



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:**  
**PETROLOGIA, METALOGÊNESE E EXPLORAÇÃO MINERAL**

**TESE DE DOUTORADO**

**MINERALOGIA E TEXTURAS DE METEORITOS BAIANOS**

**WILTON PINTO DE CARVALHO**

SALVADOR

2017

# MINERALOGIA E TEXTURAS DE METEORITOS BAIANOS

**Wilton Pinto de Carvalho**

*Orientadora : Profa. Dra. Débora Correia Rios*

*Co-orientadora: Profa. Dra. Maria Elizabeth Zucolotto*

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Geologia, Área de Concentração: Petrologia, Metalogênese e Exploração Mineral.

SALVADOR

2017

C331 Carvalho, Wilton Pinto de  
Mineralogia e texturas de meteoritos baianos / Wilton Pinto de  
Carvalho. – Salvador, 2017.  
90 f.

Orientador: Prof. Dra. Débora Correia Rios  
Co-orientador: Prof. Dra. Maria Elizabeth Zucolotto  
Tese (Doutorado - Geologia) – Universidade Federal da Bahia,  
Instituto de Geociências, 2017.

1. Meteoritos - Bahia. 2. Mineralogia. 3. Petrologia. I. Rios,  
Débora Correia, orient. II. Zucolotto, Maria Elizabeth, co-orient.  
III. Título.

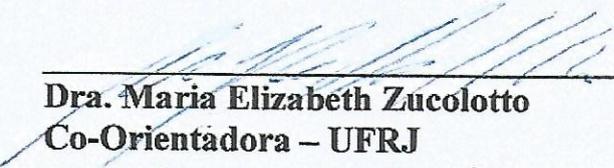
CDU: 523.68(813.8)

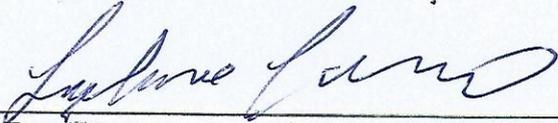
Wilton Pinto de Carvalho

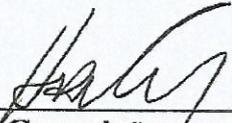
**MINERALOGIA E TEXTURA DE METEORITOS DA BAHIA**

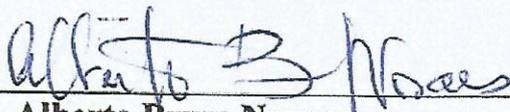
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Doutor em Geologia na área de concentração em Petrologia, Metalogênese e Exploração Mineral, em 23/03/2017.

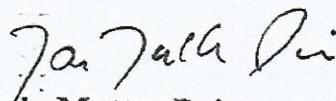
**TESE APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:**

  
Dra. Maria Elizabeth Zucolotto  
Co-Orientadora – UFRJ

  
Dr. Giampaolo Sighinolfi  
Examinador Externo – Universidade de Modena, Itália

  
Dr. Herbet Conceição  
Examinador Interno - UFBA

  
Dr. Alberto Brum Novaes  
Examinador Externo- UFBA

  
Dr. Márcio Mattos Paim  
Examinador Externo- UFBA

Salvador – BA  
2017

## **DEDICATÓRIA**

*À minha família pelo apoio, força e incentivo, sem os quais este trabalho não seria possível.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Dra. Débora Rios, orientadora e Dra. Maria Elizabeth Zucolotto, co-orientadora a dedicação, apoio e tempo alocados a este estudo.

## RESUMO

Em pouco mais de dois séculos o estudo dos meteoritos deixou de ser uma simples curiosidade de poucos naturalistas para constituir uma ciência multidisciplinar dedicada a uma rica e variada produção de análises petrográficas, geoquímicas e geocronológicas, a partir de material extraterrestre coletado na superfície e na estratosfera da Terra ou obtido em missões espaciais exploratórias de cometas, asteroides e satélites. Apesar de sua dimensão continental o Brasil tem uma coleção de meteoritos pouco expressiva em quantidade de espécimes registrando, em dezembro de 2016, apenas 69 exemplares reconhecidos oficialmente ou em processo de reconhecimento. Além disso, a produção acadêmica brasileira nessa área é muito tímida, não existindo em nenhuma instituição de ensino superior um centro de estudos dedicado à pesquisa em rochas e outros materiais extraterrestres. Esta tese de doutorado visou ampliar o conhecimento existente sobre meteoritos encontrados na Bahia e fomentar o estudo desta temática no Brasil. O estado da Bahia possui atualmente cinco meteoritos em sua coleção, sendo três de ferro, um misto e um rochoso. Os estudos concentraram-se em dois espécimes: (i) o condrito Rio do Pires e (ii) o meteorito de ferro Palmas de Monte Alto, incorporados à coleção baiana em 1994 e 2009 respectivamente. O meteorito Rio do Pires é um condrito tipo L6 achado antes de 1994. O estudo sobre este espécime objetivou ampliar os dados existentes sobre esse meteorito, através do detalhamento de suas características petrográficas, químicas e mineralógicas. Constatou-se a existência de veios de choque resultantes de evento colisional do corpo parental, e uma composição predominantemente silicática. Os minerais opacos são representados por grãos de Fe-Ni metálicos de kamacita e taenita, troilita, cromita e whitlockita (merrilita). A olivina é predominantemente magnésiana ( $Fa_{25}$ ), sendo o principal constituinte mineral do meteorito. O piroxênio é a enstatita e o plagioclásio oligoclásio. A mineraloquímica observada é comparável com a do bem estudado meteorito condritico Suizhou do tipo L6. A matriz mostra sinais de alta recristalização e presença de maskelinita, um importante indicador de choque, sendo significativa para o entendimento da história evolucionar do Rio do Pires. Por sua vez, o siderito Palmas de Monte Alto (PMA) é classificado como um octaedrito médio do grupo

IIIAB, com sua liga Fe-Ni, composta pelos minerais kamacita, taenita e plessita, formando um padrão Widmanstätten médio e bem definido. Estão presentes também nesse meteorito os minerais acessórios schreibersita, cromita e troilita. Foram ainda descritos minerais de ocorrência rara, tendo sido identificada uma solução sólida de Fe-Mn composta pelos minerais heterosita-purpurina ou sarcopisida-graftonita como membros extremos. O único exemplar desse meteorito é representado por uma massa de 97 kg que apresenta alto estágio de oxidação em locais onde a crosta foi removida.

**Palavras chave:** Meteorito, Bahia, Ferro, Níquel, Palmas de Monte Alto, Condrito, Rio do Pires.

## ABSTRACT

In just over two centuries the study of meteorites has ceased to be a mere curiosity of a few naturalists to constitute a multidisciplinary science dedicated to a rich and varied production of petrographical, geochemical and geochronological analyses, from extraterrestrial material collected on the surface and in the Earth stratosphere or collected in exploratory space missions to comets, asteroids and satellites. In spite of its continental dimension, Brazil has a meteorite collection not very expressive in number of specimens. In December 2016, only 69 units had been officially recognized or were in process of recognition. On the other hand, the Brazilian academic production in this area is very timid. There are no facilities dedicated to research on rocks and other extraterrestrial materials in high education institutions. This doctoral thesis aimed to enlarge the existing knowledge about meteorites found in Bahia and promoting the study of this subject in Brazil. The state of Bahia currently has 5 meteorites in its collection, being three irons, one pallasite and one stone. This work has a focus on two specimens. (I) The Rio do Pires chondrite and (ii) the iron Palmas de Monte Alto, the most recent records of the Bahia's collection. The Rio do Pires meteorite is a L6 chondrite found before 1994. The study on this specimen aims to amplify the existing data about that meteorite, through a detailed petrographical, chemical and mineralogical analysis and interpretation of their results. This meteorite holds shock veins resulted from a collisional event of its parental body. Its chemical composition is predominantly made of silica minerals. Opaque minerals are represented by metallic Fe-Ni grains of kamacite and taenite, troilite, chromite and whitlockite (merrillite). Olivine is predominantly magnesian (Fa25), being the main mineral constituent of the meteorite, pyroxene is enstatite and the plagioclase is an oligoclase. The observed mineral chemistry is similar to that found in the well studied Suizhou L6 meteorite. The matrix shows signs of high recrystallization and presence of maskelinite, an important indicator of shock, being significant for the understanding of the evolutionary history of Rio do Pires. On the other hand, the siderite Palmas de Monte Alto (PMA) is classified as a medium octahedrite of group IIIAB, with its Fe-Ni alloy (kamacite, taenite and plessite), forms a well-defined medium Widmanstätten pattern.

Also present in this meteorite are the accessory minerals schreibersite, chromite and troilite. Minerals of rare occurrence were also described, and a solid solution of Fe-Mn composed by heterosite-purpurine or sarcopside-grafonite as end members was identified. This meteorite is a single mass of 97 kg and presents a high oxidation stage in places where the crust was removed.

**Keywords:** Meteorite, Bahia, Iron, Nickel, Palmas de Monte Alto, Chondrite, Rio do Pires.

# SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
SUMÁRIO	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE QUADROS	xiv
ÍNDICE DE TABELAS	xiv
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUÇÃO	2
1.2 MOTIVAÇÃO	3
1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	3
1.4 CONTEXTO DO ESTUDO	4
1.4.1 Meteoritos do Brasil	4
1.4.2 Meteoritos da Bahia	5
1.5 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO	6
1.5.1 Revisão Bibliográfica	7
1.5.2 Levantamento de Dados e Mapeamento	7
1.5.3 Amostragem	7
1.5.4 Descrições Petrográficas	7
1.5.5 Mineraloquímica	7
1.6 REVISÃO TEÓRICA	8
1.7 DEFINIÇÕES BÁSICAS E NOMENCLATURA	11
1.7.1 Amostras Extraterrestres	12
1.8 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE METEORITOS	13
1.9 ESQUEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE METEORITOS	14
1.9.1 Classificação de Prior - 1920	14
1.9.2 Classificação Moderna - 2005	15
1.10 ESTRUTURA DA TESE	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17

<b>2.</b>	<b>ARTIGO SOBRE CONDRITO RIO DO PIRES</b>	<b>20</b>
	O Condrito Rio do Pires: Aspectos Petrográficos e Mineraloquímicos	21
2.1	INTRODUÇÃO	22
	2.1.1 Aspectos e Relevância do Estudo de Condritos	23
2.2	ÁREA, MATERIAIS E MÉTODOS	25
	2.2.1 Localização da Área	25
	2.2.2 Materiais	26
	2.2.2 Métodos	27
2.3	RESULTADOS	28
	2.3.1 Análises Petrográficas	28
	2.3.2 Análises Mineraloquímicas	30
2.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	38
	2.4.1 Efeitos do Choque e Metamorfismo	40
	2.4.2 Efeitos do Intemperismo Terrestre	41
2.5	CONCLUSÕES	42
	AGRADECIMENTOS	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
<b>3.</b>	<b>ARTIGO SOBRE METEORITO PALMAS DE MONTE ALTO</b>	<b>46</b>
	O Meteorito Palmas de Monte Alto: Aspectos Petrográficos e Mineraloquímicos	47
3.1	INTRODUÇÃO	49
3.2	A METEORÍTICA NO BRASIL E NO MUNDO	49
3.3	ASPECTOS HISTÓRICOS	50
3.4	LOCALIZAÇÃO E ACESSOS	51
3.5	METODOLOGIA APLICADA	52
3.6	PETROGRAFIA E MINERALOQUÍMICA	53
	3.6.1 Aspectos Macroscópicos	53
	3.6.2 Análise Estrutural	54
	3.6.3 Análises Petrográfica e Mineraloquímica	55
3.7	CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DO METEORITO PALMAS DE MONTE ALTO	61
3.8	INTEMPERISMO E CHOQUE	65
3.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
3.10	AGRADECIMENTOS	66
3.11	BIBLIOGRAFIA	67

<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICES</b>	<b>72</b>
Apêndice A. Justificativa da Participação dos Autores – Artigo 1 O Condrito Rio do Pires: Aspectos Petrográficos e Mineraloquímicos	73
Apêndice B. Justificativa da Participação dos Autores – Artigo 2 O Meteorito Palmas de Monte Alto: Aspectos Petrográficos e Mineraloquímicos	74
<b>ANEXOS</b>	<b>75</b>
Anexo 1. NORMAS DA REVISTA PESQUISA EM GEOCIÊNCIAS, UFRGS	76
Anexo 2. NORMAS DA REVISTA GEOLOGIA, USP	84

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Capítulo 1.</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b>	<b>1</b>
Figura 1.1	Classificação química dos meteoritos segundo a proposta de Krot et al. (2005)	16
<b>Capítulo 2.</b>	<b>ARTIGO SOBRE CONDRITO RIO DO PIRES</b>	<b>20</b>
	O Condrito Rio do Pires: Aspectos Petrográficos e Mineraloquímicos	21
Figura 2.1	Mapa de situação e localização	26
Figura 2.2	Amostra do meteorito Rio do Pires	27
Figura 2.3	Fotomosaicos de uma lâmina polido-delgada do meteorito Rio do Pires	29
Figura 2.4	Cristais no meteorito Rio do Pires	31
Figura 2.5	Mapas de varredura por EDS dos minerais principais observados no meteorito Rio do Pires	32
Figura 2.6	Fases metálicas de Fe-Ni	37
Figura 2.7	Imagens de texturas apresentadas por minerais opacos	39
<b>Capítulo 3.</b>	<b>ARTIGO SOBRE METEORITO PALMAS DE MONTE ALTO</b>	<b>46</b>
	O Meteorito Palmas de Monte Alto: Aspectos Petrográficos e Mineraloquímicos	47
Figura 3.1	Mapas de localização e situação	51
Figura 3.2	Meteorito Palmas de Monte Alto	52
Figura 3.3	Padrão Widmanstätten	55
Figura 3.4	Metal Fe-Ni no meteorito Palmas de Monte Alto	56
Figura 3.5	Imagens da fatia polida analisada por MEV	57
Figura 3.6	Placa de kamacita com mineral fosfatado em formato de “dálmata” incrustado	60
Figura 3.7	Diagramas de classificação química dos grupos de meteoritos de Fe, incluindo análise por INAA do meteorito Palmas de Monte Alto	64
Figura 3.8	Diagramas de correlação do Ni com conteúdos de Au e As para meteoritos do grupo IIIAB	64

## ÍNDICE DE QUADROS

<b>Capítulo 1.</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b>	<b>1</b>
Quadro 1.1	Síntese dos principais constituintes de meteoritos	13
<b>Capítulo 2.</b>	<b>ARTIGO SOBRE CONDRITO RIO DO PIRES</b>	<b>20</b>
	O Condrito Rio do Pires: Aspectos Petrográficos e Mineraloquímicos	21
Quadro 2.1	Graus progressivos de metamorfismo de impacto em condritos ordinários segundo Stoffer et al. (1991)	41
Quadro 2.2	Graus progressivos de intemperismo em condritos ordinários (Wlotzka, 1993)	42

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Capítulo 2.</b>	<b>ARTIGO SOBRE CONDRITO RIO DO PIRES</b>	<b>20</b>
	O Condrito Rio do Pires: Aspectos Petrográficos e Mineraloquímicos	21
Tabela 2.1	Composição química da olivina no meteorito Rio do Pires (wt%)	33
Tabela 2.2	Composição química dos piroxênios pobres em Ca do meteorito Rio do Pires (wt%)	34
Tabela 2.3	Composição química do plagioclásio no meteorito Rio do Pires (wt%)	35
<b>Capítulo 3.</b>	<b>ARTIGO SOBRE METEORITO PALMAS DE MONTE ALTO</b>	<b>46</b>
	O Meteorito Palmas de Monte Alto: Aspectos Petrográficos e Mineraloquímicos	47
Tabela 3.1	Classificação estrutural dos meteoritos metálicos	54
Tabela 3.2	Resultado de análises semi-quantitativas para a mineralogia principal e acessória no meteorito de ferro Palmas de Monte Alto	58
Tabela 3.3	Classificação química dos meteoritos férreos	62
Tabela 3.4	Composição média do meteorito Palmas de Monte Alto, comparada aos principais grupos de meteoritos de ferro e mistos	63
Tabela 3.5	Conteúdos de Fe, Ni, Cu, e elementos traço, nos meteoritos IIIAB registrados a partir de 2009	65

**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUÇÃO GERAL**

---

## 1.1 Introdução

Em pouco mais de dois séculos o estudo dos meteoritos deixou de ser uma simples curiosidade de poucos naturalistas para constituir uma ciência multidisciplinar dedicada a uma rica e variada produção de análises petrográficas, geoquímicas e geocronológicas, a partir de material extraterrestre coletado na superfície e na estratosfera da Terra ou obtido em missões espaciais exploratórias de cometas, asteroides e satélites.

Os meteoritos são amostras geológicas de outros astros formados juntamente com a Terra há mais de 4,5 Ga. Eles proporcionam informações de grande importância para ampliação do conhecimento científico sobre as condições físico-químicas que vigoraram durante a formação do Sistema Solar e permitem, de forma indireta, estudar regiões inacessíveis aos métodos atuais de coleta de amostras na Terra e no espaço. Acredita-se que os meteoritos férreos representem com fidelidade porções do núcleo da Terra, situado a 6.480 km da superfície, os condritos são testemunhos dos primeiros sólidos condensados na nebulosa protossolar, e que os acondritos são fragmentos oriundos do manto de astros que se fragmentaram.

A idade de formação da maioria dos meteoritos supera a idade das rochas terrestres mais antigas, a exemplo do acondrito Angra dos Reis, cuja idade de formação foi calculada em 5,56 Ga pelo método U-Pb (Amelin 2008), superando o gnaiss de Acasta, Canadá (4,2 Ga), em 1,53 Ga (Iizuka et al. 2006). Essa antiguidade torna os meteoritos fonte exclusiva de informações sobre os processos de acreção ocorridos na nebulosa primordial que originou o sistema solar, assim como e quando ocorreu a diferenciação dos seus astros e respectivos processos de partição dos elementos.

O interesse científico pelos meteoritos levou os Estados Unidos e o Japão a criar programas especiais de recuperação desse material na Antártida e regiões desérticas que, juntamente com o trabalho de “caçadores de meteoritos”, aumentou substancialmente o número de exemplares dessas rochas espaciais, como comprova o registro mantido pela Sociedade Meteorítica, cujo banco de dados em setembro de 2009 reunia apenas 2.100 espécimes, número que em 2017 passou para 55.529 (*Meteoritical Bulletin Database* 2017). Esse aumento substancial na quantidade de meteoritos disponíveis para estudo incrementou a produção de artigos acadêmicos que ocupam cada vez mais espaço nas revistas científicas.

Apesar de sua dimensão continental o Brasil tem uma coleção de meteoritos pouco expressiva em termos quantitativos, registrando em dezembro de 2016 apenas 69 exemplares

reconhecidos oficialmente ou em processo de reconhecimento, Por outro lado, a produção acadêmica brasileira nessa área é muito tímida, não existindo em nenhuma instituição de ensino superior um centro de estudos dedicado à pesquisa em rochas e outros materiais extraterrestres.

Esta tese de doutorado visa aprofundar o conhecimento existente sobre meteoritos encontrados na Bahia e fomentar estudos desta temática no Brasil. A Bahia possui atualmente cinco (5) meteoritos em sua coleção, sendo três de ferro, um misto e um rochoso. Os resultados dos estudos realizados foram submetidos na forma de artigo às revistas *Geologia USP* e *Pesquisas em Geociências*, da UFRGS, ambas B2 CAPES.

## **1.2 Motivação**

No Brasil, os meteoritos são mais conhecidos pelo potencial perigo que representam na hipótese remota de uma colisão catastrófica com nosso planeta do que pela importância científica dos dados e informações que trazem de outros astros e da nebulosa primordial que originou o sistema solar. O interesse acadêmico por essas amostras geológicas de outros mundos é muito limitado e, na maioria das instituições de ensino superior, esse tema sequer é cogitado como objeto de pesquisa.

Nos últimos oito anos, a FAPESB e o CNPq apoiaram financeiramente a execução de projetos coordenados pela orientadora e pelo doutorando, envolvendo a divulgação da meteorítica no contexto das ciências exatas, demonstrando-se perante essas instituições de fomento à pesquisa que os meteoritos constituem um vasto campo de estudos, ainda quase virgem no Brasil.

Por si, esses dois fatores são motivadores para a elaboração e defesa desta tese, porquanto poderá contribuir para aumentar as possibilidades da abordagem acadêmica do tema e, concomitantemente, incrementar a produção e publicação de artigos em periódicos nacionais e estrangeiros.

## **1.3 Objetivos Gerais e Específicos**

O objetivo principal da pesquisa é a caracterização mineralógica, textural e química dos meteoritos baianos Rio do Pires e Palmas de Monte Alto, objeto de artigos submetidos às revistas *Pesquisas em Geociências* da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e *Revista Geologia USP*, da Universidade de São Paulo.

Dentre os objetivos específicos incluem-se:

- (i) Favorecer o desenvolvimento de pesquisas em meteorítica no Brasil, uma área ainda pouco estudada e difundida em nosso meio acadêmico.
- (ii) Fomentar ações de popularização e divulgação da meteorítica na Bahia.
- (iii) Estimular pesquisas de iniciação científica por alunos de graduação na temática de meteorítica.

## 1.4 Contexto do Estudo

### 1.4.1 Meteoritos do Brasil

Em dezembro de 2016 a lista de meteoritos brasileiros atingiu a marca de 69 exemplares oficialmente reconhecidos, após depuração de registros do Catálogo de Meteoritos (Grady 2000) e do banco de dados mantido na WEB pela *Meteoritical Society* (Meteoritical Bulletin Database 2017), onde constam entradas de meteoritos duvidosos (registrados apenas por citações e sem evidência física de suas existências) ou em duplicidade, porém com nomes diferentes, como o meteorito Cacilândia, proveniente da mesma queda do meteorito Paranaíba, conforme apurado pela Dra. Elizabeth Zucolotto através de novas análises químicas comparativas realizadas em 2009 (comunicação pessoal). Analisando-se as características desses 69 meteoritos destacam-se os seguintes fatos:

- (i) Os achados são 44 espécimes ou 64% do total, superando as quedas que foram apenas 25 ocorrências.
- (ii) A quantidade de meteoritos pétreos (33) e de metálicos (36) é quase igual, correspondendo a 48% e 52% do total, respectivamente.
- (iii) Nenhum dos 36 meteoritos metálicos teve a queda observada.

A quantidade de meteoritos provenientes de Minas Gerais (20) corresponde a 29%, superando em muito o segundo estado, Rio Grande do Sul com 8 meteoritos ou 11% do total. A Bahia ocupa a quinta posição com os 5 meteoritos. Estão ausentes da relação de meteoritos brasileiros, nada menos do que 13 de um total de 26 unidades federativas (excluindo-se o Distrito Federal).

Com exceção da Argélia e Líbia, países onde grandes desertos favorecem o achado de meteoritos, o Brasil ocupava (no ano 2000) a nona posição entre as dez nações que tinham mais de 50 meteoritos caídos ou achados dentro de suas fronteiras (Grady 2000). Considerando a extensão territorial brasileira (8,5 milhões de km<sup>2</sup>), essa quantidade de meteoritos é irrisória. Conforme Catálogo de Meteoritos (Grady 2000), em países com áreas semelhantes à nossa,

como Estados Unidos (9,8 milhões de km<sup>2</sup>, 1.214 meteoritos) e Austrália (7,7 milhões de km<sup>2</sup>, 507 meteoritos), o número é mais de 10 vezes superior. Países como o México (2,0 milhões de km<sup>2</sup>, 92 meteoritos), Argentina (2,8 milhões de km<sup>2</sup>, 62 meteoritos), e mesmo a França (com apenas 544 mil km<sup>2</sup>, 62 meteoritos) contabilizam números superiores ao Brasil.

#### **1.4.2 Meteoritos da Bahia**

O Estado da Bahia tem 567.296 km<sup>2</sup>, equivalente a 6,64% do território brasileiro e tem apenas cinco meteoritos oficialmente reconhecidos. Embora esteja entre os cinco estados brasileiros com maior número de meteoritos registrados (Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Goiás, São Paulo e Bahia), essa quantidade está muito aquém da probabilidade calculada de quedas segundo modelo desenvolvido por Halliday et al. (1989), que estima a ocorrência de 86 eventos por 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>/ano.

Até 1994 apenas o meteorito Bendegó, achado na região de Monte Santo-Uauá em 1784, representava a Bahia na coleção brasileira. Foi na década de 1990 que o autor iniciou suas pesquisas no campo da meteorítica, publicando um pequeno livro intitulado “Os Meteoritos e a História do Bendegó”, no qual buscou separar os fatos das lendas que envolviam o achado e transporte daquela massa de ferro, encontrada no tempo do Brasil colonial. Em 1888, esse meteorito foi objeto de estudo estrutural e químico realizado pelo geólogo Orville Derby (Derby 1888), então diretor do Museu Nacional.

O segundo meteorito baiano foi doado ao Professor Shiguemi Fujimori por um ex-aluno do Instituto de Geociências da UFBA que estava trabalhando na região de Ibiajara-Rio do Pires, Sudoeste da Bahia. Em 1994, esse pequeno exemplar de meteorito pétreo foi analisado na Universidade do Novo México, Estados Unidos, sendo registrado com o nome de Rio do Pires (Wlotzka 1994) e classificado como condrito ordinário, tipo L6, cujo peso original era de 118 g.

O terceiro meteorito da Bahia foi achado por um agricultor na década de 1960 no município de Quijingue. O exemplar pesava cerca de 59 kg e permaneceu não identificado até 2009, ano em que foi transportado para São Paulo por um minerador daquele estado que havia contratado dois garimpeiros da região de Quijingue para fazer um poço para prospecção de esmeralda. Esses garimpeiros sabiam da existência da “pedra de ferro”, cedendo-a ao minerador para providenciar análises. Em São Paulo, a rocha foi identificada como meteorito pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (Coutinho et al. 1999) O autor desta tese foi contactado pelos detentores da rocha solicitando orientação sobre procedimentos para registro e comercialização, resultando na obtenção de duas amostras encaminhadas uma para o Museu Nacional, Rio de

Janeiro e outra para o Museu Geológico da Bahia. O novo espécime da coleção baiana foi registrado em 1999, através de comunicado do Museu Nacional em parceria com a Universidade da Califórnia, em *Los Angeles* (Grossman 1999).

O quarto meteorito dessa coleção foi denominado Vitória da Conquista, tendo sido encontrado em 2007, entre rochas existentes no laboratório de geologia da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), sem portar qualquer etiqueta de identificação ou dados sobre sua origem. Sua identificação e registro ocorreram em 2009, através de comunicado do Museu Nacional e Universidade da Califórnia, Los Angeles (Weisberg et al. 2009). Trata-se de um meteorito férreo, tipo IVA, pesando 15 kg. O autor desta tese, teve participação ativa nesse processo, realizando viagem à região, juntamente com Dra. Elizabeth Zuculotto, do Museu Nacional, para coleta de amostra e informações sobre o achado.

O quinto e último meteorito baiano, Palmas de Monte Alto, foi mencionado pela primeira vez em 1887 em comunicado dirigido ao Museu Nacional pelo padre José Dorme, da paróquia daquela cidade do Oeste da Bahia (Derby 1888). Somente em 2009 a notícia sobre a existência desse meteorito chegou a um professor de biologia da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - UESB que ouviu comentários sobre uma massa de ferro estranha existente em uma escola do ensino médio de Palmas de Monte Alto. A presença do autor desta tese acompanhado pela Dra. Elizabeth Zucolotto, do Museu Nacional, confirmou a natureza meteorítica da rocha, da qual se extraiu amostra para análises realizadas no Museu Nacional e Universidade da Califórnia, Los Angeles que culminaram no registro desse meteorito que pesa 97 kg e pertence ao grupo IIIAB dos meteorito férreos (Weisberg et al. 2009).

Os cinco meteoritos recuperados na Bahia representam os três tipos estruturais principais, sendo três férreos (grupos IC, IVA e IIIAB), um pétreo (condrito L6) e um pétreo-ferreo (palasito PMG). Essa variedade de grupos estruturais e geoquímicos da coleção baiana de meteoritos foi fator decisivo para escolha dos espécimes para os estudos realizados nesta tese.

## **1.5 Metodologia de Investigação**

Para atingir os objetivos da tese, a seguinte metodologia de investigação e análise foi aplicada em relação aos cinco meteoritos baianos:

### **1.5.1 Revisão Bibliográfica**

Foram inventariados e avaliados trabalhos já publicados sobre os meteoritos Bendegó, Palmas de Monte Alto, Vitória da Conquista, Quijingue e Rio do Pires. A pesquisa bibliográfica envolveu também a seleção e leitura de estudos petrográficos, geoquímicos e geocronológicos sobre os três tipos básicos de meteoritos: férreos, pétreos e pétreo-férreos.

### **1.5.2 Levantamento de Dados e Mapeamento**

O georreferenciamento dos locais dos achados foi feito em trabalhos de campo e análise de mapas regionais. Missões de campo foram realizadas a cada um dos locais a fim de se coletar também tradições orais relacionados à história de cada um dos exemplares estudados, buscando-se enriquecer a narrativa oficial de cada achado. Isso foi particularmente motivador, considerando-se a oportunidade de realização de entrevista pessoal com os descobridores dos meteoritos Quijingue e Palmas de Monte de Alto.

### **1.5.3 Amostragem**

O Museu Nacional forneceu amostras dos meteoritos Bendegó, Palmas de Monte Alto, Vitória da Conquista e Quijingue. O meteorito pétreo Rio do Pires, pertencente à coleção particular do autor desta tese, teve sua massa remanescente analisada. Foram preparadas lâminas polido-delgadas para cada um dos meteoritos, sendo utilizadas em análises petrográficas, microscopia eletrônica de varredura e escaneamento por microsonda eletrônica.

### **1.5.4 Descrições Petrográficas**

As massas principais dos meteoritos foram descritas macroscopicamente, estabelecendo-se suas dimensões, peso e principais minerais identificáveis a olho nu com auxílio de lupas. Lâminas delgado-polidas dos meteoritos metálicos e do meteorito pétreo foram examinadas sob luz refletida, transmitida e polarizada, utilizando-se microscópios petrográficos tradicionais. Esse procedimento permitiu a identificação dos principais minerais que compõem cada espécime, estabelecendo-se também suas texturas e morfologia, devidamente fotografadas sob microscópio.

### **1.5.5 Mineraloquímica**

O estudo químico destes meteoritos foi estabelecido a partir de exames processados em lâminas polido-delgadas e fragmentos dos meteoritos utilizando-se microscopia eletrônica de varredura e escaneamento por microsonda.

## 1.6 Revisão Teórica

Em seu âmago os meteoritos trazem marcas de cataclismas cósmicos como nano diamantes formados em explosões de estrelas denominadas supernovas e inclusões de cálcio e alumínio (CAI), primeiros sólidos a se condensar nos estágios iniciais de resfriamento da nebulosa proto-planetária. Foi esta origem violenta de alguns componentes meteoríticos, e os seus registros de um final cataclísmico para as grandes massas que impactaram a Terra, planetas e satélites, que levaram os cientistas a construir uma nova ciência, denominada meteorítica, para estudar esses fragmentos de rochas espaciais “em busca de nossas origens e talvez vislumbrar nossa possível aniquilação” (Norton 1994).

