with a lower-case superscript number immediately after the author's name and in front of the appropriate address. Provide the full postal address of each affiliation, including the country name and, if available, the e-mail address of each author.

**Corresponding author.** Clearly indicate who will handle correspondence at all stages of refereeing, publication, and post-publication. Ensure that the e-mail address is given and that contact details are kept up to date by the corresponding author.

**Present/permanent address.** If an author has moved since the work described in the article was done, or was visiting at the time, a 'Present address' (or 'Permanent address') may be indicated as a footnote to that author's name. The address at which the author actually did the work must be retained as the main, affiliation address. Superscript Arabic numerals are used for such footnotes.

## **Abstract**

A concise and factual abstract is required. The abstract should state briefly the purpose of the research, the principal results and major conclusions. An abstract is often presented separately from the article, so it must be able to stand alone. For this reason, References should be avoided,

but if essential, then cite the author(s) and year(s). Also, non-standard or uncommon abbreviations should be avoided, but if essential they must be defined at their first mention in the abstract itself.

### **Keywords**

Immediately after the abstract, provide a maximum of 6 keywords, using American spelling and avoiding general and plural terms and multiple concepts (avoid, for example, 'and', 'of '). Be sparing with abbreviations: only abbreviations firmly established in the field may be eligible. These keywords will be used for indexing purposes.

### **Abbreviations**

Define abbreviations that are not standard in this field in a footnote to be placed on the first page of the article. Such abbreviations that are unavoidable in the abstract must be defined at their first mention there, as well as in the footnote. Ensure consistency of abbreviations throughout the article.

### **Acknowledgements**

Collate acknowledgements in a separate section at the end of the article before the references and do not, therefore, include them on the title page, as a footnote to the title or otherwise. List here those individuals who provided help during the research (e.g., providing language help, writing assistance or proof reading the article, etc.), as well as institutions and funding agencies.

### **Units**

Follow internationally accepted rules and conventions: use the international system of units (SI). If other units are mentioned, please give their equivalent in SI.

### **Math formulae**

Please submit math equations as editable text and not as images. Present simple formulae in line with normal text where possible and use the solidus (/) instead of a horizontal line for small fractional terms, e.g., X/Y. In principle, variables are to be presented in italics. Powers of e are often more conveniently denoted by exp. Number consecutively any equations that have to be displayed separately from the text (if referred to explicitly in the text).

## Electronic artwork

### General points

- Make sure you use uniform lettering and sizing of your original artwork.
- Preferred fonts: Arial (or Helvetica), Times New Roman (or Times), Symbol, Courier.
- Number the illustrations according to their sequence in the text.
- Use a logical naming convention for your artwork files.
- For Word submissions only, you may provide figures, their captions, and tables within a single file at the revision stage.

### Formats

Regardless of the application used, when your electronic artwork is finalized, please ‘save as’ or convert the images to one of the following formats (note the resolution requirements for line drawings, halftones, and line/halftone combinations given below):

- EPS (or PDF): Vector drawings. Embed the font or save the text as ‘graphics’.
- TIFF (or JPG): Color or grayscale photographs (half- tones): always use a minimum of 300 dpi.
- TIFF (or JPG): Bitmapped line drawings: use a minimum of 1000 dpi.
- TIFF (or JPG): Combined bitmapped line/half-tone (color or grayscale) images: a minimum of 500 dpi is required. **Please do not:**
- Supply files that are optimized for screen use (e.g., GIF, BMP, PICT, WPG); the resolution is too low.
- Supply files that are too low in resolution.
- Submit graphics that are disproportionately large for the content.

### Color artwork

Please make sure that artwork files are in an acceptable format — TIFF (or JPEG), EPS (or PDF), or MS Office files — and with the correct resolution. If, together with your accepted article, you submit usable color figures, these will appear in color online.

### Figure captions

Ensure that each illustration has a caption. A caption should comprise a brief title (not on the figure itself ) and a description of the illustration. Keep text in the illustrations to a minimum, but be sure to explain all symbols and abbreviations used.

### **Tables**

Please submit tables as editable text and not as images. Tables can be placed either next to the relevant text in the article, or on separate page(s) at the end. Number tables consecutively in accordance with their appearance in the text and place any table notes below the table body. Be sparing in the use of tables and ensure that the data presented in them do not duplicate results described elsewhere in the article. Please avoid using vertical rules.

### **Citation in text**

Please ensure that every reference cited in the text is also present in the reference list (and vice versa). Any references cited in the abstract must be given in full. Unpublished results and personal communications are not recommended in the reference list, but may be mentioned in the text. If these references are included in the reference list they should follow the standard reference style of the journal and should include a substitution of the publication date with either ‘Unpublished results’ or ‘Personal communication’. Citation of a reference as ‘in press’ implies that the item has been accepted for publication.

### **Web references**

As a minimum, the full URL should be given and the date when the reference was last accessed. Any further information, if known (DOI, author names, dates, reference to a source publication, etc.), should also be given. Web references can be listed separately (e.g., after the reference list) under a different heading if desired, or can be included in the reference list.

### **Reference formatting**

There are no strict requirements on reference formatting at submission. References can be in any style or format as long as the style is consistent. Where applicable, name(s) of author(s), journal title/book title, chapter title/article title, year of publication, volume number/book chapter and the pagination must be present. Use of DOI is highly encouraged. The reference



style used by the journal will be applied to the accepted article by SCIELO at the proof stage. Note that missing data will be highlighted at proof stage for the author to correct.