Ao atravessar a atmosfera terrestre, no final de sua longa jornada através do espaço interplanetário, os meteoritos carregam informações importantes sobre os efeitos da resistência do ar à passagem de corpos sólidos, e conseqüentes processos de aquecimento e ablação que os fazem brilhar e perder massa em sua feérica descida.

Esses dados têm auxiliado projetistas de naves espaciais, aeronaves e satélites, a aperfeiçoar o desenho desses equipamentos, objetivando reduzir ao máximo a resistência do ar e ao mesmo tempo aumentar a proteção térmica das naves e objetos que necessitam retornar à Terra de forma segura.

Um tipo de meteorito, o condrito, é formado por grãos (*chondros* em grego) denominados cõndrulos, sendo este o material mais primitivo do sistema solar. A concentração de seus elementos químicos é bem próxima dos números referentes à abundância dos elementos no Sol e no Universo. Como esse tipo de rocha não passou pelo processo de diferenciação, um grupo denominado Carbonáceos Ivuna (CI) é utilizado em geoquímica como parâmetro para normalização de elementos da série dos Lantanídeos (Elementos Terras Raras).

Por outro lado, os acondritos (sem cõndrulos) são rochas diferenciadas com evidências de terem se originado a partir de um líquido de natureza condrítica. A variedade desse grupo de meteoritos e suas características particulares sugerem diferentes astros como fontes parentais. Nesse grupo de meteoritos estão incluídos os metálicos (Krot et al. 2005) que, acredita-se, representam porções do núcleo e da interface núcleo-manto de astros diferenciados que se fragmentaram.

Nas últimas três décadas, modernos instrumentos tais como microsondas, microscópios eletrônicos e espectrógrafos de massa, aliados a métodos analíticos cada vez mais precisos para determinação e dosagem dos elementos e minerais, proporcionaram um extenso e preciso rol de

resultados analíticos provenientes do estudo de milhares de amostras de meteoritos. Esse contínuo trabalho da comunidade científica resultou no aperfeiçoamento do sistema de classificação de Prior (1920), incorporando novos tipos de meteoritos, a exemplo das rochas lunares e marcianas encontradas principalmente na Antártica e em desertos da África e Oriente Médio. Por outro lado, foram definidos parâmetros primários e secundários para classificar materiais de origem espacial. Outra importante contribuição dessas rochas às Ciências da Terra são os resultados de análises isotópicas, pois a geocronologia as identifica como o material mais antigo do Sistema Solar.

A primeira relação de meteoritos brasileiros existentes no Museu Nacional foi compilada por Derby (1888) e contava com apenas 7 (sete) espécimes: Angra dos Reis (rocha), Bendegó, Itapicuru-Mirim, Macau, Minas Gerais, Santa Bárbara e Santa Catharina (Zucolotto et al. 2000).

O mais extenso estudo sobre meteoritos brasileiros foi realizado por Gomes e Keil (1980), publicado nos Estados Unidos. Desde então foram poucos os trabalhos científicos abordando meteoritos do Brasil.

O interesse dos cientistas pelos meteoritos foi primeiramente registrado em 1794 através de um pequeno livro escrito por Ernst Friederick Chladini resumando suas investigações e descobertas sobre fragmentos de rochas e de metal cujas quedas foram testemunhadas e apresentavam consistente documentação (Chladini 1794).

Chladini foi o primeiro cientista a aceitar que esse material “caía do céu”, estava relacionado à passagem de bólidos e que provinha de regiões além da atmosfera terrestre, possivelmente do espaço interestelar. Em 1802, as primeiras rochas meteoríticas foram analisadas na Inglaterra pelo químico Edward Charles Howard (Howard 1802) que encontrou uma composição muito semelhante nas quatro amostras que estudou e que provinham de localidades diferentes da Europa e Índia. Anos mais tarde isso, corria um boato de que Thomas Jefferson, naturalista e segundo presidente dos Estados Unidos, havia dito em 1807: “Senhores, eu acreditaria mais facilmente que dois professores nova-iorquinos mentiriam do que acreditaria em pedras que caem do céu”, referindo-se ao relato feito por dois cientistas da Universidade de Yale sobre a queda do meteorito Weston, Connecticut, no inverno daquele ano (Marvin 2006)

Apesar do ceticismo da comunidade científica, as análises dos meteoritos prosseguiram em ritmo lento, mas constante. Em 1857, Karl Ludwig von Reichenback estudou os minerais e a textura dos meteoritos utilizando um microscópio comum, seguindo-se observações com o microscópio petrológico, inventado em 1861 por Nevil Story-Maskelyne.

No final do século XIX as universidades e museus conseguiram reunir uma quantidade substancial e variada de meteoritos e informações petrológicas suficientes para estabelecer uma primeira classificação dessas rochas e fragmentos de ferro baseada na textura e características físicas, aceitando como ponto pacífico sua origem espacial.

O meteorito Bendegó, descoberto no Brasil em 1784, representou papel relevante nessa jornada pelo reconhecimento da meteorítica como ciência, haja vista o interesse que despertou na comunidade científica europeia um artigo publicado no *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, em 1819, dando conta dos resultados de análises químicas conduzidas por Wollaston em amostras coletadas pelo engenheiro britânico Aristides F. Mornay, contratado pelo Governo brasileiro para investigar ocorrências de águas termais no sertão da Bahia, em 1810. Em 1886 membros da Academia de Ciências de Paris, recomendaram ao Imperador do Brasil D. Pedro II promover meios para que o meteorito Bendegó fosse transportado para o Rio de Janeiro, onde poderia ser estudado e assim contribuir para aumentar as informações disponíveis sobre o ferro espacial do qual é constituído.

O meteorito Bendegó, pesando 5.360 kg foi transportado do município de Monte Santo, Bahia, para a Corte Imperial, na cidade do Rio de Janeiro, passando a integrar o acervo do Museu Nacional a partir de 1888. No final do século XIX era o maior meteorito exposto em um museu, extraindo-se dele amostras que foram encaminhadas a diversas instituições dos Estados Unidos e Europa. A importância desse meteorito para a comunidade científica pode ser avaliada ainda por dois fatos: sua participação na Exposição Universal, realizada em Paris em 1889, quando milhares de pessoas tiveram oportunidade de apreciá-lo através de uma réplica em madeira, mandada confeccionar pelo Governo do Brasil e a visita que recebeu do eminente físico Albert Einstein quando de sua passagem pelo Rio de Janeiro em 1925.

Nos últimos 100 anos, o desenvolvimento da geoquímica, astronomia, termodinâmica e outras ciências afins que consubstanciam os estudos dos meteoritos abriu um vasto campo de pesquisa em busca de explicações sobre a origem do sistema solar e processos de diferenciação dos astros que o compõem.

Mônica Grady, atualmente professora do *Center for Earth, Planetary, Space & Astronomical Research*, da *Open University*, Londres, é autora do Catálogo de Meteoritos, edição 2000 (Grady 2000) e durante muitos anos foi curadora da coleção de meteoritos do Museu Britânico. No artigo de abertura da coletânea de trabalhos científicos reunidos no livro *Meteorites and the Early Solar System II*, ela resumiu a importância científica dos meteoritos escrevendo (Grady 2006):

*“Usamos os meteoritos e seus componentes para inferir todos os estágios da evolução do sistema solar, da condensação dos sólidos primordiais à agregação, alteração, diferenciação e formação de brechas.”*

## **1.7 Definições Básicas e Nomenclatura**

A meteorítica é uma ciência multidisciplinar que utiliza intensamente recursos e definições emprestadas da Geologia, Geoquímica, Astronomia, Física e sistemas isotópicos para estudar os meteoritos.

Alguns termos utilizados para definir os principais fenômenos ligados aos meteoritos muitas vezes ganham conotação diferente em abordagens não científicas, daí a necessidade de apresentarmos as definições básicas a seguir, as quais serão utilizadas ao longo deste volume:

Meteoróide: fragmento de matéria que vaga pelo espaço;

Meteoro: fenômeno luminoso observado quando da passagem de um fragmento diminuto de matéria pela atmosfera terrestre;

Bólido: fenômeno luminoso observado quando da passagem de um grande fragmento de matéria pela atmosfera terrestre;

Meteorito: fragmento de rocha ou de ferro de origem espacial (meteoróide) que atinge a superfície da Terra e é recuperado;

Queda: define um meteorito recuperado após manifestações de luz e de som testemunhadas;

Achado: define um meteorito recuperado sem que haja documentação ou relatos de sua entrada na atmosfera terrestre;

A *Meteoritical Society* (METSOC) é uma sociedade que reúne pessoas interessadas no estudo dos meteoritos, contando com cerca de 950 cientistas, colecionadores e curadores de museus de 33 países. A METSOC edita um boletim trimestral, disponível na Internet (<http://www.meteoriticalsociety.org>) com os nomes e resumos das análises classificatórias de novos meteoritos. Essa organização também é responsável pela nomenclatura dos meteoritos, através de um comitê específico para aprovar ou recusar nomes propostos.

A nomenclatura dos meteoritos recomenda a utilização do nome da cidade, vila, povoado ou acidente geográfico mais próximo do local da queda ou do achado, por exemplo, o Meteorito Bendegó chama-se assim porque foi achado às margens do riacho de mesmo nome. Quando a área do achado ou queda não oferece essa distinção, tais como os desertos da África e

geleiras da Antártica, adota-se uma sigla e um número seqüencial para denominar os meteoritos. Por exemplo, os meteoritos coletados no continente antártico tem o seguinte padrão ALH8401, onde as três primeiras letras referem-se à região (Alan Hills, nesse caso) e os algarismos registram o ano e a ordem em que o meteorito foi descoberto (Ano 1984, primeiro meteorito coletado nessa expedição). Para os meteoritos achados nos desertos ou outros locais desprovidos de acidentes geográficos marcantes ou aglomerações urbanas, o Comitê de Nomenclatura da *Meteoritical Society* oferece uma relação de abreviaturas que deve ser seguida de um número seqüencial para caracterizar o achado ou queda. Exemplo Acfer 001, primeiro meteorito achado na área denominada Acfer, Algéria.

### 1.7.1 Amostras Extraterrestres

Os meteoritos são amostras geológicas que representam regiões da superfície e interior de corpos celestes, proporcionando aos cientistas, através dos resultados de análises químicas e isotópicas, informações para construção de modelos que propõem hipóteses sobre os processos de diferenciação da Terra e constituição de sua crosta, manto e núcleo.

Teoricamente todos os astros do Sistema Solar são potencialmente fontes de meteoritos, entretanto fatores como velocidade de escape, densidade da atmosfera e órbitas estáveis, combinados ou isoladamente, atuam como elementos restritivos para ejeção de material sólido no espaço e sua posterior colisão com a Terra.

Os meteoritos analisados até o presente têm como origem os asteróides, a Lua e Marte. É provável que os núcleos de cometas sejam também fontes de meteoritos, entretanto a carência de informações sobre a composição desses astros não permitiu ainda identificar material cometário nos fragmentos de rocha e de ferro espaciais recuperados até o momento.

Além dos meteoritos os cientistas dispõem de outras amostras de material extraterrestres, a saber:

Rochas lunares coletadas pelos astronautas do Projeto Apolo (Estados Unidos) e pelas naves não tripuladas do Projeto Luna (Rússia) na década de 1970;

Partículas de poeira interplanetária (IDP), coletadas na estratosfera por aviões tipo U2;

Partículas do Cometa Wild2, coletadas pelo Projeto Poeira das Estrelas (*Stardust*) e trazidas a Terra em 2006;

Nanodiamantes e SiC (Carboneto de Silício), considerados de origem estelar, extraídos de meteoritos carbonáceos

Inclusões de Cálcio e Alumínio (CAI), material refratário encontrado nos meteoritos condritos e considerado um dos primeiros sólidos resultantes da condensação da nebulosa solar.

Adicionalmente a essas amostras sólidas, os meteoritos trazem em seu interior trilhas de fissão nuclear resultantes do bombardeamento de raios cósmicos durante sua estadia no espaço, além de isótopos gerados pelos efeitos do vento solar em suas superfícies. Essas características são utilizadas para datação das idades terrestres e de exposição dos meteoritos, respectivamente o tempo de residência em nosso planeta e o tempo que passou vagando no espaço sideral após ser ejetado do astro de origem.

## 1.8 Composição Química de Meteoritos

A maioria dos minerais que compõem os meteoritos é comum às rochas terrestres. Aproximadamente 300 minerais já foram identificados nessas amostras espaciais, sendo 40 deles exclusivos. Os minerais mais comumente encontrados são as olivinas, os piroxênios e os feldspatos. Óxidos, fosfetos, sulfetos e carbonatos também ocorrem com frequência, embora em pequenas concentrações. Elementos nativos, como o Carbono, já foram isolados sob a forma de grafite e diamantes e grãos de Cobre metálico também são encontrados. O Ferro e o Níquel metálicos, formando uma liga de Taenita  $\gamma$  (Ni, Fe) e Kamacita  $\alpha$  (Ni, Fe), estão presentes em quase todos os meteoritos, sendo a marca registrada dessas rochas, uma vez que sua ocorrência na crosta terrestre sob a forma metálica é muito rara. O enxofre ocorre sob a forma de um sulfeto (FeS) denominado Troilita e o Cobalto aparece como componente da liga Fe-Ni. O quadro 1.1 sumaria os minerais mais comuns encontrados em meteoritos.

Quadro 1. Síntese dos principais constituintes de meteoritos.

Mineral	Descrição	Fórmula Geral
Níquel-Ferro	Liga de Fe, Ni e Co	(Ni,Fe,Co)
Troilita	Principal sulfeto em meteoritos	FeS
Piroxênio	Enstatita, Bronzita, Hiperstênio, Diopsídio, Augita.	(Fe,Mg,Ca)SiO <sub>3</sub>
Olivina	Comuns em meteoritos pétreos e mistos. Raras em meteoritos férreos	(Fe,Mg) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Feldspato/Plagioclásio	Albita, Anortita, Ortoclásio	(K,Na,Ca)(Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>

Dentre os minerais exclusivos de meteoritos, os principais são a Schreibersita (Fe,Ni)<sub>3</sub>P, a Osbornita (TiN) e a Oldhamita (CaS) identificados no final do século XIX.

A proporção em peso desses minerais na constituição dos meteoritos e as concentrações de elementos-traço e elementos maiores como o Fe e Ni fundamentam os sistemas de classificação atualmente vigente, sem desbancar, entretanto, a classificação estrutural adotada há 200 anos que subdivide os meteoritos em três tipos básicos: pétreos, férreos e mistos.

## 1.9 Esquemas de Classificação de Meteoritos

A primeira classificação dos meteoritos diferenciando os férreos dos pétreos foi proposta em 1807. Em 1863 foi introduzido nessa classificação o grupo de meteoritos mistos, compostos de silicatos embutidos em uma matriz de Ferro-Níquel. Baseada na composição mineralógica e características estruturais surgiram em 1904 uma classificação abrangente com 76 tipos de meteoritos. Essa classificação é denominada sistema *Rose-Tschermak-Brezina* em homenagem aos três cientistas (Rose 1864, Tschermak 1883, Brezina 1885) que a desenvolveram, adotando as seguintes classes: acondritos, condritos, enstatita-anortita-condritos, siderólitos, litosiderólitos, octahedritos, hexaedritos e ataxitos.

A multiplicidade de classes e suas subdivisões baseadas principalmente na mineralogia e em propriedades físicas tais como cor e veios na estrutura interna das rochas foram os principais pontos críticos da classificação *Rose-Tschermak-Brezina*, conforme revisão feita por Prior em 1920 propondo uma versão mais simplificada com apenas quatro classes e 19 grupos (Prior 1920).

### 1.9.1 Classificação de Prior – 1920

- (i) Condritos – subdivididos em cinco grupos de acordo o conteúdo de Fe oxidado versus Fe livre: enstatito, olivina-bronzito, olivina-hiperstênio, olivina-pigeonito, carbonáceo
- (ii) Acondritos – subdivididos em duas categorias: (i) “Pobres em cálcio” – enstatito ou aubrito, hiperstênio ou diogenito, olivina ou chassignito, olivina-pigeonito; ou (ii) “Ricos em cálcio” – augita ou angrito, diopsídio-olivina ou nakhalito, piroxênio-plagioclásio ou eucrito, howardito, shergortito.
- (iii) Mistos (*stony-irons*) – classificados conforme a natureza de seus minerais. Meteoritos de “olivina” ou palasitos; meteoritos com “bronzita-tridimita” ou

siderófilos; meteoritos de “bronzita-olivina” ou lodranito; meteoritos com “piroxênio-plagioclásio” ou mesossideritos.

- (iv) Férreos – divididos conforme o conteúdo de Ni e largura das lamelas de Kamacita: (a) hexahedrito – Ni entre 4-6%; (b) octahedrito – Ni entre 6-14%; e, (c) ataxito – Ni maior que 14%.

### **1.9.2 Classificação moderna – 2005**

A análise dos meteoritos evoluiu muito nos últimos 80 anos, construindo-se sistemas de classificação mais detalhados que levam em conta as semelhanças dos meteoritos em termos de sua mineralogia, petrografia, geoquímica e isótopos de oxigênio.

A classificação moderna dos meteoritos foi apresentada por Krot et al. (2005) e teve como principal objetivo reunir em grupos distintos meteoritos de origem similar histórico de formação parecidos de forma a revelar prováveis relacionamentos genéticos que apontam para um determinado tipo de astro (planeta ou asteróide) como possível fonte primária (Figura 1.1).

Nessa classificação os meteoritos são agrupados em duas classes principais: (i) condritos e (ii) não condritos.

Condritos são um tipo de meteorito rochoso caracterizado pela presença de côndrulos, partículas esféricas, geralmente submilimétricas, compostas principalmente de silicatos (olivinas, piroxênios e plagioclásios), troilita (FeS), liga metálica Fe-Ni, cromita, minerais fosfatados e vidro.

O grupo dos não condritos tem dois subgrupos principais: (i) Primitivos – Meteoritos que ainda preservam vestígios de características condriticas. Incluem acapulcoítos, lodranitos e winonaitos. (ii) Diferenciados – Baseados na abundância da fase metálica de Fe-Ni são subdivididos em 3 tipos: acondritos (marcianos, lunares e não agrupados), mistos (pétreo-férreos), e férreos.

## **1.10 Estrutura da Tese**

Este volume foi estruturado segundo as novas normas vigentes no Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFBA e visa à apresentação dos resultados da pesquisa em formato artigo.

No primeiro capítulo apresentam-se a introdução ao tema, os argumentos científicos que justificam e motivam esta pesquisa, objetivos gerais e específicos deste trabalho e a

# CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DOS METEORITOS

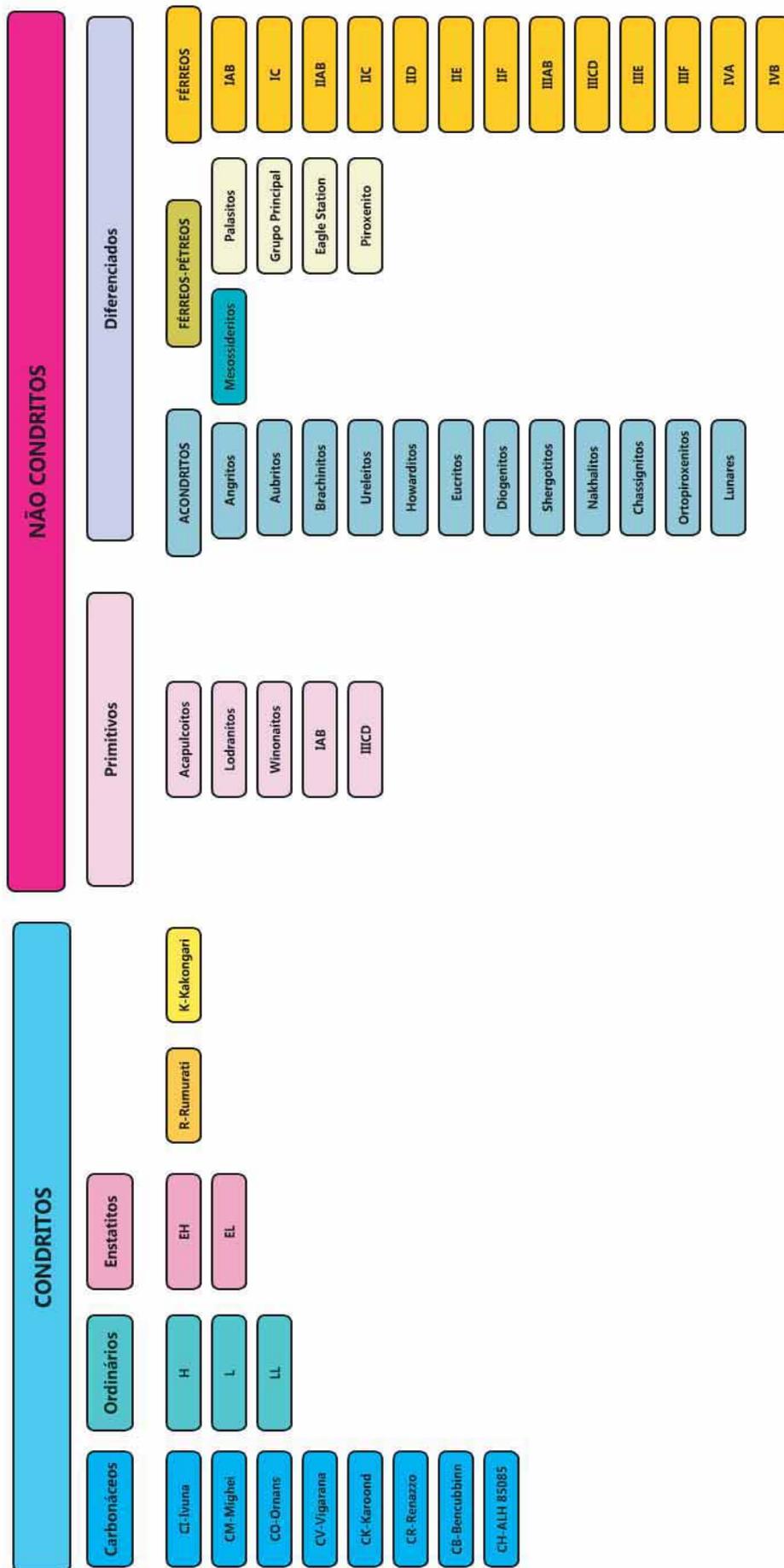


Figura 1.1. Classificação química dos meteoritos segundo proposta de Krot et al. (2005). Traduzido e adaptado.

metodologia aplicada. Além disto, são introduzidos os conceitos, definições e classificações básicas sobre meteoritos.

O segundo capítulo apresenta os resultados dos estudos realizados no meteorito condrítico Rio do Pires em formato de artigo que foi submetido à Revista de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

O terceiro capítulo apresenta os estudos realizados no meteorito férreo Palmas de Monte Alto. Estes resultados foram submetidos em forma de artigo para a revista intitulada Geologia USP, da Universidade de São Paulo.

O quarto capítulo foi reservado para algumas considerações finais, trazendo de forma sistemática as principais conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

Ao final de cada capítulo está a listagem de referências bibliográficas utilizadas. A formatação dos capítulos 2 e 3 seguiu as recomendações das revistas às quais os trabalhos foram submetidos. Ao final do volume encontram-se Apêndices que incluem as justificativas da participação dos co-autores e nos Anexos são transcritas: (A) Regras de Formatação da revista Pesquisas em Geociências, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e (B) Regras de Formatação da revista Geologia USP, da Universidade de São Paulo.

## **Referências Bibliográficas**

- Amelin, Y., 2008. U–Pb ages of angrites. *Geoch. et Cosmochimica Acta*. 72-1: 221-232.
- Blichert-Toft, J., Moynier, F., Lee, C-T. A., Telouk, P., Albarède, F., 2010. The early formation of IVA iron meteorite parent body. *Earth and Planetary Science Letters*. 296: 469-480.
- Brezina, A., 1885. *Die Meteoritensammlung des k.k. mineralogischen Hofkabinetes in Wien am 1. Mai 1895*. Alfred Holder. Wien.
- Buchwald V.F., 1975. *Handbook of iron meteorites: Their history, distribution, composition, and structure*. Berkeley, University of California Press. Vols. 1, 2, 3.
- Carvalho, W.P., 2010. *O meteorito Bendegó: história, mineralogia e classificação química*. Dissertação de Mestrado. CPG em Geologia UFBA. 203p.
- Carvalho, W.P., Rios, D.C., Conceição, H., Zucolotto, M.E., D’Orazio, M., 2011. O meteorito Bendegó: história, mineralogia e classificação química. *Revista Brasileira de Geociências*. 41(1):141-156.

- Chladni E.F.F., 1794. Über den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen, und über einige damit in Verbindung stehende Naturerscheinungen. Riga and Leipzig: J.F.Hartknoch, 63p.
- Coutinho, J.M., Quitete, E.B., Oliveira, M.C.B. 1999. The Quijingue meteorite: a pallasite from Bahia, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências* [S.l.], v. 29, n. 3: p. 447-448.
- Derby, O.A., 1888. Bendegó. *Revista do Observatório Nacional*. 3:96.
- D'Orazio M., Folco L., 2003. Chemical analysis of iron meteorites by inductively coupled plasmamass spectrometry. *Geostandards Newsletter: The Journal of Geostandards and Geoanalysis*. 27 (3): 215-225.
- Gomes, C.B., Keil, K., 1980. *Brazilian Stone Meteorites*. University of New Mexico Press. Albuquerque. 161p.
- Grady, M.M., 2000. *Catalogue of Meteorites*. Cambridge Press, London, 5th edition. 689p.
- Grady, M.M., 2006. Types of Extraterrestrial Material Available for Study. In: *Meteorites and the Early Solar System II*. Eds: D.S. Lauretta e H.Y. McSween Jr. The University of Arizona Press, Tucson. 943 p.
- Grossman, J.N., 1999. The Meteoritical Bulletin, No. 83, 1999 July. *Meteoritics and Planetary Science*, 34(S4):A169-A186.
- Halliday, I., Blackwell, A.T., Griffin, A.A., 1989. The flux of meteorites on the Earth's surface. *Meteoritics*. 24: 173-178.
- Herzog, G. F., 2006. Cosmic-ray Exposure Ages of Meteorites. In A.M. Davis (Ed.) *Meteorites, comets and planets, Treatise on Geochemistry*, Elsevier. 1: 347-380.
- Howard, E.C., 1802. Experiments and observations on certain stony and metallic substances which at different times are said to have fallen on the earth; also on various kinds of native iron. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 92 (1): 168-212.
- Hutchinson, R., 2004. *Meteorites: a petrologic, chemical and isotopic synthesis*. Cambridge. 506p.
- Iizuka, T., Horie, K., Komiya, T., Maruyama, S., Hirata, T., Hidaka, H., Windley, B.F., 2006. 4.2 Ga zircon xenocryst in an Acasta gneiss from northwestern Canada: Evidence for early continental crust. *Geology*, 34-4: 245-248.

- Jull, A. J. T., 2006. Terrestrial Age of Meteorites. In McSween et al. (Eds). Meteorites and the Early Solar System II. Univ of Arizona Press. 889-905.
- Krot, A.N., Keil, K., Goodrich, C.A., Scott, R.D., Weissberg, N.K., 2006. Classification of meteorites. In: A.M. Davis (Ed.) Meteorites, comets and planets, Treatise on Geochemistry, Elsevier. 1: 83-128.
- Marvin, U.B., 2006. Meteorites in history: an overview from the Renaissance to the 20<sup>th</sup> century. In Meteorites and Key Meteorite Collections: Fireballs, Falls and Finds. Eds: G.J.H. McCall, A. J. Bowden e Howarth R. J.. The Geological Society, London, Special Publications, 256: 15-71.
- Norton, O.R., 1994. Rocks from space, meteorites and meteorites hunters. Mountain Press Publishing Company. Missoula, Montana, USA. 449 p.
- Prior, G. T., 1920. The Classification of Meteorites. Mineralogical Magazine. 19:51-63.
- Rios, D.C., Carvalho, W.P., Walker, R., Davis, D.W., Zucolotto, M.E., 2012. Bendego IC Iron: HSE and Re-Os. Mineralogical Magazine (Print). 75:2287.
- Rose, G., 1864. Beschreibung und Eintheilung der Meteoriten auf Grund der Sammlung im mineralogischen Museum zu Berlin, 138 p.
- Scott E.R.D., 1977. Composition, Mineralogy and Origin of Group IC Iron Meteorites. Earth and Planetary Science Letters, 37: 273-284.
- Shen, J.J., Papanastassiou, D.A. et Wasserburg, G.J., 1996. Precise Re-Os determinations and systematics of iron meteorites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60, 15, 2887-2900.
- Tschermak, G., 1883. Beitrag zur Classification der Meteoriten. Sitzber. Akad. Wiss. Wien. Math-Noturw. Kl; Abs I, 88:347-371.
- Weisberg, M.K., Smith, C., Benedix, G., Herd, C.D.K., Righter, K., Haack, H., Yamaguchi, A., Cennaoui Aoudjehane, H., Grossman, J.N., 2009. The Meteoritical Bulletin, No. 96, September 2009. Meteoritics and Planetary Science, 44(9):1355-1397.
- Wlotzka, F., 1994. The Meteoritical Bulletin, No. 77, 1994 November. Meteoritics, 29:891-897.
- Zucolotto, M.E., Andrade, W.A., Klein, V.C., 2000. The meteorite collection of Museu Nacional - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brazil. Meteoritics & Planetary Science. 35:A185-A187.

## CAPÍTULO 2

### ARTIGO SOBRE CONDRITO RIO DO PIRES

---

Carvalho, W.P., Rios, D.C., Zucolotto, M.E., Conceição, H., Gomes, M., 2017. **O Condrito Rio do Pires: Aspectos Petrográficos e Mineraloquímicos**. Revista de Geociências da UFRGS (submetido).

# 1 O Condrito Rio do Pires: Aspectos Petrográficos e Mineraloquímicos

## 2 The Rio do Pires Chondrite: Petrographic and Mineral Chemistry Features

3  
4 Wilton Pinto de CARVALHO<sup>1,2</sup>, Débora Correia RIOS<sup>1,2</sup>, Maria Elizabeth ZUCOLOTTO<sup>3</sup>,  
5 Herbet CONCEIÇÃO<sup>1,2,4</sup> & Murilo Magno GOMES<sup>2</sup>

6  
7 <sup>(1)</sup> Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia. Rua Barão de  
8 Jeremoabo, 147, CEP 40.170-115, Salvador, BA, Brasil. E-mail: wilton@atarde.com.br.

9 <sup>(2)</sup> Grupo de Pesquisa Laboratório de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral. Rua Barão de  
10 Jeremoabo, 147, CEP 40.170-115, Salvador, BA, Brasil. E-mail: dcrios@ufba.br.

11 <sup>(3)</sup> Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Quinta da Boa Vista. São Cristóvão,  
12 CEP 20940-040, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: mezucolotto@globo.com.

13 <sup>(4)</sup> Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias da Universidade Federal de  
14 Sergipe. Av. Marechal Rondon, Jardim Rosa Elze, CEP 49.100-000. São Cristóvão, SE, Brasil. E-  
15 mail: herbet@ufs.br.

16  
17 **Resumo.** O meteorito Rio do Pires é um condrito tipo L6 achado antes de 1994, em data  
18 desconhecida na Bahia, Brasil, tendo seu registro publicado no *Meteoritical Bulletin* em  
19 1994, através de análise simplificada requerida para esse procedimento, apresentada por  
20 Adrian Brearley da Universidade do Novo México, Estados Unidos da América. Esse  
21 estudo objetiva ampliar os dados existentes sobre esse meteorito, através do detalhamento  
22 de suas características petrográficas, químicas e mineralógicas. Foram realizadas análises  
23 em três lâminas delgado-polidas e em uma amostra de mão, utilizando microscópio  
24 petrográfico e lupa petrográfica estereomicroscópica, microsonda eletrônica (EPMA) e  
25 microscopia eletrônica de varredura (MEV). A análise petrográfica permitiu constatar a  
26 existência de veios de choque resultantes de evento colisional do corpo parental que  
27 originou esse meteorito. Aproximadamente 93% dos minerais que compõem essa rocha  
28 são transparentes, predominando cristais de olivina, piroxênio e plagioclásio, nesta  
29 ordem. Os minerais opacos são representados por grãos de Fe-Ni metálicos, troilita (FeS),  
30 cromita (FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) e whitlockita (merrilita)Ca<sub>9</sub>(Mg<sub>0,7</sub>Fe<sup>2+</sup>)(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(PO<sub>3</sub>OH). A olivina é  
31 predominantemente magnesiânica (Fa<sub>25</sub>), sendo o principal constituinte mineral do  
32 meteorito Rio do Pires. O piroxênio é a enstatita e o plagioclásio oligoclásio. A  
33 mineraloquímica observada é similar a do bem estudado meteorito Suizhou condritico do  
34 tipo L6. A matriz mostra sinais de alta recristalização e presença de maskelinita, um  
35 importante indicador de choque, sendo significativa para o entendimento da história  
36 evolucionária do Rio do Pires.

37 **Palavras-chave.** Condrito, meteorito, L6, Rio do Pires, côndrulo.

38  
39 **Abstract.** The Rio do Pires meteorite is a L6 chondrite found at an unknown date in  
40 Bahia, Brazil. It was registered at the *Meteoritical Bulletin* in 1994, through a simplified  
41 analysis required for this procedure, presented by Adrian Brearley, University of New  
42 Mexico, USA. This paper aims to broaden the existing data on this meteorite through  
43 detailed petrographical, chemical and mineralogical analysis. Such analyses were  
44 performed on three polished thin sections and a hand sample, using a petrographical  
45 microscope and stereomicroscopic petrographic magnifying glass, electron microprobe  
46 (EPMA) and scanning electron microscope (MEV). The petrographical analysis shows  
47 the existence of shock veins caused by an impact event of the parent body that originated  
48 this meteorite. Approximately 93% of the minerals that compose this rock are transparent,  
49 predominating crystals of olivine, pyroxene and plagioclase, in this order. Opaque  
50 minerals are represented by Fe-Ni metal grains, troilite (FeS), chromite, FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and

51 whitlockite (merrillite)Ca<sub>9</sub>(Mg<sub>0,7</sub>Fe<sup>2+</sup>)(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(PO<sub>3</sub>OH). Olivine is predominantly  
 52 magnesian (Fa ~ 25%), being the main mineral constituent of the Rio do Pires meteorite.  
 53 The pyroxene is the enstatite and the plagioclase is an oligoclase. The observed mineral  
 54 chemistry is similar to that of the well studied type L6 chondrite Suizhou meteorite. The  
 55 matrix shows signs of high re-crystallization and presence of maskelynite, an important  
 56 indicator of shock, being significant for understanding the evolutionary history of Rio do  
 57 Pires.

58 **Keywords.** Chondrite, meteorite, L6, Rio do Pires, chondrule.  
 59

## 60 1 Introdução

61

62 Meteoritos chocam-se com a Terra desde os primórdios do Sistema Solar e são  
 63 definidos como rochas e ligas metálicas de Fe-Ni de origem espacial que caíram na superfície  
 64 terrestre e foram recuperados. São amostras extraterrestres passíveis de estudos petrográficos,  
 65 químicos e isotópicos, os quais permitem determinar suas texturas e composições, assim  
 66 como datar eventos relacionados à formação e evolução de astros que constituem o Sistema  
 67 Solar. O banco de dados mantido pela *Meteoritical Society*, entidade responsável pela  
 68 nomenclatura de meteoritos, tem registrado mais de 50 mil meteoritos, inclusive os espécimes  
 69 coletados na Antártida e desertos orientais, demonstrando que o número de achados e quedas  
 70 dessas rochas espaciais é significativo, oferecendo aos cientistas uma variada gama de  
 71 amostras para estudos mineraloquímicos, petrográficos e isotópicos de corpos extraterrestres  
 72 (*Meteoritical Bulletin Database, 2017*).

73 No Brasil, o Museu Nacional mantém registros da coleção de meteoritos brasileiros,  
 74 cujo número ainda é pequeno (69 exemplares), comparativamente às coleções de outros  
 75 países, como os Estados Unidos que tem 1.831 meteoritos registrados. A coleção brasileira é  
 76 constituída por 33 exemplares (47,06%) de meteoritos rochosos, 35 de ferro (47,82%) e um  
 77 único misto, um palasito composto de ferro e olivina (1,47%). Essa proporção é discordante  
 78 em relação à frequência mundial de quedas e achados, onde os meteoritos rochosos (condritos  
 79 e acondritos) correspondem a 97% e os metálicos (férreos e palasitos) a 3%. Explica-se essa  
 80 discordância, também encontrada em coleções de outros países, pela alta densidade e tamanho  
 81 dos meteoritos metálicos que facilitam seu reconhecimento e pela grande resistência ao  
 82 intemperismo que os fazem permanecer longo tempo sem se decompor até serem achados.

83 A distribuição geográfica destas quedas e achados pelos estados federativos também é  
 84 irregular, cabendo a Minas Gerais a primeira posição com 20 espécimes, seguida pelo Rio  
 85 Grande do Sul com 8, Goiás com 7 e São Paulo com 6. Na Bahia, até janeiro de 2017, foram  
 86 achados apenas cinco meteoritos, entre eles um único de natureza condritica, denominado Rio  
 87 do Pires, objeto deste artigo. Não há explicação científica para Minas Gerais abrigar 29% do

88 total de meteoritos do Brasil, uma vez que esses corpos caem aleatoriamente na superfície  
89 terrestre, podendo-se aventar a possibilidade de uma maior presença de geólogos e  
90 mineradores naquele estado favorecer o reconhecimento dos achados e quedas.

91 O histórico do meteorito Rio do Pires é bastante vago. A amostra foi cedida ao  
92 primeiro autor deste artigo em 1994 pelo Prof. Shiguemi Fujimori, catedrático em petrologia  
93 do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, ao qual foi doada por um ex-  
94 aluno que informou tê-la recuperado enquanto trabalhava na região de Rio do Pires. Não  
95 havia qualquer anotação sobre a ocorrência, nem o nome do geólogo que recolheu a amostra.  
96 A data do achado é desconhecida.

97 Considerando-se que foram infrutíferas as pesquisas para identificar e localizar o  
98 geólogo que recuperou o fragmento do meteorito doado ao Prof. Shiguemi, não foi possível  
99 estabelecer coordenadas do local do achado ou queda. Por essa razão, o meteorito foi  
100 denominado Rio do Pires e as coordenadas da sede desse município foram utilizadas para fins  
101 de registro do espécime junto ao *Meteoritical Bulletin*, conforme notificação feita pelo Dr.  
102 Adrian Brearley, do Instituto de Meteorítica da Universidade do Novo México, Estados  
103 Unidos que classificou o meteorito como condrito ordinário, tipo L6, publicando análise  
104 resumida no *Meteoritical Bulletin n° 77* (Wlotzka, 1994). Desde então, publicou-se apenas  
105 um resumo (Antonello & Zucolotto, 2001) sobre as características petrográficas dessa rocha  
106 espacial, existindo assim uma carência marcante de trabalhos acadêmicos sobre esse  
107 importante material extraterrestre.

108 O presente trabalho tem por objetivo descrever e caracterizar a mineralogia e  
109 petrologia desta rocha ao avaliar seus aspectos petrográficos e mineraloquímicos,  
110 contribuindo assim para a ampliação dos estudos sobre os meteoritos brasileiros.

111

### 112 *1.1. Aspectos e Relevância do Estudo de Condritos*

113

114 São reconhecidos três grandes grupos de meteoritos: pétreos ou rochosos, férreos ou  
115 metálicos e mistos. O grupo mais numeroso é formado pelos rochosos que respondem por  
116 97% de todas as quedas e achados de meteoritos na Terra. Por sua vez, esse grupo subdivide-  
117 se em condritos e acondritos, palavras derivadas do grego que significam respectivamente  
118 com côndrulos e sem côndrulos.

119 Condritos são um tipo de meteorito rochoso caracterizado pela presença de partículas  
120 esféricas, geralmente submilimétricas, compostas principalmente de silicatos (olivina,  
121 piroxênio e plagioclásio), troilita (FeS), liga metálica Fe-Ni, cromita, minerais fosfatados e

122 vidro. Em 2005, Krot & colaboradores (2005) propôs a mais recente classificação dos  
123 meteoritos condritos, baseada na mineralogia e petrologia, origem similar e histórico de  
124 formação parecido. De acordo com estes autores, os meteoritos condritos subdividem-se em  
125 seis classes: (i) Carbonáceos: Inclui oito grupos denominados CI, CM, CO, CR, CB, CH, CV  
126 e CK onde a primeira letra (C) significa carbonáceo, e a segunda representa o nome do  
127 meteorito tipo de cada série: (I) Ivuna, (M) Mighei, (O) Ornans, (R) Renazzo, (B) Bencubbin,  
128 (H) ALHA85005, (V) Vigarano e (K) Karoonda. (ii) Ordinários. Essa classe é a mais  
129 abundante, daí o nome ordinário no sentido de comum, respondendo por aproximadamente  
130 85% de todos os meteoritos rochosos registrados pelo *Meteoritical Bulletin Database*. O  
131 conteúdo total de Fe nos meteoritos condritos ordinários é utilizado para subclassificar essas  
132 rochas em três tipos e cinco níveis representados por letras: H (*High*/Alto – 25 a 30% Fe  
133 total), L (*Low*/Baixo – 22 a 25% Fe total), e LL (*Low-Low*/Muito Baixo – 19 a 22% Fe total).  
134 (iii) Enstatitos: A exemplo da classe dos ordinários, os enstatitos (E) também sub-classificam-  
135 se em EH e EL (*High*/Alto, >25% e *Low*/Baixo, ≤25%) conforme a concentração do elemento  
136 Fe e outros metais em suas massas. As três demais classes são mais raras e definidas de  
137 acordo com o nome do meteorito de referência – (iv) semelhantes ao Rumuruti e (v)  
138 semelhantes ao Kakangari – enquanto os restantes são coletivamente denominados de (vi)  
139 Anômalos.

140 Os meteoritos condritos também são classificados em tipos petrológicos cujas  
141 características diferem em razão de alterações provocadas pela hidratação, intemperismo e/ou  
142 metamorfismo. Essa classificação tem 7 níveis (Van Schmus & Wood, 1967), sendo o nível 3  
143 – o mais primitivo – atribuído a rochas que preservam quase que integralmente suas  
144 características ígneas, ricas em côndrulos bem definidos. Os tipos 4, 5, 6 e 7 apresentam  
145 efeitos de metamorfismo térmico, tendo sido submetidos a temperaturas que variaram de 400  
146 a mais de 950 °C, exibindo côndrulos menos definidos a partir do tipo 5, ou ausência dos  
147 mesmos no tipo 7. Os tipos 1 e 2 sofreram alterações por hidratação, tendo um conteúdo de  
148 H<sub>2</sub>O entre 2 e 20% (wt%). Assim, a nomenclatura de um meteorito condrito expressa sua  
149 classe (composição química), conteúdo de ferro total (H, L, LL), e tipo petrológico (1 a 7).

150 Estudos em côndrulos têm atraído muita atenção nos últimos anos pelas importantes  
151 informações que trazem sobre os primórdios da formação dos astros do Sistema Solar,  
152 incluindo a Terra. Acredita-se que os côndrulos foram formados a partir de minerais  
153 condensados da nuvem de gás e poeira cósmica que originou o Sistema Solar e que  
154 posteriormente sofreram fusão em diferentes regiões da nebulosa. Uma vez formados e  
155 reunidos em massas maiores, os côndrulos originaram corpos não diferenciados

156 (planetesimais condriticos) que mantiveram suas estruturas físicas e composições químicas  
157 inalteradas (meteoritos condritos primitivos). Processos de diferenciação e/ou alterações  
158 metamórficas resultaram no desaparecimento dos côndrulos devido à fusão parcial ou total,  
159 originando meteoritos diferenciados, que incluem os meteoritos acondriticos e metálicos, em  
160 procedimentos evolutivos similares aos que resultaram nas estruturas acamadadas dos  
161 planetas rochosos. Os meteoritos condritos são, portanto, rochas não diferenciadas que  
162 preservaram suas estruturas internas cósmicas resultantes da acreção de grãos que se  
163 aglutinaram formando esferas geralmente poliminerálicas que podem se apresentar íntegras  
164 ou metamorfisadas.

165 Adicionalmente, em um mesmo condrito os côndrulos podem possuir distintas  
166 mineralogias e composições. Experimentos realizados em laboratório por Hewins & Connolly  
167 (1996) determinaram que os côndrulos fundem-se entre 1.500 e 1.850 °C, conforme o maior  
168 ou menor conteúdo de minerais refratários.

169 Outra característica importante dos meteoritos condritos é a presença de inclusões  
170 ricas em cálcio e alumínio, denominadas CAIs que são formadas por minerais de alta  
171 temperatura tais como olivina, coríndon, hibonita, perovskita, anortita, melilita e espinélio.  
172 Essas inclusões em meteoritos condritos são anteriores aos próprios côndrulos e representam  
173 o material mais antigo já datado no Sistema Solar, atingindo  $4.567,2 \pm 0,6$  Ma (Amelin *et al.*,  
174 2002).

175

## 176 **2 Área, materiais e métodos**

177

### 178 *2.1 Localização da área*

179

180 O município de Rio do Pires localiza-se na região Sudoeste da Bahia, distando cerca  
181 de 596 km da capital do estado (Figura 1). O acesso por via rodoviária, a partir de Salvador,  
182 ocorre através da BR324, BR 242 e BA 122. A sede do município tem como coordenadas  
183 geográficas Latitude 13° 07' 40" S e Longitude 42° 17' 31" W. A altitude é de 551 m. O  
184 município tem área de 892,8 km<sup>2</sup>.

185 Não foi possível estabelecer as coordenadas do local do achado por falta de  
186 informações de quem coletou a amostra e a levou para o Instituto de Geociências da  
187 Universidade Federal da Bahia, conforme relatado na Introdução, tendo sido utilizadas as  
188 coordenadas da sede do município para fins de registro do meteorito (Weisberg *et al.*, 2009).

189

190

191 Figura 1. Mapa de situação e localização.

192 A) América do Sul, Brasil, Bahia; B)

193 Mapa da Bahia com localização do

194 município Rio do Pires, onde

195 provavelmente o meteorito foi

196 recuperado.

197 *Figure 1. Location map. A) South*198 *America, Brazil, Bahia; B) Map of Bahia*199 *with Rio do Pires town, where the*200 *meteorite probably was found.*

201

202 

## 2.2 Materiais

203

204 O espécime que se encontrava no

205 Instituto de Geociências da UFBA pesava

206 118 gramas, com sua aresta maior

207 medindo 4 cm (Figura 2A). Uma das

208 faces estava serrada (Figura 2B)

209 sugerindo retirada de fatia para análise da

210 textura interior e confecção de lâmina

211 petrográfica, entretanto não foram

212 localizados resultados de quaisquer exames realizados na UFBA ou em outra instituição de

213 pesquisa, tampouco foram localizados outros fragmentos da amostra. A Universidade do

214 Novo México e o Museu Nacional são as instituições depositárias de amostras desse

215 meteorito. Foi utilizada neste trabalho a massa remanescente (35 g) do fragmento original – a

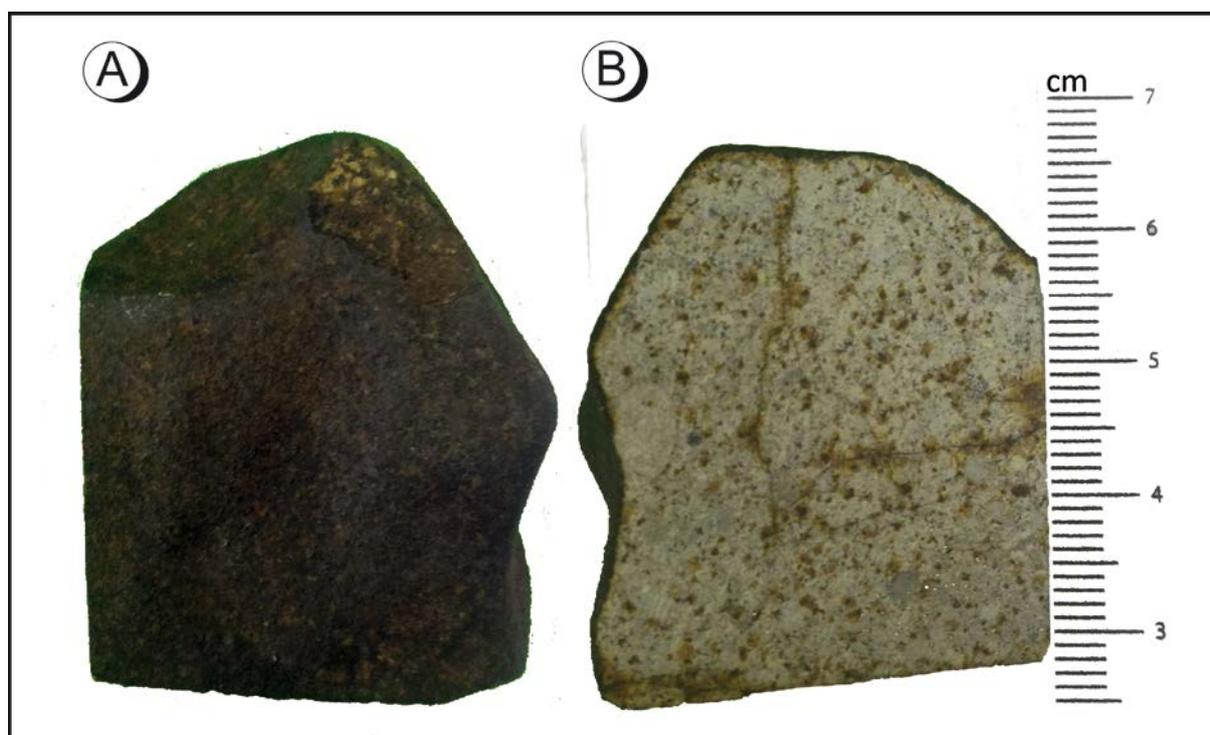
216 qual integra a coleção de meteoritos do primeiro autor desse trabalho – uma fatia metalizada

217 para análise através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e três lâminas delgado-

218 polidas.

219





220  
 221 Figura 2. Amostra do meteorito Rio do Pires. A) Fragmento original; B) Face de corte da  
 222 massa remanescente.

223 *Figure 2. Sample from Rio do Pires meteorite. A) Fragment with crust. B) Cut face of*  
 224 *remnant mass.*

225

### 226 2.3 Métodos

227

228 A amostra de mão (35 g) e uma pequena fatia polida do meteorito foram analisadas a  
 229 olho nu e com lupa estereoscópica binocular.

230 Três lâminas delgadas foram polidas e preparadas pelo método convencional e na  
 231 espessura padrão (0,3 mm), sendo analisadas com microscópio petrográfico Zeiss Axioskop  
 232 40 equipado com AxioCam de alta resolução e aplicativo Axiovision versão 4.7, nos  
 233 laboratórios do Museu Nacional – UFRJ, sob luz transmitida, polarizada e refletida.

234 Análises mineraloquímicas foram realizadas a partir da análise de uma lâmina  
 235 delgado-polida, utilizando a microsonda eletrônica JXA-JEOL 8230, equipada com  
 236 WDS/EDS e localizada no Labsonda do Instituto de Geociências da Universidade Federal do  
 237 Rio de Janeiro (IG-UFRJ), com aceleração potencial 15 kV e 15 nA. A precisão estimada para  
 238 elementos desse equipamento é melhor que 3% para elementos maiores e cerca de 10% para o  
 239 sódio. Brancos naturais e sintéticos foram usados para calibragem e correções online ZAF  
 240 foram aplicadas aos dados.

241 Uma fatia do meteorito foi polida e metalizada com ouro, sendo analisada por  
242 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), em equipamento TESCAN modelo VEGA3LV  
243 com EDS acoplado nos laboratórios multiusuários da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

244

### 245 **3 Resultados**

246

#### 247 *3.1 Análises Petrográficas*

248

249 O estudo petrográfico de uma rocha implica em uma série de observações que  
250 pretendem, em geral, descrever a composição mineralógica, a forma, dimensões e relações  
251 mútuas dos constituintes (textura), assim como as alterações e deformações sofridas ao longo  
252 do tempo. Na avaliação de meteoritos, em especial de condritos, os estudos petrográficos  
253 permitem avaliar o caráter primitivo dessas rochas que não passaram por processos de  
254 diferenciação e apresentam textura única – a presença de côndrulos – sem similar na Terra.

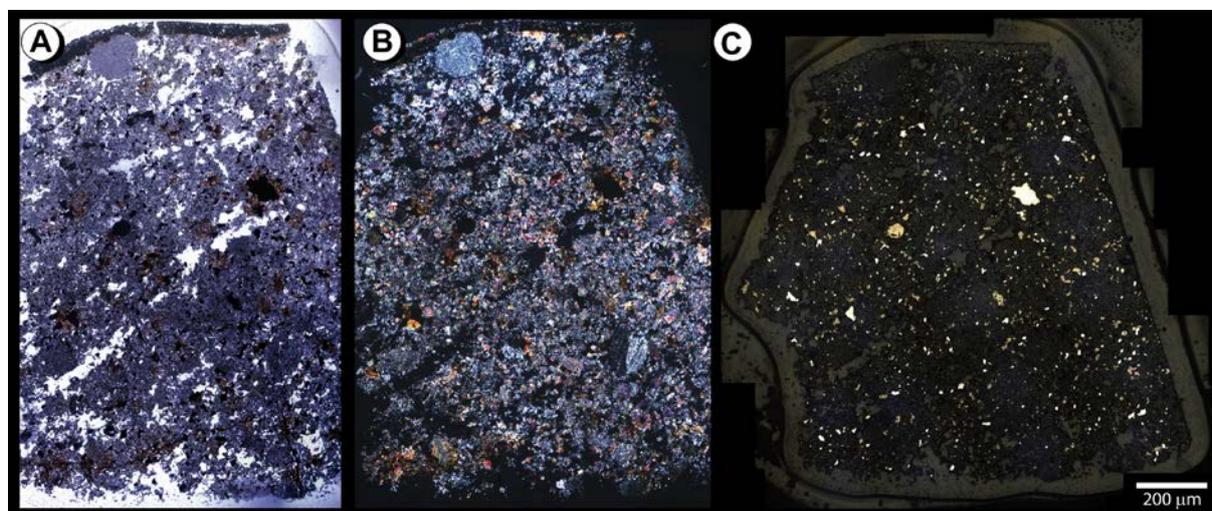
255 Os estudos petrográficos das seções polido-delgadas do meteorito Rio do Pires tiveram  
256 como objetivos principais: (i) investigar suas assembléias minerais e relacionamentos  
257 texturais e estruturais, (ii) inferir as paragêneses minerais, (iii) selecionar aspectos importantes  
258 para detalhamento com o microscópio eletrônico de varredura e a microsonda eletrônica.  
259 Adicionalmente buscou-se avaliar as estruturas internas e feições de deformação resultantes  
260 de possíveis impactos que o corpo parental sofreu no espaço. Esses efeitos causam alterações  
261 nos minerais que compõem o meteorito, permitindo inferir o grau do choque sofrido (Stoffler  
262 *et al.*, 1991).

263 No meteorito Rio do Pires a parte condrítica representa em peso 92,7% da amostra, os  
264 minerais opacos totalizam 5,3% e a crosta 2,0%. Veios de choque formados durante evento  
265 colisional no espaço são facilmente visíveis a olho nu e através de lupa. A amostra original  
266 era totalmente revestida por uma crosta de fusão preta, fina (0,3 a 0,5mm), preservada nas  
267 fatias analisadas e amostra de mão. Essa crosta vitrificada foi formada durante a passagem do  
268 meteorito pela atmosfera terrestre (Figura 2).

269 O fragmento analisado (35g) exteriormente apresenta numerosos regmalitos (mossas),  
270 crosta de fusão primária e secundária, esta última indicadora de fragmentação do meteorito  
271 durante o vôo através da atmosfera terrestre. A textura interna da rocha tem cor cinza claro  
272 com muitos côndrulos fragmentados, alongados ou circulares e de baixa definição. Inclusões  
273 metálicas de Fe-Ni e minerais opacos destacam-se em uma matriz de fina granulação com  
274 veios de choque bem delineados (Figura 2B).

275 Condritos ordinários – tais como Rio do Pires – são os mais comuns em quantidades  
 276 de quedas e achados. De acordo com Xie & Chen (2015) a mineralogia destas rochas é  
 277 geralmente muito simples, consistindo de olivina, piroxênio pobre em Ca, e ligas de Fe-Ni  
 278 (kamacita e taenita). Minerais varietais comuns incluem plagioclásio, diopsídio, e troilita,  
 279 enquanto a mineralogia acessória é constituída por cromita, whitlockita (merrilita), e cloro-  
 280 apatita. Podem ainda ocorrer cobre nativo, pigeonita, pentlandita, ilmenita, mackinawita,  
 281 bravoita, e calcopirita.

282 De acordo com medidas estatísticas feitas a partir de um fotomosaico da lâmina  
 283 delgada utilizando o programa *ImageJ* (*National Institutes of Health*, 2013), o condrito Rio do  
 284 Pires contém 94,72% de minerais transparentes e 5,28% de minerais opacos, em volume  
 285 (Figura 3). O meteorito apresenta textura cristalina granular, com vários cõndrulos que ainda  
 286 preservam limites discerníveis em relação à matriz, enquanto muitos outros possuem limites  
 287 indistintos, indicando que a rocha foi submetida a um evento metamórfico de elevado grau  
 288 térmico.



289  
 290 Figura 3. Fotomosaicos de uma lâmina polido-delgada do meteorito Rio do Pires. A) Luz  
 291 Transmitida; B) Luz Polarizada; C) Imagem de luz refletida após tratamento com nital. As  
 292 fases de cor branca correspondem à liga Fe-Ni e os cristais amarelo-dourado são troilitas.

293 *Figure 3. Photo assemblage from a thin section of meteorite Rio do Pires. A) Transmitted*  
 294 *light; B) Polarized light; C) Image under reflected light after etching with nital. White phases*  
 295 *are Fe-Ni alloy and golden-yellow crystals are troilites.*

296

297 A matriz mostra sinais de alta recristalização com cristais uniformes de olivina,  
 298 piroxênio, plagioclásio, minerais opacos e, adicionalmente, hematita e goethita ou  
 299 lepidocrosita, as quais formam as fases secundárias identificadas, resultantes de

300 intemperismo. A maskelinita – um vidro denso resultante da fusão do plagioclásio – também  
301 foi identificada, sendo sua presença significativa para o entendimento da história colisional da  
302 rocha, pois é uma importante evidência de choque.

303 A textura condrítica do meteorito Rio do Pires está preservada e pode ainda ser  
304 reconhecida tanto no espécime de mão quanto em lâmina polido-delgada (Figuras 2 e 3). Os  
305 côneulos têm composição ferro-magnésiana e apresentam-se sob formatos arredondados ou  
306 alongados, a maioria fragmentada e alguns com estrutura radiante fibrosa difusa. Eles medem  
307 em média 1,64 mm, variando de 0,3 a 5 mm em diâmetro.

308 Foram identificados côneulos porfiríticos compostos de olivina, de piroxênio e de  
309 olivina-piroxênio (Figura 4). Entretanto, em sua maioria, os côneulos são granulares,  
310 compostos também desses dois minerais, isoladamente ou combinados. Outro tipo de  
311 côneulo encontrado nesse meteorito é composto por olivina barrada. As fases metálicas  
312 predominantes são a kamacita e a taenita, além de existir quantidades acessórias de troilita,  
313 cromita e fosfatos.

314

### 315 *3.2 Análises mineraloquímicas*

316

#### 317 *3.2.1 Minerais formadores de rochas*

318

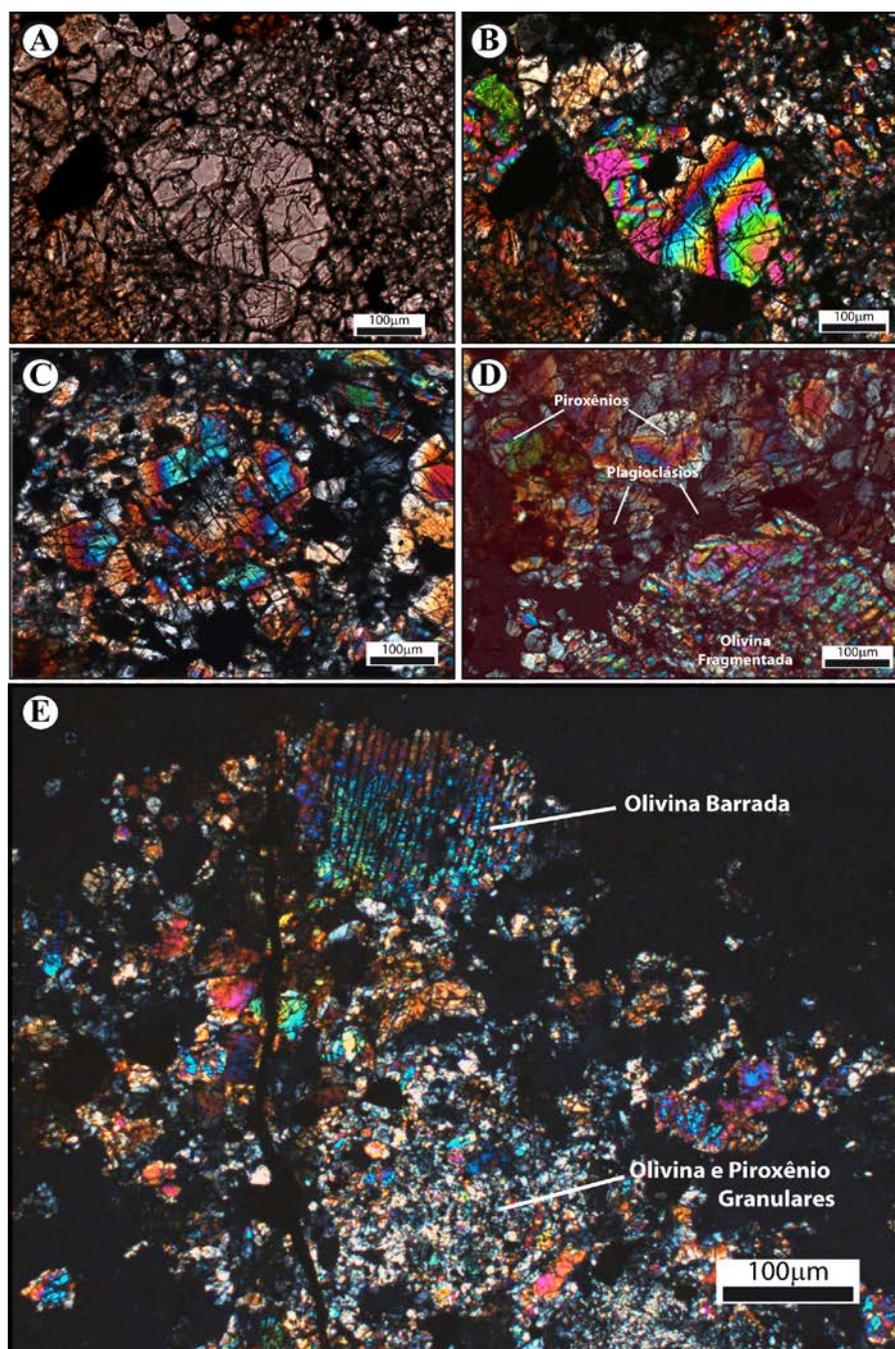
319 As análises mineraloquímicas do meteorito Rio do Pires foram subdivididas em  
320 minerais formadores de rochas (olivina, piroxênio e plagioclásio), minerais opacos (liga de  
321 Fe-Ni, troilita, cromita), e fosfatos (merrilita, cloro-apatita). Análises de dez pontos  
322 investigados por microsonda eletrônica (EPMA) e sete sites observados através de  
323 microscopia eletrônica de varredura (MEV) confirmam os achados petrográficos e  
324 quantificam as composições das fases minerais observadas (Figura 5). Além disto, o estudo  
325 por MEV revelou a existência e composição do mineral fosfatado whitlockita (merrilita).