### **Reference style**

All publications cited in the text should be presented in a list of references following the text of the manuscript. In the text refer to the author's name (without initials) and year of publication (e.g. "Since Almeida (1986) has shown that..." or "This is in agreement with results obtained later (Trompette 1994; Heilbron and Machado 2003).") For three or more authors use the first author followed by "et al.", in the text. The list of references should be arranged alphabetically by authors' names. The manuscript should be carefully checked to ensure that the spelling of authors' names and dates are exactly the same in the text as in the reference list. References should be given in the following form:

#### **Papers in scientific journals**

Almeida F.F.M. 1986. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **16**:325-349.

Costa I.P., Bueno G.V., Milhomem P.S., Silva H.S.R.L., Kosin M.D. 2007. Sub-bacia de Tucano Norte e Bacia de Jatobá. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **15**:445-453.

Escayola M.P., Pimentel M.M., Armstrong R. 2007. Neoproterozoic backarc basin: sensitive high-resolution ion microprobe U-Pb and Sm-Nd isotopic evidence from the eastern Pampean Ranges, Argentina. *Geology*, **35**:495-498.

Heilbron, M. and Machado, N. 2003, Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira orogen (SE Brazil). *Precambrian Research*, **125**:87-112.

#### **Books and book chapters**

Bedell R., Crósta A.P., Grunsky E. (eds.). 2009. *Remote Sensing and Spectral Geology*. Littleton, Society of Economic Geologists, 270 p.

Kaufman A.J., Sial A.N., Frimmel H.E., Misi A. 2009. Neoproterozoic to Cambrian palaeoclimatic events in southwestern Gondwana In: Gaucher C., Sial A.N., Frimmel H.E.,

Helverson G.P. (eds.). Neoproterozoic- Cambrian tectonics, global change and evolution: a focus on southwestern Gondwana. *Developments in Precambrian Geology*, 16, Amsterdam, Elsevier, p. 369-388.

Pankhurst R.J. & Rapela C.W. (eds.). 1998. *The Proto- Andean margin of Gondwana*. London, Geological Society of London Special Publication, **142**, 382 p.

Trompette R. 1994. *Geology of western Gondwana (2000–500 Ma)*. Rotterdam, Balkema, 350 p.

### **Papers in scientific meetings**

Astini R., Ramos V.A., Benedetto J.L., Vaccari N.E., Cañas F.L. 1996. La Precordillera: un terreno exótico a Gondwana. In: 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso Exploración de Hidrocarburos. Buenos Aires, *Actas*, v. 5, p. 293-324.

Leite-Junior W.B, Bettencourt J.S., Payolla B.L. 2003. Evidence for multiple sources inferred from Sr and Nd isotopic data from felsic rocks in the Santa Clara Intrusive Suite, Rondonia, Brazil. In: SSAGI, South American Symposium on Isotope Geology. Salvador, *Short Papers*, p. 583-585.

Milani E.J. & Thomaz-Filho A. 2000. Sedimentary basins of South América. In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz- Filho A., Campos D.A. (eds.). Tectonic evolution of South America. *31st International Geological Congress*. Rio de Janeiro, p. 389-452.

### **Thesis and dissertations**

Paes V.J.C. 1999. *Geologia da quadrícula Alvarenga, MG, e a geoquímica: implicações geotectônicas e metalogenéticas*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 144 p.

Ávila C.A. 2000. *Geologia, petrografia e geocronologia de corpos plutônicos paleoproterozóicos da borda meridional do Cráton São Francisco, região de São João Del Rei, Minas Gerais*. PhD Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 401 p.

### Printed maps

Inda H.A.V. & Barbosa J.F. 1978. *Mapa geológico do Estado da Bahia, escala 1:1.000.000*. Salvador, Secretaria das Minas e Energia, Coordenação da Produção Mineral. Mascarenhas J.F. & Garcia T.M. 1989. *Mapa geocronológico do Estado da Bahia, escala 1:1.000.000*. Texto explicativo. Salvador, Secretaria das Minas e Energia, Coordenação da Produção Mineral, 186 p.

Schobbenhaus C. (coord.). 1975. *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo – Folha Goiás (SD 22)*. Texto explicativo. Brasília, Departamento Nacional da Produção Mineral, 114 p.

### Internal reports

Internal reports will not be accepted, unless of open access for the scientific community and authorized by ad hoc consultants.

### Submission checklist

The following list will be useful during the final checking of an article prior to sending it to the journal for review. Please consult this Guide for Authors for further details of any item. Ensure that the following items are present:  
One author has been designated as the corresponding author with contact details:

- E-mail address
- Full postal address

All necessary files have been uploaded, and contain:

- Keywords
- All figure captions
- All tables (including title, description, footnotes)

Further considerations:

- Manuscript has been ‘spell-checked’ and ‘grammar-checked’.
- All references mentioned in the Reference list are cited in the text, and vice versa.
- Permission has been obtained for use of copyrighted material from other sources (including the Internet).

### **Rapid communications**

Rapid communications are limited to 2000 words, including references. Summary and abstract are limited to 100 words. At the discretion of the editors, these communications may be scheduled for the first available edition.

### **Articles with accelerated review process**

An accelerated review process may be requested for complete original studies, for which urgency of publication is adequately justified. At the discretion of the editors, these can be programmed for the first available edition. They must follow the same format described for original articles.

### **Editorials**

Editorials should cover some aspect of the broad spectrum of the Geological Sciences. They will be authored by the editors of BJG, by people linked to the Brazilian Geological Society or by industry personalities. These documents will not be submitted to peer review and will be published at the discretion of the editors.

### **Review articles**

Review articles should cover relevant topics of Geology. These articles may be requested by the editors, but recognized experts may spontaneously submit review articles in their field of expertise. In this case, potential authors should contact the editors to ascertain their interest prior to submitting the article.

### **Manuscript submission**

The submission of manuscripts must only be performed online at <http://mc04.manuscriptcentral.com/bjgeo-scielo>

There are no fees for submission and evaluation of articles.