326

##### 327 *3.2.1.1 Olivina*

328

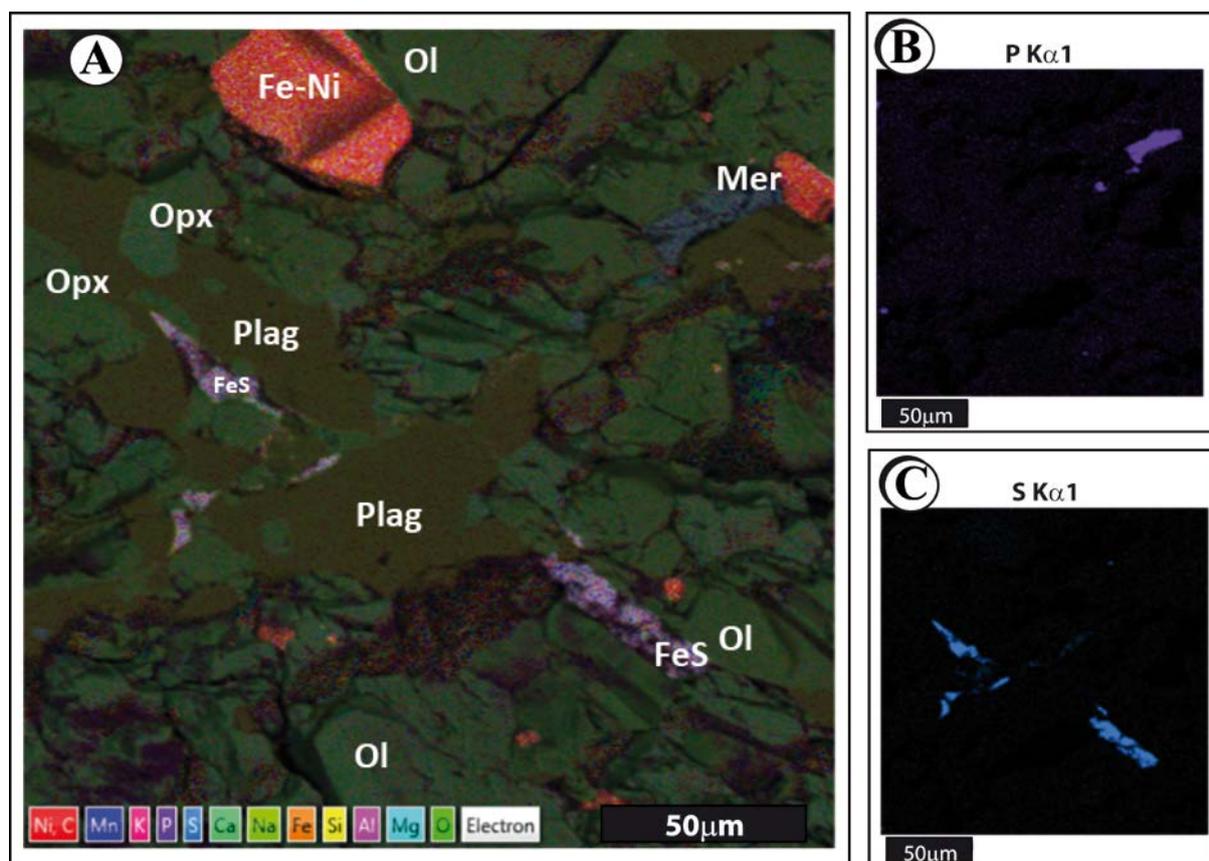
329 Olivina é o principal constituinte do meteorito Rio do Pires. Os cristais de olivina  
330 apresentam alta birrefringência e a maioria encontra-se fragmentada e fraturada, exibindo  
331 extinção ondulatória (Figura 4). Na matriz, os cristais fragmentados de olivina apresentam cor  
332 amarelada a esverdeada com pleocroísmo fraco, com alguns cristais formando côneulos  
333 barrados.



334  
 335 Figura 4. Cristais em Rio do Pires. A) Pórfiro de olivina em luz transmitida; B) Pórfiro de  
 336 olivina em luz polarizada; C) Pórfiro de piroxênio em luz polarizada; D) Côndrulo de olivina  
 337 fragmentada; E) Côndrulo granular de olivina e piroxênio e côneulo de olivina barrada em  
 338 luz polarizada.

339 *Figure 4. Crystals in Rio do Pires meteorite. A) Porphyry olivine under transmitted light. B)*  
 340 *Porphyry olivine under polarized light; C) Porphyry pyroxene under polarized light; D)*  
 341 *Fragmented olivine chondrule; E) Granular chondrule of olivine and pyroxene; F) Chondrule*  
 342 *of barred olivine under polarized light.*

343



344  
 345 Figura 5. Mapas de varredura por EDS-MEV dos minerais principais observados no meteorito  
 346 Rio do Pires. A) Campo com olivina, ortopiroxênio, plagioclásio, metal, fosfeto e sulfeto. B)  
 347 Mapa Elemental para o Fósforo. C) Mapa Elemental para o Enxofre. Ol = Olivina, Opx =  
 348 Enstatita, Mer = Merrillita, Plag = Oligoclásio, FeS = Troilita, Fe-Ni = Liga metálica de ferro  
 349 e níquel.

350 *Figure 5. Elemental maps by scanning electron microscopy showing minerals observed in Rio*  
 351 *do Pires meteorite. A) Study field showing olivine, orthopyroxene, plagioclase, metal,*  
 352 *phosphide and sulfide. B) Elemental map of Phosphorus. C) Elemental map of Sulphur. Ol =*  
 353 *Olivine, Opx = Enstatite, Mer = Merrillite, Plag = Plagioclase, FeS = Troilite, Fe-Ni = iron-*  
 354 *nickel metal alloy.*

355 A maioria dos côneulos é composta de cristais de olivina, os quais apresentam formas  
 356 arredondadas a alongadas. Esse mineral também é encontrado incluso em cristais de  
 357 piroxênio. De acordo com resultados de microsonda eletrônica (EPMA) para dez cristais  
 358 (Tabela 1) esta olivina é rica em Mg (Fa<sub>24,2-25,8</sub> - Fo<sub>73,7-75,3</sub>). O conteúdo de elementos-traço é  
 359 bastante uniforme, possuindo teores extremamente baixos (<0,03%) de TiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Os  
 360 conteúdos de CaO (<0,03%) também são baixos e a concentração de MnO varia de 0,40a  
 361 0,51%. Estes valores são coerentes com a média para o meteorito condrítico do tipo L6

362 Suizhou (Wang *et al.*,1990). No Rio do Pires, o conteúdo médio de Fa é de 25,2 mol,  
363 permitindo representar esta olivina pela fórmula  $(Mg_{1.46}Fe_{0.50}Mn_{0.01})_2SiO_4$ .

364

365 Tabela 1. Composição química da olivina no meteorito Rio do Pires (wt%).

366 *Table 1. Chemical composition of the olivine in the Rio do Pires meteorite (wt%).*

Amostra	Suizhou-Olv (média #19)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média #10
Referência	Wang et al., 1990	RP-OI	RP-OI	RP-OI	RP-OI							
Oxido	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%
SiO <sub>2</sub>	38,66	38,54	38,56	38,62	38,36	38,59	38,66	39,04	38,64	38,93	38,68	38,66
TiO <sub>2</sub>	0,08	0,00	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,51	0,01	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,08	0,00	0,00	0,00	0,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,51	na	na	na	na	na	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01
FeO	21,76	23,31	22,98	23,13	22,89	22,94	22,69	21,92	23,25	22,87	23,12	22,91
MnO	0,52	0,42	0,46	0,43	0,40	0,40	0,51	0,44	0,50	0,51	0,49	0,45
MgO	37,99	37,38	37,61	37,62	37,25	37,74	37,63	38,26	38,34	38,11	38,56	37,85
NiO	0,12	na	na	na	na	na	0,04	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01
CaO	0,10	0,01	0,01	0,00	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
<b>TOTAL</b>	<b>100,25</b>	<b>99,67</b>	<b>99,63</b>	<b>99,83</b>	<b>98,93</b>	<b>99,74</b>	<b>99,56</b>	<b>99,77</b>	<b>100,76</b>	<b>100,42</b>	<b>100,86</b>	<b>99,93</b>
Fo	75,04	73,74	74,09	74,00	74,04	74,23	74,30	75,31	74,21	74,40	74,44	74,28
Fa	24,11	25,80	25,40	25,52	25,52	25,32	25,13	24,20	25,24	25,04	25,03	25,22
Te	0,58	0,47	0,51	0,48	0,45	0,45	0,57	0,49	0,55	0,56	0,53	0,51

Valores determinados por EPMA. na = não analisado. Fo = Forsterita, Fa = Fayalita, Te = Tephroita

367 RP-OI = Olivina analisada no meteorito condritico Rio do Pires (este trabalho).

368

### 369 3.2.1.2 Piroxênio

370

371 Piroxênio é o segundo mineral em abundância no meteorito Rio do Pires. Os cóndrulos  
372 de piroxênio são alongados, apresentando efeitos típicos de choque tais como baixa  
373 birrefringência em tons do cinza, extinção ondulatória, mosaicismo (aglomerados de cristais  
374 muito pequenos) e geminação mecânica. Em alguns cristais são observadas fraturas planares.  
375 Cóndrulos radiais são raros e os poucos encontrados apresentam estrutura difusa. Análises por  
376 EPMA de 9 cristais de piroxênio neste condrito demonstram tratar-se de ortopiroxênio com  
377 conteúdo médio de Enstatita variando de 73,4 a 77,3% e teores de  $21,2 \leq Fs \leq 25,0$  mol.

378 O ortopiroxênio do Rio do Pires é representado pela fórmula  
379  $Mg_{0.759}Fe_{0.211}Ca_{0.014}O_{0.984}(Si_{1.007}Al_{0.002})_{1.009}O_3$ . As concentrações médias dos elementos  
380 maiores são respectivamente SiO<sub>2</sub> 56,10%, MgO 28,35% e FeO 14,09% e os conteúdos de  
381 MnO (0,39-0,48%) (Tabela 2)são similares ao da olivina ( $0,40 \leq MnO \leq 0,51\%$ ). Esta  
382 pequena variação demonstra que os conteúdos de elementos maiores no condrito Rio do Pires  
383 estão em equilíbrio, fato também observado no meteorito condritico Suizhou (Xie & Chen,

384 2015). Os conteúdos de elementos menores são também bastante uniformes e baixos. TiO<sub>2</sub> e  
 385 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são inferiores a 0,25%. Cálcio varia de 0,50 a 0,83%. Os teores de Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O estão  
 386 abaixo do limite de detecção da microsonda eletrônica.

387

388 of

389 *Table 2. Chemical composition of orthopyroxene in the Rio do Pires meteorite (wt%)*

Amostra	Suizhou-Px (média #3)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Média #9
Referência	Xie & Chen 2015	RP-Px	RP-Px	RP-Px	RP-Px	RP-Px	RP-Px	RP-Px	RP-Px	RP-Px	RP-Px
Óxido	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%
SiO <sub>2</sub>	55,78	55,91	56,14	56,32	55,93	55,96	56,02	56,10	56,27	56,27	56,10
TiO <sub>2</sub>	0,16	0,20	0,24	0,15	0,16	0,23	0,05	0,05	0,06	0,07	0,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16	0,13	0,17	0,17	0,16	0,16	0,04	0,02	0,04	0,05	0,10
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11	na	na	na	na	na	0,07	0,10	0,06	0,05	0,03
FeO	13,95	14,11	14,24	13,99	14,17	14,07	14,40	14,10	13,90	13,79	14,09
MnO	0,50	0,46	0,39	0,43	0,48	0,44	0,16	0,02	0,00	0,03	0,27
MgO	29,24	28,47	28,35	28,26	28,06	28,38	27,55	29,10	28,57	28,45	28,35
CaO	0,72	0,75	0,67	0,66	0,71	0,75	0,83	0,80	0,65	0,50	0,70
Na <sub>2</sub> O	0,04	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
K <sub>2</sub> O	0,01	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
<b>Total</b>	<b>100,66</b>	<b>100,03</b>	<b>100,20</b>	<b>99,99</b>	<b>99,66</b>	<b>99,99</b>	<b>99,11</b>	<b>100,27</b>	<b>99,54</b>	<b>99,21</b>	<b>99,78</b>
En	78,84	76,24	75,49	75,13	75,17	75,87	73,45	77,30	75,64	75,33	75,51
Fs	19,77	22,31	23,23	23,61	23,46	22,68	24,97	21,17	23,12	23,73	23,14
Wo	1,39	1,45	1,29	1,26	1,37	1,45	1,58	1,53	1,23	0,94	1,34

Valores determinados por EPMA. na = não analisado. En = Enstatita, Fs = Ferrosilita, Wo = Wollastonita.

390 RP-Px = Piroxênio analisado no meteorito condritico Rio do Pires (este trabalho).

391

392 *3.2.1.3 Plagioclásio*

393

394 O plagioclásio é um mineral bastante comum nos meteoritos condriticos dos tipos L5 e  
 395 L6. No Rio do Pires ocorre como grãos de formato irregular de cor cinza e tamanhos em torno  
 396 de 70-190 µm (Figura5). Antonello & Zucolotto (2001) descrevem o plagioclásio como uma  
 397 fase acessória no Rio do Pires, associado à presença de maskelinita. Os cristais estudados  
 398 apresentam formas irregulares, extinção ondulatória e fraturas, feições típicas de choque,  
 399 ocorrendo como constituinte intersticial na matriz. Não foi possível estimar a razão de  
 400 plagioclásio/maskelinita.

401 A composição química do plagioclásio (Tabela 3) nesse meteorito é  
 402 predominantemente sódica (80,54<Ab<83,05), com conteúdos pouco variáveis da molécula  
 403 de Or (6,33 a 7,95) e An (10,27 a 11,88).

404 Os dados permitem classificar este plagioclásio como oligoclásio e estabelecer a  
 405 seguinte fórmula geral:  $(\text{Na}_{0.74}\text{K}_{0.06}\text{Ca}_{0.10}\text{Fe}_{0.02})_{0.92}\text{Al}_{1.05}(\text{Si}_{2.90}\text{Al}_{0.07})_{3.00}\text{O}_8$ .

406 A composição química da maskelinita representada pela fórmula é  
 407  $(\text{Na}_{0.59}\text{K}_{0.06}\text{Ca}_{0.11}\text{Fe}_{0.02})_{0.78}\text{Al}_{1.06}(\text{Si}_{2.93}\text{Al}_{0.07})_{3.00}\text{O}_8$ , calculada a partir de análises MEV  
 408 realizadas em 14 pontos, é próxima a formula encontrada para o plagioclásio. No sítio X,  
 409 posição comumente ocupada por Na e Ca, também é comum encontrar a substituição parcial  
 410 destes íons por Ba, Sr, Ni, Eu e mesmo Cr e outros.

411

412 Tabela 3. Composição química do plagioclásio no meteorito Rio do Pires (wt%).

413 *Table 3. Chemical composition of plagioclase in the Rio do Pires meteorite (wt%).*

Óxido (wt%)	Suizhou Plag (Média 3)	1	2	3	4	5	6	Média #6
Referência	Xie & Chen 2015	RP-Plag	RP-Plag	RP-Plag	RP-Plag	RP-Plag	RP-Plag	RP-Plag
Óxido	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%
SiO <sub>2</sub>	65,76	64,50	64,30	66,40	66,70	65,80	65,90	65,60
TiO <sub>2</sub>	0,04	na	na	na	na	na	na	na
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,77	22,80	22,90	21,50	21,30	21,00	21,30	21,80
FeO	0,41	0,30	0,60	0,50	0,50	0,40	0,50	0,47
MnO	0,02	na	na	na	na	na	na	na
MgO	na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,02
CaO	2,21	2,30	2,00	2,10	2,00	2,20	2,30	2,15
Na <sub>2</sub> O	8,87	8,80	8,80	8,40	8,60	9,50	8,70	8,80
K <sub>2</sub> O	1,31	1,30	1,30	1,10	1,00	1,10	1,10	1,15
BaO	0,02	na	na	na	na	na	na	na
<b>TOTAL</b>	<b>100,41</b>	<b>100,00</b>	<b>99,90</b>	<b>100,00</b>	<b>100,10</b>	<b>100,00</b>	<b>99,90</b>	<b>99,98</b>
Or	7,89	7,83	7,95	7,04	6,35	6,33	6,77	7,04
Ab	80,97	80,54	81,78	81,68	82,99	83,05	81,35	81,90
An	11,15	11,63	10,27	11,28	10,66	10,63	11,88	11,06

Valores determinados por EDS-MEV. na = não analisado. Or = Ortoclásio. Ab = Albita. Na = Anortita.

414 RP-Plag = Plagioclásio analisado no meteorito condritico Rio do Pires (este trabalho).

415

### 416 3.2.2 *Minerais opacos*

417

418 De acordo com Rubin (1997) a razão taenita/kamacita em condritos ordinários do tipo  
 419 L é de ~0.3, isto é, possuem concentrações de kamacita 3 vezes maiores que a taenita.

420 Além dessas duas fases principais é possível identificar quantidades acessórias de  
 421 tetrataenita, awaruita, pentlandita (em espécimes oxidados), ilmenita, rutilo e Cu-metálico que  
 422 são fases mais raras em abundância (<10-4wt%), mas bastante freqüentes, presentes em  
 423 aproximadamente 66% dos condritos já analisados. Os minerais opacos observados nas

424 lâminas do Rio do Pires examinadas neste estudo correspondem a cerca de 5,3% em volume  
425 da rocha, tendo sido identificadas três fases principais: Fe-Ni metal, troilita e cromita.

426

### 427 3.2.2.1 Ferro-Níquel metálico

428

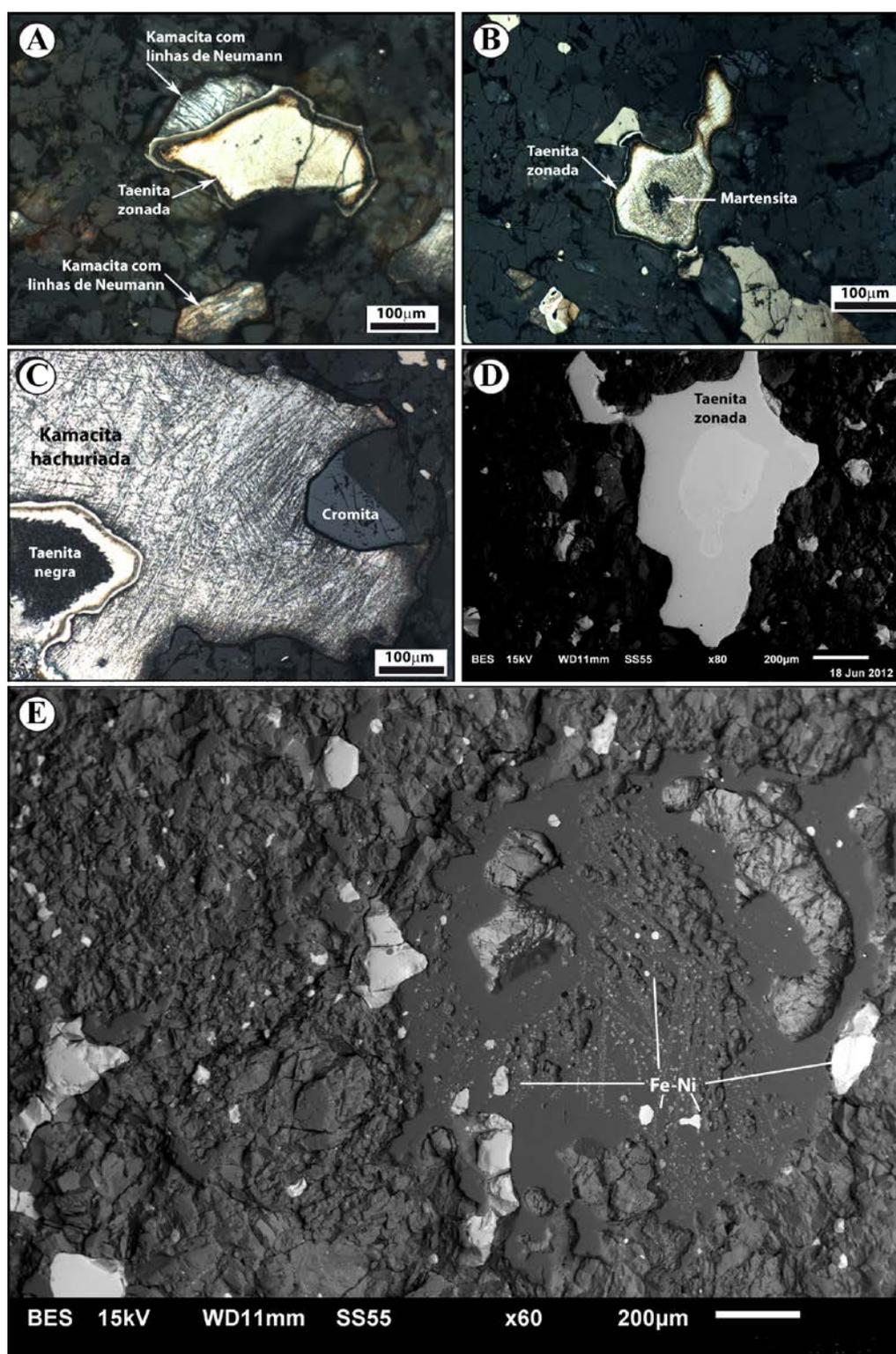
429 O Fe-Ni metálico sob a forma de uma solução sólida é um componente muito  
430 frequente nos meteoritos rochosos e predominante nos (metálicos) e palasitos (mistos). A  
431 concentração de Ni nessa liga nos condritos ordinários varia de 7 a 45 wt% (Oshtakh *et al.*,  
432 2008). Os três minerais que compõem a solução sólida Fe-Ni metálico são denominados: i)  
433 kamacita ( $\alpha$ Fe-Ni), ii) taenita ( $\gamma$ Fe-Ni) e iii) plessita, uma mistura de kamacita e taenita  
434 granulares, com conteúdo de Ni de 20-25 wt%.

435 O Fe-Ni metálico é a fase majoritária entre os minerais opacos do Rio do Pires,  
436 possuindo distribuição heterogênea. A análise ocorreu após uma amostra ser tratada com nital  
437 (solução HNO<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O a 2%) revelando a liga de Fe-Ni (Figura 3C) em suas diversas formas,  
438 sobressaindo-se a kamacita hachuriada e kamacita com bandas de Neumann, taenita zoneada e  
439 não zoneada e tetrataenita, uma fase rara em condritos. Ocorrências de plessita e martensita  
440 também foram observadas (Figura 6).

441 Os cristais metálicos de Fe-Ni do Rio do Pires sob luz refletida apresentam cor branca  
442 metálica, tem formato irregular e tamanho variando desde partículas micrométricas a grãos  
443 milimétricos. O conteúdo de Ni nessa liga varia de 5 a 32%. Medidas realizadas com EDS  
444 demonstram homogeneidade da kamacita (Fe = 94,2 a 95,0%, Ni = 5,0 a 5,8% e Co = 0,81 a  
445 0,87%), que ocorre como grãos individuais e como agregados policristalinos. Por sua vez, a  
446 taenita, naturalmente mais rica em Ni que a kamacita, possui um conteúdo médio de Fe de  
447 76,36 wt% e Ni de 23,63 wt%. A plessita, uma mistura de kamacita e taenita, também está  
448 presente entre os minerais opacos desse meteorito, apresentando-se zonada – referida por  
449 alguns autores como taenita, e não zonada – também denominada plessita propriamente dita.

450 Nos cristais de kamacita existem numerosas linhas paralelas, denominadas bandas de  
451 Neumann (Buchwald, 1975) que são lamelas geminadas produzidas por choque (Figura 6 A).

452 Observou-se ainda a martensita (Figura 6B) – solução-sólida de ferro-carbono que  
453 forma cristais lenticulares - em textura intragranular.



454  
 455 Figura 6. Fases metálicas de Fe-Ni. A) Kamacita com linhas de Neumann e troilita zonada; B)  
 456 Taenita e martensita; C) Kamacita hachuriada e taenita negra; D) Taenita zonada; E)  
 457 Vestígios de cône drulo com inclusões de Fe-Ni.  
 458 *Figure 6. Fe-Ni metal phases. A) Kamacite with Neumann lines and zoned troilite; B) Taenite*  
 459 *and martensite; C) Hatched kamacite and black taenite; (E) Chondrule remnants with Fe-Ni*  
 460 *inclusions.*

461 Estes cristais de martensita são provavelmente resultantes da decomposição da taenita  
462 e sua presença é um indicador de distúrbios produzidos por choque sofrido pelo meteorito no  
463 espaço (Xie & Chen, 2015).

464

#### 465 3.2.1.4.2 Troilita

466

467 Esse sulfeto de ferro com fórmula geral  $FeS$  foi primeiramente observado pelo monge  
468 italiano Dominique Troili (Troili, 1766) no meteorito condrito Albareto que caiu na Itália em  
469 1766. Contudo, apenas em 1862 este sulfeto foi identificado como um novo mineral por  
470 Gustav Rose, que o denominou troilita em homenagem ao monge (Marvin, 2001). É um  
471 mineral muito comum nos meteoritos, porém de raríssima ocorrência na crosta terrestre.

472 A troilita apresenta-se no meteorito Rio do Pires em grãos arredondados de cor  
473 dourada, cuja composição química média consiste de 65,5% Fe e 34,5% S. Não foram  
474 observados efeitos de choque nos grãos de troilita examinados, a exemplo de mosaicismo,  
475 texturas intragranulares ou indícios de fusão por impacto (Figura 7).

476

#### 477 3.2.1.4.3 Cromita

478

479 Cromita ( $FeCr_2O_4$ ) é um mineral acessório muito comum em condritos, apresentando-  
480 se no meteorito Rio do Pires em cristais de formato irregular, sem fraturas ou deformações  
481 planares visíveis. Seu conteúdo médio de Cr chega a 57,8% (Figura 7B).

482

#### 483 3.2.1.4.4 Fosfatos

484

485 Fosfatos de cálcio como a cloroapatita e merrilita – quando presentes em meteoritos  
486 condriticos e acondritos – são potencialmente elegíveis para estudos geocronológicos  
487 baseados no sistema U-Pb. No meteorito Rio do Pires foram identificados cristais de  
488 whitlockita (merrilita) com a seguinte composição básica (teores em peso): CaO 44,03%,  
489  $P_2O_5$  41,25%, MgO 4,26% e  $Na_2O$  2,56% (~6 pontos analisados por EDS-MEV, Figura 5).

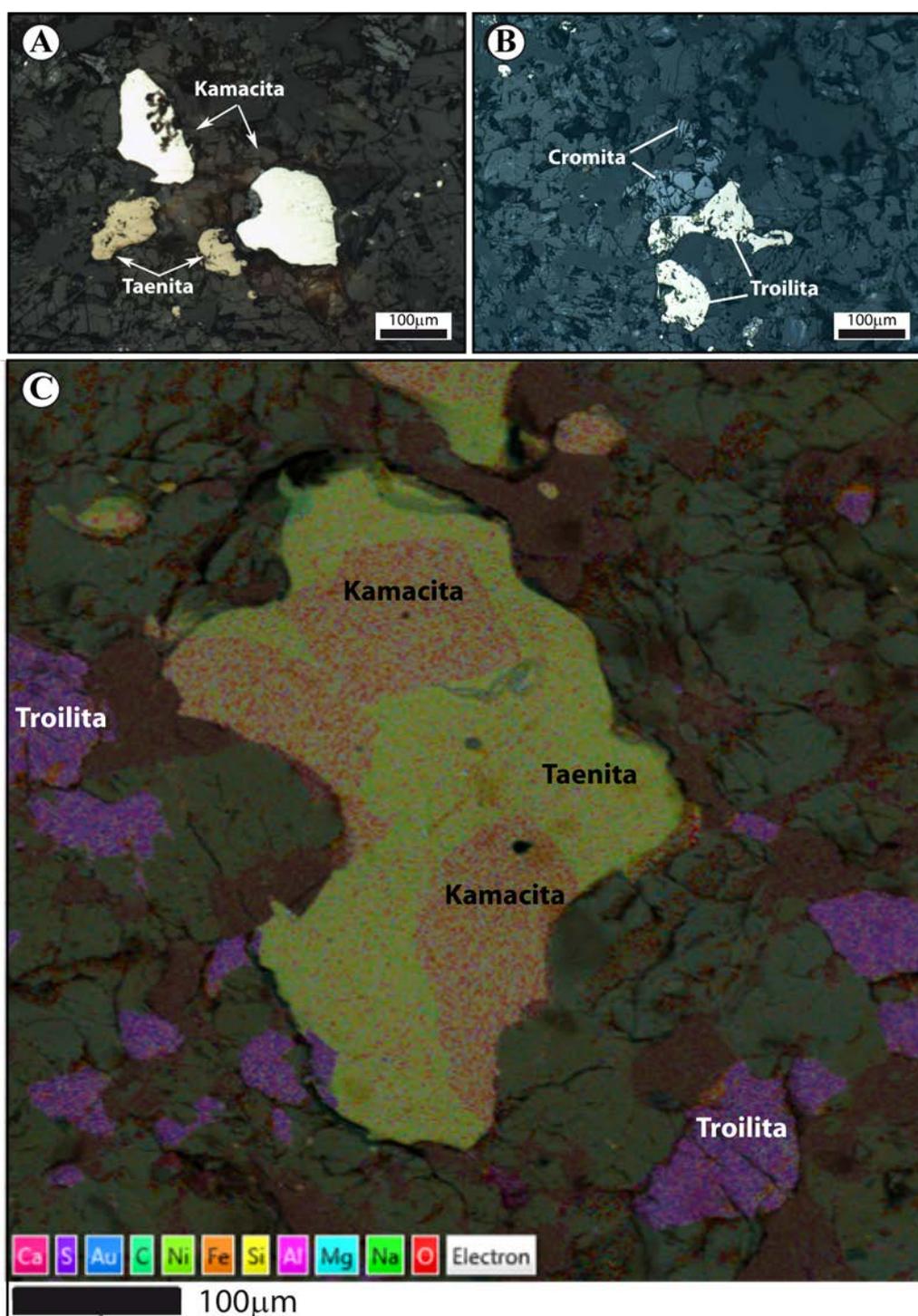
490

## 491 4. Discussão dos Resultados

492

493 Os estudos aqui apresentados permitem ampliar o conhecimento sobre o condrito Rio  
494 do Pires e confirmam sua classificação.

495



496

497 Figura 7. Imagens de texturas apresentadas por minerais opacos. A) Liga Fe-Ni e troilita; B)  
 498 Troilita e cromita; C) Mapa da distribuição dos elementos analisados por varredura no MEV.  
 499 Nestas imagens são destacados cristais de:troilita (Tr), kamacita (Kam) e taenita (Tae).

500 *Figure 7. Images of textures presented by opaque minerals. A) Fe-Ni alloy and troilite. (B)*  
 501 *Troilite and cromite. (C) Elemental mapping by scanning electron microscopy, showing*  
 502 *troilite (Tr), kamacite (Kam) and taenite (Tae) minerals.*

503 A textura, pobre em c ndrulos bem definidos, e o percentual da molécula da fayalita  
504 nos cristais de olivina (Fa<sub>25</sub>) são características dos meteoritos do grupo L. A existência de  
505 grãos de feldspatos maiores que 50 m e a concentra o de Co na kamacita (0,88%), permitem  
506 sub-classificar Rio do Pires como L6, de acordo com os critérios de Van Schmus & Wood  
507 (1967), ratificando assim a classifica o prévia realizada quando este condrito foi registrado  
508 no *Meteoritical Bulletin* (Wlotzka, 1994).

509

#### 510 4.1 Efeitos do Choque e Metamorfismo

511

512 St ffler *et al.* (1991) defenderam que os cristais de plagioclásio nos condritos  
513 ordinários preservam indicativos dos efeitos de choque. De acordo com estes autores, um  
514 choque de baixa intensidade resulta em extin o ondulatória; fei es de deforma o planar  
515 (PDFs) e isotropiza o parcial ocorrem em choques de intensidade moderada; e a completa  
516 transforma o em vidro diapl tico (maskelinita) acontece quando a rocha   submetida a  
517 choques de graus mais elevados.

518 A estrutura interna do meteorito Rio do Pires, observada com lupa em amostra de mão  
519 serrada, permite visualizar diversos veios (Figura 2B), os quais são indicadores de choque  
520 metamórfico decorrente de impacto sofrido no espaço. Os veios de choque observados no Rio  
521 do Pires são muito finos, retilíneos e simples, similares a fraturas, e comparáveis aos descritos  
522 no condrito Suizhou por Xie & Chen (2015).

523 Alguns outros efeitos sugestivos de choque metamórfico (Stoffler *et al.*, 1991; Rubin  
524 1997) são encontrados nos cristais de olivina e plagioclásio do meteorito Rio do Pires.  
525 Fraturas irregulares, mosaicismo e extin o ondulatória, tais como os visualizados, são  
526 parâmetros indicativos de choque de grau moderado, e classificariam Rio do Pires entre S3 e  
527 S4 na escala de Stoffler (1991) conforme Quadro 1. Contudo, a presença de veios de choque e  
528 maskelinita – um vidro proveniente da fusão do plagioclásio sob alta pressão – elevam o grau  
529 de choque de S3-S4 para S5, sinalizando que o mesmo foi submetido a condi es de alta  
530 pressão e temperatura, as quais podem ter alcançado valores entre 45-55 GPa e 600-850 C.

531 A dedu o com base nos dados obtidos difere da atual classifica o proposta por  
532 Brearley (Wlotzka, 1994), que atribui grau de choque S6 ao Rio do Pires nas informa es  
533 preliminares prestadas ao *Meteoritical Bulletin* para registro do meteorito. Essa nova  
534 proposi o, ao incluir a existência de múltiplos veios de fusão como fator determinante para a  
535 classifica o entre S4 e S5, complementa os resultados de Antonello & Zucolotto (2001), que  
536 sugeriram grau de choque entre S3 e S4.

537 Quadro 1. Graus progressivos de metamorfismo de impacto em condritos ordinários, segundo  
538 Stoffer *et al.*(1991).

539 *Chart 1. Progressive degrees of impact metamorphism in ordinary chondrites (Stoffer et al.,*  
540 *1991)*

Grau de Choque	Efeitos resultantes do pico de equilíbrio da pressão de choque em cristais de		Efeitos resultantes da mobilização local da T-P	Pressão do Impacto (Gpa)	Aumento Temperatura Pós-Choque (°C)
	Olivina	Plagioclásio			
<b>S1</b> Sem choque	Extinção ótica bem nítida e definida, fraturas irregulares		Nenhum	<4-5	10-20
<b>S2</b> Choque Muito Fraco	Extinção ótica ondulatória, fraturas irregulares		Nenhum	5-10	20-50
<b>S3</b> Choque Fraco	Feições planares, extinção ondulatória, fraturas irregulares	Extinção ondulatória	Veios de choque opacos, formação incipiente de bolsões de fusão, algumas vezes interconectados	15-20	100-150
<b>S4</b> Choque Moderado	Mosaicismo fraco, fraturas planares	Extinção ondulatória, isotropismo parcial, feições de deformação	Bolsões de fusão, veios de fusão interconectados, veios de choque opacos	30-35	250-350
<b>S5</b> Choque Forte	Mosaicismo forte, fraturas planares + feições de deformações planares	Maskelinita	Formação de bolsões de fusão pervasivos	45-55	600-850
<b>S6</b> Choque Muito Forte	Efeitos restritos a regiões localizadas no interior ou próximo a zonas fundidas		Formação de bolsões de fusão pervasivos	75-90	1500-1750
	Recristalização em estado sólido e manchas, ringwoodita, fusão	Fusão por choque (vidro normal)			
<b>Choque de Fusão</b>	Fusão total da rocha (rochas fundidas por impacto e brechas de fusão)				

541

542

#### 543 4.2. Efeitos do Intemperismo Terrestre

544

545 O meteorito Rio do Pires provavelmente foi coletado pouco tempo após a queda, haja  
546 vista apresentar baixo grau de intemperismo (Quadro 2) de acordo com os critérios da escala  
547 de Wlotzka (1993).

548 A superfície de corte do meteorito exhibe pontos de oxidação da liga Fe-Ni, com  
549 ocorrência em maior intensidade nas zonas adjacentes aos veios de choque, contudo sem

550 afetar a kamacita. Os óxidos formados percolam as fraturas dos minerais, revelando-se sob a  
 551 forma de manchas de tons amarelo-ocre que ocupam menos de 10% do volume total do  
 552 meteorito, características típicas do estágio W1 –ligeiramente intemperizado – em uma escala  
 553 cujo limite inferior é W0 e o superior W6.

554

555 Quadro 2. Graus progressivos de intemperismo em condritos ordinários (Wlotzka, 1993).

556 *Chart 2. Progressive weathering degrees in ordinary chondrites (Wlotzka, 1993).*

Graus de Intemperismo	Feições Observadas (em lâmina delgado-polida sob microscópio petrográfico)
W0	Não são visíveis sinais de oxidação no metal ou sulfeto. Uma mancha de limonita pode estar visível sob luz transmitida. Quedas recentes usualmente são desse grau de intemperismo, embora algumas possam ser classificadas como W1.
W1	Pequenas bordas de óxidos em volta do metal e troilita; pequenos veios de óxidos.
W2	Oxidação moderada do metal, cerca de 20-60% sendo afetado.
W3	Oxidação intensa do metal e sulfeto, 60-95% sendo substituídos.
W4	Completa oxidação (>95%) do metal e troilita, mas não há alteração nos silicatos.
W5	Início de alteração de silicatos máficos, principalmente ao longo de fissuras.
W6	Substituição massiva de silicatos por minerais argilosos e óxidos.

557

558

## 559 5. Conclusões

560

561 Os recentes avanços tecnológicos e instrumentais permitem re-analisar amostras de  
 562 meteoritos de maneira não destrutiva, proporcionando a obtenção de imagens de alta  
 563 resolução e análises químicas pontuais de melhor precisão e avaliar fases minerais diminutas  
 564 e de menor expressão modal, bem como feições submicroscópicas, tais como os veios de  
 565 impacto. As análises quantitativas e semi-quantitativas aqui realizadas por EPMA e EDS,  
 566 bem como as determinações modais realizadas nos estudos petrográficos, confirmam que o  
 567 espécime Rio do Pires estudado é um condrito ordinário do tipo petrológico L6, tendo como  
 568 minerais formadores do meteorito cristais de olivina rica na molécula de forsterita,  
 569 ortopiroxênio enstatita e oligoclásio. Os estudos aqui realizados confirmam essa classificação.  
 570 Os cristais de olivina, enstatita e oligoclásio perfazem cerca de 85% em volume do  
 571 meteorito. Os cristais de olivina e enstatita estão majoritariamente fragmentados, formando

572 texturas em mosaico, enquanto os cristais de plagioclásio foram parcial ou totalmente  
573 transformados em maskelinita.

574 Os minerais de Fe-Ni (kamacita, taenita e plessita), troilita e fosfetos (merrilita) são os  
575 acessórios mais comuns neste condrito. Cromita ocorre em pequenas quantidades. Por outro  
576 lado, a identificação do fosfato whitlockita (merrilita) entre as fases minerais dessa rocha  
577 pode viabilizar estudos posteriores para a determinação da idade de formação do corpo  
578 parental através do sistema cronológico U-Pb.

579 Várias texturas observadas são características de metamorfismo de impacto. Além  
580 disto, o metamorfismo térmico alterou significativamente o condrito Rio do Pires textural e  
581 composicionalmente, levando à recristalização dos côndrulos, com perda de nitidez das  
582 bordas e homogeneização dos minerais dos côndrulos e matriz marcada pela ausência de  
583 zoneamentos químicos significativos.

584 Brearley propôs para o condrito Rio do Pires o grau de choque 6 (Wlotzka, 1994).  
585 Contudo, devido às texturas em cristais de olivina e plagioclásio, a formação da maskelinita, o  
586 fraco mosaicismo, e a presença de fraturas planares, somadas à ausência de ringwoodita e  
587 majorita levam a advogar para esta rocha um grau de choque S4-S5, reforçando a sugestão de  
588 Antonello & Zucolotto (2001), que propuseram um grau de choque mais fraco que o  
589 originalmente adotado no processo de registro desse meteorito.

590 A presença de veios de choque, em associação com as feições observadas nos cristais  
591 de olivina e enstatita – são indicadores das colisões que o corpo parental sofreu em tempos  
592 muito anteriores à queda dessa amostra na Terra.

593

594

595 **Agradecimentos:** Os autores expressam aqui seus agradecimentos aos técnicos e pesquisadores do  
596 Labsonda da UFRJ, Laboratório Multiusuário da UFS, Laboratório Multiusuário de Microscopia  
597 Eletrônica (LAMUME) do IF-UFBA, Museu Nacional, Museu Geológico da Bahia, e ao Laboratório  
598 de Preparação e Análise de Amostras do Serviço Geológico do Brasil (CPRM-Salvador) pela  
599 preparação de amostras e análises realizadas.

600 Este trabalho conta com recursos dos projetos GeoLogar: Ciências da Terra para a Sociedade  
601 (Processos 559013/2009-4 do CNPq e TO: PES 0056/2011 da FAPESB). Débora Rios e Herbet  
602 Conceição agradecem ao CNPq pelas bolsas de produtividade em pesquisa. Murilo Gomes agradece  
603 ao SISBIC-UFBA pela oportunidade de desenvolver estágio de iniciação científica como aluno  
604 voluntário.

605

606 **Referências bibliográficas**

- 607
- 608 Amelin Y., Krot A.N., Hutcheon I.D. & Ulyanov A.A. 2002. Lead isotopic ages of chondrules  
609 and calcium-aluminum-rich inclusions. *Science*, 297:1678-1683.
- 610 Buchwald, V.F. 1975. Handbook of iron meteorites: Their history, distribution, composition,  
611 and structure. Berkeley, University of California Press. Vols. 1,2, 3.
- 612 Antonello, L.L. & Zucolotto, M.E. 2001. Mineralogy and petrography of the L6 chondrite Rio  
613 do Pires, Brazil. *Acta Microscopica*, 3: 234-234.
- 614 Hewins, R.H & Connolly, H.C. Jr. 1996. Peak temperatures of flash-melted chondrules. In: R.  
615 H. Hewins *et al.* (Eds). *Chondrules and the protoplanetary disk*. Cambridge University,  
616 Cambridge, p. 197-204.
- 617 Krot, A.N., Keil, K., Goodrich, C.A., Scott, R.D. & Weissberg, N.K. 2005. Classification of  
618 meteorites, In: A.M. Davis (Ed.) *Meteorites, comets and planets, Vol.1 Treatise of*  
619 *Geochemistry* (Eds) H.D. Holland & K.K. Turekian(Eds), Elsevier-Pergamon, Oxford:  
620 p. 83-128.
- 621 Marvin, U.B. 2001. The fall at Albareto, 1766: Described as volcanic by Domenico Troili.  
622 *Meteoritics & Planetary Science*, 36(S9):A123.
- 623 Meteoritical Bulletin Database. Disponível em: <<http://www.lpi.usra.edu/meteor/index.php>>  
624 Acesso em: 13 jan. 2017.
- 625 National Institutes of Health. 2013 *Application ImageJ* disponível em <https://imagej.nih.gov/ij/>
- 626 Oshtrakh, M.I., Petrova, E.V., Grokhovsky, V.I. & Semionkin, V.A. 2008. A study of ordinary  
627 chondrites by Mössbauer spectroscopy with high-velocity resolution. *Meteoritics &*  
628 *Planetary Science*, 43: 941–958.
- 629 Rubin, A.E. 1997. Mineralogy of Meteorite Groups. *Meteoritics & Planetary Science* 32:231-  
630 247.
- 631 Stoffler, D., Keil, K. & Scott E.R.D. 1991. Shock metamorphism of ordinary chondrites.  
632 *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 3845-3867.
- 633 Troili, D. 1766. Regionamento della caduta di un sasso. Modena. Soliani, 43p.
- 634 Van Schmus W.R. & Wood J.A. 1967. A chemical-petrologic classification for the chondritic  
635 meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31: 747–765.
- 636 Weissberg, M.K., Smith, C., Benedix, G., Herds, D.K., Righter, K., Haack, H., Yamaguchi, A.,  
637 Righter, K., Haack, H. Yamaguchi, A., Y., Aoudjehane, H.C. & Grossman, J.N. 2009.  
638 The Meteoritical Bulletin, No. 96, September 2009. *Meteoritics and Planetary Science*,  
639 44(9): 1365-1397.

- 640 Wang R.J., Qiu J.R. & Chen J.C. 1990. A preliminary study of the Suizhou meteorite, In: A  
641       synthetical study of Suizhou meteorite. Publishing House of the China University of  
642       Geosciences, Wuhan: p. 12-19.
- 643 Wlotzka, F. 1993. A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, 28(3): 460-460
- 644 Wlotzka, F. 1994. Meteoritical Bulletin 77, 1994 November. *Meteoritics*, 29(6): 891-897.
- 645 Xie, X.& Chen, M. 2015. *Suizhou meteorite: mineralogy and shock metamorphism*. Berlin,  
646       Springer-Verlag Berlin Heidelberg and Guangdong Science, 257 p.

**CAPÍTULO 3**

**ARTIGO SOBRE**

**METEORITO PALMAS DE MONTE ALTO**

---

Carvalho, W.P., Rios, D.C., Zucolotto, M.E., Conceição, H., Araújo, A.J.S., 2017. **O Meteorito Palmas de Monte Alto: Aspectos Petrográficos e Mineraloquímicos**. Revista Geologia USP. Série Científica (submetido).

## **O Meteorito Palmas de Monte Alto: Aspectos Petrográficos e Mineraloquímicos**

*The Palmas de Monte Alto Meteorite: Mineral chemistry and petrographic features*

O Meteorito Palmas de Monte Alto

Wilton Pinto de Carvalho<sup>1,2</sup>, Débora Correia Rios<sup>1,2</sup>, Maria Elizabeth Zucolotto<sup>2,3</sup>, Herbet Conceição<sup>1,2,4</sup>, Acácio José Silva de Araújo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia (PPGEO-UFBA) ([wilton@atarde.com.br](mailto:wilton@atarde.com.br), [ajs.araujo@hotmail.com](mailto:ajs.araujo@hotmail.com)).

<sup>2</sup> Grupo de Pesquisa Laboratório de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral (GPA) ([dcrios@ufba.br](mailto:dcrios@ufba.br)).

<sup>3</sup> Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro (MN-UFRJ) ([zucolotto@globocom](mailto:zucolotto@globocom)).

<sup>4</sup> Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias da Universidade Federal de Sergipe (PGAB-UFS) ([herbet@pq.cnpq.br](mailto:herbet@pq.cnpq.br)).

Dados do autor principal: Rua Lafayette Velloso – Condomínio Jardim Gantois, Qd.D, Casa 3. Jaguaribe. Salvador, Bahia. 41613-076.

Fone: (71) 98894-8744

Nº de palavras: 6.767

Total de figuras: 08

Total de tabelas: 05

## RESUMO

Diversos parâmetros têm sido utilizados para classificação dos meteoritos de ferro, principalmente a mineralogia e as propriedades químicas e estruturais. Este artigo apresenta esta seqüência de parâmetros classificatórios, ampliando e detalhando os dados disponíveis sobre o meteorito Palmas de Monte Alto, um siderito achado antes de 1955, e que hoje representa um dos cinco espécimes que compõem a coleção de meteoritos do estado da Bahia. Ele é constituído por uma única massa de 97 kg que apresenta alto estágio de oxidação em locais onde a crosta foi removida. Sua mineralogia inclui kamacita, taenita, plessita, bem como fases minerais secundárias tais como o óxido de Fe-Ni akaganeíta. Estão presentes também nesse meteorito minerais acessórios de ocorrência comum em ligas de Fe-Ni de origem espacial, isto é, schreibersita, cromita e troilita, tendo sido identificada uma rara solução sólida de ortofosfatos de Fe-Mn, composta pelos minerais heterosita-purpurita ou sarcopsida-graftonita como membros extremos. A largura média de suas lamelas de kamacita ( $0,95 \pm 0,15$  mm) permite classificá-lo estruturalmente como um octaedrito médio, com um padrão Windmasttaten médio e bem definido. Seus teores de Ni (9,40 wt%) e Co (0,46 wt%) comparados aos elementos-traço Ga (22 ppm), Ir (0,70 ppm), As (16,00 ppm) e Au (1,70 ppm), recomendam a inclusão desse meteorito no grupo químico IIIAB.

Palavras chave: Meteorito; Ferro; Níquel; Palmas de Monte Alto

## ABSTRACT

Several parameters have been used to classify iron meteorites, mainly mineralogy and chemical and structural properties. This paper presents these classificatory parameters allowing a more detailed view to enlarge the knowledge about the Palmas de Monte Alto meteorite. This siderite was found before 1955, being one of the five specimens that compose the Bahia State meteorite collection. It consists of a single mass of 97 kg which shows a high stage of oxidation in places where the crust has been removed. Its mineralogy includes kamacite, taenite, plessite, as well as secondary mineral phases such the Fe-Ni oxide akaganeite. There are also accessory minerals of common occurrence in Fe-Ni alloys of spatial origin like schreibersite, chromite and troilite, and a rare solid solution of Fe-Mn orthophosphates composed by the minerals heterosite-purpurite or sarcopsida-graftonite as extreme members. The average width of its bands of kamacita ( $0.95 \pm 0.15$  mm) allows classifying it structurally as a medium octahedrite, with a medium and well defined Windmasttaten pattern. Its contents of Ni (9.40 wt %) and Co (0.46 wt %) – compared to trace-elements Ga (22 ppm), Ir (0.70 ppm), As (16.00 ppm) and Au (1.70 ppm) – recommends the inclusion of this meteorite in the chemical group IIIAB.

Keywords: Meteorite; Iron; Nickel; Palmas de Monte Alto

## INTRODUÇÃO

O meteorito Palmas de Monte Alto (PMA), objeto deste artigo, um dos cinco espécimes da Coleção Baiana de Meteoritos, foi achado pelo lavrador Francisco da Cruz no topo da Serra de Monte Alto, antes de 1955 e removido para a cidade de Palmas de Monte Alto. Trata-se de uma massa de formato irregular composta de ferro e níquel e 97 kg de peso.

Exceto pelas informações preliminares apresentadas pela Dra. Elizabeth Zucolotto para registro desse siderito (Weisberg, 2009) e de um resumo integrante dos anais da 72ª Reunião Anual da Sociedade Meteorítica (Zucolotto e Riffi, 2009) não há estudos publicados sobre esse meteorito. Os dados preliminares levaram o meteorito Palmas de Monte Alto a ser classificado como um octaedrito médio do grupo IIIAB.

Este artigo propõe-se a apresentar análises mineraloquímicas e estruturais sobre o PMA, que permitam discutir sua composição química, texturas e estruturas primárias e secundárias, e assim colaborar para a redução da lacuna de conhecimento sobre os meteoritos da coleção brasileira.

## A METEORÍTICA NO BRASIL E NO MUNDO

Os meteoritos começaram a ser estudados cientificamente no final do século XVIII quando foi publicado em 1794 o livro intitulado “Sobre a origem do ferro de Pallas e outros similares, e alguns fenômenos naturais associados” de autoria do físico alemão Ernst Florenz Friedrich Chladni (Chladni, 1794). Esse autor foi o primeiro a sugerir origem espacial para fragmentos de ferro e rochas com características macroscópicas muito diferentes dos ambientes geológicos onde foram achados. Nos dois séculos seguintes, a Meteorítica firmou-se como uma ciência multidisciplinar dedicada ao estudo e classificação de amostras geológicas extraterrestres que incluem não apenas meteoritos, mas também rochas lunares, poeira interplanetária e partículas oriundas de asteróides e cometas. Atualmente estes materiais são prospectados por sondas espaciais e metodologias e técnicas analíticas – bem como esquemas classificatórios específicos – foram desenvolvidas. Nestas rochas reside a possibilidade de descobertas de novos minerais e ocorrências de elementos químicos nativos.

Os meteoritos caem aleatoriamente nos continentes e oceanos. O elevado número de achados na Antártida e desertos estão relacionados às condições de baixíssimo intemperismo reinantes nessas regiões e a uma natural concentração ao longo de milhares de anos. Nessas circunstâncias, as coleções de meteoritos existentes nos principais museus do mundo foram exaustivamente estudadas e, nos últimos vinte anos, milhares de novos espécimes foram descobertos nas geleiras da Antártida e nos desertos da África, Oriente Médio e América do Sul que passaram a integrar o banco de dados mantido pelo *Meteoritical Bulletin*. Este boletim é a publicação responsável pelo registro oficial de amostras e espécimes de rochas e ferro espaciais, cujo número totalizava em janeiro de 2017, 55.529 diferentes exemplares (*Meteoritical Bulletin Database*, 2017). A distribuição mundial dos meteoritos, em termos de quantidade de espécimes demonstra larga predominância do tipo rochoso (97%) em relação aos férreos e palasitos (3%). A coleção brasileira de meteoritos é modesta em termos quantitativos, contando com 69 exemplares em dezembro de 2016, sendo 33 espécimes do tipo rochoso (47,06%), 35 de ferro (47,82%) e um único misto, um palasito composto de ferro e olivina (1,47%).

Os meteoritos brasileiros incluem exemplares famosos como o Bendegó e o Angra dos Reis, e é relativamente diversificada e equilibrada em termos de meteoritos rochosos e férreos. Contudo, dada a grande extensão territorial do Brasil e a representatividade de coleções de outros países com área similar, como os Estados Unidos (1784 exemplares) e Austrália (682 exemplares), o número é muito pequeno. Essa discrepância entre a coleção brasileira e a estatística mundial ocorre também em coleções de outros países e deve-se ao mais fácil reconhecimento dos meteoritos metálicos pelo leigo bem como à sua alta resistência ao intemperismo, o que lhes confere uma longa permanência na superfície terrestre até serem levados a instituições de pesquisa para identificação.

No território brasileiro as quedas e achados contemplam 14 estados, com Minas Gerais ocupando o primeiro lugar com 20 exemplares (29%), seguida pelo Rio Grande do Sul (8), Goiás (7), São Paulo (6), Bahia (5), Rio de Janeiro, Santa Catarina (4), Ceará (4), Paraná (3), Rio de Janeiro (4), Maranhão (2), Pernambuco (2), Mato Grosso (2), Pará (1), e Rio Grande do Norte (1). Não há explicação científica para a maior concentração de meteoritos em Minas Gerais, podendo-se aventar a possibilidade de uma maior presença de geólogos e mineradores naquele estado favorecer o reconhecimento dos achados e quedas. Além disto, a ausência de pesquisas científicas sobre a maioria dos espécimes da coleção brasileira reflete o fato da meteorítica como ciência ser muito pouco difundida no Brasil.

## ASPECTOS HISTÓRICOS

Em artigo para a Revista do Observatório (Nacional), o geólogo Orville Derby (Derby, 1888) mencionou um comunicado recebido pelo Museu Nacional sobre um provável meteorito de ferro, similar ao Bendegó, achado na Serra de Monte Alto, no sudoeste da Bahia. A ocorrência nunca foi investigada ou comprovada até que, em 2007, o professor de paleontologia Douglas Riff, da Universidade Estadual do Sudoeste Baiano – UESB, enquanto em missão de campo, teve sua atenção despertada por relatos da existência de uma massa de ferro guardada na Escola Municipal Marcelino Neves, no município de Palmas de Monte Alto. O Dr. Riff notou muitas semelhanças entre a massa de ferro que lhe foi apresentada e o meteorito Bendegó exposto no Museu Nacional, no Rio de Janeiro, levando-o a comunicar o fato à Dra. Zucolotto que, de imediato, se prontificou a viajar à Bahia para ir à cidade de Palmas de Monte Alto, acompanhada pelo primeiro autor deste artigo, a fim de coletar amostras e levantar informações sobre o achado. A missão de campo ocorreu na semana de 02 a 05/07/2008, constatando-se realmente tratar-se de um meteorito de ferro que poderia ser correlacionado àquele mencionado por Derby (Derby, 1888).

O meteorito foi achado pelo lavrador Francisco da Cruz quando extraía seiva de mangabeiras no topo da Serra de Monte Alto em um ponto próximo às coordenadas 14°22'08" Sul e 43°01'02" Oeste. De acordo com o relato do Sr. Francisco, a sua atenção foi despertada por uma “pedra” de formato irregular “parecida com uma máquina de costurar modelo antigo”. O Sr. Francisco bateu na “pedra” com a ferramenta que usava para sangrar a mangabeira, produzindo um som metálico característico de golpes de ferro contra ferro. Tentou então mover a “pedra” e não conseguiu devido ao seu avantajado peso. Apesar de não saber precisar exatamente quando isso aconteceu, o Sr. Francisco informou que encontrou o meteorito quando ele era rapazinho, antes de se casar.

Com base na Certidão de Casamento, Francisco da Cruz nasceu em 1924 e se casou em 1955. Assim, o ano do achado foi antes de 1955 e, se considerarmos “rapazinho” como uma pessoa de 20 anos, o período estimado do achado ficaria entre 1940 e 1954. A probabilidade de o achado ter ocorrido na década de 1940 é reforçada por outros comentários de moradores antigos da cidade de Palmas de Monte Alto que calculam em cerca de 60 anos o tempo em que a “pedra” chegou ao município.

Para remover a massa de ferro de 97 kg, Sr. Francisco contou com a ajuda de outros dois homens que transportaram o meteorito para a cidade de Palmas de Monte Alto usando um cobertor forte para improvisar uma rede onde a peça foi depositada e suspensa por uma vara comprida e resistente apoiada nos ombros. Durante muitos anos o meteorito permaneceu sob a guarda da Escola Municipal Marcelino Neves, estando desde 2008 sob a guarda da Prefeitura, depositado na Secretaria da Educação.

## LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

O município de Palmas de Monte Alto dista 835 km de Salvador, por via rodoviária. O acesso é feito através das BR 324 (Salvador – Feira de Santana), BR 116 (Feira de Santana – Vitória da Conquista), e BA 030 (Vitória da Conquista – Palmas de Monte Alto).



Figura 1. Mapas de (A) Localização do Estado da Bahia no Continente Sulamericano, (B) Situação do Município de Palmas de Monte Alto no Estado da Bahia.

## METODOLOGIA APLICADA

Em missão de campo entrevistou-se o Sr. Francisco da Cruz, descobridor do espécime (Figura 2A). Duas fatias (Figura 2B) foram retiradas da massa principal (Figura 2C), as quais foram objeto deste estudo. O meteorito foi pesado, dimensionado, fotografado e analisado macroscopicamente no local onde a peça está guardada (Figura 2C). Um fragmento de aproximadamente 100 gramas foi doado para o acervo do Museu Nacional (UFRJ).

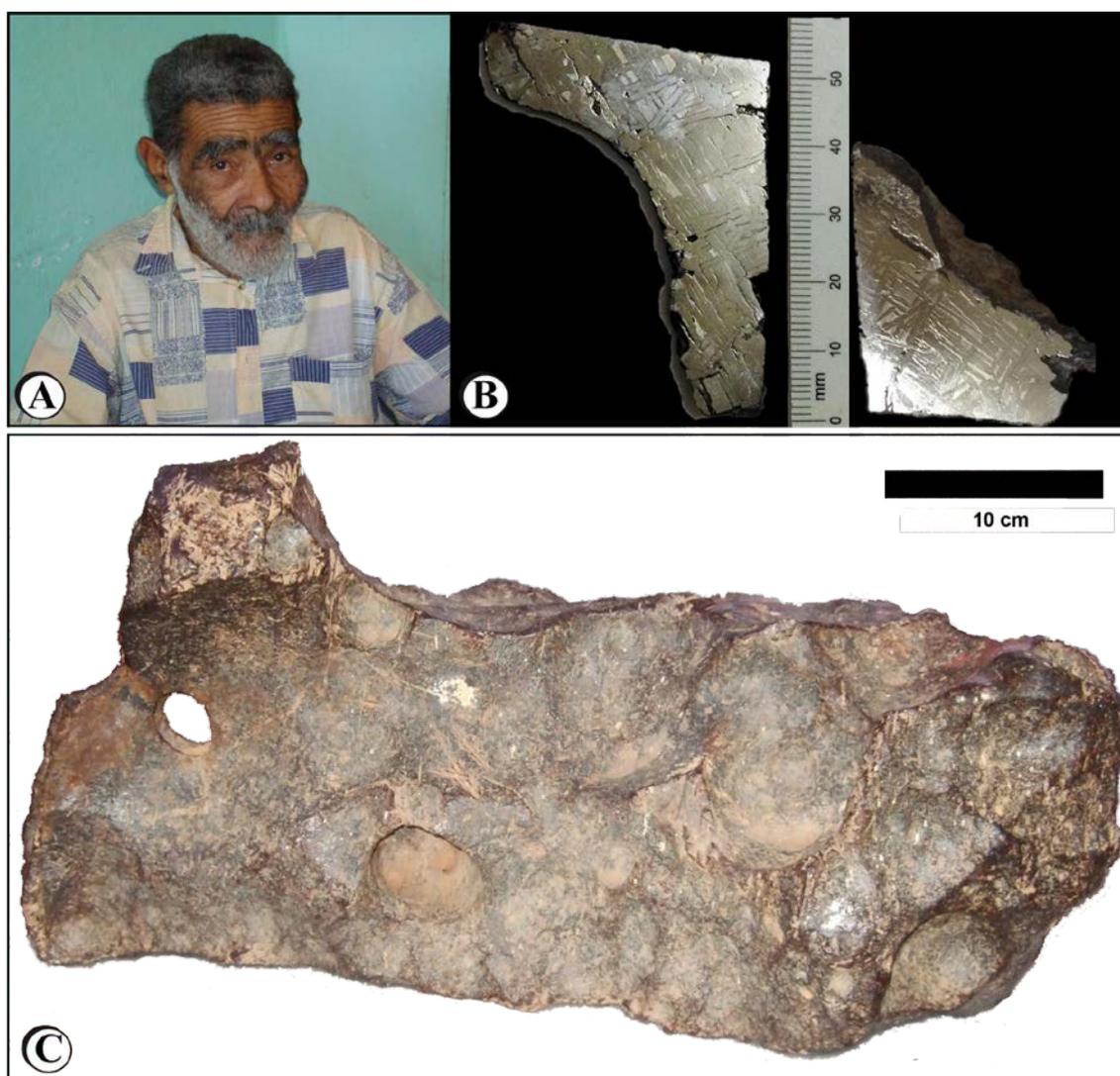


Figura 2. Meteorito Palmas de Monte Alto: (A) Sr. Francisco da Cruz, o descobridor. (B) Fatias retiradas da massa principal e utilizadas nesse estudo. (C) Massa principal.

As amostras foram polidas e atacadas com nital (solução de  $\text{HNO}_3$  e álcool a 2%) para realçar as características metalográficas do meteorito (Figura 2B) e permitir detalhado exame de seus minerais através da microscopia petrográfica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise por sonda eletrônica (EPMA).

De um dos fragmentos foi retirada uma fatia delgada, a qual foi polida com pasta de diamante e também atacada com nital, sendo utilizada para análises MEV.

Neste estudo, os equipamentos e laboratórios utilizados para as análises foram:

- a) Microscópio petrográfico Zeiss Axioskop 40 equipado com AxioCam de alta resolução e aplicativo Axiovision versão 4.7.
- b) Microscópio de microdureza Vickers do Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro (IG-UFRJ).
- c) Microscópio eletrônico de varredura Tescan, modelo Vega3 com WDS/EDS acoplado, localizado nos laboratórios multiusuários da Universidade Federal de Sergipe (UFS).
- d) Microscópio eletrônico de emissão (SEM) JEOL 6610 LV, com detectores de cintilação, catodoluminescência e BSEI acoplados, do Departamento de Geologia da Universidade de Toronto.
- e) Microsonda eletrônica JXA-JEOL 8230, equipada com WDS/EDS e localizada no Labsonda do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IG-UFRJ), com aceleração potencial 15 kV e 15 nA. A precisão estimada para elementos desse equipamento é melhor que 3% para elementos maiores e cerca de 10% para o sódio.

## PETROGRAFIA E MINERALOQUÍMICA

### Aspectos Macroscópicos

O meteorito Palmas de Monte Alto tem formato irregular, medindo 49,5 cm de comprimento por 17,8 cm de altura em sua parte central. Em uma das extremidades apresenta uma protuberância com aproximadamente 8 cm de comprimento, elevando a altura para 25,5 cm (Figura 2C). A massa principal pesa 97 kg.

A peça é revestida por uma crosta de fusão de cor marrom com sinais de intensa oxidação, principalmente na mencionada protuberância onde a crosta foi inteiramente removida. O meteorito exibe numerosos regmalitos arredondados ou alongados, cujas dimensões variam de 20 a 100 mm de diâmetro (Figura 2C).

Na extremidade da protuberância há um furo de formato oval medindo 33 x 24 mm e que atravessa toda a massa metálica. Há outro furo circular com 47 mm de diâmetro localizado nas proximidades da extremidade que tem a protuberância (Figura 2B). Esse segundo furo não atravessa toda a massa como o primeiro. Provavelmente ambos eram originalmente preenchidos pelo mineral troilita (FeS) que se vaporizou durante a passagem do meteorito pela atmosfera terrestre, tendo em vista seu baixo ponto de fusão (1.188°C) em relação ao da liga Fe-Ni que funde a 1.517°C aproximadamente, podendo essa temperatura variar um pouco em função da concentração de Ni. A superfície interna do meteorito observada após serragem de uma pequena fatia apresenta cor cinza-metálica semelhante ao aço.

## Análise Estrutural

A estrutura de um meteorito de ferro é determinada com base em uma propriedade primária destes espécimes, o conteúdo de Ni, e uma propriedade secundária, a história termal, de forma que meteoritos que não possuem qualquer ligação genética podem ainda assim apresentar a mesma estrutura. Hutchinson (2004) explica que por causa disto muitos confundem a classificação estrutural com a química.

A classificação estrutural permitiu a separação inicial destes meteoritos em três classes distintas (Tabela 1). Em temperaturas do sub-solidus ( $>910^{\circ}\text{C}$ ) o metal forma o mineral do sistema cúbico de face-centrada, a  $\gamma$ -taenita, ou austenita. Durante o resfriamento, metais com  $>5.7\%$  de Ni levam a transformação da taenita em um mineral do sistema cúbico de corpo-centrado, a  $\alpha$ -kamacita. Porém se o conteúdo de Ni for  $>5.7\%$  as duas fases são estáveis o que permite a nucleação e o crescimento de kamacita pobre em Ni como lamelas paralelas aos planos octaédricos da taenita. O conteúdo de Ni e as taxas de resfriamento determinam portanto a estrutura dos meteoritos de ferro (Hutchinson, 2004). Entende-se que, quanto maior o conteúdo de Ni, mais rápido o resfriamento da liga metálica, e mais estreitas as bandas de kamacita.

A classificação estrutural dos meteoritos de ferro (Tabela 1) fundamenta-se na largura das lamelas ou bandas de kamacita, evidenciadas quando uma superfície interna polida é tratada com nital. Essa propriedade, denominada padrão Widmanstätten, foi descoberta independentemente por Alois von Widmanstätten em 1808 e Guglielmo Thompson em 1804 (Buchwald, 1975).

Tabela 1. Classificação estrutural dos meteoritos metálicos baseada nas propostas de Tschermark (1883), Brezina (1885, 1904), Buchwald (1975) e Scott e Wasson (1975) (apud Norton, 2008). A tarja cinza indica o grupo classificatório do Meteorito Palmas de Monte Alto.

Classe Estrutural	Textura	Bandas de Kamacita (mm)	Níquel (%)	Grupo Químico Correlato
<b>Hexaedritos (HEX)</b>	Linhas de Neuman	> 50	4,5 - 6,5	IIAB, IIG
<b>Octaedritos (O)</b>	Linhas de Widmanstätten			
	Muito Grosso (Ogg)	3,3 - 50	6,5 - 7,2	IIAB, IIG
	Grosso (Og)	1,3 - 3,3	6,5 - 8,5	IAB, IC, IIE, IIIAB, IIIE
	<b>Médio (Om)</b>	<b>0,5 - 1,3</b>	<b>7,4 - 10,3</b>	<b>IAB, IID, IIE, IIIAB, IIIF</b>
	Fino (Of)	0,2 - 0,5	7,8 - 12,7	IID, IIICD, IIIF, IVA
	Muito Fino (Off)	< 0,2	7,8 - 12,7	IIC, IIICD
	Plessitico (Opl)	< 0,2 - fios	Fios de Kamacita	IIC, IIF
<b>Ataxitos (D)</b>		Nenhuma	> 16,0	IIIF, IVB

Uma seção polida do meteorito Palmas de Monte Alto foi tratada com uma solução nital – uma mistura de ácido nítrico (2%) e álcool absoluto (98%) usada para atacar os componentes da liga de Fe-Ni do meteorito. O tratamento revelou uma estrutura Widmanstätten bem definida (Figura 3A, 3B), com lamelas de kamacita com largura média de  $0,95 \pm 0,15$   $\mu\text{m}$ , sem correção de orientação (Frost, 1965), e apresentando relação comprimento *versus* largura da ordem de 15 vezes. As cores visualizadas na imagem (Figura 3A) foram produzidas pela adição de sulfatos e sulfitos de potássio e sódio (Picral) na solução Nital e refletem as variações nos conteúdos de Ni e Fe no metal.

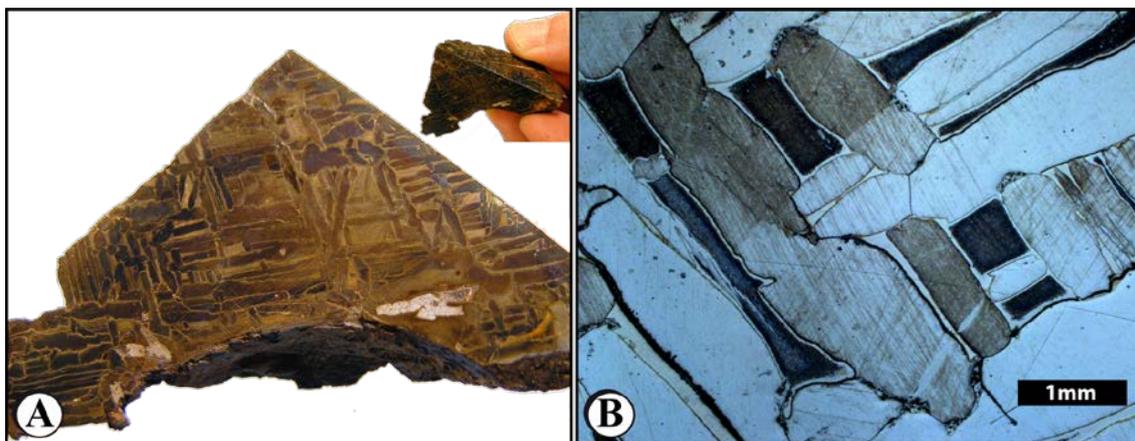


Figura 3. Padrão Widmannstätten no meteorito Palmas de Monte Alto. (A) Seção polida de fragmento atacado com picral. (B) Aspecto microscópico em luz refletida do padrão em seção polida atacada com nital.

Avaliando-se a fatia polida ao microscópio petrográfico, em luz refletida, observam-se numerosas linhas de Neumann (Figuras 4A e 4B) e kamacita hachurada, (Figura 4D) indicadoras de alterações estruturais resultantes de choque enquanto o meteoróide vagava pelo espaço. Bandas de kamacita com textura de subgrãos decorados com fosfetos também estão presentes (Figura 4C), assim como taenita e plessita – mistura de taenita com kamacita – e representam entre 25 e 35% da área examinada (Figuras 4D, 4E), apresentando-se sob as formas martensítica, negra, em rede, e ctenomórfica (Figuras 4E e 4F).

### Análises Petrográfica e Mineraloquímica

A composição dos meteoritos metálicos predominantemente consiste de uma liga Fe-Ni formada por dois minerais: kamacita e taenita. Além desses dois minerais básicos, esses meteoritos podem conter fases acessórias de cromita, minerais sulfetados e fosfatados e elementos naturais como Co e Cu (Norton, 1994).

Uma fatia polida do meteorito Palmas de Monte Alto que apresentava uma região com aderência de produtos de corrosão (Figura 5A) foi examinada sob o enfoque petrográfico macroscópico, na lupa, e por microscopia eletrônica (SEM) na

Universidade de Toronto e na Universidade de Sergipe. A fatia possui formato triangular com dimensões em torno de 4,5x 4,0 x 3,0 cm. O exame macroscópico revelou uma região oxidada com coloração ferrugem alaranjada-amarronzada e um veio preenchido (Figura 5A).

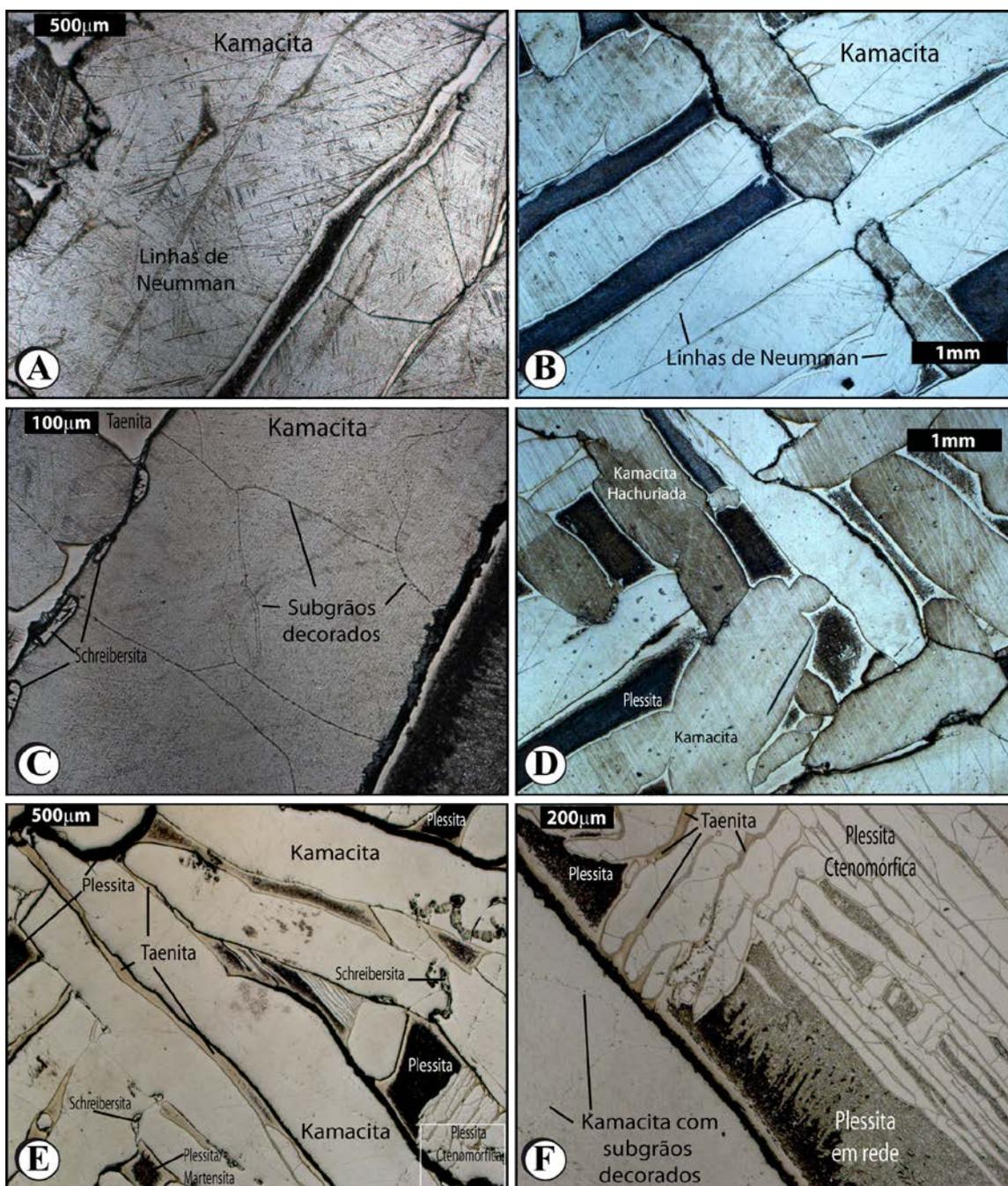


Figura 4. Liga metálica Fe-Ni no meteorito Palmas de Monte Alto. (A) (B) Kamacita com linhas de Neumann. (C) Kamacita com subgrãos decorados. (D) Kamacita hachurada. (E) Plessita ctenomórfica e martensítica. (F) Plessita ctenomórfica e “em rede” associada com taenita e kamacita com subgrãos decorados.

Sob o enfoque petrográfico, os exames microscópicos desta seção polida revelaram além das fases metálicas Fe-Ni – kamacita, taenita e plessita – inclusões de cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), troilita ( $\text{FeS}$ ), e schreibersita  $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$ ; Figuras 4C e 4E). Foram identificadas três variedades distintas de kamacita: (1) decorada com subgrãos de fosfetos (Figura 4C), (2) com lamelas *crosshatched* e (3) com estrutura  $\epsilon$  (epsilon). Esse último tipo evidencia efeitos de choques de alta intensidade.

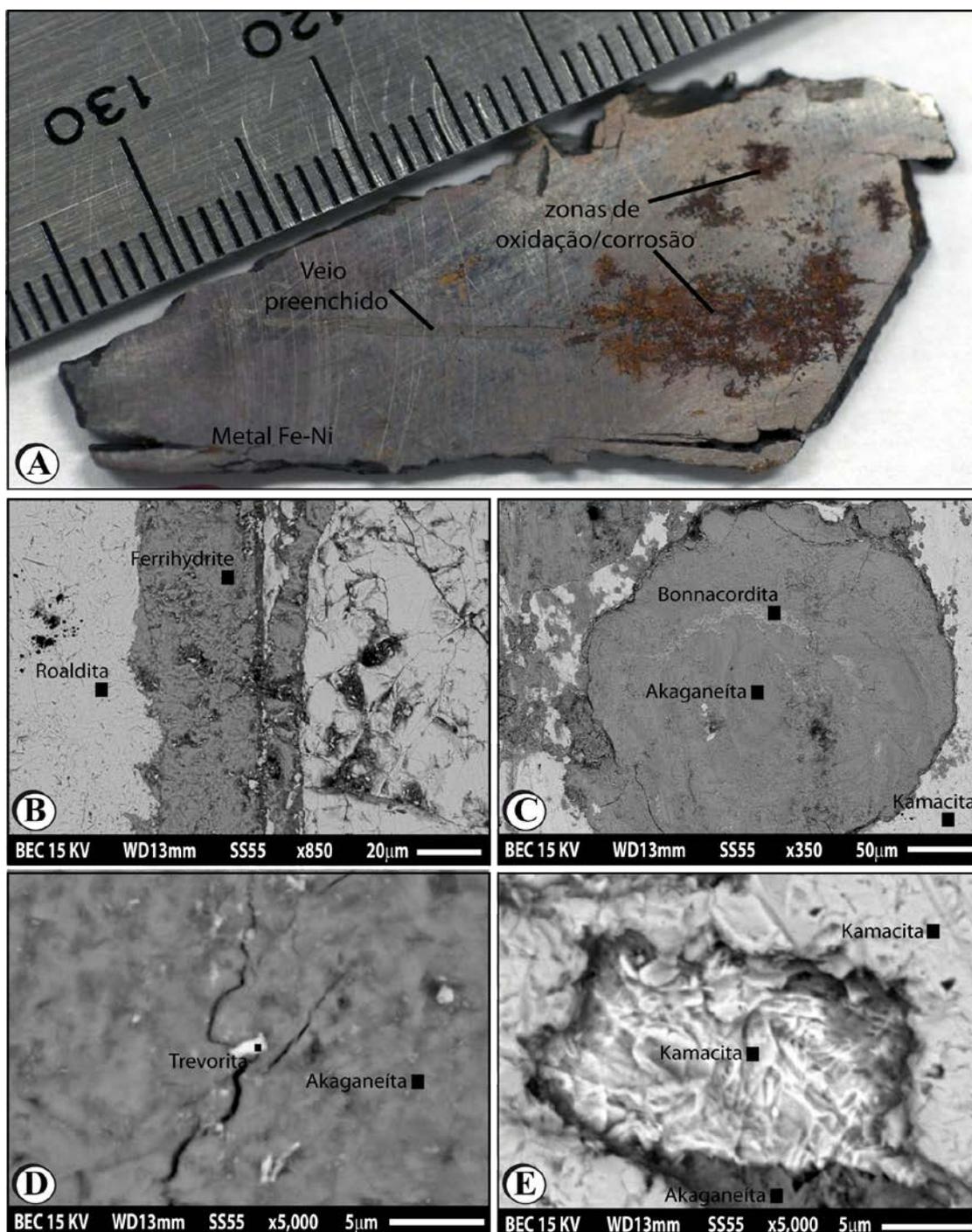


Figura 5. Imagens da fatia polida analisada por MEV. (A) Fatia polida analisada. (B) Placas de roaldita na kamacita e veio preenchido por ferrihydrita. (C) Cristal de akaganeíta com graduação para bonnacordita. (D) Inclusões de trevorita em akaganeíta. (E) Akaganeíta em contato com kamacita.

As análises por MEV permitiram, além de caracterizar a mineralogia principal, identificar minerais acessórios que ocorrem, quer como fases primárias, quer como resultados de processos secundários que afetaram a amostra após sua exposição na superfície terrestre. A tabela 2 sintetiza estes resultados.

Tabela 2. Resultado de análises semi-quantitativas para a mineralogia principal e acessória no meteorito de ferro Palmas de Monte Alto.

	n #	Fe (wt%)	Ni (wt%)	O (wt%)	Si (wt%)	Cl (wt%)	Na (wt%)	Mg (wt%)	Ti (wt%)	P (wt%)	C (wt%)	Al (wt%)
Minerais principais												
	3	89.89 a 91.50	8.50 a 10.11									
		kamacita alpha-(Fe,Ni)										
		Plessita										
		Taenita gama (Fe,Ni)										
Minerais acessórios												
	1	58.64	23.66							17.71		
		Scheibersita (Fe,Ni) <sub>3</sub> P										
	1	94.23	5.77									
		Roaldita (Fe,Ni) <sub>4</sub> N										
	1	89.37	10.63									
		Haxomita (Fe,Ni) <sub>23</sub> C <sub>6</sub>										
	1	65.26	34.74									
		Ferrihidrita (Fe <sub>10</sub> <sup>+3</sup> O <sub>14</sub> (OH) <sub>2</sub> )										
	1	58.33	19.26	22.41								
		NiFe <sup>+3</sup> O <sub>4</sub> (Trevorita)										
	1	30.04	38.90	31.05								
		Bonnacordita (Ni <sub>2</sub> FeBO <sub>3</sub> )										
	1		4.97								92.69	
		Grafita (C hexagonal)										
	1	38.10	49.03						12.30			
		Qandilita (Mg,Fe <sup>+2</sup> ) <sub>2</sub> (Ti,Fe <sup>+3</sup> ,Al)O <sub>4</sub>										
Minerais secundários	5	49.83 a 54.37	3.87 a 5.77	41.61 a 46.81						n.d. a 0.66		
		Akaganaita [Fe <sup>+3</sup> (O,OH,Cl)]										
	2	3.60 a 3.64	n.d.	56.00 a 57.24	10.02 a 10.81			0.84 a 0.94	2.59 a 3.18			11.30 a 11.70
		Ardennita (Mn <sup>+2</sup> ,Ca,Mg) <sub>4</sub> (Al,Mg,Fe) <sub>6</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>										
		(Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(AsO <sub>4</sub> VO <sub>3</sub> )(OH) <sub>6</sub>										

De acordo com as determinações utilizando EDS/MEV em oito cristais, o conteúdo de Ni na kamacita no meteorito Palmas de Monte Alto varia de 5,8 a 6,9%, em conformidade com os valores encontrados para kamacita dos membros do grupo IIIAB ( $5,5\% < \text{Ni} > 7,5\%$ ; Scott e Wasson, 1975). Na taenita e plessita, o teor desse elemento sobe para 18,1% em média, variando  $16,0 < \text{Ni} > 23,9\%$ , um pouco abaixo do limite inferior da média dos meteoritos de ferro IIIAB ( $25\% < \text{Ni} < 50\%$ ). Estas análises identificaram a presença da fase mineral roaldita ((Fe,Ni)<sub>4</sub>N), que se desenvolve como placas na fase kamacita nas proximidades do veio preenchido (Figura 5B). O mineral roaldita foi descrito por Nielsen e Buschwald (1981) nos meteoritos de Youndegin (IAB, Western Australia) e Jerslev (IIB, Dinamarca) e mais recentemente por Anthony et al. (1995) no meteorito Canyon Diablo (IAB, EUA).

Na zona oxidada (Figura 5A) as análises químicas associadas ao estudo petrográfico levaram à identificação de akaganeíta ( $[\text{Fe}^{+3}(\text{O},\text{OH},\text{Cl})]$ ; Figura 5C), um óxido de Fe-Ni que pode conter até 5% wt em Cl. Este mineral é considerado chave para a compreensão dos efeitos da corrosão em metais de meteoritos (Buchwald e Clarke Jr., 1988, 1989), já que com o passar do tempo este produto inicial da corrosão é convertido em goetita. A presença da akaganeíta sugere a existência de cloro na amostra. De acordo com Buchwald e Clarke Jr. (1989) o Cl não é nativo dos meteoritos, mas é atraído do ambiente pelas ligas de Fe-Ni devido à sua natureza eletroquímica. Estes autores advogam que os íons de Cl podem ser encontrados em fraturas praticamente invisíveis no interior de alguns espécimes de meteoritos de Fe e sua presença pode interferir nas análises de elemento-traço e nas datações que utilizam o sistema <sup>36</sup>Cl.

Na amostra estudada a akaganeíta está em contato com kamacita, apresenta cor ferrugem laranja a amarronzada (Figuras 5A, 5C). Os elevados teores de Fe implicam que havia no mineral 5-10% de H<sub>2</sub>O, o qual pode ter sido perdido durante a análise no SEM. Algumas zonas no cristal (Figura 5C) possuem uma possível gradação para bonnacordita (Ni<sub>2</sub>FeBO<sub>5</sub>) – um oxiborato de Fe-Ni – e inclusões de trevorita (NiFe<sup>+3</sup><sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Figura 5D). Testes experimentais (Sawicki, 2011) demonstram formação de bonnacordita por síntese hidrotermal de óxidos de Fe em condições supercríticas pela dissolução e re-precipitação de uma fase Fe-Ni de composição intermediária, o que pode ser acelerado pelo Ni produzido em reações de captura neutrônica termalmente induzidas. Faust e Fahey (1962) advogam que a presença da trevorita - uma solução sólida entre goetita-maghemita-trevorita - representa o estágio final de oxidação de meteoritos de ferro ricos em níquel.

Pequenos cristais atribuídos ao grupo da aenigmatita ((Na,Ca)<sub>4</sub>(Fe<sup>+2</sup>,Ti,Mg)<sub>12</sub>Si<sub>12</sub>O<sub>40</sub>) – um inossilicato de Na-Fe-Ti – foram identificados em pequenos aglomerados (Figura 5E). O grupo de minerais aenigmatita (Kuzmann, 1999) possui elevada densidade (>3.7), com dureza intermediária 5.5-6, e forma uma série de solução sólida com a wilkinsonita (Na<sub>2</sub>Fe<sup>+2</sup><sub>4</sub>Fe<sup>+3</sup><sub>2</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>20</sub>). Cosca *et al.* (1988) sugerem que a cristalização deste grupo de minerais está restrita a condições de baixas pressões e elevadas temperaturas. Sua presença em meteoritos foi descrita pela primeira vez por Ivanov e colaboradores (2003) no meteorito Kaidun.

O veio, identificado macroscopicamente, é preenchido por ferrihidrita (Fe<sup>+3</sup><sub>2</sub>O<sub>3</sub>·0.5(H<sub>2</sub>O)), um mineral secundário que se desenvolve em ambientes oxidantes.

A schreibersita  $(\text{Fe,Ni})_3\text{P}$ , identificada na análise petrográfica, também foi analisada por MEV/EDS, revelando conteúdos médios dos elementos Fe (57,2%), Ni (27,0%) e P (14,7%). A composição da schreibersita de Palmas de Monte Alto são coerentes com os teores observados nesse mineral em meteoritos de ferro: Fe 41,5 a 68,4%, Ni 10,1 a 42,6% e P 12,8 a 15,3% (Nriagu e Moore, 1984). Em associação com a schreibersita foram identificados cristais de barringerita  $((\text{Fe,Ni})_2\text{P})$ , que ocorrem nos núcleos da schreibersita.

Um cristal de coloração branca e preta, com formato irregular e medindo 1,64 mm em sua maior dimensão, destacou-se durante as observações petrográficas por apresentar-se incrustado em uma placa de kamacita (Figura 6A).

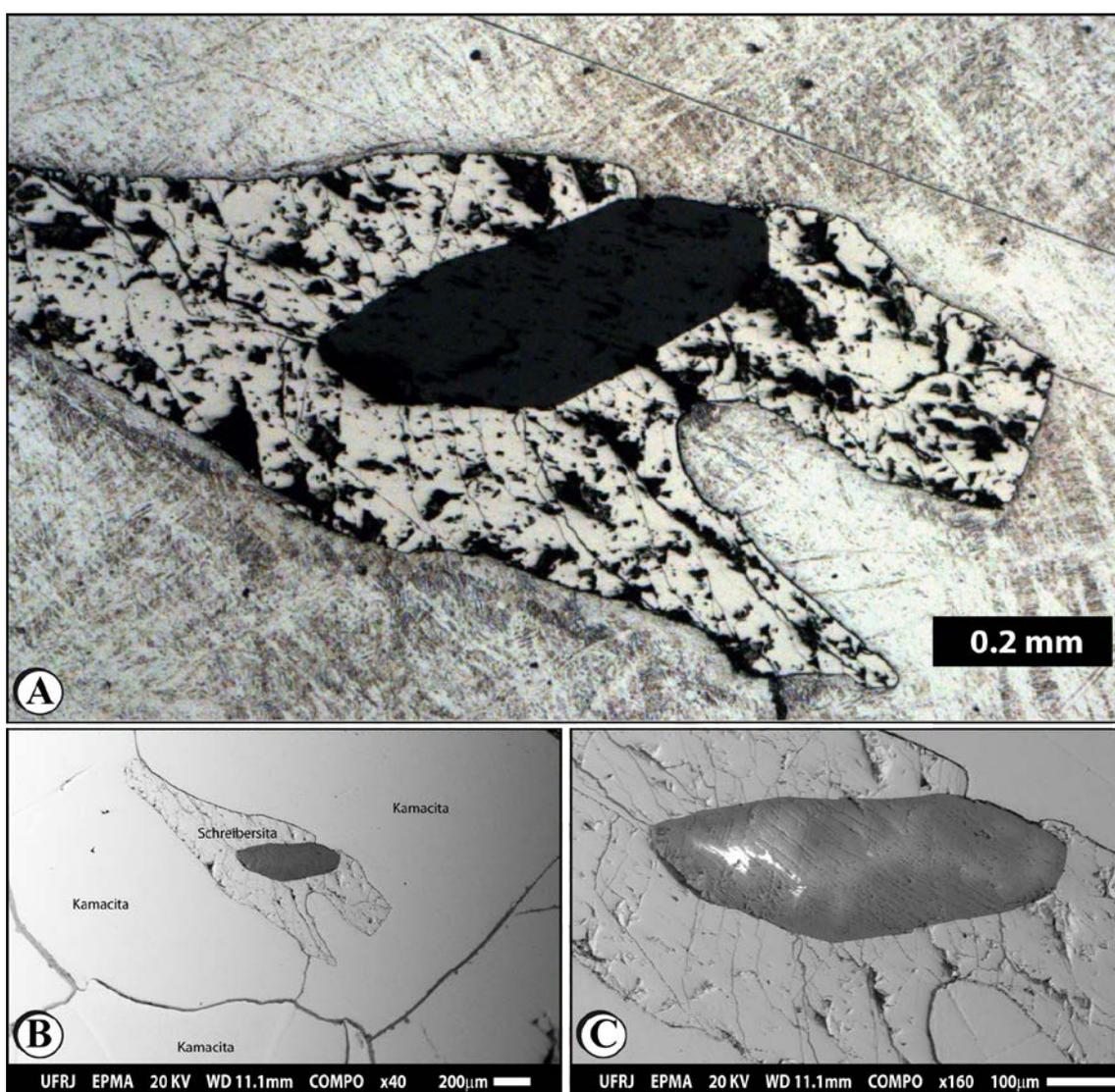


Figura 6. Placa de kamacita com mineral fosfatado em formato de “dálmata” incrustado. (A) Fotografia em microscópio petrográfico em luz refletida. (B) Imagem em EPMA. (C) Detalhe do cristal de fosfato incrustado.

A análise por EPMA permitiu constatar que esse grão é composto por kamacita, taenita e schreibersita (Figura 6B) e, por sua vez, inclui um cristal medindo 0,50 x 0,20mm de um mineral fosfatado que, de acordo com sua composição química, representa uma solução sólida cujos membros extremos são heterosita-purpurita  $[(Fe^{+3},Mn^{+3})PO_4]$  ou sarcopsita-graftonita  $[(Fe^{+2},Mn^{+2},Mg^{+2},Ca^{+2})_3(PO_4)_2]$  (Figura 6C). A diferença entre estas duas séries de ortofosfatos de ferro-manganês é que os membros da heterosita-purpurita não apresentam cálcio-magnésio em suas estruturas e ocorrem em ambientes mais oxidados. Nas análises realizadas não foram dosados os conteúdos de Mg e Ca, impossibilitando a distinção entre as duas séries. Estes ortofosfatos coexistem com schreibersita, kamacita e taenita.

Ortofosfatos de Fe-Mn ocorrem em alguns pegmatitos graníticos terrestres e tem sido reportados em meteoritos de ferro e mistos. De acordo com Olsen e Fredriksson (1966), estes ortofosfatos coexistem de forma estável com fosfeto-sulfeto-metal em octaedritos médios e finos e sugerem um grau de oxidação próximo ao de condritos. Ainda segundo estes mesmos autores as condições que levam à existência de fosfatos em meteoritos de ferro são raras e enquanto fosfetos são fases comuns, fosfatos são exceção, pois as condições de alta temperatura associadas a uma longa história de resfriamento levam à difusão e sua completa destruição, com a formação dos fosfetos. A presença da solução sólida heterosita-purpurita seria indicativa de condições de maior grau de oxidação e taxas de resfriamento mais rápidas durante a formação do corpo parental que originou o meteorito Palmas de Monte Alto, similar ao de condritos comuns.

Em associação com a aenigmatita foram reportados em meteoritos de ferro outros minerais acessórios raros tais como a qandilita, do grupo do espinélio (magnesioferrita) e a ardennita. (Tabela 2). A presença destas fases minerais no PMA carece de confirmação através de análises mais detalhadas. Contudo, a possibilidade de sua presença neste meteorito necessita ser melhor investigada.

## CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA PALMAS DE MONTE ALTO

Além da classificação estrutural os meteoritos de ferro também são agrupados de acordo com suas variações químicas. Os estudos iniciais já demonstravam uma clara correlação inversa entre os conteúdos de Ni e a largura das bandas de kamacita (Farrington, 1907). Goldberg *et al.* (1951) ratificou a importância destas correlações químicas ao sugerir que também haviam boas correlações entre os conteúdos de Ga e as larguras das bandas, que permitiam três agrupamentos bem distintos: 45-100 ppm, 17-22 ppm, e 1,7-2,5 ppm. Lovering *et al.* (1957) ampliaram o número de elementos estudados para incluir o Ge, permitindo subdivisões do primeiro destes três agrupamentos iniciais do Ga. Os grupos receberam denominações de números romanos I a IV com base nos conteúdos decrescentes de Ga e Ge. Os meteoritos de ferro que não puderam ser incluídos em um desses quatro grupos foram considerados anômalos.

À medida que as técnicas geoquímicas instrumentais avançaram e ganharam maior precisão e acuracidade analítica, essa classificação foi aprimorada por Wasson

(1967, 1974), Wasson e Kimberlin (1967), Scott e Wasson (1976), permitindo associar uma conotação genética a estes agrupamentos. O esquema classificatório também passou a considerar a distribuição e morfologia dos minerais característicos, bem como a largura das bandas de kamacita (Scott e Wasson, 1975). Isto gerou subdivisões nos 4 grupos principais (I, II, III, IV) que passaram a ser representadas por letras (A, B, C...).

Assim a classificação de meteoritos de ferro está fundamentada na concentração dos elementos Ni, Ga, Ge, Ir, Au, As e outros elementos-traço, além das classes estruturais. São três os parâmetros classificatórios principais: (i) meteoritos de ferro consistem basicamente (~99%) de metais de Fe-Ni; (ii) o conteúdo de Ni é necessário para interpretar a estrutura dos meteoritos de ferro em termos dos diagramas de fase Fe-Ni; e (iii) os elementos-traço Ga e Ge têm distribuição não aleatória, formando *clusters* em certas concentrações e o Ir apresenta amplo fracionamento que difere daquele do Ga, Ge e Ni (Scott, 1972). Segundo Wasson (1974), a escolha destes elementos foi arbitrária e, apesar dos grupos serem mais bem definidos com plotagens Ga-Ni e Ga-Ge, outros elementos-traço podem também ser úteis neste agrupamento, desde que novas metodologias analíticas – apenas análises por INAA eram possíveis na época que a classificação foi proposta – sejam desenvolvidas.

Com base nos critérios discutidos acima, os meteoritos de ferro são atualmente classificados em 14 grupos regulares (Scott e Wasson, 1975) – os quais contemplam 87% dos meteoritos de ferro conhecidos – e um grupo de anômalos, denominados “Não Agrupados” (Tabela 3).

Tabela 3. Classificação química dos meteoritos férreos (apud Wasson, 1970). A tarja cinza indica o grupo classificatório do Meteorito Palmas de Monte Alto.

<b>Grupos Químicos</b>	<b>Quantidade de Meteoritos</b>	<b>Percentual (%)</b>	<b>Níquel (%)</b>	<b>Gálio (ppm)</b>	<b>Germânio (ppm)</b>	<b>Iródio (ppm)</b>	
<b>I</b>	AB	125	16,25	6,5 - 60,8	2 - 100	2 - 520	0,02 - 6
	C	11	1,43	6,1 - 6,8	49 - 55	212 - 247	0,07 - 2,1
<b>II</b>	AB	106	13,78	5,3 - 6,4	46 - 62	107 - 185	0,01 - 0,9
	C	8	1,04	9,3 - 11,5	37 - 39	88 - 114	4 - 11
	D	117	15,21	9,6 - 11,3	70 - 83	82 - 98	3,5 - 18
	E	18	2,34	7,5 - 9,7	21 - 28	62 - 75	1 - 8
	F	5	0,66	10,6 - 14,3	8,9 - 11,6	99 - 193	0,75 - 23
	G	5	0,66				
<b>III</b>	AB	233	30,30	7,1 - 10,5	16 - 23	27 - 47	0,01 - 20
	CD	42	5,46	6,5 - 60,8	2 - 100	2 - 520	0,02 - 6
	E	13	1,69	8,2 - 9,0	17 - 19	34 - 37	0,001 - 6
	F	8	1,04	6,8 - 8,5	6,3 - 7,3	0,7 - 1,1	0,006 - 7,9
<b>IV</b>	A	65	8,45	7,4 - 9,4	1,6 - 2,4	0,09 - 0,14	0,4 - 4
	B	13	1,69	16,0 - 18,0	0,17 - 0,27	0,003 - 0,07	13 - 38

Este agrupamento possui uma forte conotação genética, pois se advoga que cada grupo represente um corpo parental distinto. Esta diversidade química é o principal meio classificatório para meteoritos de ferro, sendo a classificação estrutural utilizada como um parâmetro secundário. Segundo Hutchinson (2004) as diferenças químicas entre os grupos foram provavelmente determinadas pela condensação da nebulosa ou pela volatilidade. Já as diferenças químicas entre membros de um mesmo grupo são atribuídas a processos secundários, tais como a cristalização fracionada. Os grupos IAB/IIIAB e IIE são não-magmáticos enquanto os demais são magmáticos.

O meteorito Palmas de Monte Alto foi analisado por Ativação de Nêutrons (INAA) na Universidade da Califórnia em Los Angeles (UCLA) por Dr. John Wasson que repassou à Dra. Elizabeth Zucolotto as concentrações de Ni (9,40%), Ga (22 ppm), Co (0,54%), Ir (0,70 ppm), Au (1,70 ppm) e As (16 ppm). Estes resultados analíticos foram utilizados a sua classificação genética e registro no *Meteoritical Bulletin* (Weisberg, 2009). Por sua vez, Haack e McCoy (2005) apresentam as concentrações médias de Ni, Co, Re, Au, Ga e Ge encontradas nos principais grupos de meteoritos de ferro e mistos (Tabela 4), na qual incluímos os conteúdos do Palmas de Monte Alto para fins comparativos, verificando-se que são compatíveis com os dados compilados por Haack e McCoy (2005) para o grupo IIIAB e estão dentro dos limites propostos por Scott e Wasson (1975; Tabela 3).

Tabela 4. Composição média do meteorito Palmas de Monte Alto comparada aos principais grupos de meteoritos de ferro e mistos (dados de Haack e McCoy, 2005).

Grupo	Re (ppm)	Ni (%)	Co (%)	Au (ppm)	Ga (ppm)	Ir (ppm)	Ge (ppm)	Cu (ppm)
IAB	0.26	9.50	0.49	1.75	63.60	2.00	247.00	234.00
IIAB	1.78	5.65	0.46	0.71	58.63	12.50	174.00	133.00
IIIAB	0.44	8.33	0.51	1.12	19.79	3.20	39.10	156.00
IVA	0.23	8.51	0.40	1.55	2.14	1.80	0.12	137.00
IVB	2.15	17.18	0.76	0.14	0.23	18.00	0.06	<9
<b>Palmas de Monte Alto*</b>	-	<b>9.40</b>	<b>0.54</b>	<b>1.70</b>	<b>22.0</b>	<b>0.70</b>	-	-

Na seqüência de procedimentos para classificação química dos meteoritos de ferro, os diagramas da concentração de Ni em relação ao Ga, Au, Co, As e Ir (Figura 7) confirmam o posicionamento do PMA nas áreas delimitadas pelos membros do grupo IIIAB. Nos sete anos seguintes (2010-2016) ao registro do meteorito Palmas de Monte Alto como membro do grupo IIIAB, o Comitê de Nomenclatura da Sociedade Meteorítica aprovou mais 26 espécimes desse mesmo tipo (Tabela 5), inclusive outro exemplar brasileiro, denominado Pontes e Lacerda, achado no Mato Grosso, em 2013 (*Meteoritical Bulletin* 104, no prelo).

Complementando os resultados acima, os gráficos da concentração de Ni em relação ao Ga, Au, Co e As dos 26 meteoritos do Grupo IIIAB analisados e registrados após o PMA demonstram a coerência de sua inclusão nesse grupo genético (Tabela 4 e Figura 8).

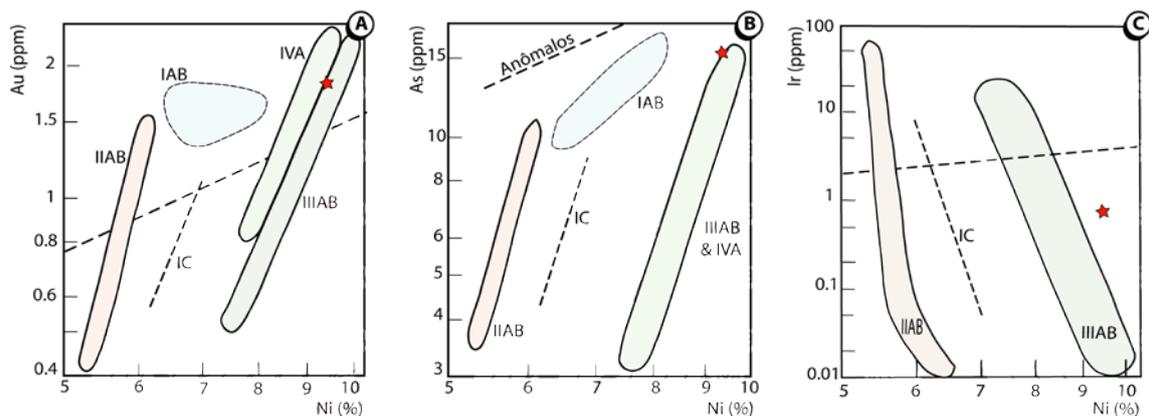


Figura 7. Diagramas de classificação química dos grupos de meteoritos de ferro, incluindo a análise por INAA do Meteorito Palmas de Monte Alto, indicado por uma estrela. (A) Au versus Ni, mostrando a correlação positiva dos IIIAB, (B) As versus Ni. (C) Ir versus Ni, demonstrando a correlação negativa e sua distinção do IIAB e IC. Campos de Scott e Wasson (1975).

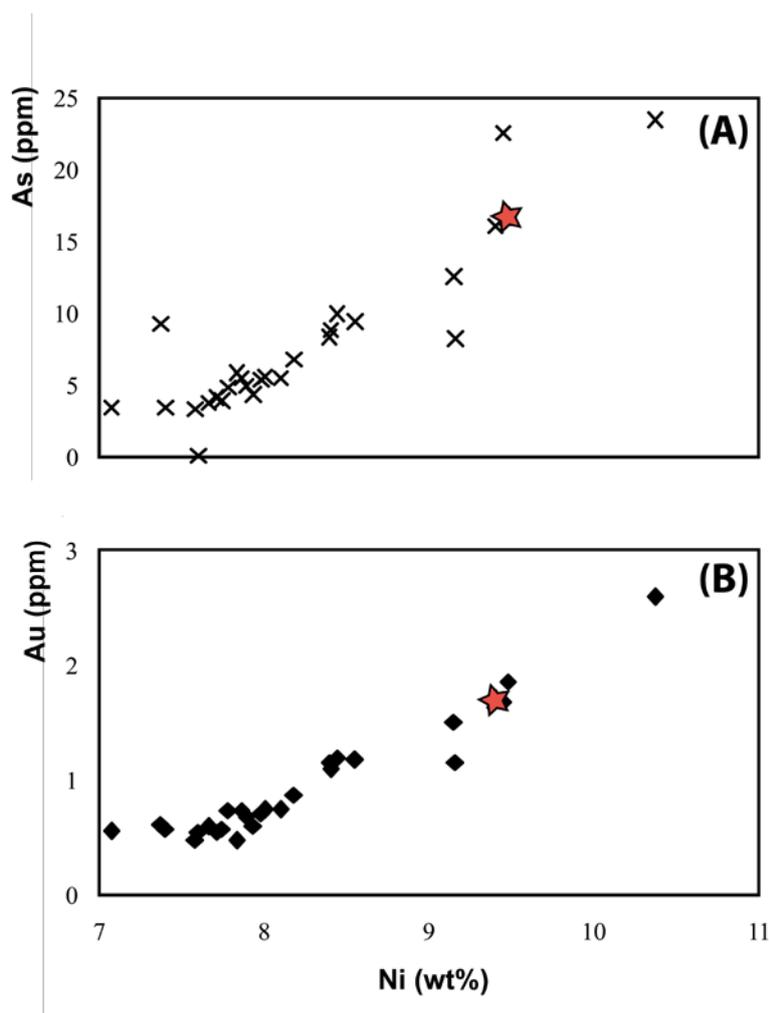


Figura 8. Diagramas de correlação do níquel com os conteúdos de Au e As para os 27 meteoritos recentemente classificados como pertencentes ao grupo IIIAB no *Meteoritical Bulletin Database*. Meteorito Palmas de Monte Alto representado por uma estrela.

Tabela 5. Conteúdos de Fe, Ni, Co e elementos-traço nos meteoritos IIIAB registrados a partir de 2009 (*Meteoritical Bulletin Database*).

Meteorito	País	Ano Registro	Metbull	Ni %	Co %	As ppm	Au ppm	Ga ppm	Ir ppm	Ni %	Ga ppm
Northwest Africa 3208	Northwest Africa	2012	99	7,58	0,49	3,25	0,48	17,70	18,90	7,58	17,70
Digor	China	2009	97	7,71	0,49	4,08	0,54	20,50	15,50	7,71	20,50
Camp Wood	Estados Unidos	2010	98	7,40	0,50	3,40	0,57	18,40	12,10	7,40	18,40
Llano River	Estados Unidos	2012	99	7,60	0,51	nd	0,54	17,00	9,70	7,60	17,00
Ariah Park	Austrália	2014	102	7,74	0,50	3,86	0,57	18,40	9,14	7,74	18,40
Javorje	Slovênia	2012	99	7,83	0,48	5,80	0,47	25,00	7,60	7,83	25,00
Northwest Africa 8444	Northwest Africa	2014	103	7,07	0,50	3,35	0,55	18,00	7,40	7,07	18,00
Northwest Africa 8370	Marrocos	2014	103	8,44	0,53	9,90	1,19	21,40	5,90	8,44	21,40
New York	Desconhecido	2013	101	7,66	0,50	3,73	0,59	18,40	5,29	7,66	18,40
Pontes e Lacerda	Brasil	2015	104	8,10	0,49	5,43	0,74	20,80	4,84	8,10	20,80
Villa Regina	Argentina	2014	100	7,93	0,50	4,30	0,60	19,30	4,32	7,93	19,30
Tartak	Polónia	2014	103	7,37	0,50	9,20	0,61	19,80	4,00	7,37	19,80
Northwest Africa 4708	Northwest Africa	2012	99	7,89	0,51	4,88	0,68	20,00	3,86	7,89	20,00
Catalina 107	Chile	2015	104	8,00	0,50	5,55	0,74	20,00	3,34	8,00	20,00
Northwest Africa 8442	Northwest Africa	2014	103	7,98	0,50	5,29	0,71	20,40	2,82	7,98	20,40
Itaka	Rússia	2016	105	9,16	0,53	8,18	1,15	26,20	2,29	9,16	26,20
High Island Creek	Estados Unidos	2015	104	7,86	0,51	5,42	0,73	21,20	2,25	7,86	21,20
Northwest Africa 8719	Northwest Africa	2015	104	7,78	0,51	4,80	0,73	19,60	2,25	7,78	19,60
Northwest Africa 4707	Northwest Africa	2012	99	8,18	0,52	6,71	0,87	22,10	0,75	8,18	22,10
<b>Palmas de Monte Alto</b>	<b>Brasil</b>	<b>2009</b>	<b>96</b>	<b>9,40</b>	<b>0,54</b>	<b>16,00</b>	<b>1,70</b>	<b>22,00</b>	<b>0,70</b>	<b>9,40</b>	<b>22,00</b>
Yarovoie	Rússia	2014	103	9,45	0,52	22,50	1,68	18,30	0,70	9,45	18,30
Apizaco	México	2015	104	8,55	0,53	9,35	1,17	21,40	0,32	8,55	21,40
Northwest Africa 6903	Marrocos	2012	100	8,40	0,52	8,80	1,09	21,50	0,22	8,40	21,50
Apache Junction	Estados Unidos	2012	100	8,39	0,53	8,30	1,15	20,10	0,19	8,39	20,10
Las Cruces	Chile	2013	101	9,15	0,53	12,50	1,50	20,60	0,18	9,15	20,60
Domeyko	Chile	2014	102	9,48	0,57	16,70	1,85	19,20	0,06	9,48	19,20
Burns	Estados Unidos	2014	102	10,37	0,57	23,40	2,59	14,40	0,02	10,37	14,40

## INTEMPERISMO E CHOQUE

De modo geral, os meteoritos do grupo IIIAB tais como Palmas de Monte Alto possuem elevada microdureza (Buchwald, 1975) em razão de metamorfismo de choque evidenciado por alterações na kamacita, taenita e plessita. No teste de microdureza (HV, Vickers Hardness) a kamacita do Palmas de Monte Alto, quando localizada em zona não afetada pelo calor durante a passagem pela atmosfera, apresenta média (N=24) de 284 HV, com um mínimo de 222 HV e máximo de 366 HV. Quatro medidas tomadas sobre taenita e plessita na mesma amostra registraram valores entre 366 HV e 411 HV confirmando uma maior dureza da taenita e plessita comparativamente à kamacita. Isto reflete o maior teor de Ni destes minerais. Estes valores de microdureza observados sugerem que este siderito sofreu um choque de alto grau.

Segundo Buchwald (1975) os meteoritos que compõem o Grupo IIIAB são os melhores representantes dos processos de diferenciação e composição do núcleo metálico de astros diferenciados. Estudos cronológicos (Voshage, 1967; Voshage e Feldmann, 1979), inferências sobre a taxa de resfriamento experimentada, e feições de choque existentes nos meteoritos desse grupo indicam sua origem em um corpo parental com cerca de 50 km de diâmetro que sofreu ruptura total há cerca de  $600 \pm 100$  ma, expondo o núcleo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O meteorito Palmas de Monte Alto, achado na Bahia provavelmente na década de 1940, permaneceu desconhecido do meio científico até recentemente. Os projetos de recuperação, catalogação e registro de meteoritos desenvolvidos pelos autores deste artigo em associação com um trabalho de educação e divulgação científica, levaram em 2009 ao registro de mais este exemplar da coleção brasileira, ampliando para 5 exemplares a coleção baiana. De acordo com Hutchinson (2004) alguns meteoritos do grupo IIIAB ao qual pertence o Palmas de Monte Alto estão associados a várias crateras tais como Henbury, a meteoritos palasíticos e mesosideritos, e à abundante chuva de meteoros de Cape York. O aumento no conteúdo de Ni neste grupo é acompanhado do aumento na quantidade de sulfetos e fosfetos

Os minerais acessórios identificados no meteorito Palmas de Monte Alto representam uma assembléia mineral rica em Ni que inclui óxidos de Fe-Ni (akaganeíta e bonnacordita), espinélios (trevorita, qandilita) e silicatos (grupo da aenigmatita) e seus equivalentes alterados, associados à presença de sulfetos, óxidos, fosfetos e fosfatos. A solução sólida de ortofosfatos de Fe-Mn identificada é de ocorrência rara e abre a possibilidade para a sua datação pelo método U-Pb.

O estudo mineraloquímico das zonas de corrosão no meteorito Palmas de Monte Alto levou à identificação de várias fases minerais, com implicações na compreensão do tipo de intemperismo/alteração às quais este material foi submetido na superfície terrestre, resultando na formação da trevorita, akaganeíta (absorção de cloro), e a solução sólida goetita-maghemita-bonnacordita (por reações completas de oxidação). É importante notar que a zona de oxidação/corrosão deste meteorito está concentrada e associada a fases minerais específicas, que não simplesmente o metal.

Associações similares são reportadas em rochas ultramáficas do depósito de Ni-Fe rico em PGEs de Bon Accord, no complexo ofiolítico Arqueano Jamestown, Greenstone Belt de Barbeton, África do Sul (Tredoux *et al.*, 1989). Neste ambiente eles são considerados como evidências de uma origem mantélica profunda e as elevadas razões Ni/Fe e Ni/Co do depósito levaram estes autores a sugerir que ele tenha sido derivado de material rico em siderófilos – meteorito de ferro – que permaneceu no manto inferior após uma formação ineficiente do núcleo.

Choque de alta intensidade no corpo parental do meteorito Palmas de Monte Alto é evidenciado pela presença de alterações estruturais na kamacita, e ratificado pelos estudos de microdureza.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos e pesquisadores do Labsonda-UFRJ, Laboratório Multiusuário - UFS, Laboratório de SEM - Universidade de Toronto, LAMUME – Laboratório de Microscopia Eletrônica, Instituto de Física – UFBA, Museu Nacional, Museu Geológico da Bahia, e ao Laboratório de Preparação e Análise de Amostras da CPRM-Salvador. Este trabalho contou com recursos dos projetos Pro Mete e GeoLogar (CNPq e FAPESB). Débora Rios e Herbet Conceição agradecem ao CNPq as bolsas de produtividade em pesquisa.

## BIBLIOGRAFIA

- Anthony, J.W., Williams, S.A., Bideaux, R.A., Grant, R.W., Wilson, W.E. (1995). *Mineralogy of Arizona*. University of Arizona Press. 3<sup>rd</sup> Ed. 508p.
- Brezina, A. (1885). Die Meteoritensammlung des k.k. mineralogischen Hofkabinetes in Wien am 1. Mai 1895. Alfred Holder. Wien.
- Brezina, A. (1904). The arrangement of collections of meteorites. *Trans. Am. Philos. Soc.*, 43, 211–247.
- Buchwald, V.F. (1975). *Handbook of iron meteorites: Their history, distribution, composition, and structure*. Berkeley, University of California Press. Vols. 1, 2, 3.
- Buchwald, V.F. e Clarke, R.S. Jr. (1988). Akaganeite, not lawrencite, corrodes Antarctic iron meteorites (abstract). *Meteoritics*. 23: 261-261.
- Buchwald, V.F. e Clarke, R.S. Jr. (1989). Corrosion of Fe-Ni alloys by Cl-containing akaganéite (B-FeOOH): The Antarctic meteorite case. *American Mineralogist*. 74: 656-667.
- Chladni E.F.F. (1794). Über den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen, und über einige damit in Verbindung stehende Naturerscheinungen. Riga and Leipzig: J.F.Hartknoch, 63p.
- Cosca, M.A., Roland, R.R e Essene, E.J. (1988). Dorrite  $[\text{Ca}_2(\text{Mg}_2, \text{Fe}^{+3}_4)(\text{Al}_4\text{Si}_2)\text{O}_{20}]$  a new member of the aenigmatite group from a pyrometamorphic melt-rock. *American Mineralogist*. 73: 1440-1448.
- Derby, O.A. (1888). *Revista do Observatório Nacional*. 3.
- Farrington, O.C. (1907). *Analyses of Iron Meteorites compiled and classified by O.C Farrington*. 51p.
- Fausr, G.T. e Fahey, J.J. (1962). The serpentine group minerals. *U. S. Geotr Sura. Prof. Pap.* 38SA:92p.
- Frost, M.T. (1965). Kamacite plate width estimation in octahedrites. *Mineralogical Magazine*. 35: 640-642.
- Goldberg, E., Uchiyama, A. e Brown, H. (1951). The distribution of nickel, cobalt, gallium, palladium and gold in iron meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2:1-25.
- Haack, H., McCoy, T.J. (2005). Iron and stony-iron meteorites. In: A.M. Davis (Ed.) *Meteorites, comets and planets, Treatise on Geochemistry*, Elsevier. 1: 325-345.
- Huthchison, R. (2004). *Meteorites: a petrologic, chemical and isotopic synthesis*. Cambridge University Press. Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore e São Paulo. 520p.
- Ivanov, A.V., Kononkova, N.N., Yang, V.S., Zolensky, M.E. (2003). The Kaidun meteorite: Clasts of alkaline-rich fractionated materials. *Meteoritics e Planetary Science*. 38(5): 725–737.
- Kunzmann, T. (1999). The aenigmatite-rhonite mineral group. *European Journal of Mineralogy*. 11(4): 743-756.
- Lovering, J.F., Nichiporuk, W., Chodos, A., Brown, H. (1957). The distribution of gallium, germanium, cobalt, chromium, and copper in iron and stony-iron

- meteorites in relation to nickel content and structure. *Geochim. and Cosmochim. Acta.* 11: 263-278.
- Meteoritical Bulletin Database. (2017). <https://www.lpi.usra.edu/meteor/>, em 13/01/2017
- Nielsen, H.P., Buchwald, V.F. (1981). Roaldite, a new nitride in iron meteorites. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.* 12<sup>th</sup>, 12B, p.1343–1348.
- Norton, O.R. (1994). *Rocks from space: meteorites and meteorite hunters*. Mountain Press Pub. 447p.
- Norton, O.R., Chtiwood, L.A. (2008). *Field Guide to Meteors and Meteorites*. Springer. London. 287p.
- Nriagu, O.N., Moore, P.B. (1994). *Phosphate Minerals*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo. 450p.
- Olsen, E., Fredriksson, K. (1966). Phosphates in iron and pallasite meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 30: 459-470.
- Sawicki, J. (2011). Hydrothermal synthesis of Ni<sub>2</sub>FeBO<sub>5</sub> in near-supercritical PWR coolant and possible effects of neutron-induced <sup>10</sup>B fission in fuel crud. *Journal of Nuclear Materials.* 415: 179-188.
- Scott, E.R.D. (1972). Chemical fractionation in iron meteorites and its interpretation. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 36: 1205-1236.
- Scott, E.R.D., Wasson, J.T. (1975). Classification and properties of iron meteorites. *Reviews of Geophysics and Space Physics.* 13: 527-546.
- Scott, E.R.D., Wasson, J.T. (1976). Chemical classification of iron meteorites: VIII. Groups IC, IIE, IIIF and 97 other irons. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 40:103-115.
- Tredoux, M., Wit, M.J., Hart, R.J., Armstrong, R.A., Lindsay, N.M., Sellschop, J.P.F. (1989). Platinum group elements in a 3.5 Ga nickeliron occurrence: Possible evidence of a deep mantle origin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 94: 795-813.
- Tschermak, G. (1883). Beitrag zur Classification der Meteoriten. *Sitzber. Akad. Wiss. Wien. Math-Noturw. Kl; Abs I*, 88:347-371
- Voshage, H. (1967). Bestrahlungsalter und Herkunft der Eisenmeteorite. *Z. Naturforsch* 22a: 477-506.
- Voshage, H., Feldmann, H. (1979). Investigations on cosmic-ray-produced nuclides in iron meteorites, 2. New results on 41K/40-4H/21Ne exposure ages and the interpretation of age distributions. *Earth and Planetary Science Letters*, 40: 83-90.
- Wasson, J.T. (1967). Chemical classification of iron meteorites: I. A study of iron meteorites with low concentrations of gallium and germanium. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 31: 161-180.
- Wasson, J.T. (1970). The chemical classification of iron meteorites: IV. Irons with Ge concentrations greater than 190 ppm and other meteorites associated with group I. *Icarus.* 12: 407-423.
- Wasson, J.T. (1974). *Meteorites - Classification and Properties*. Springer, 316p.

- Wasson, J.T., Kimberlin, J. (1967). The chemical classification of iron meteorites: II. Iron and pallasites with germanium concentrations between 8 and 100 ppm. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 31: 2065-2093.
- Weisberg, M.K., Smith, C., Benedix, G., Herds, D.K., Righter, K., Haack, H., Yamaguchi, A., Righter, K., Haack, H. Yamaguchi, A., Y., Aoudjehane, H.C., Grossman, J.N. (2009). *The Meteoritical Bulletin*, No. 96, September 2009. *Meteoritics and Planetary Science.* 44(9): 1355-1397.
- Zucolotto, M.A., Riffi, D. (2009). Two new iron meteorites from Bahia, Brazil, Nancy, França, 72nd Annual Meteoritical Society Meeting, p.5380.

## **CAPÍTULO 4**

### **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

---

Os estudos de meteorítica começaram na Bahia em 2008 quando o primeiro autor desta tese iniciou curso de mestrado no Instituto de Geociências, da UFBA, convencendo a Profa. Dra. Débora Rios a orientá-lo nessa nova vertente do conhecimento geológico.

Nos últimos sete anos, ao longo dos trabalhos de mestrado e doutorado que culminam nesta tese, foram desenvolvidos projetos específicos de divulgação da meteorítica, em parceria com o Museu Geológico da Bahia e Associação de Astrônomos Amadores da Bahia a exemplo do PROMETE – Programa de Recuperação de Meteoritos financiado pela FAPESB e do Projeto GeoLogar (CNPq/FAPESB) que está em sua terceira fase.

Foram produzidos e impressos *folders*, cartilhas e panfletos para divulgação da importância dos meteoritos, assim como foram realizadas exposições especiais para o grande público em dois *shoppings centers* de Salvador. Equipamentos de ensino representados por um planetário inflável e duas salas de exposição permanente para meteoritos e informações sobre o Sistema Solar foram montadas no Museu Geológico, com recursos do GeoLogar.

Esse esforço trouxe como consequência a criação e fortalecimento de uma cultura meteorítica no âmbito do Instituto de Geociências da UFBA, sensibilizando membros do corpo docente e alunos de graduação e pós-graduação em geologia, resultando em diversos trabalhos apresentados em congressos e simpósios, elaboração de Trabalhos Finais de Graduação e o desenvolvimento de pesquisa e nível de mestrado, tendo como tema os meteoritos.

Esta tese – tirando vantagem do novo formato oferecido pelo Curso de Pós-Graduação em Geologia – é composta por dois artigos que abordam os aspectos petrográficos e mineraloquímicos de dois meteoritos achados na Bahia. Espera-se com este trabalho contribuir para sensibilizar a comunidade que milita nas geociências brasileiras sobre esse vasto campo de pesquisa representado por materiais extraterrestres, amostras geológicas de outros astros.

Os dois artigos estão sendo submetidos à revista Pesquisa em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e à revista Geologia USP, da Universidade de São Paulo. São trabalhos inéditos sobre estes dois meteoritos encontrados na Bahia, que se juntam à publicação em 2010 na Revista Brasileira de Geociências intitulada “O meteorito Bendegó: História, Mineralogia e Classificação Química,” resultado do trabalho de mestrado do autor desta tese.

Os resultados das análises realizadas nos meteoritos Rio do Pires e Palmas de Monte Alto são um importante passo para consolidar o estudo dos meteoritos no âmbito do Instituto de Geociências da Bahia que, ao lado do Museu Nacional (UFRJ), firma-se como um centro habilitado para realizar pesquisas e publicar trabalhos sobre esse tema.

## APÊNDICES

---

## APÊNDICE A

### Justificativa da Participação dos Autores

#### O Condrito Rio do Pires: Aspectos Petrográficos e Mineraloquímicos

Revista Pesquisa em Geociências, UFRGS

Autor (a)	Contribuição
MSc. Wilton Pinto de Carvalho	Responsável pela execução da pesquisa, obtenção dos dados, interpretação dos resultados, discussões e redação do artigo.
Dra. Débora Correia Rios	Orientadora da pesquisa. Responsável pela coordenação do projeto, obtenção dos recursos, promoção de aprendizado e redação do artigo através de orientação, discussões, correções, revisão das análises petrográficas, litoquímicas e mineraloquímicas.
Dra. Maria Elizabeth Zucolotto	Co-orientadora da pesquisa. Responsável por orientar análises petrográficas e mineraloquímicas, discussões dos resultados e trabalhos de campo.
Dr. Herbet Conceição	Responsável pela realização de análises mineraloquímicas no MEV.
IC Murilo Magno Gomes	Responsável por auxiliar em fotografias e análises petrográficas.

## APÊNDICE B

### Justificativa da Participação dos Autores

#### O Meteorito Palmas de Monte Alto: Aspectos Petrográficos e Mineraloquímicos

Revista Geologia USP, Série Científica

Autor (a)	Contribuição
MSc. Wilton Pinto de Carvalho	Responsável pela execução da pesquisa, obtenção dos dados, interpretação dos resultados, discussões e redação do artigo.
Dra. Débora Correia Rios	Orientadora da pesquisa. Responsável pela coordenação do projeto, obtenção dos recursos, promoção de aprendizado e redação do artigo através de orientação, discussões, correções, revisão das análises petrográficas, litoquímicas e mineraloquímicas. Realizou observações e análises em amostras de meteoritos utilizando MEV da Universidade de Toronto.
Dra. Maria Elizabeth Zucolotto	Co-orientadora da pesquisa. Responsável por orientar análises petrográficas e mineraloquímicas, discussões dos resultados e trabalhos de campo. Orientou e coordenou observações e análises em amostras de meteoritos utilizando microsonda da UFRJ.
Dr. Herbet Conceição	Responsável pela realização de análises mineraloquímicas no MEV, na UFS.
BSc. Acácio José Silva de Araújo	Responsável por auxiliar em análises litoquímicas.

## **ANEXOS**

---

# ANEXO A



## **Instruções aos Autores**

Os manuscritos devem ser cuidadosamente preparados pelos autores observando as instruções aqui apresentadas. Um modelo de documento (template) está disponível para acesso no sítio da revista e utilização como padrão na confecção do arquivo de texto, incluindo quadros e tabelas.

Arquivo modelo para preparação dos manuscritos

Arquivo modelo para submissão

## **Considerações gerais**

Os manuscritos devem ter temática relacionada às Geociências, conforme tabelas de áreas de conhecimento do CNPq e da CAPES.

Os manuscritos devem estar em consonância com os códigos de nomenclatura estratigráfica, zoológica e/ou botânica (nos casos dos manuscritos em paleontologia), bem como devidamente redigidos observando as normas de redação da língua mãe.

## **Língua**

Línguas aceitas para submissão e publicação: português, espanhol ou inglês.

Textos e ilustrações devem ser preparados em uma só língua.

Manuscritos redigidos em português: além do resumo, devem conter abstract.

Manuscritos redigidos em espanhol: além do resumen, devem conter abstract.

Manuscritos redigidos em inglês: além do abstract, devem conter resumo. Conservar a homogeneização da língua inglesa no formato americano ou britânico.

Termos não traduzidos de outra língua, distinta daquela a que se refere o manuscrito, devem constar em itálico.

## **Forma de submissão**

Cada manuscrito deve ser submetido na forma de um arquivo pdf (Portable Document Format) utilizando o endereço eletrônico [pesqgeoc@ufrgs.br](mailto:pesqgeoc@ufrgs.br).

Na submissão, o autor correspondente deverá anexar uma carta endereçada ao Editor Chefe declarando que (i) o trabalho não foi publicado anteriormente (exceto na forma de um resumo ou como parte de uma palestra ou de um trabalho de conclusão de curso, tese ou dissertação); (ii) o trabalho não está sendo avaliado para publicação em outro órgão de divulgação; (iii) todas as informações apresentadas no manuscrito são de responsabilidade do autor correspondente, bem como dos demais coautores, se houver; e, (iv) se aceito, não será publicado na mesma forma por outro meio. Sugere-se redigir a carta, assinar, digitalizar em formato pdf, e anexar à mensagem juntamente com o arquivo pdf do manuscrito.

Na carta de encaminhamento, o autor correspondente deve sugerir até três nomes de pesquisadores relacionados à temática do manuscrito submetido para atuação, se necessário, como examinador ad doc. As indicações devem contemplar pesquisadores com grau de doutor, e que não estejam vinculados à(s) instituição(ões) do(s) autor(es). Os nomes devem ser acompanhados de e-mail, instituição com endereço completo para correspondência.

## **Formatação**

Cada manuscrito pode conter um total de até 40 páginas, incluindo referências, ilustrações e apêndices (quando houver). Páginas excedentes poderão ser publicadas mediante consulta prévia.

Utilizar o software Microsoft Word para produção do texto, com todas as margens ajustadas em 2,5 cm, espaço 1,5 entre linhas, fonte Times New Roman. Manter a formatação do texto o mais simples possível.

Todas as páginas do texto devem ser sequencialmente numeradas na margem superior direita.

As linhas devem estar numeradas de modo contínuo do início ao fim do texto.

Título do trabalho: alinhado à esquerda, em negrito, fonte tamanho 14. Manuscritos redigidos em português ou espanhol deverão ter o título vertido para língua inglesa e posicionados logo abaixo do título original em uma nova linha. Manuscritos em inglês deverão ter o título vertido para a língua portuguesa, também posicionado abaixo do título original.

Nome dos autores: tamanho 12, com a margem alinhada à esquerda, escritos em sequência, separados por vírgulas e “&”; o último sobrenome de cada autor deverá ser escrito em caixa alta; exemplo: Carla Amaral RITTER<sup>1</sup>, Pedro Luiz MENDONÇA<sup>1,2</sup> & Adam SMITH<sup>3</sup> (os números sobrescritos referem-se aos vínculos institucionais explicitados a seguir).

Vínculo institucional dos autores: fonte 11, alinhado à esquerda, espaço simples (1), segunda linha com deslocamento da segunda linha em 0,63 cm; adaptar estritamente conforme os exemplos que seguem; não utilizar abreviações nos nomes das instituições.

(1) Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, Brasil. E-mail: xxxx@xxx.

(2) Centro de Ciência do Sistema Terrestre, Instituto Nacional de Pesquisa Espacial. Av. dos Astronautas, 1.758, CEP 12.227-010, São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: xxxx@xxx, yyyy@yyyy.

**Resumo**, resumen e abstract: devem abordar de forma clara e concisa a problemática, os objetivos, os métodos, os resultados e as conclusões, nesta ordem; comportar até 20 linhas, em fonte 11, parágrafo único (reco de 1 cm à direita e à esquerda), espaço entre linhas simples, sem citações bibliográficas.

Palavras-chave (para manuscritos em português e inglês), Palabras clave (manuscritos em espanhol) e Keywords (manuscritos em português, espanhol e inglês): lista de até seis termos, separados por vírgula, fonte 11, espaço entre linhas simples, reco de 1 cm à direita e à esquerda; não utilizar termos já descritos no título.

Organizar o texto nas seguintes seções: 1 Introdução; 2 Área; material e métodos (inserir nesta seção informações sobre o estado de arte: p. ex. caracterização geológica, estratigráfica, fundamentação teórica); 3 Resultados; 4 Discussão dos resultados; 5 Conclusões; Agradecimentos (opcional); e Referências bibliográficas. Em manuscritos com características particulares, formas distintas de divisão poderão ser aceitas, mediante consulta prévia.

Todo o texto, a partir da seção 1 Introdução (excetuando-se os agradecimentos), deve ser confeccionado em fonte 12, justificado, com primeira linha de cada parágrafo com reco do lado esquerdo de 1,25 cm.

Os títulos das seções deverão constar ordenadamente com algarismos arábicos, em negrito, alinhados à esquerda, sem reco, fonte 12.

Os subtítulos devem ser ordenados com algarismos arábicos, alinhados à esquerda, sem reco, em itálico (p. ex.: 2.1 Localização da área, 2.2 Estratigrafia, 2.3 Métodos), assim sucessivamente, até a terceira ordem (p. ex.: 3.2.1), fonte 12.

Agradecimentos: sem numeração, fonte 11, espaço simples entre linhas, alinhado à esquerda, sem reco, incluindo, quando cabíveis, números de projetos/processos, agências de fomento,

esclarecimento sobre a relação do manuscrito como parte constituinte de dissertações ou teses de doutoramento etc. Os autores não devem fazer agradecimentos às suas próprias instituições.

As ilustrações (coloridas ou preto e branco) devem ser inseridas no arquivo Microsoft Word, para conversão em pdf, na posição desejada, centralizadas, com a respectiva legenda na posição superior (no caso de tabelas e quadros) ou inferior (figuras). A primeira citação de uma ilustração no texto deve ser feita antes de sua inserção. Ordenar as ilustrações de modo fluido, de modo a facilitar a leitura do texto e sua posterior e imediata visualização.

Materiais suplementares vinculados ao manuscrito (tais como mapas e figuras em formatos distintos, listas, tabelas com dados detalhados) poderão ser publicados somente na forma online.

Recomendações gerais sobre a formatação: (i) não usar hifenização no processador de texto; (ii) usar negrito, itálico, subscrito, sobrescrito etc., somente quando pertinente; (iii) não importar tabelas e equações de programas gráficos (use o processador de texto para criá-las); (iv) não utilizar notas de rodapé; (v) utilizar sempre os símbolos internacionais de medidas ao invés dos nomes completos (p. ex.: 7 m ao invés de 7 metros).

## **Ilustrações**

Ilustrações: figuras, tabelas e quadros são considerados ilustrações.

Figuras: são ilustrações gráficas, imagens fotográficas ou fotomicrográficas, com extensão jpg, ou jpeg, ou tiff; em resolução compatível para publicação (mínima de 300 dpi).

Tabelas: compreendem ilustrações que armazenam informações numéricas, construídas com bordas laterais abertas; não devem ultrapassar uma página em extensão; editadas em Word ou Excel.

Quadros: são ilustrações contendo elementos textuais, construídos com bordas fechadas; não devem ultrapassar uma página em extensão; editados em Word ou Excel.

Em casos excepcionais, apêndices poderão compor o manuscrito, alocados após as referências.

Numeração das ilustrações: o número das figuras, tabelas e quadros é independente (p. ex.: figura 1, figura 2, quadro 1, quadro 2, tabela 1), constituindo numeração e ordenamento próprios para cada tipo de ilustração, de forma sequencial.

Para figuras compostas (contendo várias partes), cada subdivisão deve ser indicada por letras maiúsculas (p. ex.: figura 7A, 7B), no canto superior esquerdo, em tamanho de fonte não maior que 14.

No texto, as ilustrações deverão ser citadas conforme os exemplos apresentados:

“A coluna estratigráfica do intervalo estudado é apresentada na figura 5.”

“Dos táxons registrados, somente *G. occidentalis* (Fig. 7A) e *G. obovata* (Fig. 7B e C) correspondem...”

“As características pluviométricas da área estão listadas, por município, no quadro 2, enquanto os valores das temperaturas médias e precipitação são apresentados separadamente (Tab. 3 e 4).”

Todas as ilustrações devem ser preparadas e inseridas no texto de modo a não necessitar ampliações ou reduções, com legibilidade e dimensões compatíveis a uma largura máxima de 8 ou 16,5 cm (para uma coluna ou para a largura da página, respectivamente) e altura máxima de 24 cm, considerando o uso econômico dos espaços disponíveis. Evitar espaços internos em branco.

Ilustrações coloridas poderão ser publicadas na versão eletrônica da revista, desde que a mesma seja apresentada também na versão em preto e branco, com conteúdo equivalente para publicação na versão impressa. No caso de utilização de gradientes de cor (ex. tons de cinza), garantir que os tons escolhidos sejam discerníveis no formato eletrônico e impresso.

Legendas dos manuscritos redigidos em português: todas as legendas das ilustrações devem vir acompanhadas de sua versão integral na língua inglesa.

Legendas dos manuscritos redigidos em espanhol: todas as respectivas legendas das ilustrações devem vir acompanhadas de sua versão integral na língua inglesa.

Legendas dos manuscritos redigidos em inglês: todas as respectivas legendas das ilustrações devem vir acompanhadas de sua versão integral na língua portuguesa.

Nos casos de figuras compostas, organizar a legenda tal como exemplificado a seguir.

Figura 1. Mapa de localização. A) Bacia de Campos; B) Localização da área de mapeamento (polígono azul).

Figure 1. Location map. A) Campos Basin; B) Location of mapping area (blue polygon).

Recomendações adicionais: (i) não usar qualquer tipo de arquivo otimizado para tela (tais como GIF, BMP, PICT, WPG); (ii) molduras das figuras devem ter espessura compatível com os caracteres internos; (iii) escalas gráficas devem ser expressas nas áreas das ilustrações; (iv) todos os símbolos devem ser explicados convenientemente nas legendas gráficas (dentro da figura) ou na legenda textual; (v) os menores símbolos ou letras devem ter uma altura mínima de 1 mm); (vi) sugere-se o uso da fonte Arial narrow para as ilustrações; (vii) no modelo de documento disponível no sítio da revista é apresentada uma tabela e um quadro, rigorosamente preparados conforme o padrão da revista.

Cada mapa ou imagem de localização deve comportar: seta Norte; escala de barra em quilômetros (km) ou metros (m); grade/malha e informação do sistema de coordenadas; fuso; datum.

## Referências bibliográficas

Ao longo do texto e nas legendas, as citações devem seguir os formatos dos seguintes exemplos: Santos (1970), Smith & McGregor (1956), Lange (1947a, 1947b), e para três ou mais autores: Lange et al. (1951). Quando entre parênteses, referenciar os vários artigos primeiramente em ordem cronológica e, como segundo critério, em ordem alfabética, conforme os seguintes exemplos: (Lange, 1947a, 1947b; Lange et al., 1951; Smith & McGregor, 1956; Axel, 1970; Smith, 1970).

O emprego do termo apud como recurso à citação de obras não consultadas diretamente pelo autor é desencorajado, salvo em casos excepcionais.

As referências devem ser listadas ao final do texto, separadas entre si por um espaço simples, ordenadas em alfabeticamente pelo sobrenome do primeiro autor, seguido dos demais autores, conforme, criteriosamente, os exemplos fornecidos.

Formatar o parágrafo com recuo especial (deslocamento) de 1 cm.

Livros:

Passchier, C.W., Myers, J.S. & Kroner, A. 1990. Field geology of high-grade gneiss terrains. Berlin, Springer-Verlag, 150p.

Capítulos de livro:

Brown, G.C. 1982. Calc-alkaline intrusive rocks: their diversity, evolution and relation to volcanic arcs. In: Thorpe, R.S. (Ed.). Andesites: orogenic andesites and related rocks. London, John Wiley, p. 437-460.

Artigos em periódicos:

Andrés, M.F. 2008. Modelización del flujo em acuífero confinado sin discretización temporal. Boletín Geológico y Minero, 119(2): 273-282.

Russo, R.W. 1997. Facies and facies models. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 256(3/4): 7-34.

Russo, R.W. & Silver, P.J. 1996. Cordillera formation, mantle dynamics, and the Wilson cycle. Geology, 24(1): 5-35.

Russo, R.W., Silver, P.J. & Ramos, V. 1994. Fluvial responses to climate and sea-level change: a review and look forward. Sedimentology, 33(supl.): 4-27.

Sommer, F.W. 1959. Introdução ao estudo sistemático dos gêneros paleozóicos de esporos dispersos. II - Pollenites. Boletim do Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia, 197: 5-91.

Trabalhos publicados em anais de eventos:

Schneider, R.L., Mühlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R.A., Daemon, R.F. & Nogueira, A.A. 1974. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, SBG, v. 1, p. 41-66.

Trabalhos acadêmicos:

Macedo, F.P. 1982. Petrologia do complexo granítico de São Gabriel, RS. Porto Alegre, 193p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Massoli, M. 1991. Relação entre o embasamento cristalino e os sedimentos basais do Subgrupo Itararé na região de Salto de Pirapora, SP. São Paulo, 94p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia Sedimentar, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Silva, W.G. 2008. Bioestratigrafia e variações relativas do nível do mar na Planície Costeira do Rio Grande do Sul: estudo da seção neogênica/quaternária do poço 2-CA-1-RS com base em registros palinológicos. Porto Alegre, 84p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Relatórios internos e outras produções institucionais:

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2004. Vocabulário básico de recursos minerais e meio ambiente. 2a. ed., Rio de Janeiro, IBGE, 332p.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 2002. Diagnóstico das condições das encostas marginais dos reservatórios dos rios Tietê e Paranapanema. São Paulo, IPT, 440p. (Relatório 23.302).

Malcom, H.J. 1979. Report on biostratigraphical results of samples from Colorado Basin. Houston, EXXON/SIEXF, 152p. (Internal Report).

Mapas:

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 1981. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo, Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 2 v., escala 1:1.000.000.

Documentos em meio eletrônico:

Frater, H. 1998. Landforms of the Earth. Berlin, Springer, 1 CD-ROM.

Hinrichs, R. & Soares, A.P.P. 2001. Análise de metais pesados em pilhas e baterias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 8., 2001, Curitiba. Anais... Curitiba, SBGq. 1 CD-ROM.

Micheels, A., Bruch, A. & Mosbrugger, V. 2009. Miocene climate modeling sensitivity experiments for different CO<sub>2</sub> concentrations. *Palaeontologia Electronica*, 12(2): 1-19. Disponível em: <[http://palaeo-electronica.org/2009\\_2/172/index.html](http://palaeo-electronica.org/2009_2/172/index.html)>. Acesso em: 05 out. 2009.

Camargo, K.C. & Spoladore, A. 2009. Considerações geológicas e geomorfológicas sobre a distribuição de cavernas carbonáticas ao primeiro planalto paranaense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30., 2009, Montes Claros. Anais... Montes Claros. p. 1-17. Disponível em: <[http://www.sbe.com.br/anais30cbe/30cbe\\_011-017.pdf](http://www.sbe.com.br/anais30cbe/30cbe_011-017.pdf)>. Acesso em: 30 set. 2009.

## ANEXO B



### **Geologia USP. Série Científica**

#### **Instruções aos Autores**

##### **Escopo e política**

##### **Objetivos e Política Editorial**

A revista Geologia USP destina-se à publicação de trabalhos inéditos nas diversas áreas da geologia.

Os conceitos emitidos bem como as referências bibliográficas são de total e exclusiva responsabilidade dos autores.

Ao Conselho Editorial compete a pré-análise do material enviado, qualificando-o ou não, num primeiro momento, para publicação na Geologia USP. Isto não impede que o artigo possa ser recusado, durante a fase de análise crítica, pelos relatores indicados pelo Conselho Editorial.

Passando pela primeira fase de julgamento, o artigo será submetido à análise crítica de, pelo menos, dois relatores indicados pelo Conselho Editorial.

Os trabalhos retornarão aos autores juntamente com os pareceres dos relatores para as providências necessárias.

Efetuada as alterações, retornar a nova versão do manuscrito para a Seção de Publicações, que as encaminhará aos relatores para reavaliação do trabalho.

Estando o artigo apto para publicação, após avaliação final dos relatores e do Conselho Editorial, a Seção de Publicações entrará em contato com os autores para que enviem os arquivos digitais.

O Abstract será revisado por profissional contratado para essa função. Essa revisão será enviada ao autor para sua concordância.

A correção da prova final do trabalho, antes da impressão, será feita pelos próprios autores. Nesta fase do processo, não mais serão aceitas modificações.

Volumes impressos e/ou separatas, se desejados, serão custeados pelos autores.

## Forma e preparação dos manuscritos

### Apresentação do Artigo

**Página de rosto** - deverá conter três títulos: em português, em inglês e um título curto, no idioma principal do manuscrito, com no máximo 50 caracteres contando os espaços; nome completo e instituição de origem dos autores; endereço completo do autor principal (caixa postal, logradouro, CEP, cidade, estado, país e telefone para contato), e-mail de todos os autores; número de palavras; total de figuras e de tabelas.

**Resumo e Abstract** - em um único parágrafo, devem ser concisos, com no máximo 270 palavras. Textos mais longos devem vir acompanhados de justificativa circunstanciada.

**Palavras-chave e keywords** - máximo de seis, separadas por ponto e vírgula, com a primeira letra em maiúscula. Ex.: Bacia do Araripe; Quaternário; Fácies; Depósitos magmáticos.

Os descritores em inglês devem acompanhar os termos em português.

**Texto principal** - poderá ser redigido em português ou inglês. Elaborar em Word, fonte Times New Roman, tamanho 12, espaço simples. O tamanho máximo aceito para publicação é de 25 páginas, incluindo texto, resumo, abstract, tabelas, figuras e referências bibliográficas. Trabalhos mais longos podem ser aceitos desde que argumentos científicos que os justifiquem sejam apresentados e aceitos.

- a) Na fase de submissão, inserir numeração de páginas, bem como as figuras, tabelas e legendas.
- b) Quando o artigo estiver devidamente aprovado para publicação, as figuras e tabelas devem ser retiradas do texto. Enviá-las separadamente e numeradas, cada uma num arquivo. As legendas devem vir em um único arquivo, separadas das figuras e tabelas.

Títulos e subtítulos - utilizar a formatação abaixo:

NÍVEL 1 - NEGRITO, CAIXA ALTA.

Nível 2 - Negrito, caixa alta na primeira letra da primeira palavra e caixa baixa nas demais.

Nível 3 - Itálico, caixa alta na primeira letra da primeira palavra e caixa baixa nas demais (sem negrito).

Nível 4 - Caixa alta na primeira letra da primeira palavra e caixa baixa nas demais (sem negrito).

Tabelas e quadros - considerar quadro como tabela. Elaborar em Word, no modo ?tabela?, com formato aberto, fonte Arial, tamanho 8. Obedecer as medidas: 8,2 cm (uma coluna) ou 17 cm (duas colunas), comprimento máximo de 22 cm, incluindo a legenda. Tabelas muito extensas deverão ser divididas.

- a) Na fase de submissão, inserir as tabelas no texto, juntamente com a legenda, com a devida numeração sequencial.

b) Quando o artigo estiver devidamente aprovado para publicação, as tabelas devem ser retiradas do texto. Enviá-las separadamente e numeradas, cada uma num arquivo. As legendas devem vir em um único arquivo, separadas das tabelas.

Ilustrações - mapas, fotos, figuras, gráficos, pranchas, fotomicrografias etc., considerar como figuras. Utilizar fonte Arial, tamanho 9. Obedecer as medidas: 8,2 cm (uma coluna) ou 17 cm (duas colunas), comprimento máximo de 22 cm, incluindo a legenda. Deverão estar em formato JPEG, TIFF ou EPS, com resolução mínima de 300 dpi.

a) Na fase de submissão, inserir as figuras no texto, juntamente com a legenda, com a devida numeração sequencial. Ilustrações coloridas serão aceitas desde que os custos da impressão sejam cobertos pelo autor.

b) Quando o artigo estiver devidamente aprovado para publicação, as figuras devem ser retiradas do texto. Enviá-las separadamente e numeradas, cada uma num arquivo. As legendas devem vir em um único arquivo, separadas das figuras.

Citações no texto - exemplos de citação direta / citação indireta:

a) Um autor

Santos (1980) / (Santos, 1980)

b) Dois autores

Norton e Long (1995) / (Norton e Long, 1980)

c) Mais de dois autores

Moorbath et al. (1992) / (Moorbath et al., 1992)

d) Congressos, conferências, seminários etc.

No Congresso Brasileiro de Geologia (1984) / (Congresso Brasileiro de Geologia, 1984)

e) Vários trabalhos de diferentes autores

Smith (1985), Rose e Turner (1986) e Johnson et al. (1990) / (Smith, 1985; Rose e Turner, 1986; Johnson et al., 1990)

f) Citação de vários trabalhos de um mesmo autor

Smith (1979a, 1979b, 1981) / (Smith, 1979a, 1979b, 1981)

Referências - listar no final do texto, em ordem alfabética de autores e, dentro dessa sequência, em ordem cronológica. A exatidão das referências bibliográficas é de inteira responsabilidade dos autores.

Exemplos de referências:

a) Livro com um autor

Middlemost, E. A. K. (1997). *Magma, rocks and planetary development: A Survey of Magma/Igneous Rock Systems*. Harlow: Longman.

b) Livro com dois autores

Anderson, M. P., Woessner, W. W. (1992). *Applied groundwater modeling. Simulation of low and advective transport*. San Diego: Academic Press.

c) Livro com três ou mais autores

Harland, W. B., Armstrong, R. L., Cox, A. L. V., Craig, L. E., Smith, A., Smith, D. (1989). *A geologic time scale* (2a ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

d) Capítulo de livro

Almeida, F. F. M., Amaral, G., Cordani, U. G., Kawashita, K. (1973). The Precambrian evolution of the South American cratonic margin south of Amazonas River. In: A. E. Nairn, F. G. Stille (Eds.), *The ocean basin and margins* (v. 1, 411-446). New York: Plenum.

e) Artigo de periódico

Caffe, P. J., Soler, M. M., Coira, B. L., Cordani, U. G., Onoe, A. T. (2008). The granada ignimbrite: a compound pyroclastic unit and its relationship with upper miocene caldera volcanism in the northern Puna. *Journal of South American Earth Science*, 25(4), 464-484.

f) Trabalho apresentado em evento

Danni, J. C. M., Ribeiro, C. C. (1978). Caracterização estratigráfica da sequência vulcano-sedimentar de Pilar de Goiás e de Guarinos, Goiás. XXX Congresso Brasileiro de Geologia, v. 2, 582-596. Recife: SBG.

g) Mapa

Inda, H. A. W., Barbosa, J. F. (1978). *Mapa Geológico do Estado da Bahia. Escala 1:1.000.000*. Salvador: Secretaria de Minas e Energia do Estado da Bahia/CBPM.

h) Teses e dissertações

Petta, A. R. (1995). *Estudo geoquímico e relações petrogenéticas do batólito múltiplo composto São Vicente/Caicó (RN-Brasil)*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas ? UNESP.

i) Documentos em meio eletrônico

Livro

Sharkov, E. (2012). *Tectonics: Recent Advances*. Croatia: InTech, <<http://www.intechopen.com/books/tectonics-recent-advances>>.

Artigo de periódico

Soares, E. A., Tatum, S. H. (2010). OSL age determinations of pleistocene fluvial deposits in Central Amazonia. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 82(3), 691-699. Acesso em 14 de fevereiro de 2011, <<http://www.scielo.br/pdf/aabc/v82n3/17.pdf>>.

Trabalho apresentado em evento

Souza-Lima, W., Farias, R. M. (2007). A flora quaternária dos travertinos de Itabaiana, Sergipe. *PALEO 2007*(p. 7). Itabaiana: SBP. Acesso em 18 de dezembro de 2008, <[http://www.phoenix.org.br/Paleo2007\\_Boletim.pdf](http://www.phoenix.org.br/Paleo2007_Boletim.pdf)>.

j) Com numeração DOI

Livro

Zavattini, J. A. (2009). As chuvas e as massas de ar no estado de Mato Grosso do Sul: estudo geográfico com vista à regionalização climática. DOI: 10.7476/9788579830020.

Artigo de periódico

Evandro L. Kleina, E. L., Rodrigues, J. B., Lopesa, E. C. S., Gilvana L. Soledade, G. L. (2012). Diversity of Rhyacian granitoids in the basement of the Neoproterozoic-Early Cambrian Gurupi Belt, northern Brazil: Geochemistry, U?Pb zircon geochronology, and Nd isotope constraints on the Paleoproterozoic magmatic and crustal evolution. *Precambrian Research*, 220-221, 192-216, DOI: 10.1016/j.precamres.2012.08.007.

**Para realizar a submissão de artigos:**

Encaminhar manuscrito com tabelas e figuras inseridas, conforme item 4a da "Apresentação do Artigo", para o e-mail [publigc@usp.br](mailto:publigc@usp.br).

Qualquer dúvida, entrar em contato com a Seção de Publicações, e-mail: [publigc@usp.br](mailto:publigc@usp.br) ou no tel. (11) 3091-3973.

Revista Geologia USP

Apresentação

Conselho Editorial

Corpo Consultivo

Tutorial: Referências no Word

Artigos Submetidos

Série Científica

eBook - Artigos Publicados

Artigos Publicados

Instruções aos Autores

Submissão Eletrônica

Publicação Especial

Artigos Publicados

Instruções aos Autores

Série Didática

Artigos Publicados

Instruções aos Autores

Direitos Reservados © 1999-2017 Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo