



RAQUEL SEVERO CELIA

**METEORITO PATRIMÔNIO E METEORITO TRÊS IRMÃOS: ANÁLISE  
PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA COMPARATIVA DE METEORITOS L6**

Porto Alegre

2021

RAQUEL SEVERO CELIA

**METEORITO PATRIMÔNIO E METEORITO TRÊS IRMÃOS: ANÁLISE  
PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA COMPARATIVA DE METEORITOS L6**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Orientadores:** Profa. Dra. Márcia Elisa Boscato  
Gomes

Porto Alegre

2021

### CIP - Catalogação na Publicação

Severo Celia, Raquel  
METEORITO PATRIMÔNIO E METEORITO TRÊS IRMÃOS:  
ANÁLISE PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA COMPARATIVA DE  
METEORITOS L6 / Raquel Severo Celia. -- 2021.  
108 f.  
Orientadora: Márcia Elisa Boscato Gomes.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,  
BR-RS, 2021.

1. Meteoritos. 2. Condritos. 3. Meteorito  
Patrimônio. 4. Meteorito Três Irmãos. I. Boscato  
Gomes, Márcia Elisa, orient. II. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **Meteorito Patrimônio e Meteorito Três Irmãos: análise petrográfica e mineralógica comparativa de meteoritos L6** elaborado por **Raquel Severo Celia**, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Comissão Examinadora:**

---

Msc. Renata Brandelli Schaan

---

Prof.Dr. Rommulo Vieira Conceição

---

Msc. Susan Martins Drago

Dedico esse trabalho a todas às  
mulheres pesquisadoras desse país e  
todas mulheres que fazem e fizeram parte  
da minha caminhada. Vocês me dão forças  
para continuar.

## AGRADECIMENTOS

Certa feita, aprendi com uma pesquisadora a qual admiro muito, que a sessão de agradecimentos de um trabalho é onde irão encontrar-se as pessoas que auxiliaram o feito do mesmo. Assim como ela, gostaria de agradecer primeiramente aos professores e pesquisadores que tanto me auxiliaram até aqui. Os caminhos poderiam ter sido bem diferentes se talvez uma lição de corredor ou debate não tivesse ocorrido. Muito obrigada. Também agradeço à Alexandra Asanovna Elbakyan, sem ela esse trabalho não seria possível.

Ao meu pai e irmãos, João Antônio, Adriano e Matheus. Sem vocês me apoiando, me incentivando e se certificando que eu estava bem e tinha todos recursos, com certeza eu não teria chegado até aqui. Muito obrigada.

Minhas tias, Maria Raquel e Maria Gicela. Cada uma da sua forma me mostrou a força que tenho e de onde ela vem. Vocês com certeza são parte fundamental da mulher e pesquisadora que sou hoje. Muito obrigada.

Às mulheres da minha família, Letícia e Andréia, muito obrigada por me mostrarem que certas circunstâncias não definem quem somos e o que podemos realizar.

Agradecer às minhas três estrelas: Antônio Roberto, Malba e Elygia. Obrigada por estarem ao meu lado a sua maneira.

Ao meu companheiro de vida, Matheus Silva (e à Linda também). A tua presença nessa sessão de agradecimentos com certeza não está atrelada somente às noites mal dormidas com a luz acesa enquanto eu escrevia esse trabalho ou aos chás que me reconfortavam. Sem ti ao meu lado me apoiando e me mostrando o quanto sou capaz, teria sido bem diferente. Obrigada por estar ao meu lado.

Agradecer às minhas amigas irmãs: Carolina, Natalia e Yasmin (e a Rita). Vocês são a melhor coisa que eu poderia pedir em termos de amizade e são meu conforto em qualquer hora. Obrigada por existirem e estarem comigo nessa jornada.

Aos meus amigos André e Álvaro. A luz de vocês e preocupação durante todo esse processo foram essenciais para que eu pudesse finalizar esse trabalho.

À minha amiga Laura, meu muito obrigada, por entender o quão corrido e emocionante pode ser ter uma vida dupla com duas faculdades. Também à minha amiga Mariane por sempre se preocupar comigo.

Às minhas colegas de profissão e amigas: Bénédicte, Catherine, Elisa, Gabriela, Laís e Silvia. Cada uma de vocês teve uma colaboração única nessa minha caminhada geológica. Nem mesmo o tempo do Paleozoico seria suficiente para eu aprender e compartilhar tudo que gostaria com vocês. Juntas somos mais fortes.

Aos meus consagrados geológicos, Luiz, Luis, Maurício e Natanael. Ter vocês ao meu lado fizeram com que essa caminhada fosse muito mais fácil e leve. Muito obrigada.

Agradecer a Gustavo Salerno, um astrofísico tão apaixonado por meteoritos quanto eu. Aprender contigo e compartilhar o pouco que sei foi fundamental para construção desse trabalho e do meu entendimento não somente sobre os meteoritos, mas também sobre coisas muito maiores que eu. Muito obrigada.

Ao meu amigo e colega, Maurício Dias e à Mau Gem Vulcana. Desde o apoio incondicional até as lições geológicas de vida, assim como os paratiquetos para que eu me acalmasse e confiasse em mim. Muito obrigada por estar comigo e não soltar minha mão.

Por último, mas com toda certeza não menos importante, agradecer a minha orientadora e amiga, Márcia. Obrigada por me ensinar que meu valor como pesquisadora vai muito além de um artigo publicado em uma revista específica ou que eu preciso abandonar minhas convicções morais e políticas para fazer pesquisa. A minha admiração e carinho por ti vão muito além do instituto de geociências, anos luz além.

Agradecer também a ela, Universidade pública de qualidade. Em algum momento da minha caminhada acadêmica comentaram que certos espaços não eram espaços de expressão política. Por isso, deixo meu agradecimento aqui:

Receita de Bolo de Chocolate

2 xícaras de farinha;

4 colheres de sal;

1 xícara de chocolate

Leite

Coloque os ingredientes.

Muito obrigada.

*The simple truth is that interstellar distances will not fit into the human imagination.*

*“A simples verdade é que as distâncias interestelares estão além da imaginação humana .*

(Douglas Adams)



## RESUMO

O estudo dos meteoritos é uma ferramenta essencial para o entendimento da formação da Terra e do Sistema Solar. Sua caracterização e análise detalhada, juntamente com uma comparação entre meteoritos do mesmo tipo, auxiliam a montar histórias de formação destes. Esse trabalho é uma análise e caracterização do meteorito Patrimônio – com queda na década de 50 – e do meteorito Três Irmãos – queda em 2017, e uma comparação entre estes dois meteoritos. O meteorito Patrimônio já possui classificação de tipo petrológico definida (L6), mas ainda falta a classificação de choque. Já o meteorito Três Irmãos possui as duas classificações, L6 e S3. As classificações L referem-se ao conteúdo de ferro, já o número de 1 a 6 do tipo petrológico. O trabalho foi conduzido utilizando petrografia macro e microscópica, MEV e microsonda eletrônica, para caracterização completa dos dois meteoritos. As petrografias e imageamentos em BSE serviram para a caracterização petrológica e análise de texturas entre os constituintes dos meteoritos. Análises quantitativas e mapas WDS foram utilizados para as definições de química mineral. O meteorito Patrimônio possui côndrulos discerníveis com diversas texturas; olivina e piroxênio fraturado; piroxênio com extinção reta e ondulante, plagioclásio intersticial e associado a cromita policristalina; veios de choque e bolsões de fusão. O meteorito Três Irmãos também possui côndrulos discerníveis; olivina e piroxênio fraturados e veios e bolsões de fusão, contudo, o plagioclásio não se associa com cromita policristalina e a matriz é mais fina que a do Patrimônio. Os dois meteoritos possuem certa homogeneidade química, contudo possuem duas populações de plagioclásio (uma mais albitica e outra com maior teor de cálcio). Ainda, o meteorito Patrimônio tem diferentes composições de piroxênio, alguns com maior teor de ferro e cálcio que os da maioria que são da série enstatita-ferrosilita. O Três Irmãos possui também duas populações de piroxênio: enstatita e diopsídio. Devido às variações observadas nos piroxênios do meteorito Patrimônio - tanto texturais quanto químicas - a classificação do tipo L6 pode não ser a mais adequada para esse meteorito. Quanto ao choque, devido a presença de bolsões de fusão e veios, matriz com textura mais grossa que a do Três Irmãos e texturas de plagioclásio e cromita policristalina, o meteorito Patrimônio encaixa-se na categoria de choque S4. Já o meteorito Três Irmãos, tendo duas populações de piroxênio diferentes, côndrulos discerníveis e cromitas não fraturadas ou policristalinas, provavelmente encaixa-se em um grau de choque abaixo de S4.

**PALAVRAS-CHAVE:** Meteoritos, Condritos, Estágio de choque, Meteorito Patrimônio, Meteorito Três Irmãos.

## ABSTRACT

The study of meteorites is an essential tool for understanding the formation of the Earth and the Solar System. Its characterization and detailed analysis, together with a comparison between meteorites of the same type, help to build their formation histories. This work is an analysis and characterization of the Patrimônio meteorite – which fell in the 50s – and the Três Irmãos meteorite – which fell in 2017, and a comparison between these two meteorites. The Patrimônio meteorite already has a defined petrological type classification (L6), but it still lacks the shock classification. The Três Irmãos meteorite, on the other hand, has both classifications, which are L6 and S3. The L classifications refer to the iron content, while the number 1 to 6 refer to the petrologic type. The work was carried out using macro and microscopic petrography, SEM and electronic microprobe, for complete characterization of the two meteorites. The petrographies and BSE imaging were used for petrological characterization and texture analysis among meteorite constituents. Quantitative analyzes and WDS maps were used for definitions of mineral chemistry. The Patrimônio Meteorite has discernible chondrules with diverse textures; olivine and fractured pyroxene; pyroxene with straight and undulating extinction, interstitial plagioclase and associated with polycrystalline chromite; shock shafts and fusion pockets. The Três Irmãos meteorite also has discernible chondrules; fractured olivine and pyroxene and fusion veins and pockets, however, plagioclase is not associated with polycrystalline chromite and the matrix is thinner than that of Patrimônio. The two meteorites have a certain chemical homogeneity; however, they have two plagioclase populations (one more albitic and one with a higher calcium content). In addition, the Patrimônio meteorite has different pyroxene compositions, some with higher iron and calcium content than most of the enstatite-ferrosilite series. Três Irmãos also has two pyroxene populations: enstatite and diopside. Due to the variations observed in the pyroxenes of the Patrimônio meteorite - both textural and chemical - the classification of type L6 may not be the most suitable for this meteorite. As for the shock, due to the presence of fusion pockets and veins, a matrix with a thicker texture than that of Três Irmãos and plagioclase and polycrystalline chromite textures, the Patrimônio meteorite fits into the S4 shock category. The Três Irmãos meteorite, on the other hand, having two different pyroxene populations, discernible chondrules and non-fractured or polycrystalline chromites, probably fits in a degree of shock below S4.

**KEYWORDS:** Meteorites, Chondrites, State of shock, Patrimônio Meteorite, Três Irmãos Meteorite

## ABREVIATURAS E SIGLAS

M – Massas solares

HH – Herbig-Hero

CAI – Inclusão rica em cálcio e alumínio

CI – Condrito Carbonáceo do tipo Ivuna

CM - Condrito Carbonáceo do tipo Murchison

CO - Condrito Carbonáceo do tipo Ornans

CV - Condrito Carbonáceo do tipo Allende

CR - Condrito Carbonáceo do tipo Renazzo

CH - Condrito Carbonáceo do tipo ALH5085

CB - Condrito Carbonáceo do tipo Bencubbin

CK - Condrito Carbonáceo do tipo Karounda

OC – Condritos ordinários

OP – Olivina Porfirítica

PP – Piroxênio Porfirítico

POP – Olivina-Piroxênio Porfirítico

PR – Piroxênio Radial

OB – Olivina Barrada

C – Criptocristalina

OPG – Olivina Piroxênio Granular

Msoc - The Meteoritical Society

OI – Olivina

Px – Piroxênio

Plg – Plagioclásio

Cr – Cromita

FeS – Troilita

Kma – Kamacita

Tae - Taenita

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Transformações minerais de alta pressão e alta temperatura. Retirada de Gillet et al., 2007.....	31
Figura 2 - Localização da queda do meteorito Patrimônio.....	41
Figura 3 - Listagem do meteorito Patrimônio, em 1958, pela Sociedade Internacional para Ciências Meteoríticas e Planetárias.....	41
Figura 4 - Localização da queda do meteorito Três Irmãos.....	42
Figura 5 - Amostras utilizadas no trabalho. A) Lâmina petrográfica meteorito Patrimônio. B) Lâmina petrográfica meteorito Três Irmãos. C) Tablete em resina meteorito Três Irmãos. D) Tablete meteorito Patrimônio. Petrografia Microscópica: .	48
Figura 6 - Representação de como uma amostra mal polida pode alterar a incidência dos BSE e receber interferência da topografia da amostra. Sendo (a) amostra bem polida e (b) amostra com relevo. Retirado de Reed, 2005 .....	50
Figura 7 - Representação da amostra no imageamento SE do MEV. Retirado de Reed, 2005.....	50
Figura 8 - Ciclos de trabalho desenvolvidos. Sendo o ciclo mais interno a primeira etapa, a do meio a segunda etapa e, o ciclo mais externo, a última etapa.	52
Figura 9 - A) Côndrulo POP; B) Parte de um cône drulo PR; C) Cône drulo CR; D) Cône drulo de PR.....	56
Figura 10 - A) Cône drulo porfírico; B) Cône drulo OB; C e D) Cône drulo de piroxênio.....	57
Figura 11 - Matriz do meteorito Patrimônio composta por piroxênio, olivina e plagioclásio.....	58
Figura 12 - Olivina fraturada – detalhe das fraturas planares. ....	59
Figura 13 - A) Olivina por BSE em microsonda; B, C e D) Fraturas planares da olivina em luz refletida.....	59
Figura 14 - Piroxênio do Patrimônio por BSE em microsonda eletrônica.....	60
Figura 15 – A) Plagioclásio subédrico. B) Plagioclásio com extinção ondulante .....	61
Figura 16 - A) Textura intersticial do plagioclásio. B) Intersticial relacionado a troilita. C e D) Plagioclásio associado a cromita policristalina. ....	62
Figura 17 - A) Veio de choque em lâmina. B) Detalhe do bolsão de fusão. ...	63
Figura 18 - Opacos com mistura de fases kamacita e taenita. ....	63

Figura 19 - Bolsão de veio de choque com troilita, kamacita e taenita. ....	64
Figura 20 - A) Cromita com fraturas planares; B) Cromita associada a kamacita, taenita e troilita; C e D) Cromita policristalina associada à plagioclásio. ....	65
Figura 21 - Associação de troilita, kamacita e taenita. ....	66
Figura 22 - Apatita do meteorito Patrimônio. ....	67
Figura 23 – Gráfico $\text{SiO}_2 \times \text{MgO}/\text{FeO} + \text{MgO}$ das olivinas do meteorito Patrimônio. ....	68
Figura 24 – Gráfico do manganês das olivinas do meteorito Patrimônio. ....	69
Figura 25 - Diagrama ternário de piroxênios plotando os dados de microsonda do meteorito Patrimônio. ....	70
Figura 26 – Gráfico $\text{CaO} \times \text{MgO}/\text{MgO} + \text{FeO}$ dos piroxênios do meteorito Patrimônio. ....	70
Figura 27 – Quantidade de cálcio em um côndrulo do meteorito Patrimônio. ....	71
Figura 28 – Côndrulo de PR. ....	71
Figura 29 – Classificação dos plagioclásios do meteorito Patrimônio. ....	72
Figura 30 – Gráfico $\text{CaO} \times \text{NaO}$ dos plagioclásio no meteorito Patrimônio. ....	73
Figura 31 – Côndrulo de cromita com plagioclásio rico em Ca do meteorito Patrimônio. A) Imagem de elétrons retroespalhados. B) Mapa composicional de Ca mostrando presença do plagioclásio rico em cálcio no detalhe. ....	73
Figura 32 – Relação Cr vs Al nas cromitas do meteorito Patrimônio. ....	74
Figura 33 – Mapa composicional de cloro Apatita do meteorito Patrimônio. ....	75
Figura 34 - Côndrulos presentes na amostra 3IR1: A e B) Côndrulos de PR; C e E) Côndrulos de olivina barrada; D) Côndrulo de olivina-piroxênio granular. ....	77
Figura 35 - Visão geral da amostra 3IR2, côndrulo e matriz em BSE. A) Visão geral; B) Possível côndrulo; C) Detalhe da matriz mostrando os contatos poligonais entre os minerais (olivina, piroxênio). ....	78
Figura 36 - Matriz recristalizada da amostra 3IR1, evidenciando os contatos poligonais entre os cristais do meteorito. C) Plagioclásio na matriz do meteorito. ....	79
Figura 37 - A) Cristal de olivina fraturado na amostra 3IR1; B) Detalhe das fraturas planares presentes na olivina. ....	80
Figura 38 - A) Olivinas da amostra 3IR1 em BSE; B e C) Detalhe das olivinas da amostra 3IR1; D) Olivina em luz refletida. ....	80
Figura 39 – Piroxênio em BSE do meteorito Três Irmãos. ....	81
Figura 40 – Cristais subédricos de plagioclásio no meteorito Três Irmãos. ....	82

Figura 41 - A) Plagioclásio intersticial na amostra 3IR2; B) Detalhe do plagioclásio intersticial.....	82
Figura 42 - A e D) Cromita associada à troilita na amostra 3IR2; B) Detalhe da cromita associada à troilita; C) Cromita sem fraturamento na amostra 3IR2. ....	83
Figura 43 - A e B) Veios de choque da amostra 3IR1; C e E) Bolsões de fusão; D, F e G) Detalhes dos bolsões de fusão.....	85
Figura 44 - Bolsão pervasivo na amostra 3IR2.....	86
Figura 45 - A) Kamacita e taenita na amostra 3IR2; B) Detalhe da divisão das duas fases kamacita e taenita).....	87
Figura 46 - Detalhe do bolsão de fusão com textura de troelita policristalina .	87
Figura 47- Apatita do meteorito Três Irmãos. ....	88
Figura 48 - Gráfico binário sílica vs MgO/FeO+MgO das olivinas do meteorito três irmãos analisadas em microsonda eletrônica.....	89
Figura 49 – Classificação dos piroxênios do meteorito Três Irmãos.....	90
Figura 50 – Classificação dos plagioclásios do meteorito Três Irmãos .....	91
Figura 51 – Gráfico $Cr_2O_3$ x $Al_2O_3$ das cromitas do meteorito Três Irmãos. ...	92
Figura 52 - A) Espectro EDS da borda da apatita. B) Espectro EDS do centro do grão de apatita. ....	93

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Meteoritos brasileiros do acervo do LIMEP .....	19
Quadro 2 - Classes e grupos de meteoritos. Adaptado de Krot et al., (2017).	25
Quadro 3: Componentes dos grupos dos meteoritos ordinários. Adaptado de Krot et al., (2017).....	26
Quadro 4 - Presença de Fe nos três grupos de condritos ordinários Retirado de Norton & Chitwood (2011) .....	27
Quadro 5: Classificação petrológica de CO. Retirada de Van Schmus & Wood (1967).....	28
Quadro 6 - Classificação de côndrulos. Adaptada de Gooding & Keil (1981).	29
Quadro 7: Classificação dos estágios de choque. Retirada de Stöffler (1991). .....	33
Quadro 8: Revisão da classificação de estágios de choque. Retirada de Stöffler et al., (2018). .....	35
Quadro 9: Variedades petrográficas de cromitas em condritos ordinários. Retirada e modificada de Rubin, 2003. *Imagens de exemplo retiradas de Rubin, 2003. .....	36
Quadro 10 - Classificação de grau de intemperismo de meteoritos, retirada de Wlotzka (1993). .....	40
Quadro 11: Artigos base do trabalho. ....	46

## .SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1.	Justificativa	19
1.2.	Objetivos	19
2.	ESTADO DA ARTE	21
2.1.	Sistema Solar	21
2.2.	Meteoritos	23
2.2.1.	Meteoritos Condriticos	24
2.2.2.	Meteoritos Condritos Ordinários	26
2.3.	Classificação de cõndrulos	28
2.4.	Minerais em meteoritos condritos e de alta pressão de choque	29
2.5.	Estado de Choque	31
2.5.1.	Texturas de cromita em meteoritos condriticos	36
2.6.	Classificação de intemperismo.	39
2.7.	Meteorito Patrimônio.	40
2.8.	Meteorito Três Irmãos.	42
3.	METODOLOGIA	44
3.1.	Revisão Bibliográfica:	44
3.2.	Petrografia Macroscópica:	47
3.3.	Preparação de amostras:	47
3.4.	Petrografia óptica – luz refletida	48
3.5.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV):	49
3.6.	Microanálises por Microsonda Eletrônica (EPMA):	51
3.7.	Etapas do Trabalho	52
3.7.1.	Etapa 1 - Revisão Bibliográfica – Petrografia Macroscópica- Preparação de Amostras	52
3.7.2.	Etapa 2 - Revisão Bibliográfica - Petrografia Microscópica - MEV	



3.7.3. Etapa 3 - Revisão Bibliográfica - Petrografia Microscópica – Microsonda Eletrônica	54
4. RESULTADOS	55
4.1. Meteorito Patrimônio	55
4.1.1. Microscopia e texturas	55
4.1.1. Química Mineral	67
4.1.1.1. Olivina	67
4.1.1.2. Piroxênio	69
4.1.1.3. Plagioclásio	71
4.1.1.4. Cromita	73
4.1.1.5. Apatita	74
4.2. Meteorito Três Irmãos	75
4.2.1. Microscopia e texturas	75
4.2.2. Química Mineral	88
4.2.2.1. Olivina	88
4.2.2.2. Piroxênio	89
4.2.2.3. Plagioclásio	90
4.2.2.4. Cromita	91
4.2.2.5. Apatita	92
5. DISCUSSÃO	94
6. CONCLUSÕES	98
7. REFERÊNCIAS	99
1 APÊNDICE A – Resultados de química mineral: Olivina	103
2 APÊNDICE B – Resultados de química mineral: Piroxênio	104
3 APÊNDICE C – Resultados de química mineral: Plagioclásio	106
4 APÊNDICE D – Resultados de química mineral: Cromita	107

## 1. INTRODUÇÃO

Assim como o estudo da geologia terrestre em que duas amostras de uma mesma rocha podem apresentar feições tão diversas que podem fazer com que uma classificação diversa seja aplicada às amostras, no estudo dos meteoritos isso também ocorre. Um mesmo meteorito pode apresentar duas classificações apenas pelo fato de o choque ter alterado de forma diferente seus constituintes. Um estudo detalhado não apenas de química mineral, mas também de petrografia microscópica com atenção às texturas e assembleias minerais auxilia nesse feito.

O meteorito Patrimônio, mesmo tendo sido estudado após sua queda na década de 50, ainda não possui sua classificação de choque, apenas de tipo petrológico. Já o meteorito Três Irmãos, com queda observada em 2017, mesmo tendo suas duas classificações já definidas, possui algumas feições que divergem da definição de L6 e S3. Confirmar tanto as classificações petrológicas quanto de choque se faz necessário para que haja melhor compreensão das origens desses materiais e atualização do banco de dados de meteoritos brasileiro.

O Brasil possui diversas amostras meteoríticas sendo o maior acervo no Museu Nacional do Rio de Janeiro (MNRJ). O LIMEP (Laboratório Interdisciplinar de Meteorítica e Ciências Planetárias) possui algumas amostras cedidas pelo MNRJ (Quadro 1).

Quadro 1 - Meteoritos brasileiros do acervo do LIMEP

Meteorito	Estado da queda	Tipo petrológico	Choque
Rio do Pires	Bahia	L6	S6
Três Irmaos	Bahia	L6	S3
Campos Sales	Ceará	L5	S1
Parambu	Ceará	LL5	S3
Itapicuru Mirim	Maranhão	H5	-
Paranaíba	Mato Grosso do Sul	L6	S6
Minas Gerais (b)	Minas Gerais	H4	-
Patrimônio	Minas Gerais	L6	-
Uberaba	Minas Gerais	H5	S3
Vicência	Pernambuco	LL3	S1
Varre-Sai	Rio de Janeiro	L5	S4
Lavras do Sul	Rio Grande do Sul	L5	S3
Putinga	Rio Grande do Sul	L6	S5
Santa Vitória do Palmar	Rio Grande do Sul	L3	S3
Avanhandava	São Paulo	H4	S2
Porangaba	São Paulo	L4	S2

### 1.1. Justificativa

Manter um banco de dados atualizado e completo das amostras meteoríticas nos acervos faz com que o entendimento sobre a formação desse material possa ser cada vez mais estudado de forma correlacionada e comparativa. Ainda, entender as texturas petrográficas que estão presentes nos mesmos auxilia na tarefa de compreensão da origem dos meteoritos e seus constituintes.

### 1.2. Objetivos

O principal objetivo do presente trabalho é a caracterização dos meteoritos Patrimônio e Três Irmãos, caracterização do grau de choque e refinar a classificação petrográfica e, a partir delas, adquirir maior conhecimento sobre os processos de

metamorfismo de choque que as duas amostras experienciaram. Para que tal objetivo seja alcançado, objetivos específicos precisam ser atingidos:

1. Caracterização petrográfica dos meteoritos Patrimônio e Três Irmãos
2. Análise de texturas petrográficas de forma detalhada.
3. Caracterização química dos constituintes dos meteoritos.

## 2. ESTADO DA ARTE

A formação do Sistema Solar (e de outros sistemas planetários) e os mistérios que a cercam muito nos instigam, pois dizem respeito a nossa origem também: a formação da Terra e os outros planetas, origem da vida e água na Terra (e outros corpos celestes) e outras questões acerca do Universo. Nosso sistema tem sido estudado através de três vieses (principais, mas que se complementam):

- **Astrofísica:** as condições de formação do início do Sistema Solar ainda são bem incertas, contudo, a observação de discos protoplanetários pode ajudar na resolução de algumas dessas dúvidas.
- **Simulações numéricas:** para auxiliar os cálculos nas relações químicas e físicas e também fazer uma detalhada análise de cada estágio da formação.
- **Meteoritos (e materiais de missões espaciais):** através de análises de isótopos, químicas e físicas de materiais extraterrestres, um banco de dados dos componentes dos corpos do Sistema Solar tem se formado - até mesmo linhas do tempo de formação de asteroides e planetas rochosos.

### 2.1. Sistema Solar

As chamadas nuvens moleculares (NM) são o local de nascimento das estrelas - que a partir de observações comprovou-se que não nascem isoladas e sozinhas e sim em grupo/aglomerado. As NM são grandes volumes de gás frio, vastas e compostas majoritariamente por hidrogênio e hélio molecular, algumas moléculas orgânicas complexas e grãos de poeira (representados por silicatos, hidrocarbonetos e gelos,- todos de metais pesados) (Montmerle et al., 2006).

Mesmo possuindo a massa para tal - entre 10<sup>6</sup> a 10<sup>8</sup> M (Massas solares), equivalente a  $1,988\ 47 \pm 0,000\ 07 \times 10^{30}$  kg - as NM não formariam estrelas por causa da gravidade. Através dela haveria uma chamada queda livre e a NM entraria em colapso em menos de 1 Ma. Contudo, acredita-se ter um balanço com a pressão de dentro da NM, que mantém a gravidade em equilíbrio: a partir da distribuição de velocidade no gás, como um estado de turbulência, ocorrem trocas de energia entre

as bordas das grandes NM com as pequenas, ou seja, há uma dissipação de energia para unidades menores, formando núcleos pré-estelares ou as chamadas “nuvenzinhas” (Montmerle et al., 2006).

Toda essa turbulência precisa de uma energia de suporte e a origem da mesma ainda está em debate (Montmerle et al., 2006). A energia de uma supernova próxima ou até mesmo um mecanismo interno: os Herbig-Hero (HH), presentes nas regiões próximas à formação de estrelas, são a representação óptica da saída de energia de estrelas recém-formadas (Reipurth & Bally, 2001). Essa energia de suporte faz com que a NM não colapse, contudo, como há a dissipação de energia para menores escalas, já citada, em algum momento as pequenas nuvens e núcleos pré-estelares colapsam para haver a formação de novas estrelas.

Para que as estrelas sejam visíveis, após a formação delas, a nuvem parental não condensada é dissipada pela radiação estelar e assim há a visualização das mesmas. Após tornar-se uma estrela “livre” de sua nuvem de origem, a evolução estelar ocorre a partir do seu potencial gravitacional e, após milhares de anos, estão dispersas de forma abundante na galáxia (Montmerle et al., 2006). Dessa forma, a memória de formação estelar individual se perde; contudo, comparando-se estrelas chamadas “de campo” – como o Sol - e a quantidade de estrelas próximas e em locais de formação estelar, leva a crer que aproximadamente 90% de estrelas como o Sol nasceram em aglomerados estelares (Adams & Myers, 2001).

Quando há a conservação do momento angular – resultado de reação de retorno da ejeção de material na formação de estrelas (e.g Shu et al., 1987) - os chamados discos protoplanetários são formados. O fluxo de massa produzido pela conservação do momento angular leva a acreção protoestelar. Os discos que fornecem o material para a formação de planetas são discos circundantes às estrelas formadas. Após o disco se formar e esfriar, o que ocorre a seguir é a formação dos minerais refratários.

Os primeiros passos para a formação planetária estão na colisão de partículas de gelo e poeira presentes nos discos. Segundo Dominik e Tielens (1997), para uma colisão eficiente os agregados precisam ser similares em tamanho (ou os grãos de um agregado terem o mesmo tamanho médio do que está colidindo), se não colisões em alta velocidade com pequenas partículas resultam na dispersão ou destruição das partículas. A formação de planetesimais é resultante da concentração das partículas

no gás que está em turbulência no disco, através do mesmo colapso gravitacional (em regiões de maior densidade) e fornece matéria para a formação de planetas.

Vestígios dos planetesimais em nosso Sistema Solar, por exemplo, podem ser encontrados no cinturão de asteroides entre os planetas Marte e Júpiter e são nesses cinturões que se encontram os meteoroides e asteroides (presentes também no chamado Kuiper Belt), chave para o estudo da evolução do Sistema Solar (Pfalzner et al., 2015).

## **2.2. Meteoritos**

Para que um corpo extraterrestre possa ser chamado de meteorito, ele precisa ter entrado na atmosfera terrestre e atingido sua superfície. Sua origem pode variar, a grande maioria provém de asteroides, ou até mesmo de Marte ou da Lua. Sua nomenclatura está baseada no local mais próximo em que foi encontrado e recuperado - o mais próximo. Exemplo, o meteorito Putinga teve queda observada e caiu na cidade de Putinga, Rio Grande do Sul, em 1937.

O meteorito Putinga usado de exemplo é chamado de “queda” pois sua queda foi observada. Já meteoritos em que sua queda não foi presenciada e sim apenas foram recuperados são chamados de “achados”. Quando há evidências de que o meteorito possui a mesma origem (mesmo corpo celeste), mas foram achados em locais diferentes, são chamados de “pares”.

Assim como as rochas terrestres, as classificações de meteoritos (Krot et al. 2017) auxiliam a fazer conexões em relação à sua gênese (serem derivados do mesmo corpo parental, por exemplo). Meteoritos podem ser primitivos ou diferenciados. Dentro dos primitivos, existem os condritos e não condritos. Já nos diferenciados, temos os acondritos, siderolitos e sideritos (Quadro 2). Esses grupos de meteoritos são uma amostra completa da evolução inicial do sistema solar e da geração primária dos planetesimais (Pfalzner et al., 2015). Condritos são a representação da matéria não processada inicial e os diferenciados (acondritos e metálicos) são de corpos celestes que já passaram por diferenciação interna.

### **2.2.1. Meteoritos Condriticos**

Meteoritos condritos possuem componentes formados junto com o início do Sistema Solar, cerca de 4,56 Ma, e seus principais elementos são o oxigênio, silício, ferro e magnésio. Quanto aos constituintes, os côndrulos mais abundantes são: de olivina, piroxênio e Fe e Ni metálico, são partículas de rápida cristalização (minutos/horas). A forma dos côndrulos varia desde arredondados, que representam a fusão perfeita, até irregulares devido ao fato de agregarem outros elementos no seu processo de resfriamento (Scott & Krot, 2003).

Além dos côndrulos, condritos possuem outros três elementos: matriz (com silicatos hidratados e anidros, óxidos, sulfetos, grãos pré-solares e até mesmo material orgânico); Fe e Ni metálico fora dos côndrulos; e as chamadas inclusões refratárias (Scott & Krot, 2003). Essas são derivadas de alta temperatura (fusão e condensação por exemplo) e são divididas em dois grupos: agregados de olivinas ameboides (com olivina, Fe e Ni, diopsídio, espinélio e anortita) e CAIs (inclusões ricas em cálcio e alumínio com minerais que não compõem o restante do meteorito, como perovskita, espinélio, melilita).

Devido à grande variedade de material, os condritos foram divididos em três classes, abrangendo seus quinze grupos (Quadro 2). A primeira com os condritos carbonáceos (dos grupos CI, CM, CO, CV, CR, CH, CB e CK), a segunda com os condritos ordinários (dos grupos H, L e LL) e a terceira com os enstatita condritos (dos grupos EH e EL; Scott & Krot, 2003). Além das classes, há os grupos K e R, sendo K um condrito do tipo Kakangari, com maior proporção de matriz e alta oxidação; já o R um condrito do tipo Rumurutitos, também possui alta matriz e possui estado de oxidação entre os enstatita condritos e os H.

Condritos carbonáceos podem ou não ser ricos em carbono (CI e CM são, por exemplo) e são definidos atualmente pela sua quantidade de elementos refratários (Scott & Krot, 2003). Os enstatita condritos possuem relações nebulosas e apesar da composição isotópica de oxigênio corroborar com a classificação de EH e EL, ainda há muito para se verificar em relação a esses dois grupos. E, por último, os condritos ordinários correspondem a mais de 80% das quedas de meteoritos.



Quadro 2 - Classes e grupos de meteoritos. Adaptado de Krot et al., (2017).

Não diferenciados																					
Condritos																					
Classe	Carbonáceos								Ordinários			Enstatita									
Grupo	CI	CM	CO	CR	CB	CH	CV	CK	H	L	LL	EH	EL	R	K						
Tipo Petroológico	1	1-2	3-4	1-2	3	3	3-4	3-6	3-6			3-6		3-6	3						
Subgrupo					CBa	CVa															
					CBb	CVb															
						CVred															
Não Condritos																					
Mesmo asteroide?																					
Classe	Acapulcoitos		Londranitos		Winonaitos		inclusões de silicato em IAB				inclusões de silicato em IIICD										
Grupo	AC		LOD		WIN																
Diferenciados																					
Acondritos																					
Classe	Angritos		Aubritos		Branchnitos		Urelitos		Meteoritos HED												
Grupo	ANG		AUB				URE		Eucritos												
																Howarditos					
																Diogenitos					
Mesmo asteroide? (Vesta?)																					
Planetários																					
Marte																					
Classe	Shergotitos		Nahlitos		Chassignitos		Ortopiroxenito														
Grupo	SHE		NAK		CHA		OPX														
Lua																					
Classe	Basaltos		Brechas																		
Siderolitos																					
Classe	Pallasitos		Mesosideritos																		
Grupo	PAL		MES																		
Subgrupo	Grupo Principal																				
	Eagle Station																				
	Piroxênio																				
Sideritos																					
Classificação estrutural	Ogg	Og	Om	Of	Off	Opl	D	IIE/UNG													
Grupo Químico	IIB IIE	IIE IIF IC	IIAB IID IIIF	IVA IIIC	IIID	IIC IIF	IVB	Não agrupados													

### 2.2.2. Meteoritos Condritos Ordinários

Os meteoritos condritos ordinários estão divididos em três grupos a partir da sua composição em ferro – elementar e ferro total. Os nomes dos grupos são: H – alto ferro (“high iron”); L – baixo ferro (low iron”); LL – baixo metal e baixo ferro total (“low metal, low total iron”). Essa classificação (divisão), utilizando-se de olivinas e piroxênio, foi primeiro proposta e discutida por Urey e Craig (1953), que dividiram os condritos em H e L, após diversos autores também debaterem, em 1964, Keil e Fredriksson adicionaram o grupo LL à lista. Os componentes médios dos condritos ordinários divididos nos três grupos podem ser vistos Quadro 3.

Quadro 3: Componentes dos grupos dos meteoritos ordinários. Adaptado de Krot et al., (2017).

<b>Ordinários</b>			
<b>Componentes</b>	<b>H</b>	<b>L</b>	<b>LL</b>
<b>CAI + AOA (vol%)</b>	<0.1	<0.1	<0.1
<b>Cond (vol%)</b>	60-80	60-80	60-80
<b>Matrix (vol%)</b>	10-15	10-15	10-15
<b>Metal (vol%)</b>	8.4	4.1	2.0
<b>Diâmetro médio cond (mm)</b>	0.3	0.7	0.9

O grupo H possui de 25 a 30% de ferro total em peso e, desse intervalo, 15 a 19% são de ferro metal, ou seja, estado elementar sem estar relacionado aos silicatos do meteorito (Quadro 4). O intervalo de faialita (Fa) – que nos indica as composições de magnésio e ferro da olivina do meteorito H – está entre 16 e 20%, mostrando que as olivinas do H são ricas em magnésio (de 84 a 80%). O grupo L, em relação ao ferro total possui entre 20 e 23% e, diferente do H, possui um ferro elementar bem baixo – entre 1 e 10%. A proporção da faialita do L (21-25%) demonstra que houve oxidação do ferro em relação ao H. O grupo L é o que possui o maior número de quedas em relação aos outros. O último grupo, LL, contrariamente ao L é o que possui menos quedas, possui pouco ferro elementar – apenas entre 1 e 3% e as olivinas têm o teor de faialita (%Fa) mais alto – maior oxidação – entre 26 e 32%.

Quadro 4 - Presença de Fe nos três grupos de condritos ordinários Retirado de Norton & Chitwood (2011)

<b>Grupo</b>	<b>Fe Metal (%peso)</b>	<b>Fe Total (%peso)</b>	<b>Fa (%mol)</b>	<b>Fs (%mol)</b>
<b>H</b>	15-19	25-30	16-20	14-20
<b>L</b>	1-10	20-23	21-25	20-30
<b>LL</b>	1-3	19-22	26-32	32-40

Após a classificação química a partir do conteúdo de ferro, os OC (condritos ordinários) são classificados a partir do seu tipo petrológico. A classificação mais utilizada (Quadro 5) foi proposta por Van Schmus e Wood (1967) e baseia-se em aspectos petrográficos para além da química. Estes autores definiram 6 grupos, sendo os grupos 1 e 2 para os condritos carbonáceos (não equilibrados e com metamorfismo hidrotermal) e os seguintes para os OC em que grupo 3 designa os “não equilibrados”, mais primitivos, e o grupo 6 os “equilibrados”. Pode-se observar resultados de um possível metamorfismo térmico, como o aumento da recristalização mineral e, como já dito, o aumento do equilíbrio químico. Aspectos como recristalização da matriz e minerais e também texturas dos cõndrulos são levados em conta. Alguns autores e pesquisadores já reconhecem um tipo a mais, sendo 7 no total, contudo, nesse trabalho usaremos a classificação já citada.

Quadro 5: Classificação petrológica de CO. Retirada de Van Schmus &amp; Wood (1967).

Tipo	1	2	3	4	5	6
Homogeneidade de composição da Olivina e Piroxênio	-	Desvio da média > 5%		Desvio da média <5% a uniforme	Uniforme	
Estado estrutural do Piroxênio de baixo Ca	-	Predominantemente monoclinico		Cristais monoclinicos abundantes	Ortorrômico	
Grau de desenvolvimento do Piroxênio secundário	-	Ausente		Predominância de agregados micro cristalinos	Grãos intersticiais	
Vidro ígneo	-	Primário isotrópico; Abundância variável		Turvo quando presente	Ausente	
Minerais metálicos Alto teor de Ni (peso%)	-	(<20%) Taenita ausente ou escassa	(>20%) Kamacita e Taenita presentes.			
Minerais sulfetados Médio teor de Ni	-	> 0.5%	< 0.5%			
Textura geral dos Côndrulos	Côndrulos ausentes	Côndrulos facilmente discerníveis		Côndrulos bem definidos	Côndrulos de fácil distinção	Côndrulos indiscerníveis
Textura da matrix	Fina opaca	Muito opaca	Opaca	Microcristalina transparente	Recristalizada	
Carbono (peso%)	~2.8%	0.6~2.8%	0.2~1.0%	< 0.2%		
Água (peso%)	~20%	4~18%	< 2%			

### 2.3. Classificação de cõndrulos

Além da classificação petrográfica da rocha como um todo, os cõndrulos também podem ser classificados por suas texturas e mineralogia. A classificação mais utilizada foi proposta por Gooding & Keil (1981) (Quadro 6), que separam os cõndrulos em três grupos: grupo 1 de texturas porfiríticas (olivina porfirítica - OP, piroxênio porfirítico - PP e olivina-piroxênio porfiríticos - POP. O grupo 2 de texturas não porfiríticas (piroxênio radial - PR, olivina barrada - OB e criptocristalina - C) e o último, grupo 3, com a textura olivina piroxênio granular - OPG.

Quadro 6 - Classificação de côndrulos. Adaptada de Gooding &amp; Keil (1981)

<b>Côndrulos</b>	<b>Tipo</b>	<b>Textura/Minerais</b>
Grupo 1	OP	Olivina Porfirítica
	PP	Piroxênio Porfirítico
	POP	Olivina-Piroxênio Porfirítico
Grupo 2	PR	Piroxênio Radial
	OB	Olivina Barrada
	C	Criptocristalina
Grupo 3	OPG	Olivina Piroxênio Granular

#### **2.4. Minerais em meteoritos condritos e de alta pressão de choque**

As altas pressões causadas pelo choque no espaço, modificam o material meteorítico. Parâmetros da rocha como o estado e textura pré-choque, a deformação que ocorre em alta temperatura e alta pressão, grandes gradientes de temperatura e também resfriamento rápido de forma adiabática resultam em diversos processos.

As alterações que ocorrem no meteorito se dão de maneira diferente em cada constituinte: há perda de força em sólidos com composição de MgO e SiO<sub>2</sub> (Grady, 1980) e as reações em agregados policristalinos divergem das de monocristalinos. Sendo as respostas diferentes, a intensidade da chamada “pressão de choque de pico inicial” irá variar e, conseqüentemente, a temperatura a ser distribuída nesse meio sólido será heterogênea.

Existem três principais tipos de transformações que podem ser definidos: transformação em estado sólido, fusão e quenching (resfriamento rápido) e fusão e cristalização do líquido (Figura 1). Segundo Leroux (2001), as transformações que ocorrem são: fusão de alta pressão; redução e oxidação; perda de gases (voláteis e/ou gases nobres); fraturas; deformação plástica e geminação mecânica; transformações polimórficas de alta pressão. O autor descreve microestruturas em olivina, diopsídio, enstatita, plagioclásio e metal Fe-Ni. Fraturas são abundantes em olivina e estão presentes em diopsídio, plagioclásio, mas ausentes em Fe-Ni; transição de fases em alta temperatura e alta pressão ocorrem na olivina (wadsleita e

ringwoodita), diopsídio e enstatita (majorita, ilmenita e peroviskita); recristalização em estado sólido ocorre apenas com a olivina e Fe-Ni.

Os veios de choque são também uma importante expressão deste fenômeno, sendo o local em que os polimorfos de alta pressão se formam - tanto dentro do próprio veio quanto em suas margens. Muitas vezes o veio envolve fragmentos do condrito, e a formação de minerais de alta pressão que têm sua cristalização dentro dos veios de choque indicam que o veio passou por quenching (resfriamento rápido). Os polimorfos da olivina, ringwoodita e wadsleita, possuem uma composição química muito próxima a das olivinas presentes em regiões dos meteoritos sem feições de choque, o que sugere que a formação desses polimorfos ocorreu em estado sólido (Gillet et al., 2007).

A masquelinita é a fase amorfa do plagioclásio e no meteorito onde foi descoberta, um acondrito basáltico (shergotito), foi descrita como um vidro isotrópico transparente, contudo, ainda possui grãos com formas bem delimitadas e preserva a clivagem dos feldspatos. Devido ao fato do shergotito possuir tanto química quanto textura similares às de um gabro, Milton & De Carli (1963) fizeram um experimento de alta pressão (250 a 300 kbar) em um gabro, concluindo que a alta pressão pode elevar a temperatura a um nível superior à de fusão do plagioclásio, fazendo com que ocorra transformação em estado sólido com baixa temperatura.

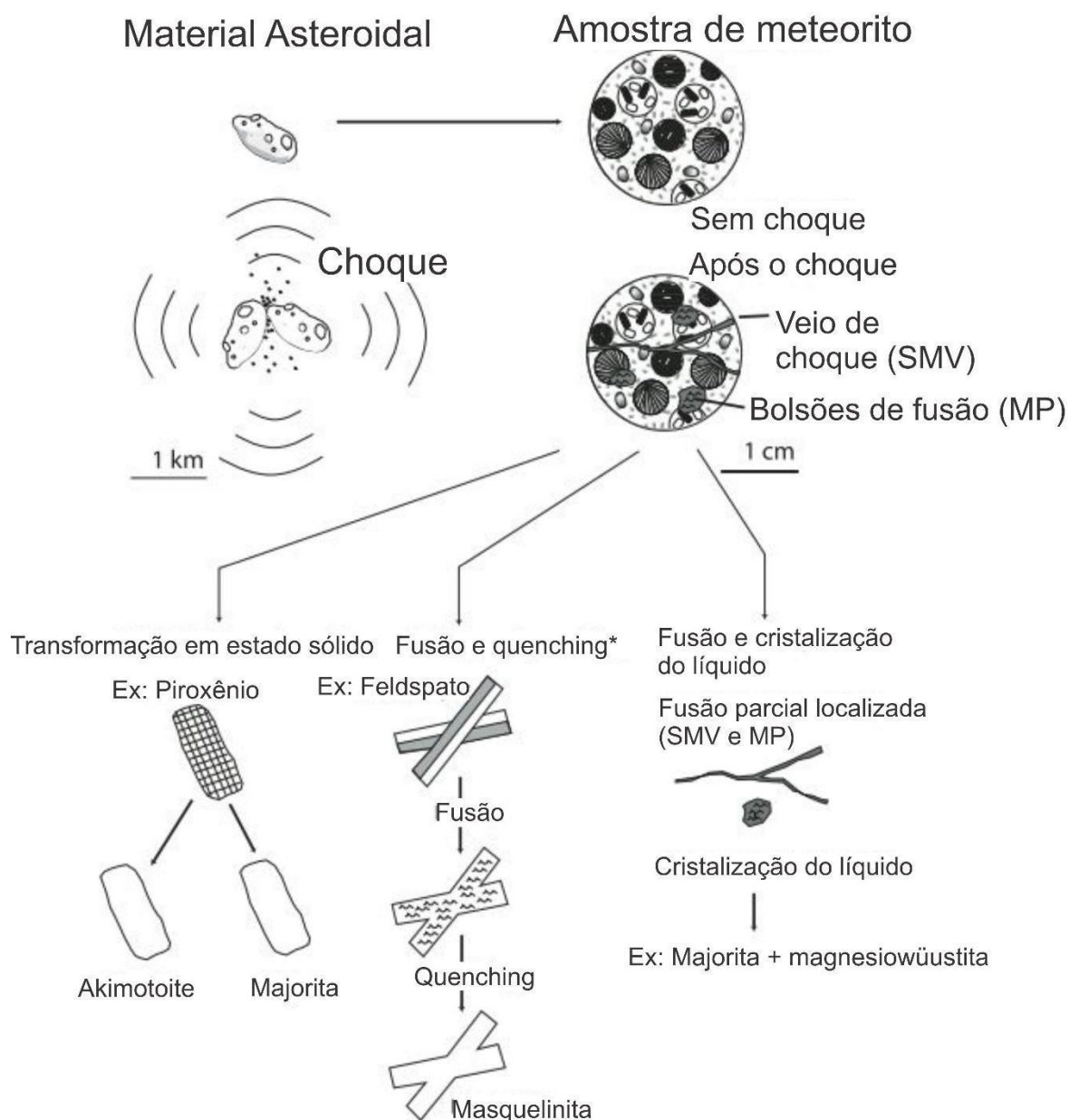


Figura 1 - Transformações minerais de alta pressão e alta temperatura. Retirada de Gillet et al., 2007.

## 2.5. Estado de Choque

O estado de choque de um meteorito é resultante de metamorfismo gerado por colisões em alta velocidade no espaço. O impacto se propaga pela matéria, e após um pico de alta pressão há uma descompressão adiabática. As feições produzidas pelo choque de um meteorito podem fornecer informações da história primordial do

material (do corpo parental do meteorito); o impacto chega a afetar desde distribuição de gases nobres até idades radiométricas. Stöfler (1991) propôs uma classificação de choque que atualmente é a mais utilizada. Segundo o autor, as classificações de choque anteriores para meteoritos CO (Carter et al., 1968; Van Schmus & Ribbe, 1968; Dodd & Jarosewich, 1979; Sears & Dood, 1988) levam em conta apenas aspectos como deformação da olivina, estrutura do feldspato, ou apenas utilizam o grupo L para a classificação. A classificação de Stöfler (1991) baseia-se em experimentos de deformações induzidas e as feições texturais em minerais e assembleias provocadas, além de usar CO dos três grupos composicionais.

Os estágios de choques propostos vão do S1 (sem choque) até S6 (choque muito forte) e, por último, fusão total da rocha. Essas características estão resumidas no Quadro 7.



Quadro 7: Classificação dos estágios de choque. Retirada de Stöffler (1991).

Estágios de choque	Efeitos resultantes do equilíbrio da pressão de choque de pico		Efeitos resultantes da trajetória local de P-T	Pressão de choque GPa	Aumento de temperatura pós choque °C	Aumento mínimo estimado da temperatura °C
	Olivina	Plagioclásio				
Sem choque S1	Extinção reta, fraturas irregulares		Nenhuma	<4-5	10-20	10
Choque muito fraco S2	Extinção ondulante, fraturas irregulares		Nenhuma			
Choque fraco S3	Fraturas planares, extinção ondulante, fraturas irregulares	Extinção ondulante	Veios opacos de choque; formação incipiente de bolsões de fusão (as vezes interconectados)	5-10	20-50	20
Choque moderado S4	Mosaicismo (fraco), fraturas planares	Extinção ondulante, parcialmente isotrópico, fraturas planares de deformação	Bolsões de fusão; veios de fusão interconectados, veios opacos de choque	15-20	100-150	100
Choque forte S5	Mosaicismo (forte), fraturas planares + feições planares de deformação	Masquelinita	Formação pervasiva de bolsões de fusão, veios e diques; veios opacos de choque.	30-35	250-350	300
Choque muito forte S6	Restrito a regiões locais ou próximo a zonas fundidas		Como no estágio S5	45-55	600-850	600
	Recristalização no estado sólido e "manchas", ringwoodita e	Fusão por choque (vidro normal)				
Fundido por choque	Toda rocha fundida (rochas fundidas por impacto e brechas de fusão)			75-90	1500-1750	1500

Stöffler et al., (2018), propuseram uma revisão da classificação anterior (Quadro 8), em que o estágio S7 é adicionado e descrições mais detalhadas são feitas. Para o escopo deste trabalho, não há mudança significativa da classificação anterior, dito isso, esse trabalho irá utilizar a classificação de Stöffler de 1991, mas sempre revisitando a atual.

Quadro 8: Revisão da classificação de estágios de choque. Retirada de Stöffler et al., (2018).

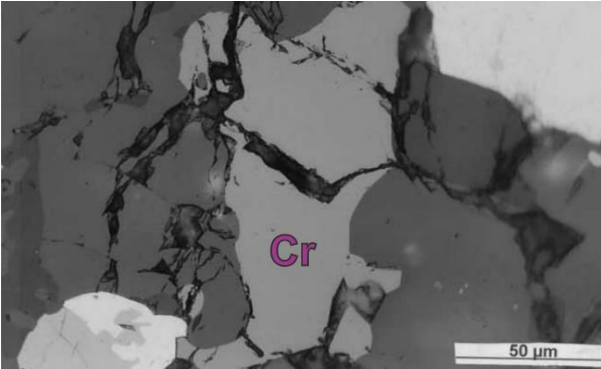
Estágio de Choque IUGS 2007 e proposta de Stöffler 2018	Pressão GPa (293k)	Pressão GPa (293k)	Pressão GPa (920k)	Efeitos resultantes do equilíbrio do pico da pressão de choque			Efeitos resultantes da trajetória local de P-T
				Olivina		Plagioclásio	
C-S1				Extinção reta Fraturas irregulares	Variação angular da posição de extinção: <2°	Extinção reta Fraturas irregulares	Nenhum
C-S2	<4-5			Extinção ondulatória Fraturas irregulares	Variação angular da posição de extinção: >2°	Extinção ondulatória Fraturas irregulares	Nenhum
C-S3	5-10			Fraturas planares (fp) Extinção ondulatória Fraturas irregulares	Grau baixo: máximo de 2 grupos de fp Grau alto: 3 ou mais grupos de fp	Extinção ondulatória	Veios opacos de choque; formação incipiente de bolsões de fusão (às vezes interconectados)
C-S4	15-20	10-15	10-16	Mosaicismo (fraco)	Grau baixo: mosaicismo incipiente, fp e fdp	Grau baixo: extinção ondulatória Grau alto: parcialmente isotrópico, fdp	Bolsões de fusão; veios de fusão interconectados, veios opacos de choque
C-S5	30-35	25-30	20-25	Mosaicismo (forte)	Grau alto: mosaicismo forte, fp e fdp	Vidro diaplético (masquelinita)	Formação pervasiva de bolsões de fusão, veios e diques; veios opacos de choque.
C-S6	45-55	45-60	35-45	Restrito a regiões locais ou próximo a zonas fundidas: fusão e recristalização com manchas amarelo-marrons de olivina		Fusão por choque (vidro normal)	Como no estágio S5
C-S7	>70-75		45-60	Toda rocha fundida			

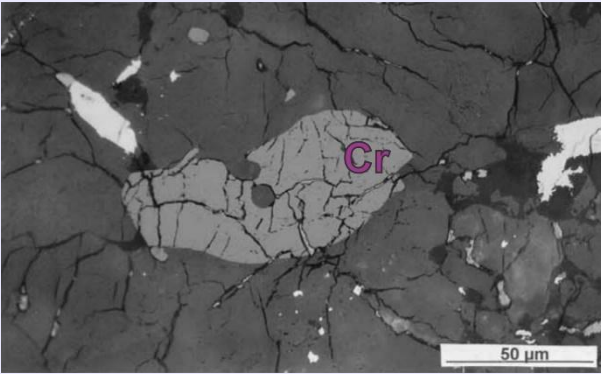
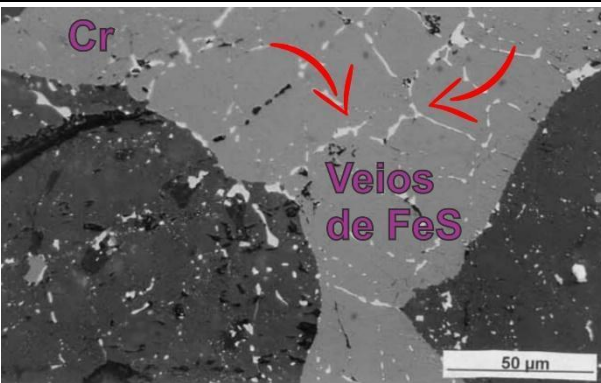
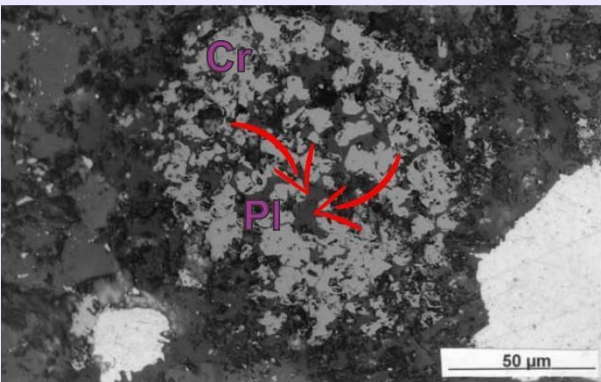
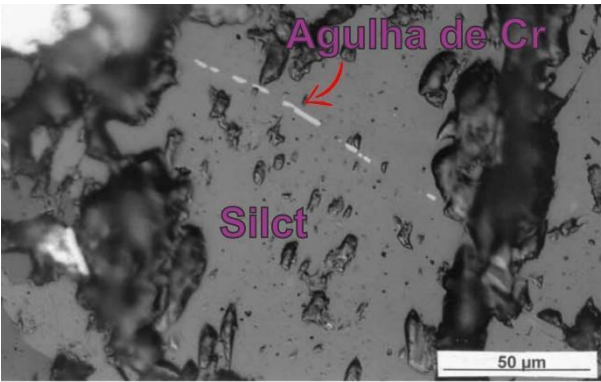
### 2.5.1. Texturas de cromita em meteoritos condriticos

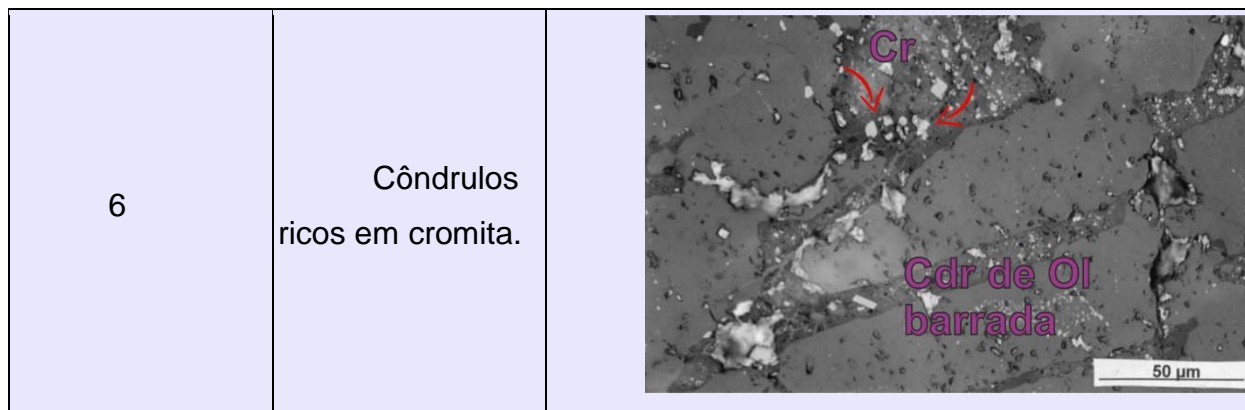
Para além da classificação de choque de Stöffler (1991 e 2018) e as respectivas feições, outros parâmetros indicativos de choque foram descritos por diversos autores, como: troilita policristalina, assim como misturas de metal-troilita que demonstram terem sido rapidamente solidificadas; abundância de Cu metálico; veios de troilita e metal; metais martensíticos (em grãos); bolhas de metal e troilita no interior de silicatos, causando o escurecimento dos mesmos; entre outras texturas e evidências.

A cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) é o óxido com maior volume em meteoritos condritos ordinários - 0.6% peso aproximadamente da mineralogia em condritos H e L - e, ainda, óxidos também podem ser sim afetados por choque. Pensando nessas questões, Rubin (2003) observou evidências indicativas de que as texturas de cromita em OC podem providenciar um novo índice petrográfico de choque. Separadas em seis variedades (Quadro 9), todas cromitas apresentam efeitos de impacto, exceto a primeira variedade (grãos de cromitas sem fraturas e veios opacos).

Quadro 9: Variedades petrográficas de cromitas em condritos ordinários. Retirada e modificada de Rubin, 2003. \*Imagens de exemplo retiradas de Rubin, 2003.

Variedade	Descrição	Imagens de exemplo
1	Grãos de cromita sem fraturas e não fundidos.	

2	Grãos de cromita com fraturas de impacto, não fundidos.	 <p>Micrograph showing Cr grains with impact fractures. A scale bar indicates 50 μm.</p>
3	Grãos de cromita interseccionados por veios opacos.	 <p>Micrograph showing Cr grains intersected by FeS veins. Red arrows point to the veins. A scale bar indicates 50 μm.</p>
4	Assembleia cromita-plagioclásio.	 <p>Micrograph showing Cr and Plagioclase (Pl) assembly. Red arrows point to the plagioclase. A scale bar indicates 50 μm.</p>
5	Vênulas com agulhas e inclusões de cromita.	 <p>Micrograph showing Cr needles and inclusions. Red arrows point to the needles. A scale bar indicates 50 μm.</p>



A variedade 1, em que a cromita não possui fraturas e nem mesmo indício de fusão, os grãos aparecem com intercrescimento de troilita e Fe-Ni e também ocorrem no meio de silicatos máficos (com ou sem plagioclásio). São chamadas de “cromita grossa” e aparecem em formas subédricas a anédricas, arredondadas, em blocos e equantes, de tamanhos de 10 a 200  $\mu\text{m}$  (Rubin, 2003).

A variedade 2, sem indício de fusão, contudo já com fraturas diversas e irregulares. Essas mesmas fraturas tendem a ocorrer nos silicatos próximos às cromitas fraturadas.

A variedade 3 de cromita é composta por grãos de cromita ainda sem feição de fusão, contudo possuem veios de Fe-Ni metálico ou troilita interseccionando-os, veios de até 10  $\mu\text{m}$  de espessura e quantidade modal de 1 a 25% em volume. Esses mesmos grãos de cromita interseccionados pelos veios, possuem intercalação com outros grãos, grossos, também de troilita e Fe-Ni metálico; enquanto outras cromitas possuem em seu entorno silicatos máficos já invadidos por veios opacos (Rubin, 2003).

A variedade 4, assembleias cromita-plagioclásio, também usadas para indicativo de grau de choque (Rubin, 2003), é bastante relatada em OC desde H a L (incluindo L6), e até mesmo em brechas de fusão por impacto, e podem ser chamadas de “grupos de agregados de cromita”. Também são encontradas em forma de gotículas na masquelinita e plagioclásio cristalino com intercalação de espinélio com alto teor de cromo. Os tamanhos dos agregados e dos grãos, assim como textura e proporção entre plagioclásio e cromita são muito diversos. Em relação ao volume de cromita nessas assembleias, as cromitas representam entre 10% e 75% de volume. Os tamanhos das cromitas - que podem ser desde euédricas, subédricas a anédricas

e também arredondados - estão entre 0,2 a 20  $\mu\text{m}$  e, envolvidos por plagioclásio, o agregado todo pode ter de 20 a 300  $\mu\text{m}$  de tamanho.

A variedade 5 de cromita é descrita como vênulas com agulhas e inclusões de cromita, mais especificamente “trilhas curvas” e pequenas bolhas redondas cortando silicatos máficos. O tamanho das vênulas é de até 300  $\mu\text{m}$  de comprimento e até 2  $\mu\text{m}$  de espessura (Rubin, 2003). Apesar da maioria das vênulas possuírem apenas cromita, algumas podem aparecer com vidro de composição de plagioclásio, ou, até mesmo, plagioclásio cristalino.

A variedade 6 de cromita em OC com feição de choque está relacionada a côndrulos, com 5 a 15% do volume total do côndrulo sendo constituído por cromita e o restante do côndrulo é composto por silicatos como, por exemplo olivina e mesóstase normativa de plagioclásio (masquelinita). Constituindo aproximadamente 0,03% do volume dos OC total e 0,04% dos côndrulos de OC, eles possuem texturas radiais, criptocristalinas, porfíricas e barradas e podem ser tanto côndrulos de cromita como côndrulos contendo cromita.

## **2.6. Classificação de intemperismo.**

Assim como as rochas terrestres, os meteoritos também passam por alterações causadas pelo intemperismo que pode ocorrer durante o período de exposição na superfície da Terra e, para designar os graus de intemperismo, são usadas duas classificações. A primeira diz respeito a amostras de mão para meteoritos da Antártica, que vai de A até E (Velbel, 1988), sendo A com menos oxidação de Fe e com o maior nível de intemperismo. A outra classificação (Quadro 10) é feita através de lâmina petrográfica e foi definida por Wlotzka (1993), sendo de W0 a W6. O estágio W0 representa normalmente quedas recentes e também meteoritos com pouco intemperismo, contudo às vezes podem ser descritos como W1, em que já são visíveis aros de óxidos em torno de metais e troilita. No W2, é possível descrever veios com óxidos de ferro, pois tais veios são provenientes não do estágio de intemperismo químico em si, mas através de intemperismo mecânico. Os estágios mais avançados, em que os silicatos são afetados ou até mesmo completamente substituídos por argilas, são mais raros de se encontrar.

Quadro 10 - Classificação de grau de intemperismo de meteoritos, retirada de Wlotzka (1993).

Grau de Intemperismo	Características	Idade terrestre correlacionada a meteoritos do Condado Roosevelt, Novo México
W0	Nenhuma oxidação visível de metal ou sulfeto. Uma coloração limonítica já pode ser perceptível na luz transmitida.	
W1	Pequenos aros de óxido em torno de metal e troilita, pequenos veios de óxido.	
W2	Oxidação moderada do metal, afetando cerca de 20-60%.	5.000 a 15.000 anos.
W3	Oxidação pesada de metal e troilita, sendo 60-95% substituído.	15.000 a 30.000 anos.
W4	Oxidação completa (>95%) do metal e da troilita, mas sem alteração dos silicatos.	20.000 a 35.000 anos.
W5	Alteração inicial de silicatos máficos, principalmente ao longo de fissuras.	30.000 a > 45.000 anos.
W6	Substituição maciça de silicatos por minerais e óxidos de argila.	

## 2.7. Meteorito Patrimônio.

O meteorito de nome Patrimônio possui queda observada, no ano de 1950, no distrito de Patrimônio (Figura 2), coordenadas aproximadas 19° 32'S, 48° 34'W - pertencente, junto com Monjolinho e Prata, ao município de Prata, interior de Minas Gerais, Brasil.



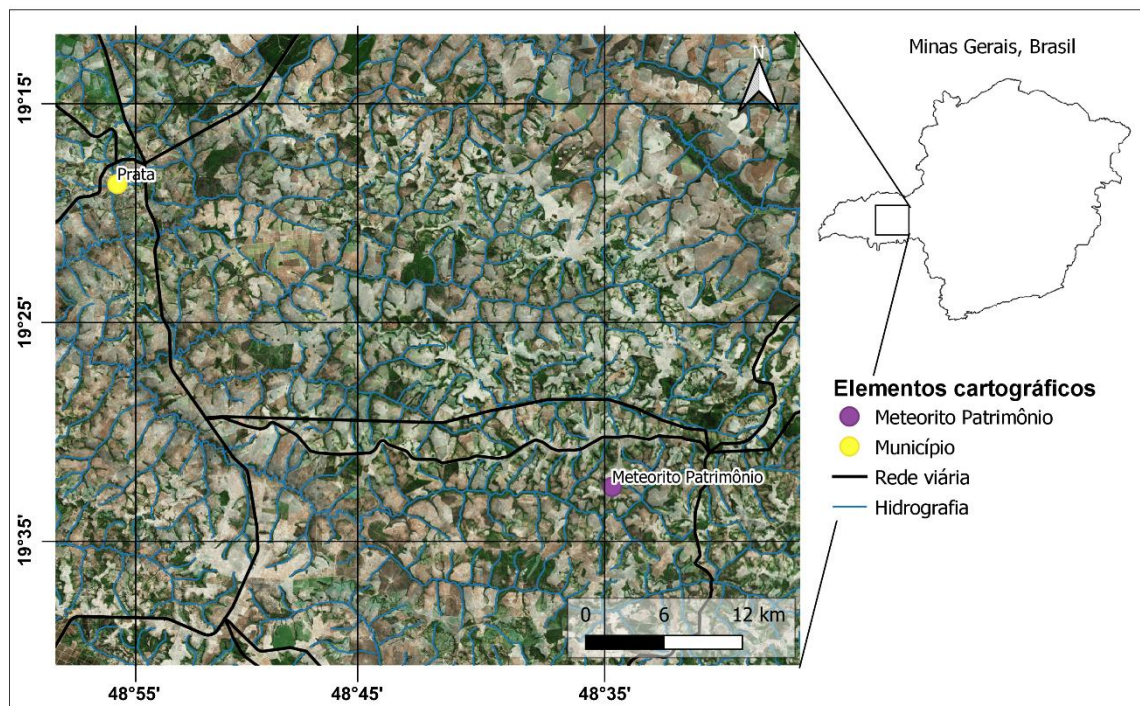


Figura 2 - Localização da queda do meteorito Patrimônio

Segundo o Meteoritical Bulletin Database, base de dados da The Meteoritical Society – Msoc - (International Society for Meteoritics and Planetary Science), o meteorito Patrimônio foi publicado (listado) (Figura 3) pela comissão da MSoc., no catálogo de meteoritos, em 1958 na cidade de Moscow, USSR, descrito por Leonard (1958). A listagem ocorreu através do livro de Frederick Charles Leonard: “A classificational catalogue of the meteoritic falls of the world”, de 1956, em que o Patrimônio já estava catalogado.

**45. PATRIMÔNIO, Brazil.**

**L i t e r a t u r e : I . F . L e o n a r d . A C l a s s i f i c a t i o n a l C a t a l o g  
o f t h e m e t e o r i t i c f a l l s o f t h e W o r l d ,  
1 9 5 6 , p . 8 .**

Figura 3 - Listagem do meteorito Patrimônio, em 1958, pela Sociedade Internacional para Ciências Meteoríticas e Planetárias.

Descrito por Gomes et al., (1978) por meio de análises em microscopia de luz transmitida e refletida e de microsonda eletrônica, o meteorito Patrimônio é composto por olivina, ortopiroxênio e plagioclásio, e em menor proporção, fases metálicas como

kamacita e taenita, sulfeto troilita e diopsídio. Sendo os acessórios de maior importância a cromita e a whitlockita. Devido a composição homogênea da olivina e do piroxênio, côndrulos escassos e alta recristalização, o meteorito Patrimônio foi definido como L6. Contudo, a classificação de choque está em aberto até hoje.

## 2.8. Meteorito Três Irmãos.

O meteorito de nome Três Irmãos teve sua queda observada em 2016, no dia 26 de maio e foi catalogado em 2018. Sua queda ocorreu no estado da Bahia, na região rural sudoeste do estado, em Palmas de Monte Alto, com coordenadas geográficas:  $14^{\circ} 7' 1''\text{S}$ ,  $43^{\circ} 3' 51''\text{W}$  (Figura 4).

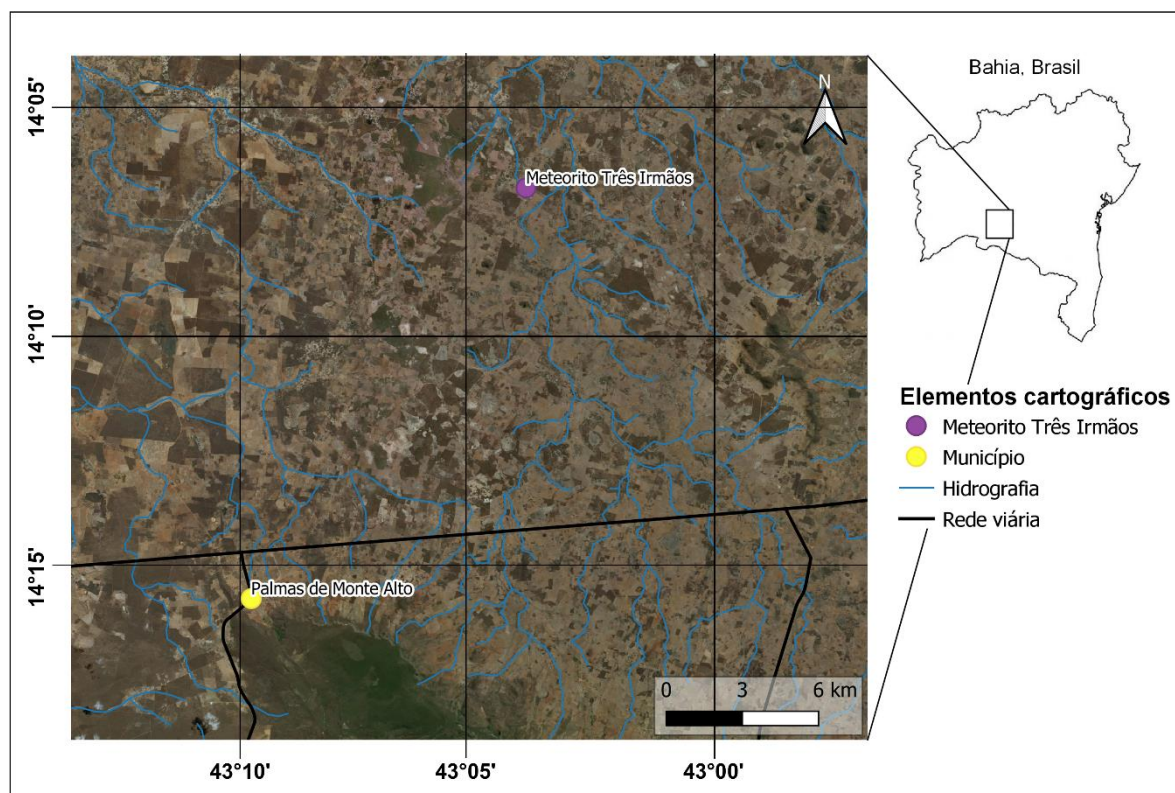


Figura 4 - Localização da queda do meteorito Três Irmãos

A queda ocorreu por volta das 11h30min e moradores da região pensaram que o barulho da queda fosse de uma pedreira ou de uma linha de trem em construção próxima a área. Um professor de história, sabendo do fato, fez um vídeo que, ao

publicar na internet, permitiu que pesquisadores do MNRJ e da UFBA (Universidade Federal da Bahia) pudessem ir ao local se certificar da veracidade do meteorito.

Petrograficamente descrito por M.E.Zucolotto e C.Villaça (2018), o meteorito Três Irmãos é classificado como do tipo L6 e com intemperismo W0 (sem sinais), possui predominantemente, além da matriz, grãos de plagioclásio, grãos metálicos de taenita, plessita e kamacita, presença de cromita monocristalina. Os bolsões de fusão, extinção ondulante de plagioclásio e olivina, juntamente com as fraturas da mesma, indicam que o estágio de choque do meteorito está em S3. A matriz possui alto grau de recristalização, com alguns côndrulos aparentes.

### **3. METODOLOGIA**

O capítulo de metodologia consiste na explanação dos métodos que foram usados para atingir os objetivos do trabalho, mas também para elencar as etapas que ocorram do trabalho. Dito isso, esse capítulo está dividido em duas seções:

uma em que a autora define os métodos

uma em que a autora explica as etapas do trabalho e como e porque utilizou os métodos apresentados.

#### **3.1. Revisão Bibliográfica:**

A revisão bibliográfica é um método que está presente em todos trabalhos e projetos de pesquisa, independente do assunto. Contudo, sua abordagem diverge entre as diferentes áreas de conhecimento e não há um modelo engessado para se realizar uma pesquisa bibliográfica dentro da área de geologia e ciências da terra. Gil (2014) explica que até mesmo os modelos de revisão bibliográfica discutidos por autores da área distinguem-se entre si e que a criação de um modelo para o seguimento da mesma deve ser encarada como aleatório.

Mesmo as outras técnicas aqui apresentadas sendo revisitadas durante o trabalho, a revisão bibliográfica, independente do modelo abordado pela autora, esteve presente em toda a construção da pesquisa, desde a elaboração do projeto, até a discussão dos resultados e finalização da monografia.

As etapas seguidas para a revisão bibliográfica neste trabalho foram: a pesquisa e a leitura inicial, chamada de exploratória (Gil, 2014), em que a autora pode se apropriar do tema geral, muito antes de ter o projeto definido. A leitura exploratória também ocorreu para que a autora pudesse selecionar se o título serve à pesquisa planejada ou não.

Gil, 2014, define que após essa leitura exploratória, ocorrem outros três tipos de leitura:

leitura seletiva: ocorre após a definição do projeto e serve, como o nome sugere, para selecionar de fato se é pertinente à pesquisa. Não é decisiva.

leitura analítica: crítica e imparcial. Deve ser feita de forma objetiva e serve para a categorização das informações. Com quatro diferentes momentos: leitura total do texto, ideias-chaves, ordenação de ideias e sintetização das mesmas.

leitura interpretativa: serve principalmente para dar significância ampla à leitura analítica e, ainda, conectar os dados obtidos com outras leituras previamente realizadas.

A autora realizou duas dessas últimas leituras, sendo a analítica e a interpretativa. A seletiva não se fez necessária, dado ao fato de a exploratória ter sido mais pontual e eficiente. Os métodos analíticos aqui apresentados também tiveram uma etapa de apropriação para o entendimento correto das técnicas utilizadas e os resultados a serem gerados.

Antes de começar com o método de busca por artigos, a autora fez a leitura do livro “Decifrando Meteoritos”, das pesquisadoras M. Elizabeth Zucolotto, Ariadne C. Fonseca e Loiva L. Antonello (2013), uma leitura básica e completa sobre os meteoritos. O livro possui diversas referências e, a partir das mesmas, a autora buscou os textos completos. O método de busca dos artigos foi feito através da internet utilizando sites de busca, inserindo os nomes dos autores e títulos, sendo os artigos base deste trabalho listados no Quadro 11. A leitura, catalogação e armazenamento de informações foi realizado com o auxílio do software Mendeley Desktop 1. 19.4.

Quadro 11: Artigos base do trabalho.

Assunto		Artigo/Título	Autores	Ano
Classificações	Classificação de meteoritos e de condritos	Classification of Meteorites	A.N. Krot, K. Keil, C.A Goodrich e M.K Weisberg	2017
		A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites	Van Schmus, W. R. & Wood, J. A.	1967
Choque	Estágio de Choque	Shock metamorphism of ordinary chondrites	D. Stöffler, K. Keil e E. Scott.	1992
		Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system	D. Stöffler, C. Hamann e K. Metzler.	2018
	Texturas entre cromita e plagioclásio	Chromite-plagioclase assemblages as a new shock indicator; Implications for the shock and thermal histories of ordinary chondrites	A. Rubin	2003
Texturas Mineralógicas	Texturas e classificação de cõndrulos	Relative abundances of chondrule primary textural types in ordinary chondrites and their bearing on conditions of chondrule formation	J.L. Gooding & K. Keil	1981

### **3.2. Petrografia Macroscópica:**

A petrografia macroscópica foi realizada em uma lupa estereoscópica do Laboratório de Microsonda Eletrônica do CPGq - IGEO, laboratório parceiro do projeto. A descrição foi feita utilizando-se de um memorial descritivo para a padronização da mesma. Análises destrutivas não foram realizadas, pois as amostras são muito delicadas e raras, logo, essa etapa do trabalho foi realizada apenas fazendo a descrição macroscópica através da lupa.

### **3.3. Preparação de amostras:**

As amostras dos meteoritos Patrimônio e Três Irmãos (em ordem cronológica de queda) utilizadas neste estudo foram cedidas pelo Museu Nacional do Rio de Janeiro e constam de:

O meteorito Patrimônio - um tablete de 2x1 cm (amostra PTR2 –Figura 5D)

O meteorito Três Irmãos - três fragmentos de, aproximadamente, 2 mm cada (amostra 3IR2 – Figura 5C).

A preparação das amostras para meteoritos consiste em avaliar a quantidade de material que se possui de cada meteorito. Diferentemente de rochas terrestres, o material no estudo de meteoritos é limitado, muitas vezes, a fragmentos de milímetros (a exemplo do meteorito Três Irmãos). Após avaliação da quantidade de material e conclusão se há pouco disponível (que é o caso desse trabalho), se faz avaliação de técnicas não destrutivas e opções para se manter a maior quantidade possível de material intacto. Tomados esses cuidados, foi feita a preparação para as análises por MEV.

As lâminas petrográficas utilizadas neste trabalho foram confeccionadas no laboratório de laminação do MNRJ pela Profa. Dra. Maria Elizabeth Zucolotto, sendo a lâmina do meteorito Patrimônio denominada PTR1 (Figura 5A) e a do Três Irmãos 3IR1 (Figura 5B).

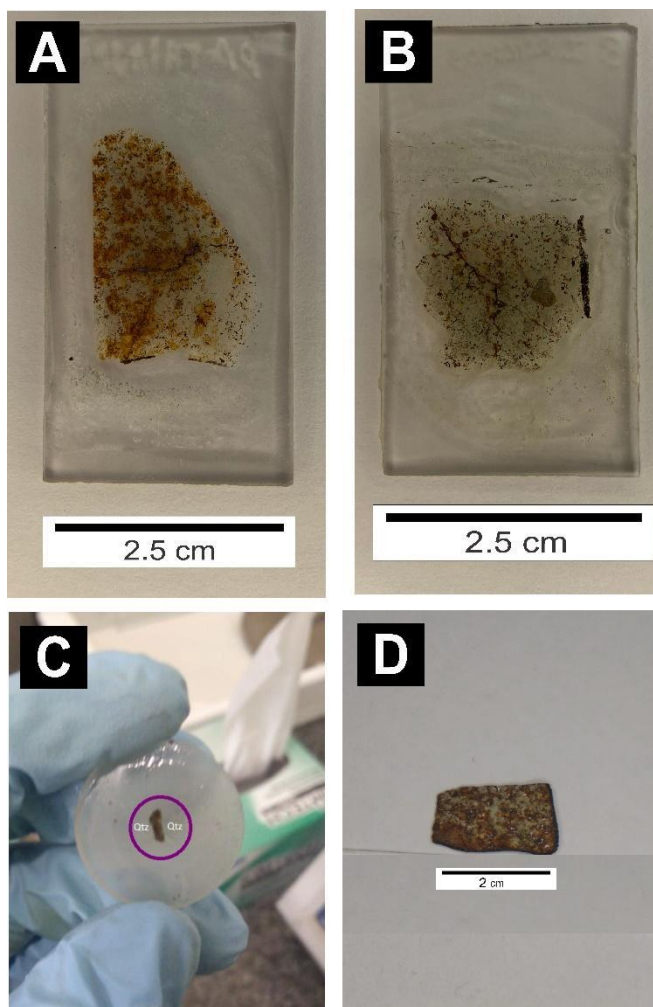


Figura 5 - Amostras utilizadas no trabalho. A) Lâmina petrográfica meteorito Patrimônio. B) Lâmina petrográfica meteorito Três Irmãos. C) Tablete em resina meteorito Três Irmãos. D) Tablete meteorito Patrimônio. Petrografia Microscópica:

A técnica de petrografia óptica é utilizada para identificação de minerais em magnificações que vão até 500x e atingindo escalas de microns. Nesse método também está inserida a contagem de côndrulos, para a estimativa de abundância dos mesmos através da técnica de estimativa visual comparativa. Os microscópios óticos utilizados foram Zeiss – Axio Imager e Meiji do Laboratório de Microsonda Eletrônica do Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq).

### 3.4. Petrografia óptica – luz refletida

A microscopia óptica em luz refletida nesse trabalho teve como objetivo apenas a confirmação de texturas e fases, pois devido a pandemia COVID-19 não houve



acesso a um microscópio com luz refletida. Para as confirmações, uma luz foi adaptada ao lado do microscópio óptico de luz transmitida.

### **3.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV):**

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica analítica utilizada para a investigação morfológica e textural dos constituintes da rocha, bem como a sua identificação e análise qualitativa/semi-quantitativa de sua composição química. Esta se baseia na interação da amostra com um feixe de elétrons incidente que produz diversos tipos de radiações. O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um equipamento composto de lentes focalizadoras de um feixe de elétrons, que são provenientes de uma fonte que ao excitar a amostra provoca a liberação de raios X que são detectados por EDS (acoplado ao MEV) – dispersão de energia, e ainda detecta elétrons emitidos pela amostra. Há dois tipos de imagens que podem ser obtidas com o MEV:

Imagens de elétrons retroespalhados (BSE), e essa fração de elétrons é diretamente relacionada ao número atômico do elemento que está sendo excitado. O detector do BSE é sensível a energia e para altos números atômicos a porção de elétrons de alta energia é maior. Em uma amostra em que há diversas fases químicas (no caso da geologia, diversas fases minerais), a alta claridade em uma imagem gerada por BSE significa um maior número atômico médio. Para que haja uma análise de qualidade, a amostra deve estar bem polida (Figura 6), para que não haja grande perturbação vinda da topografia da amostra.

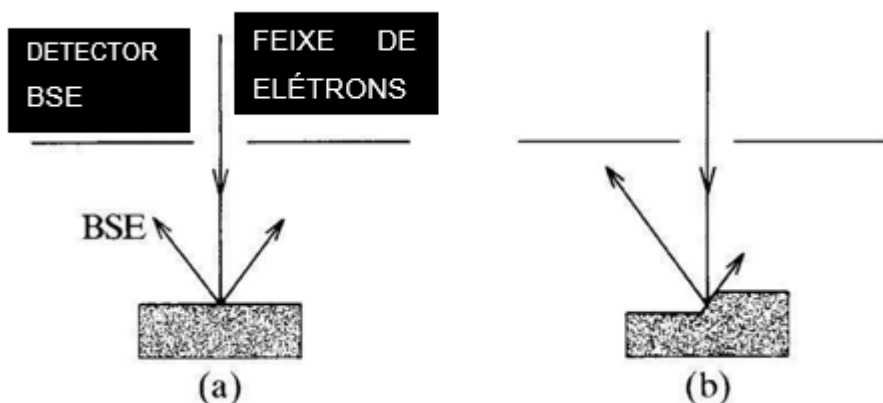


Figura 6 - Representação de como uma amostra mal polida pode alterar a incidência dos BSE e receber interferência da topografia da amostra. Sendo (a) amostra bem polida e (b) amostra com relevo. Retirado de Reed, 2005

Imagens de elétrons secundários (SE): com energias de poucos elétrons volts, os elétrons secundários, em relação à superfície da amostra, são emitidos de profundidade muito rasa. A eficiência da imagem SE aumenta à medida que o ângulo entre amostra e feixe diminui e o resultado visual é o mesmo que uma luz direcionada difusa em qualquer objeto sólido, revelando uma topografia fácil de assimilar (Figura 7). Na geologia, a técnica é muito aplicada para a visualização da forma cristalina dos minerais e das relações texturais entre eles.

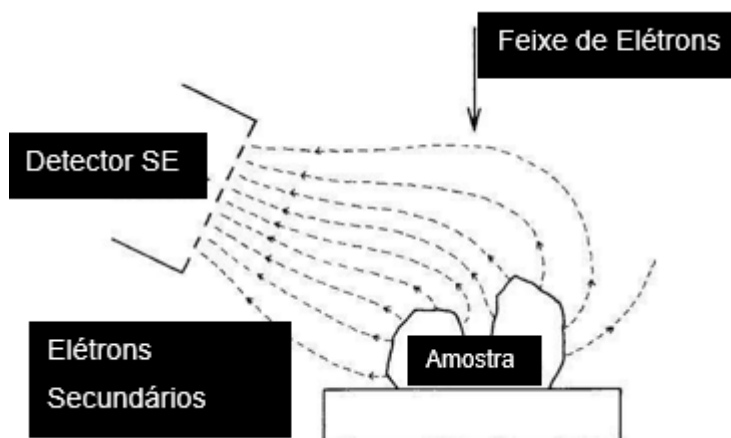


Figura 7 - Representação da amostra no imageamento SE do MEV. Retirado de Reed, 2005.

Para este trabalho não foram realizadas análises em SE.

O equipamento de MEV utilizado neste trabalho é um MEV JEOL JSM6610LV, com detector EDS Bruker XFLASH 5030 acoplado, no Laboratório de Geologia Isotópica do Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq). E as amostras

usadas para as análises foram o tablete do Patrimônio e fragmentos do Três Irmãos embutidos em resina e polidos, para as análises em BSE.

### 3.6. Microanálises por Microsonda Eletrônica (EPMA):

A EPMA, diferente dos métodos apresentados anteriormente, é utilizada para a análise quantitativa das composições químicas, nesse caso, dos minerais. A partir de um feixe de elétrons, com um diâmetro na faixa de 1  $\mu\text{m}$ , que excita o material a ser analisado até que o mesmo emita raios X. Acoplados a microsonda, há 5 espectrômetros de WDS (dispersivo de comprimento de onda) para a detecção dos raios X característicos.

A análise quantitativa com a EPMA faz uso de padrões para calibração da máquina e determinação da concentração que são analisados juntamente com a amostra, para a determinação da concentração de cada elemento de acordo com a equação:

$$\text{Concentração}_{\text{amostra}} = \left( \frac{\text{Concentração}_{\text{padrão}}}{\text{Intensidade}_{\text{padrão}}} \right) \cdot \text{Intensidade}_{\text{amostra}} \times [\text{correções}]$$

Assim, o tempo demandado é maior que que pelas outras técnicas.

A microsonda eletrônica é capaz de determinar todos elementos com número atômico acima do Be e com quantidades mínimas acima de dezenas de ppm.

O equipamento possui também um microscópio óptico acoplado para a visualização da amostra em luz transmitida (polarizada e natural) e em luz refletida que permite localização dos pontos de interesse. Além da análise pontual, foram realizados mapas composicionais para o entendimento da distribuição dos elementos no mineral.

As condições analíticas utilizadas foram tensão de 15 keV e corrente do feixe de 15 nA, com feixe focado ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ) para a análise dos silicatos, dos óxidos e também para os mapas químicos.

A microsonda eletrônica utilizada é da marca Cameca, modelo SXFive do Laboratório de Microsonda Eletrônica do Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica - CPGq-IGEO-UFRGS.

### 3.7. Etapas do Trabalho

A metodologia aplicada a um trabalho nunca é cem por cento linear - onde passa-se por uma técnica e esta não é mais revisitada. A Figura 8 exemplifica o fluxo de metodologia deste trabalho e como os métodos foram utilizados para responder às perguntas a que esse trabalho se propõe.

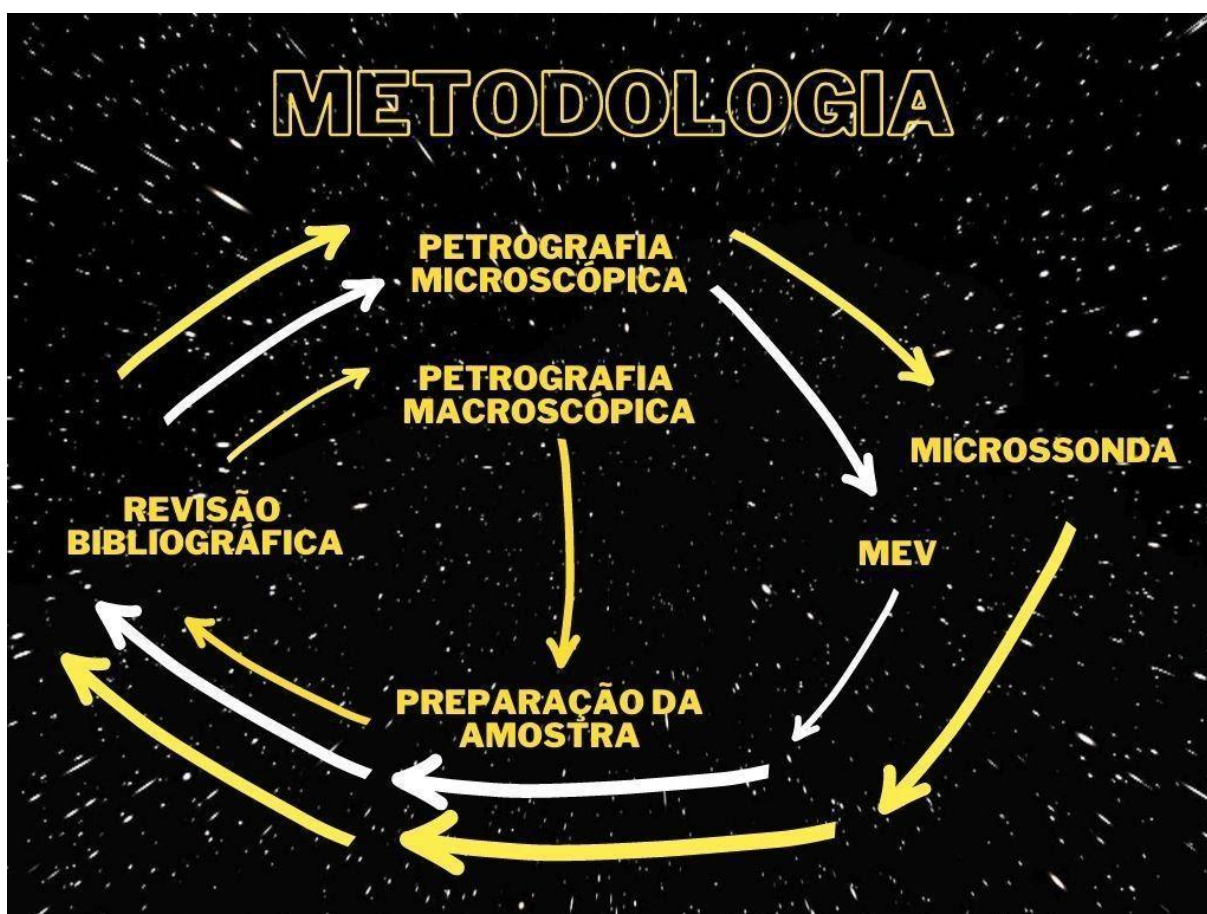


Figura 8 - Ciclos de trabalho desenvolvidos. Sendo o ciclo mais interno a primeira etapa, a do meio a segunda etapa e, o ciclo mais externo, a última etapa.

#### 3.7.1. Etapa 1 - Revisão Bibliográfica – Petrografia Macroscópica- Preparação de Amostras

A revisão bibliográfica, como já dito, é o ponto de partida para diversos trabalhos.

A etapa macroscópica neste trabalho foi realizada para a caracterização macroscópica do meteorito Três Irmãos. O meteorito Patrimônio, por tratar-se de um tablete, não passou pela etapa de descrição macroscópica. A macroscopia do meteorito Três Irmãos foi realizada com o auxílio de pinças para manusear os fragmentos e, como já dito, com auxílio da bibliografia correta para a descrição de meteoritos.

Após a descrição macroscópica do material, houve a etapa de preparação das três amostras. O meteorito Patrimônio precisou apenas ser lixado e metalizado para as análises de MEV, já o Três Irmãos exigiu maior preparo. Foi escolhido um dos melhores fragmentos do Três Irmãos (de 2mm) para preparação para as técnicas – amostra 3IR2. Esse fragmento foi colocado em resina com dois fragmentos de quartzo ao lado, também de 2mm cada, para controlar e evitar a perda de material no polimento. Após polido, a resina foi metalizada para as análises no MEV.

As lâminas petrográficas foram feitas no Museu Nacional do Rio de Janeiro e não houve participação da autora na laminação (Figura 5AB).

### **3.7.2. Etapa 2 - Revisão Bibliográfica - Petrografia Microscópica - MEV**

A análise petrográfica dos meteoritos têm os mesmos princípios da análise de rochas terrestres, voltada à identificação dos minerais, texturas e quantificação dos constituintes.

A etapa do MEV para as duas amostras de meteoritos consistiu, majoritariamente, em obter imagens de BSE para análise de texturas e relações de contato entre as fases minerais. Tais texturas são peças chave para a definição e refinamento dos estágios de choque dos meteoritos. Foram observadas texturas como: bolsões de fusão, e relacionadas à cromita e plagioclásio.

### **3.7.3. Etapa 3 - Revisão Bibliográfica - Petrografia Microscópica – Microsonda Eletrônica**

A terceira e última etapa, já compreendendo alguns resultados e sempre retornando a revisão bibliográfica, consiste no emprego da EPMA com a utilização do WDS acoplado para a geração de mapas composicionais. Os resultados encontrados nos mapas, referentes à abundância, foram comparados com os já realizados nas etapas anteriores em contagem modal da petrografia microscópica, usando assim diversas metodologias para a caracterização de texturas petrográficas e mineralógicas dos meteoritos.

Para além, contudo, das quantificações e análises qualitativas, foi feita a utilização do último método: a microsonda eletrônica para a análise quantitativa pontual da composição química de todos os componentes das lâminas, em que serão obtidas as fórmulas estruturais de cada fase.

Assim, com todos os resultados adquiridos e tratados, a próxima etapa é a discussão e comparação dos mesmos entre os meteoritos.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Meteorito Patrimônio

#### 4.1.1. *Microscopia e texturas*

Os constituintes, a mineralogia, as texturas primárias e as texturas e estruturas de choque foram estudadas por microscopia ótica e imageamento em microsonda eletrônica.

O meteorito Patrimônio possui apenas vestígios de côndrulos, sendo na petrografia ótica metade de um côndrulo de olivina piroxênio granular (POP) (de aproximadamente 3,6mm (Figura 9A); um de PR destruído e alongado, de tamanho de 1,6mm (Figura 9B); outro côndrulo criptocristalino com tamanho aproximado de 1,5mm (Figura 9C); um de olivina porfirítica com 0,5 mm de tamanho. Por último, um côndrulo de PR de tamanho de 1,3mm (Figura 9D).

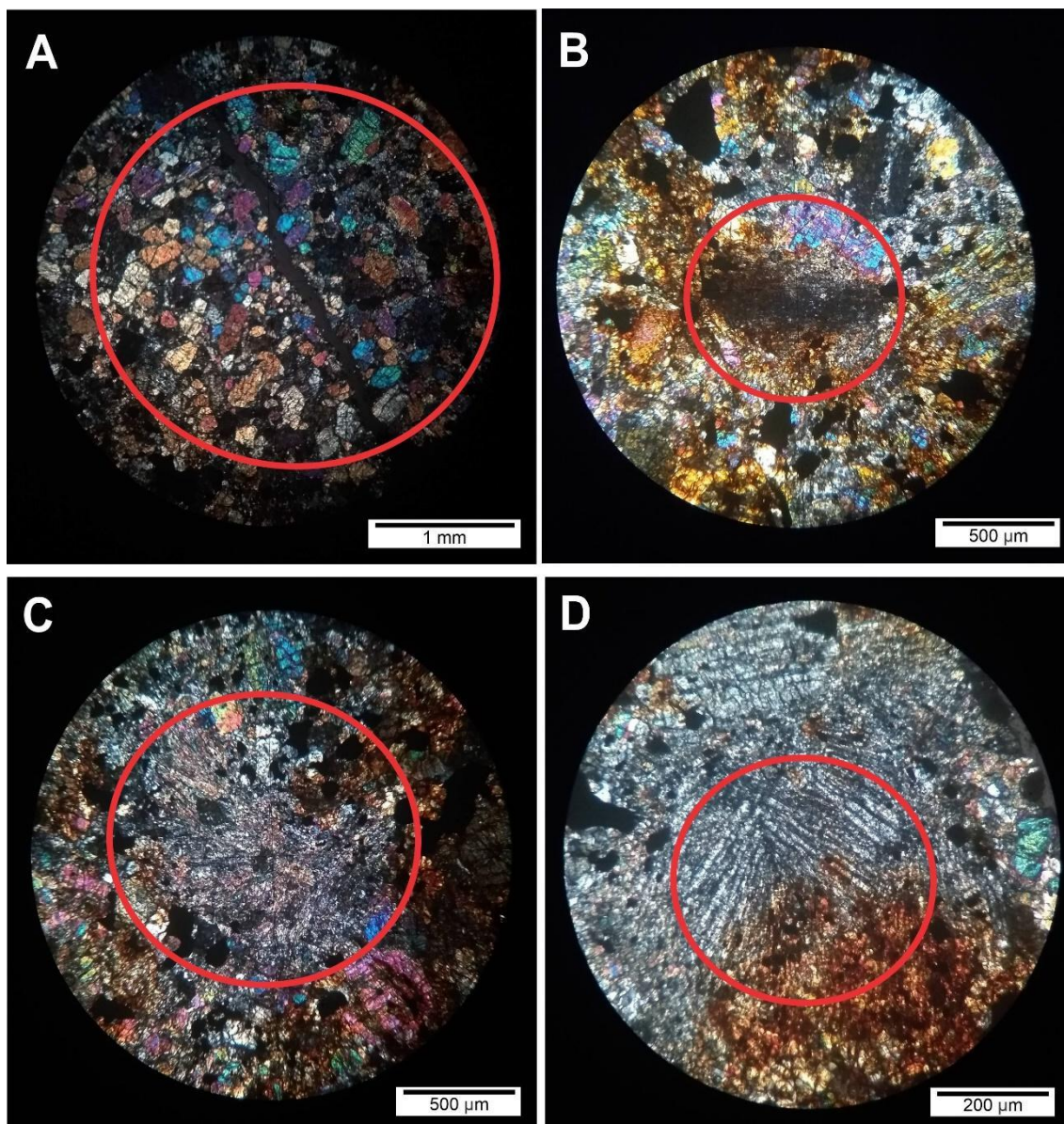


Figura 9 - A) Côndrulo POP; B) Parte de um côndrulo PR; C) Côndrulo CR; D) Côndrulo de PR.

Já no imageamento em microsonda eletrônica, o meteorito possui também côndrulos escassos, porém visíveis e discerníveis. Suas classificações e texturas foram interpretadas como: porfirítico (Figura 10A), OB (Figura 10B) e PR (Figura 10CD).



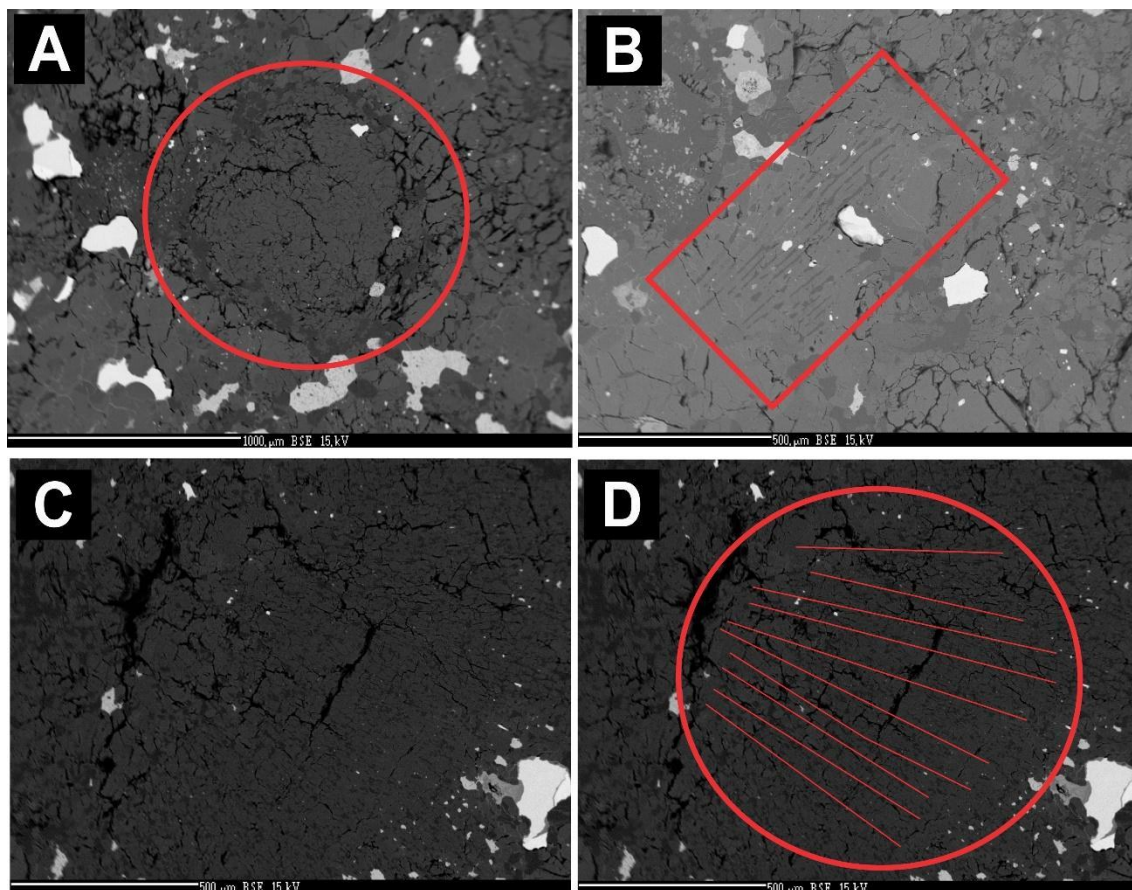


Figura 10 - A) Côndrulo porfirítico; B) Côndrulo OB; C e D) Côndrulo de piroxênio

A matriz do Patrimônio possui minerais com contatos poligonais bem marcados, recristalizada, fina, cristais menores que 0,3 mm de plagioclásio, olivina, piroxênio (Figura 11). Há a presença de masquelinita também no meteorito.

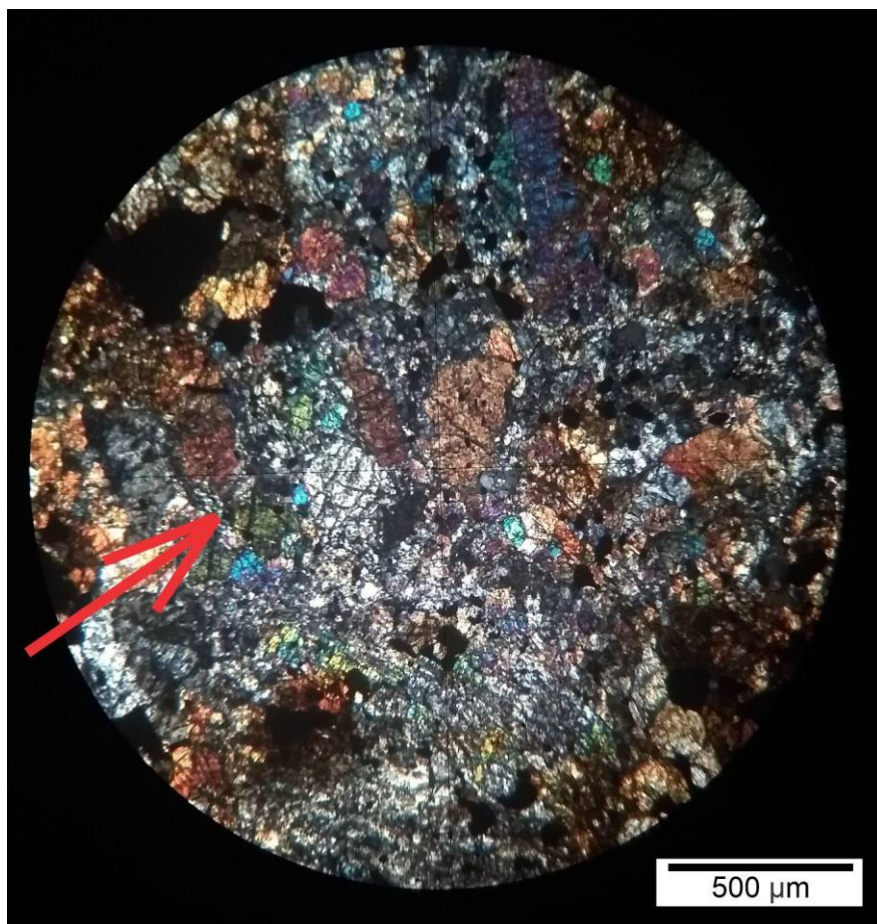


Figura 11 - Matriz do meteorito Patrimônio composta por piroxênio, olivina e plagioclásio.

Além da matriz e os fragmentos de côneulos, ainda há cristais reliquiares de olivina, piroxênio e plagioclásio de tamanho: 1,5 mm a 0,55 mm. A olivina possui fraturas planares bem marcadas (Figura 12 e Figura 13) em praticamente todos cristais e extinção ondulante.

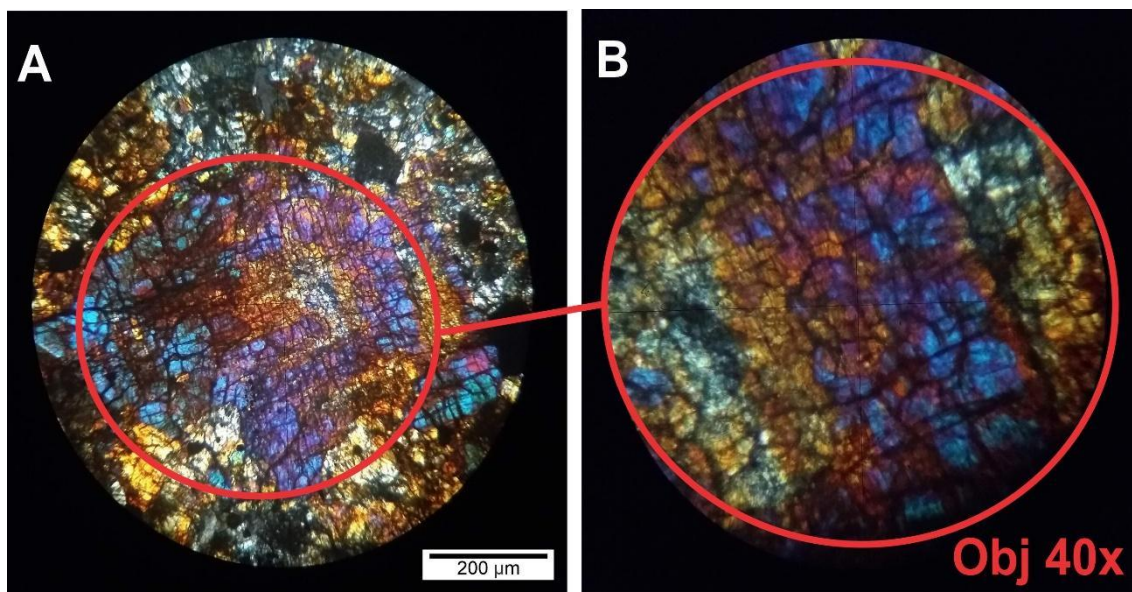


Figura 12 - Olivina fraturada – detalhe das fraturas planares.

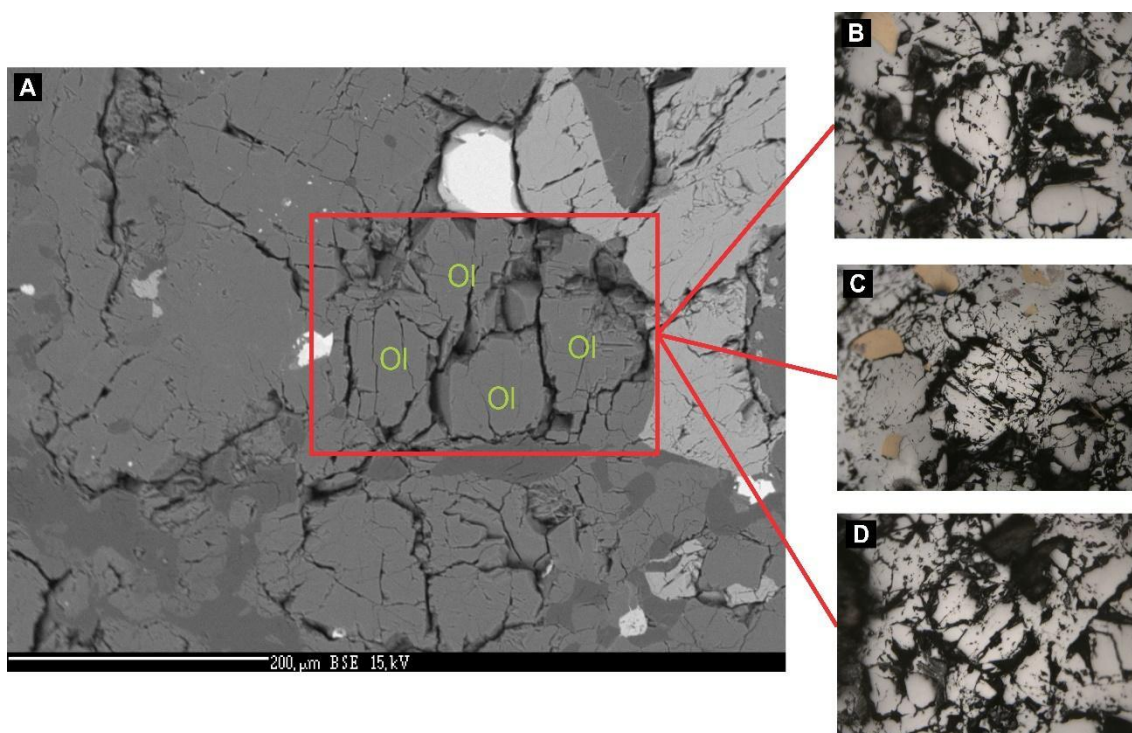


Figura 13 - A) Olivina por BSE em microsonda; B, C e D) Fraturas planares da olivina em luz refletida.

O piroxênio também está muito fraturado, visível em microscopia óptica, contudo existem os dois tipos de extinção: ondulante e reta nos grãos de piroxênio do Patrimônio. Já no imageamento por microsonda (BSE), o piroxênio possui formas regulares (Figura 14).

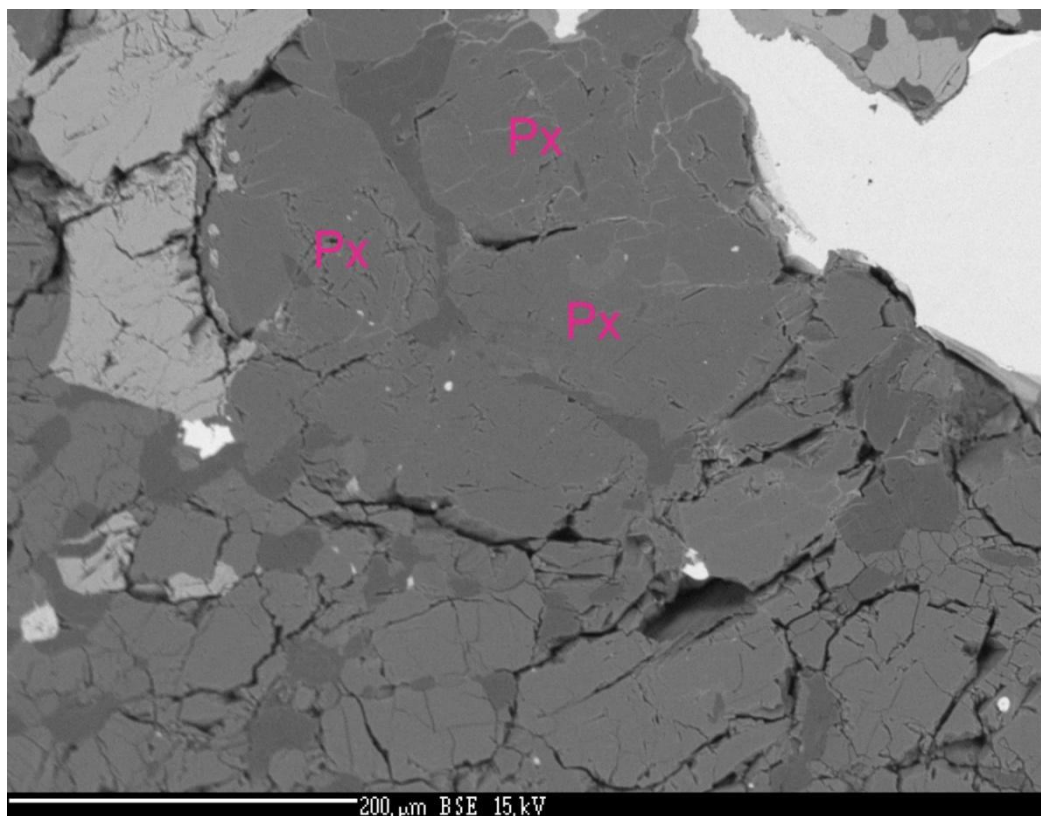


Figura 14 - Piroxênio do Patrimônio por BSE em microsonda eletrônica.

Em petrografia óptica, o plagioclásio possui fraturamento e extinção ondulante (Figura 15 AB); em alguns raros grãos ainda é possível ver a macla do mineral. É possível ver que plagioclásio possui três feições petrográficas distintas em BSE, se relacionando com diferentes minerais:

Intersticial relacionado aos piroxênios (Figura 16A)

Intersticial (e/ou não) relacionado aos sulfetos/troilita (Figura 16B)

Associado à cromita, na maioria das vezes a policristalina (Figura 16CD).

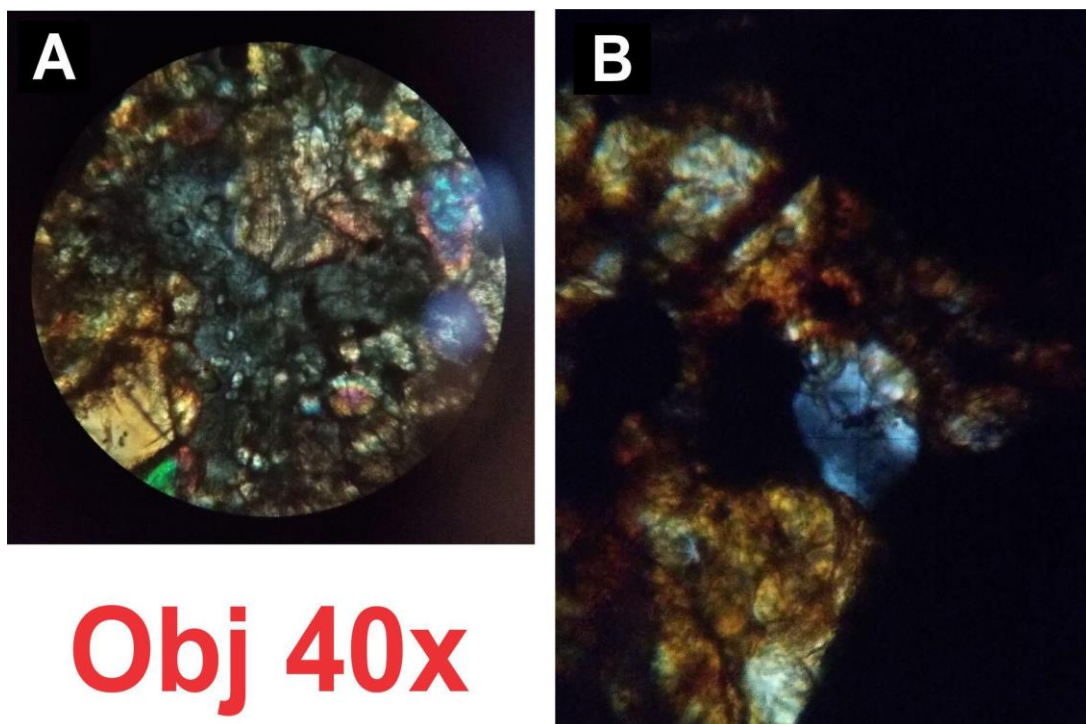


Figura 15 – A) Plagioclásio subédrico. B) Plagiocáio com extinção ondulante

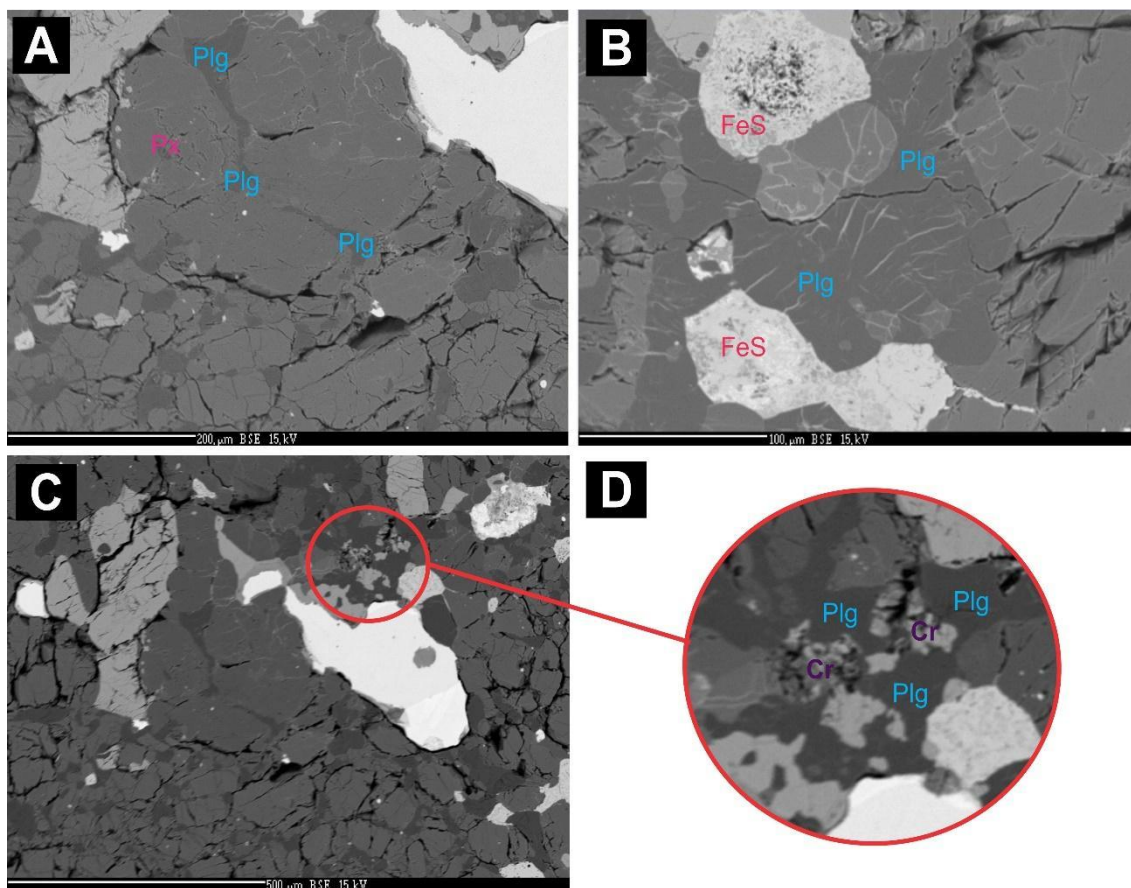


Figura 16 - A) Textura intersticial do plagioclásio. B) Intersticial relacionado a troilita. C e D) Plagioclásio associado a cromita policristalina.

O meteorito possui veios de choque vistos em lâmina, de opacos e sulfeto, contudo eles não estão interconectados e podem ser vistos em detalhe na Figura 17. Os bolsões associados aos veios do meteorito são também de fases metálicas (Figura 18 e Figura 19). Ainda, há grande presença de troilita – com diversas texturas, poli e monocristalina; opacos de diversas formas e com bastante mistura entre as duas fases – kamacita e taenita – de tamanho médio 0,6mm.

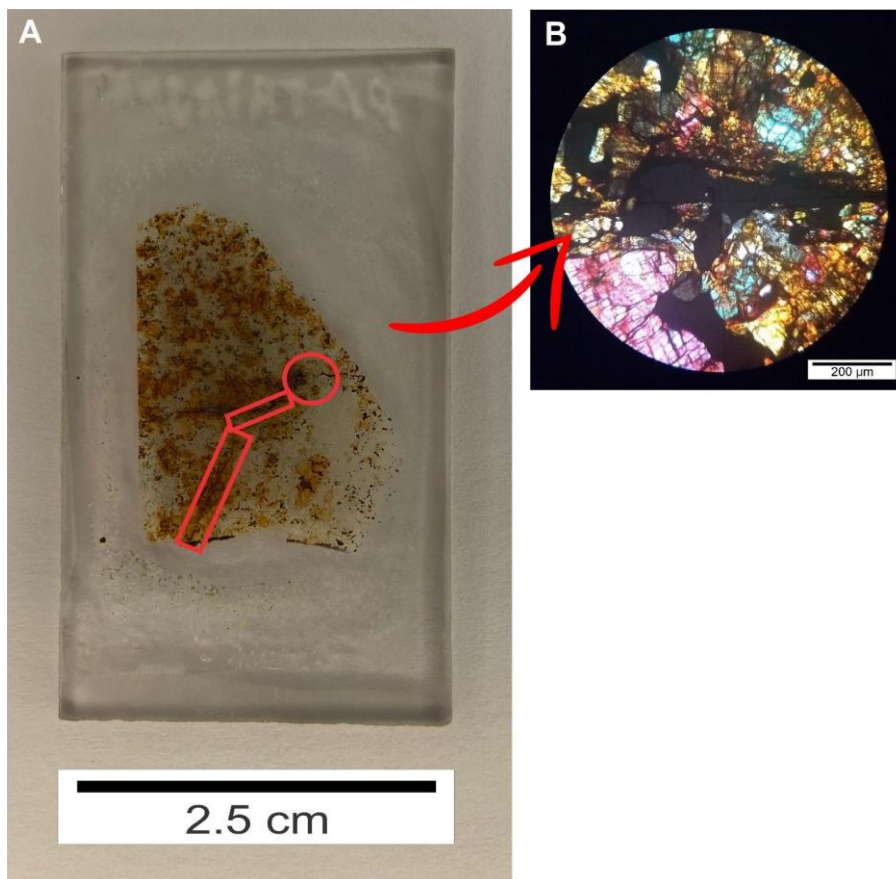


Figura 17 - A) Veio de choque em lâmina. B) Detalhe do bolsão de fusão.

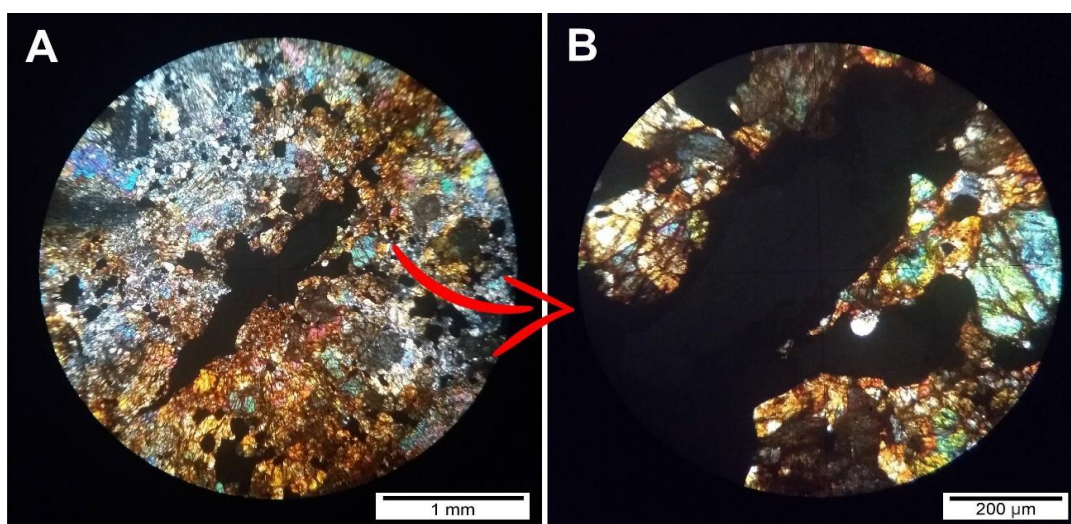


Figura 18 - Opacos com mistura de fases kamacita e taenita.

Por imageamento de microsonda (BSE) é possível ver apenas pequenos veios, contudo seus bolsões são bem visíveis e os dois estão interconectados, como mostra a Figura 19. A composição dos veios e bolsões são de troilita, kamacita, taenita

e possivelmente masquelinita (sua composição é de plagioclásio, contudo não há como afirmar estruturalmente).

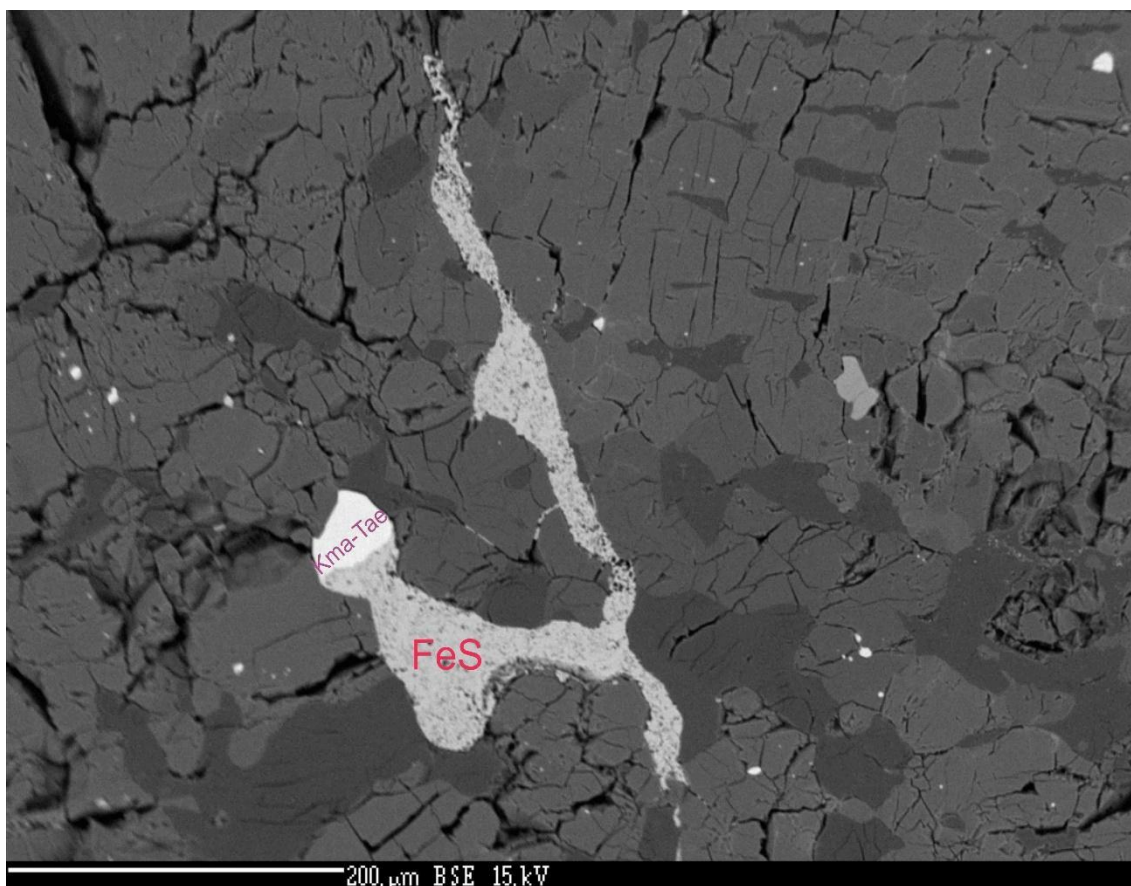


Figura 19 - Bolsão de veio de choque com troilita, kamacita e taenita.

A cromita do Patrimônio, assim como o plagioclásio, também apresenta três texturas petrográficas diversas, visíveis nas imagens obtidas através da microsonda utilizando BSE:

Cristais grandes de até 200  $\mu\text{m}$ , bem formados e com fraturas planares semelhantes à olivina (Figura 20A).

Associada à kamacita, taenita e troilita, com cristais grandes e sem fraturas planares (Figura 20B).

Associada ao plagioclásio, em que esse é o constituinte dominante e a cromita é policristalina ou cristais menores que o restante das feições da mesma (Figura 20 CD).



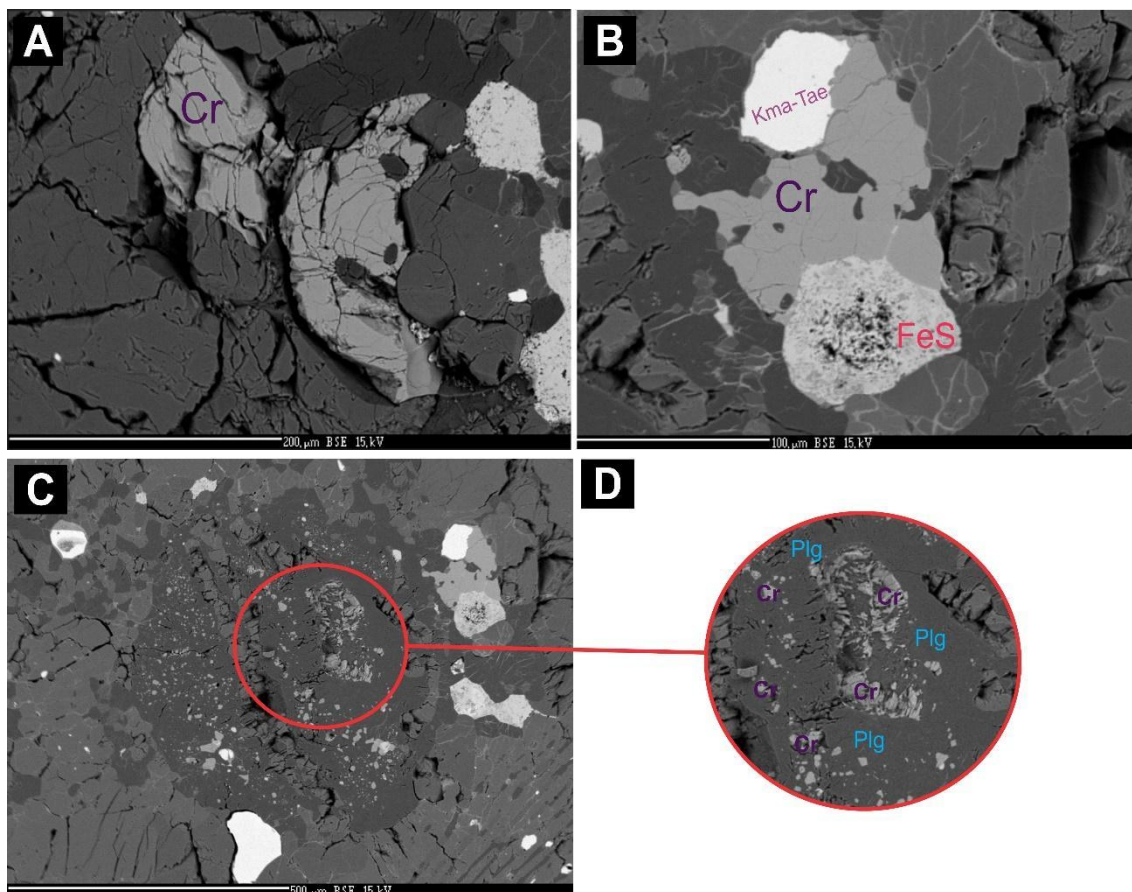


Figura 20 - A) Cromita com fraturas planares; B) Cromita associada a kamacita, taenita e troilita; C e D) Cromita policristalina associada à plagioclásio.

A troilita, kamacita e taenita estão quase sempre associados (Figura 21); a troilita forma agregados policristalinos e a relação da kamacita e taenita está de 30 para 70%. Na maioria das vezes a kamacita e taenita aparecem de forma conjunta, misturada, sendo caracterizada como plessita.

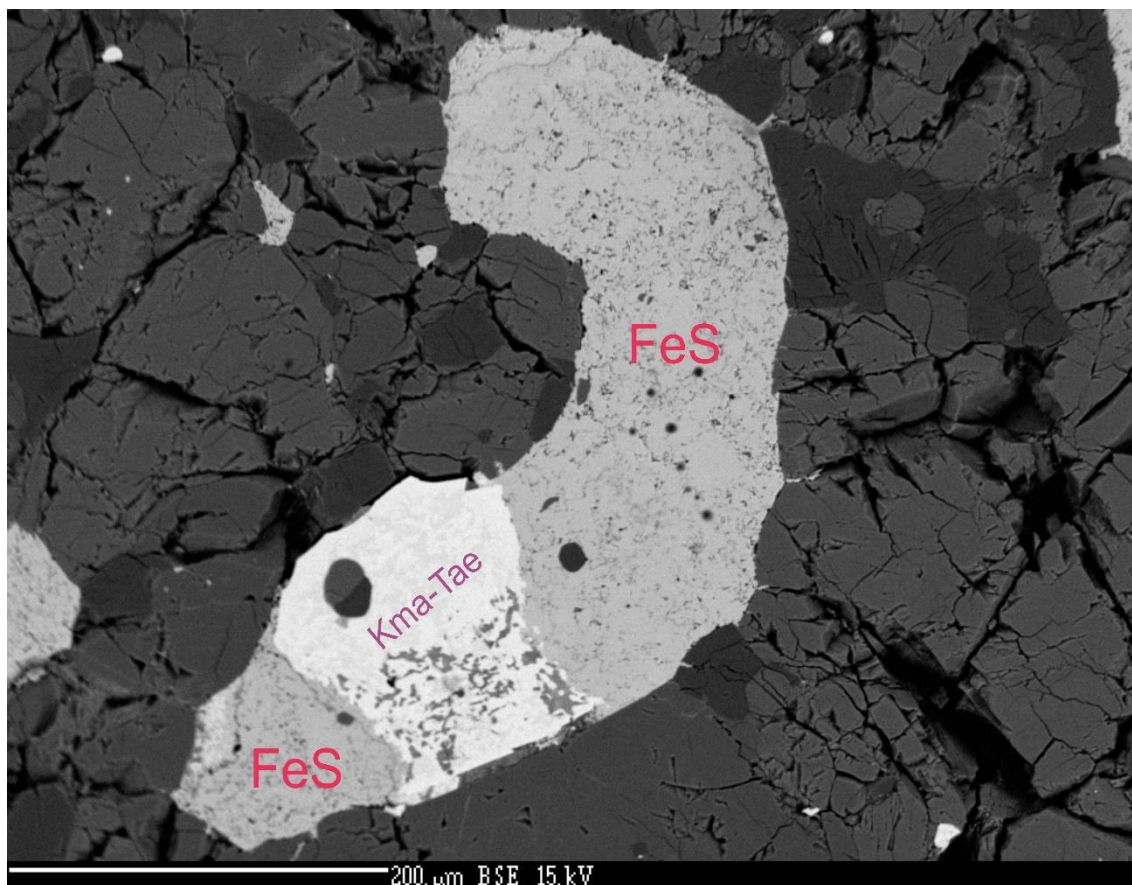


Figura 21 - Associação de troilita, kamacita e taenita.

A apatita do meteorito Patrimônio possui cristais bem formados e está associada à metálicos, também possui fraturamento (Figura 22).

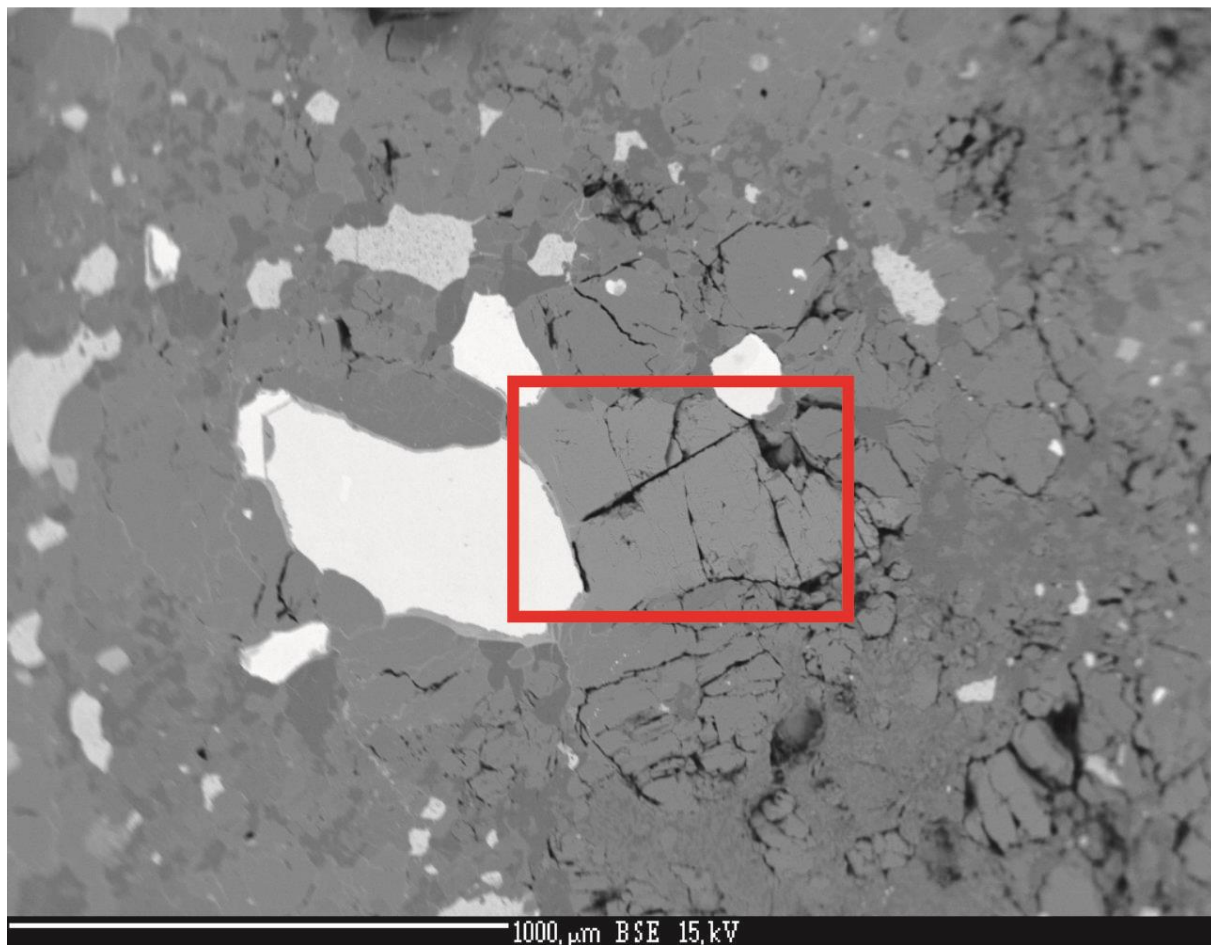


Figura 22 - Apatita do meteorito Patrimônio

#### **4.1.1. Química Mineral**

A composição química dos minerais foi determinada por microsonda eletrônica. Foram estudados olivina, piroxênio e plagioclásio que ocorrem em diferentes côndrulos e na matriz desta rocha, além de cromita

##### **4.1.1.1. Olivina**

A análise química da olivina contou com 24 pontos na amostra PTR2.

A composição da olivina apresenta-se bem homogênea, caracterizada por Fo 62 a 65 (em 21 pontos de análise) e localizadamente Fo 50 a 43.

As olivinas presentes no c ndrulo de olivina barrada caracterizam duas populações (Figura 23 e Figura 24). Uma população de composição homogênea – população 1, com teores de MgO entre 37,6% e 38,0%, FeO em torno de 23%, MnO entre 0,44% e 0,51%, CaO até 0,04% e NiO até 0,08%. A população 2 se diferencia pela menor quantidade de MgO, entre 22 e 28%, maior concentração de FeO 27% a 29%, e por possuir NiO e CoO com valores em torno de 1,0% e de 0,1%, respectivamente.

Na matriz, a olivina apresenta uma grande homogeneidade composicional (Figura 23), caracterizando-se por teores de MgO entre 37,5% e 38,5%, FeO entre 22,8% e 23,9%, CaO abaixo de 0,05% e NiO até 0,05%. A composição da olivina da matriz é semelhante   da população 1 do c ndrulo barrado.

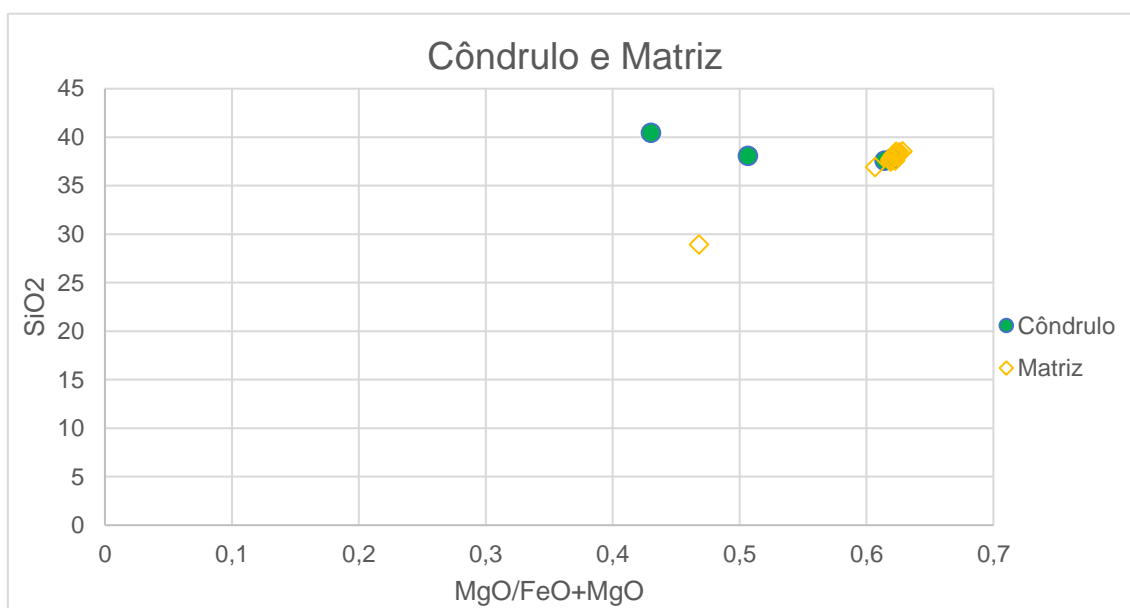


Figura 23 – Gráfico SiO<sub>2</sub> x MgO/FeO+MgO das olivinas do meteorito Patrimônio

O conteúdo de MnO das olivinas da matriz e da população 1 do c ndrulo   de 0,44% a 0,47% que se situa no intervalo esperado para olivinas de condritos ordinários: aproximadamente 0,5% MnO (Figura 24). Na população 2 do c ndrulo, a quantidade de MnO é mais baixa, entre 0,31 e 0,22%.

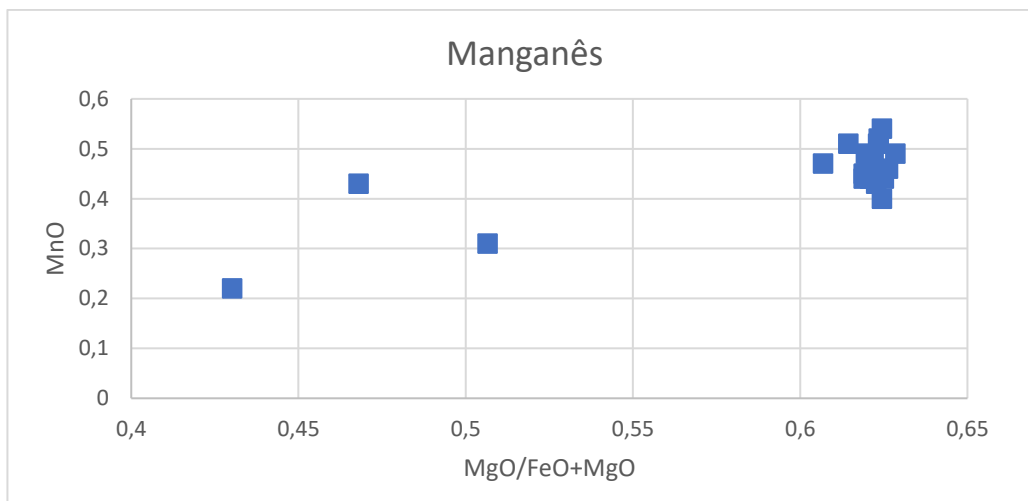


Figura 24 – Gráfico do manganês das olivinas do meteorito Patrimônio

#### 4.1.1.2. Piroxênio

O piroxênio da amostra PTR2, em que foram realizados 16 pontos, possui composição homogênea, correspondente à de piroxênio ortorrômbico magnesiano da série enstatita – ferrosilita, em que o conteúdo de MgO está entre 24,03% e 28,82%, FeO entre 13% e 15%, CaO entre 0,5% e 0,9% e NiO até 0,13%. Os teores de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  variam entre os grãos, desde 0,04% até 0,63% (Figura 25).

Em um côneo de piroxênio radial, a composição predominante é MgO está entre 24,03% e 28,82%, %, FeO entre 13% e 15%, CaO entre 0,5% e 0,9% e NiO até 0,13% (Figura 28)

Neste côneo, foi determinada uma composição de piroxênio rico em cálcio, em que o teor de CaO é de 20,89% e MgO 15,91% (

Figura 26). Este piroxênio também possui maior quantidade de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  que o restante piroxênios: com 0,96%. Outras ocorrências de piroxênios ricos em cálcio foram observadas na amostra através de mapas composicionais, como na Figura 27, que correspondem aos piroxênios monoclinicos determinados pela petrografia óptica.



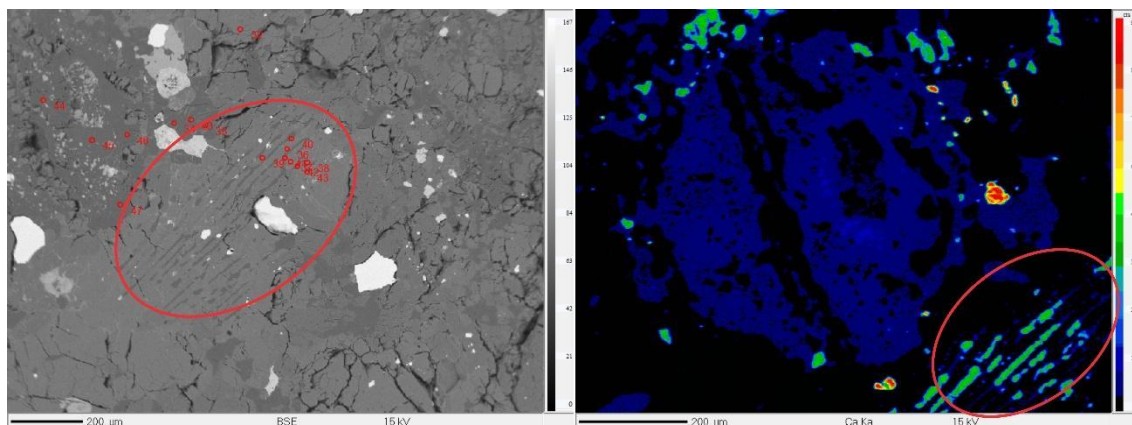


Figura 27 – Quantidade de cálcio em um cône drulo do meteorito Patrimônio.

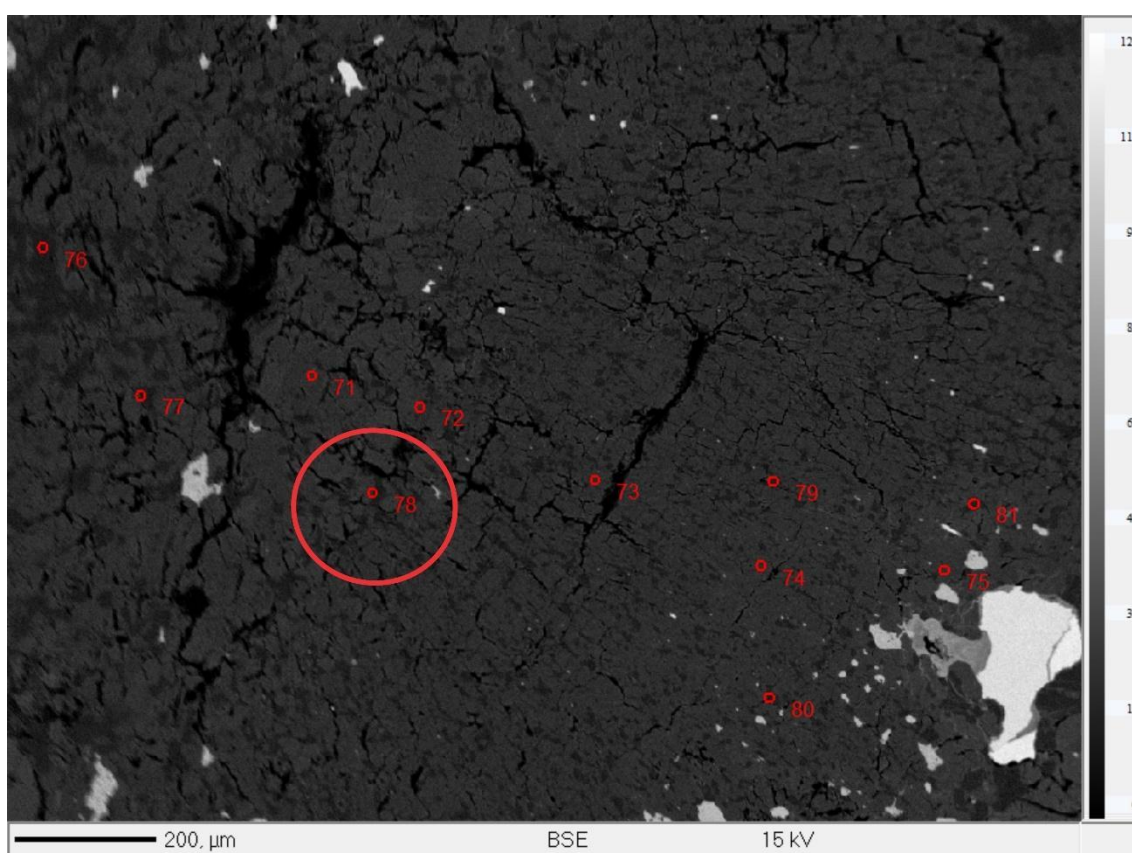


Figura 28 – Cône drulo de PR.

#### 4.1.1.3. *Plagioclásio*

A análise de plagioclásio da amostra PTR2 contou com 29 pontos. Duas populações definidas pela química estão presentes (Figura 29 e 30). A primeira é encontrada em dois cône drulos: um piroxênio radial e outro em um possível cône drulo

de cromita e plagioclásio. Estes minerais possuem química de albita-oligoclásio (Figura 29) com  $\text{Na}_2\text{O}$  entre 5 e 9%, Ca de 1 e 3%,  $\text{K}_2\text{O}$  entre 0,8 e 2,2%, FeO entre 0,3 e 3%,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  até 0,4% e MgO menor que 0,1%. Nesta população algumas análises apresentam conteúdos atípicos de Fe (até 8%) e Cr (até 6%), porém com fechamento adequado e mantendo o conteúdo de álcali. Este comportamento pode representar um quimismo particular desses minerais, porém não é descartada a possibilidade das análises representarem uma mistura com cromita ou algum outro óxido. A fórmula estequiométrica para estes plagioclásios é:  $\text{K}_{0,04-0,13}\text{Na}_{0,45-0,84}\text{Ca}_{0,1}\text{Si}_3\text{Al}_{1-1,2}\text{O}_8$ .

A segunda população é representada por plagioclásios mais cálcicos – andesina-labradorita (Figura 29 e 31) - que se encontram dentro do cône de cromita. Esses minerais se caracterizam por serem mais ricos em CaO (até 6%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (23-26%) e empobrecido em  $\text{Na}_2\text{O}$  (5-6%). Estes feldspatos não apresentam valores diferentes de FeO (0,2%) e  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (0,04-0,16%) em relação à população mais sódica. Para estes plagioclásios que possuem maior teor de cálcio a fórmula estequiométrica fica:  $\text{K}_{0,18}\text{Na}_{0,53}\text{Ca}_{0,3}\text{Si}_3\text{Al}_{1,4}\text{O}_8$ .

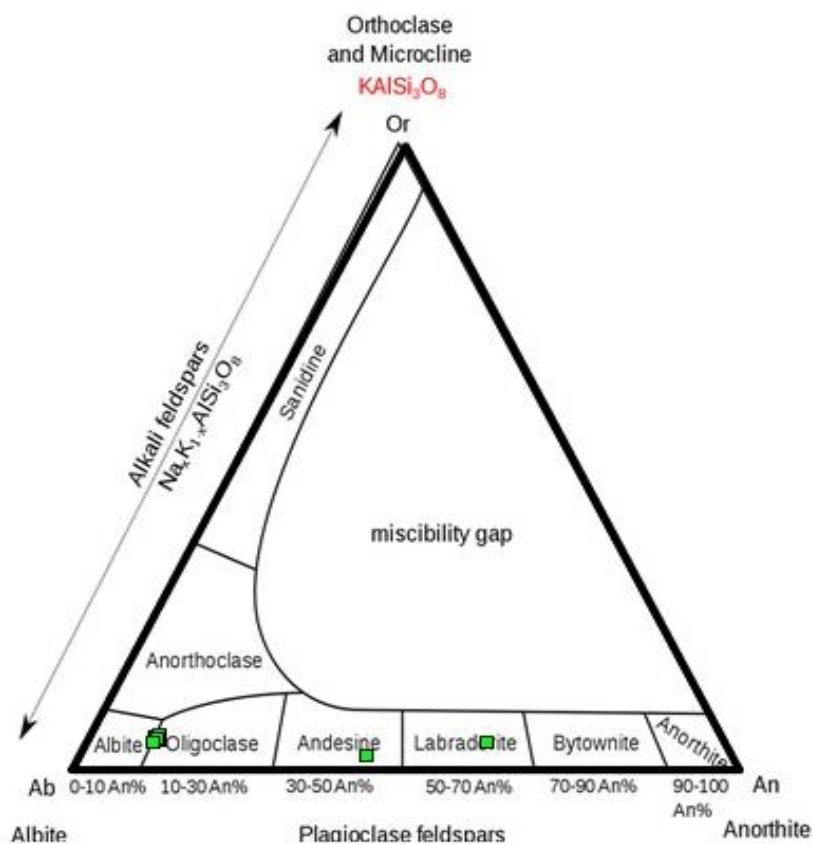


Figura 29 – Classificação dos plagioclásios do meteorito Patrimônio.



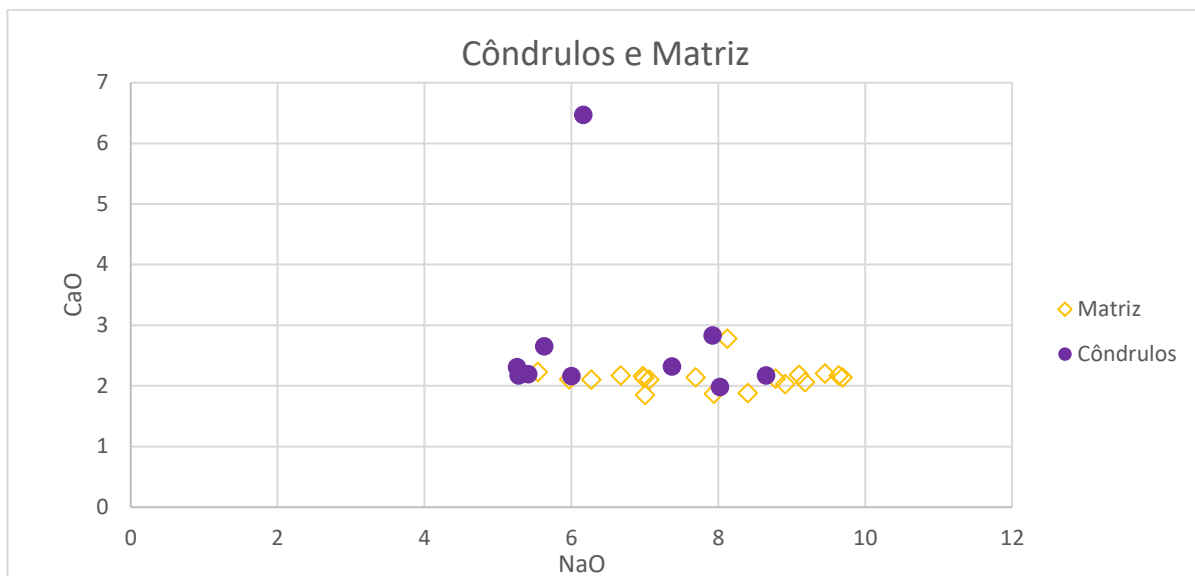


Figura 30 – Gráfico CaO x NaO dos plagioclásios no meteorito Patrimônio.

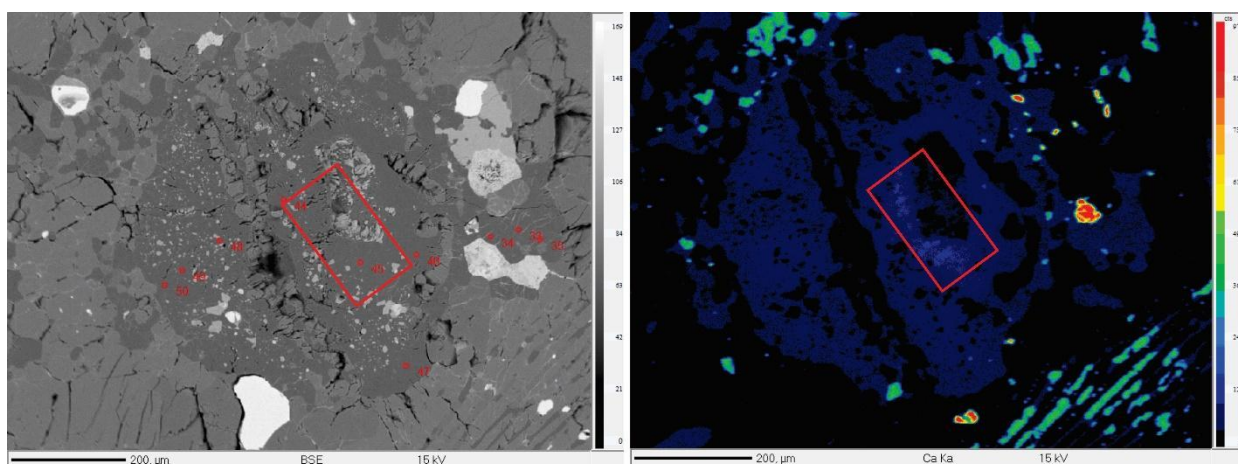


Figura 31 – Cômulo de cromita com plagioclásio rico em Ca do meteorito Patrimônio. A) Imagem de elétrons retroespalhados. B) Mapa composicional de Ca mostrando presença do plagioclásio rico em cálcio no detalhe.

#### 4.1.1.4. Cromita

A análise química da cromita da amostra PTR2 objetivou-se pela caracterização de duas populações destes minerais (Figura 32). A primeira população refere-se a assembleia cromita-plagioclásio e apresenta teores de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  entre 53 e 55%, FeO entre 28 e 31%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  entre 5 e 7%,  $\text{TiO}_2$  entre 2 e 3%, MgO entre 2 e 3%, MnO de 0,6% e NiO entre 0,1 e 0,3%. A fórmula estequiométrica da cromita na

assembleia cromita-plagioclásio do meteorito Patrimônio fica:  $\text{Fe}_{6,87-7,78}\text{Cr}_{12,43-12,90}\text{O}_4$ .

As cromitas da segunda população referem-se a assembleia destas com ligas de Fe-Ni (Troilita, Kamacita e Taenita) e apresenta teores de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  entre 53 e 56%,  $\text{FeO}$  entre 30 e 32%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  entre 5 e 6%,  $\text{TiO}_2$  entre 2 e 3%,  $\text{MgO}$  entre 2 e 3%,  $\text{MnO}$  entre 0,6 e 0,9% e  $\text{NiO}$  inferior a 0,4%. A fórmula estequiométrica da cromita do meteorito Patrimônio fica:  $\text{Fe}_{6,87-7,78}\text{Cr}_{12,43-12,90}\text{O}_4$ .

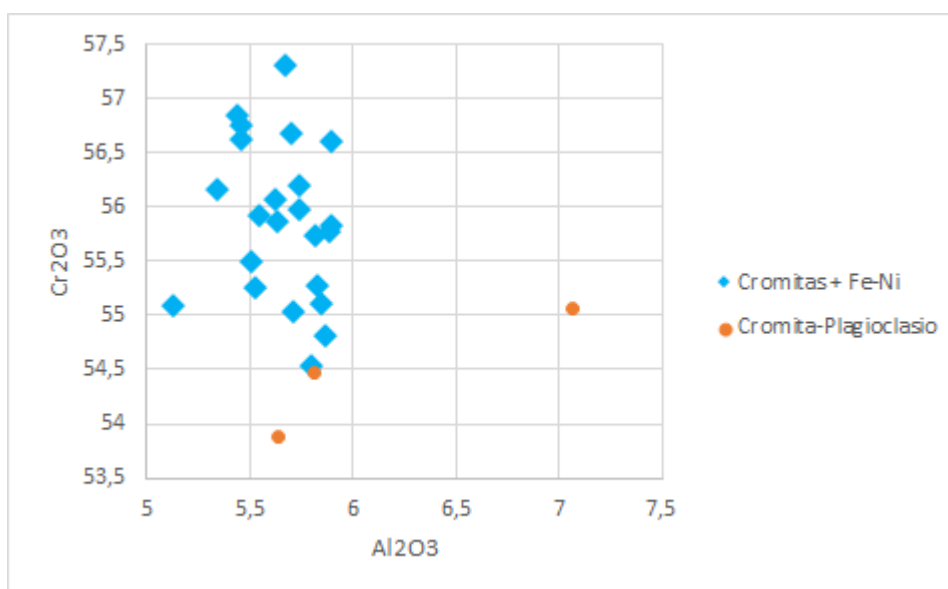


Figura 32 – Relação Cr vs Al nas cromitas do meteorito Patrimônio.

#### 4.1.1.5. Apatita

A apatita do meteorito Patrimônio foi analisada através de um mapa composicional de Cl no qual se confirma a composição de cloro apatita, como mostra a Figura 33. Não é verificada zonação composicional.

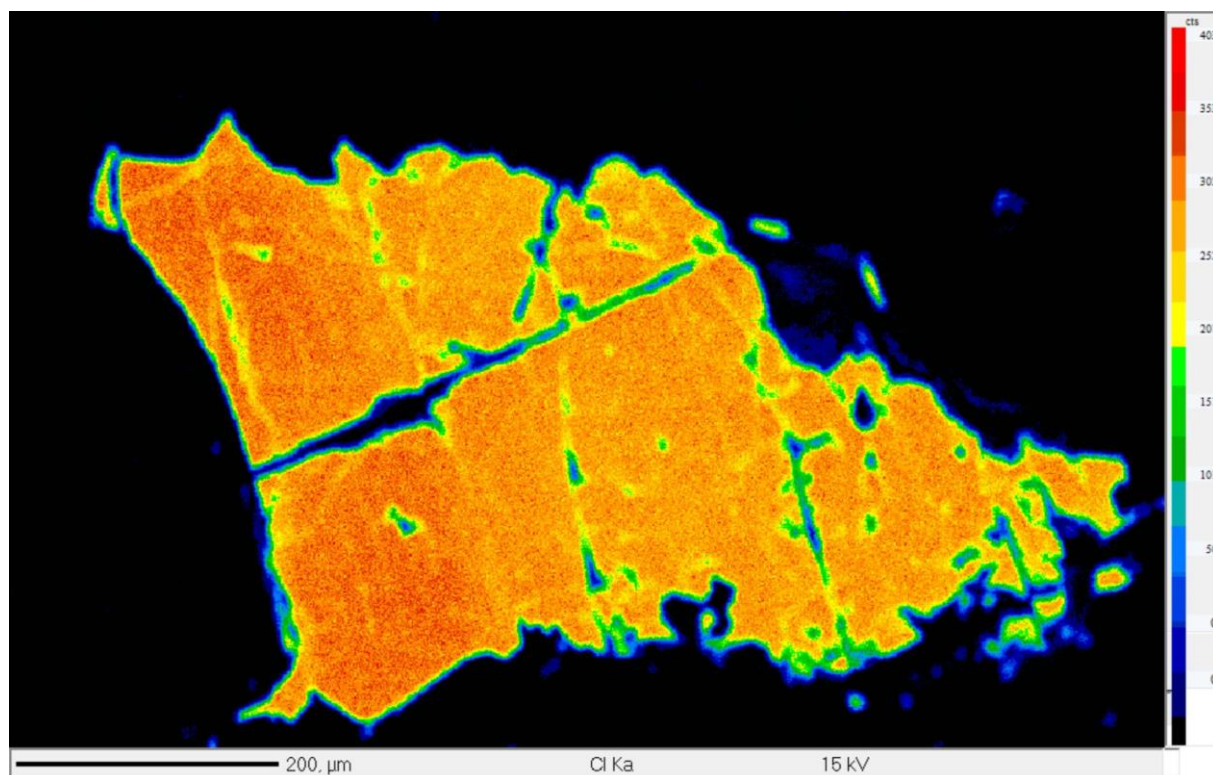


Figura 33 – Mapa composicional de cloro Apatita do meteorito Patrimônio.

## 4.2. Meteorito Três Irmãos

### 4.2.1. *Microscopia e texturas*

Os constituintes, a mineralogia, as texturas primárias e as texturas e estruturas de choque foram estudadas por microscopia ótica e imagens eletrônicas de elétrons retroespalhados (Figura 35 A).

O meteorito Três Irmãos possui côndrulos discerníveis em microscopia ótica. A maioria dos côndrulos são de piroxênio radial (PR) (Figura 36 A e B). Os tamanhos variam entre 1 mm a 2,2 mm, mesmo a maioria não estando em perfeito estado e sim em partes, é possível definir a classificação. Um dos côndrulos – visível mesmo em lupa – mesmo sendo de PR é possível ver a matriz muito fina do mesmo totalmente recristalizada com contatos poligonais de recristalização no plagioclásio e outros cristais de piroxênios com tamanho de 0,05 mm (destacando-se da matriz) e diversos opacos com tamanhos menores que 0,5 mm.

Além dos cõndrulos de PR, o Três Irmãos possui cõndrulos porfiríticos de olivina piroxênio (POP) com tamanhos entre 1,5 mm a 1,8 mm. Observa-se também dois cõndrulos de olivina barrada (Figura 34CE) de tamanho 0,8 mm e 1,3 mm e recristalizado, o primeiro (Figura 34C) com uma borda de cristais de olivina de 0,08 mm. Por fim, possui um cõndrulo de olivina piroxênio granular (OPG) de tamanho 0.75 mm e com maior número de opacos que os outros cõndrulos (Figura 34D).

A amostra 3IR2 não possui cõndrulos discerníveis e bem marcados. Há apenas um possível cõndrulo, contudo sua textura não é discernível nem mesmo na imagem de BSE (Figura 34AB).

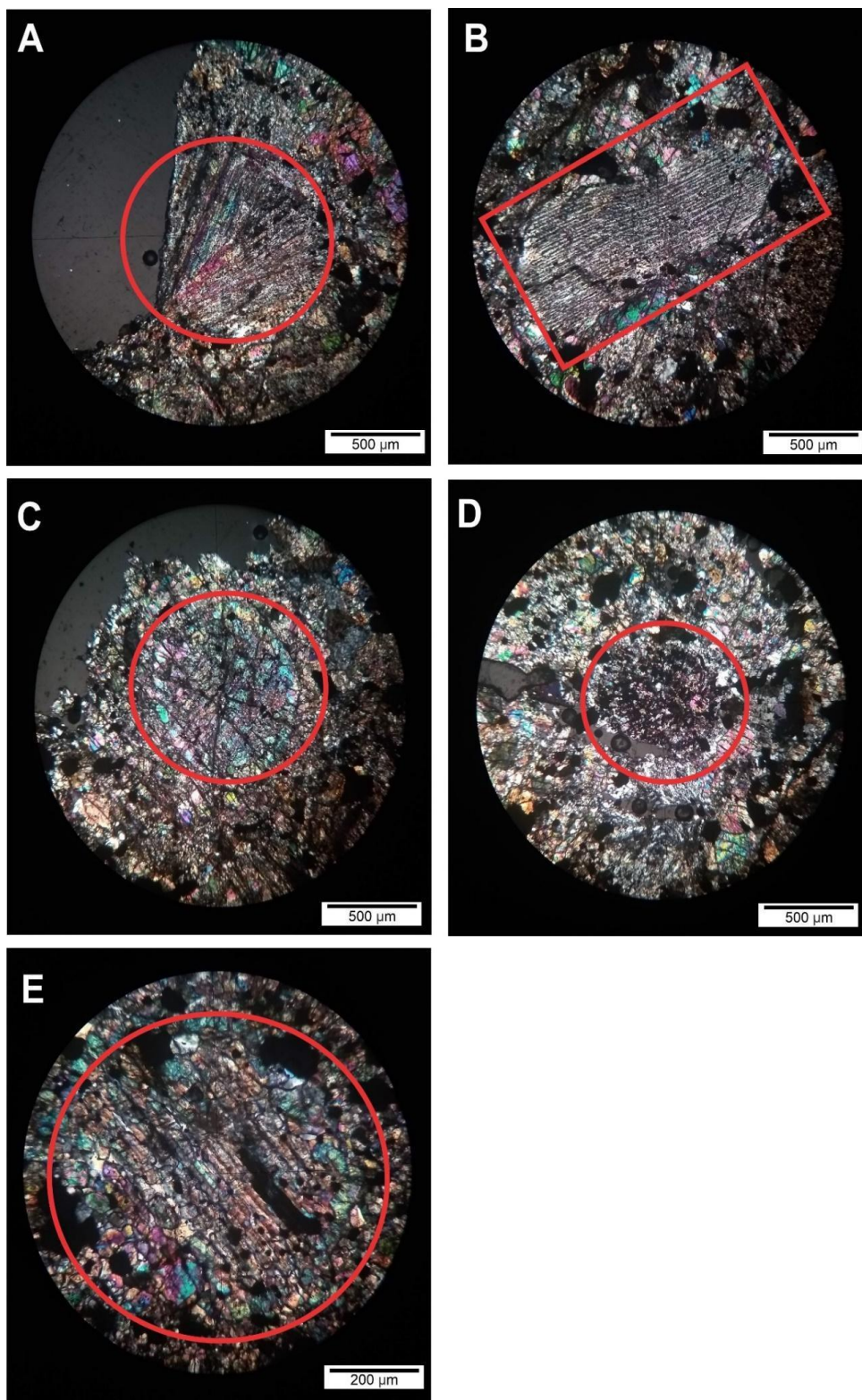


Figura 34 - Côndrulos presentes na amostra 31R1: A e B) Côndrulos de PR; C e E) Côndrulos de olivina barrada; D) Côndrulo de olivina-piroxênio granular.

A matriz do meteorito é toda recristalizada, de tamanho muito fino e contatos poligonais marcados. Na imagem de detalhe (Figura 35C) é possível visualizar os contatos poligonais entre a olivina o piroxênio e o plagioclásio.

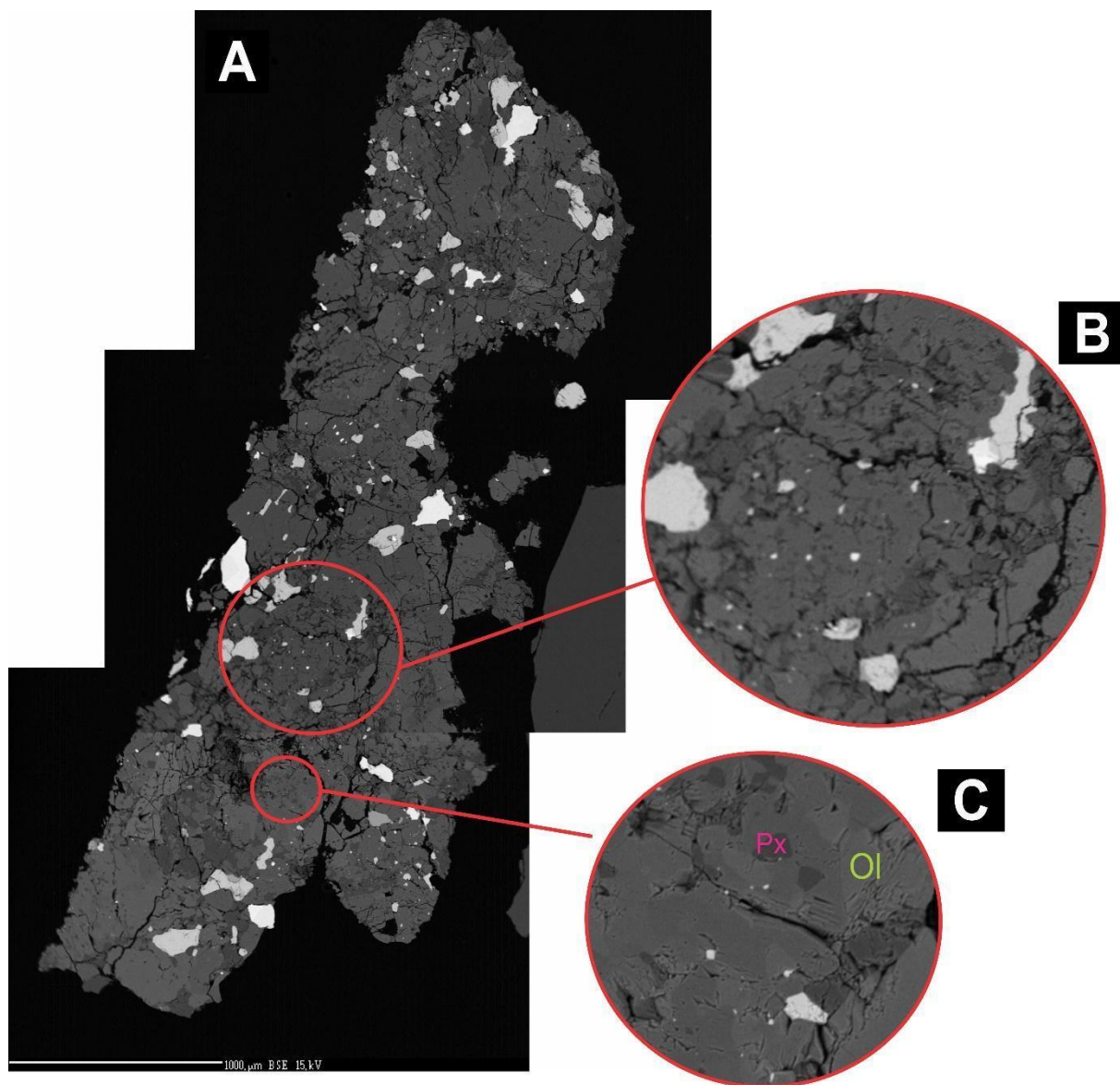


Figura 35 - Visão geral da amostra 31R2, côndrulo e matriz em BSE. A) Visão geral; B) Possível côndrulo; C) Detalhe da matriz mostrando os contatos poligonais entre os minerais (olivina, piroxênio).

A proporção de matriz em relação aos côndrulos discerníveis é de 75% matriz e 25% côndrulos (Figura 36 A, B e C). Além dos côndrulos e pedaços dos mesmos, ainda há alguns grãos reliquiais, com tamanhos de 0,40 mm a 0,75 mm de olivina, piroxênio e plagioclásio, o último em menor quantidade e com tamanho menor em relação aos dois primeiros, todos são subédricos a euédricos.

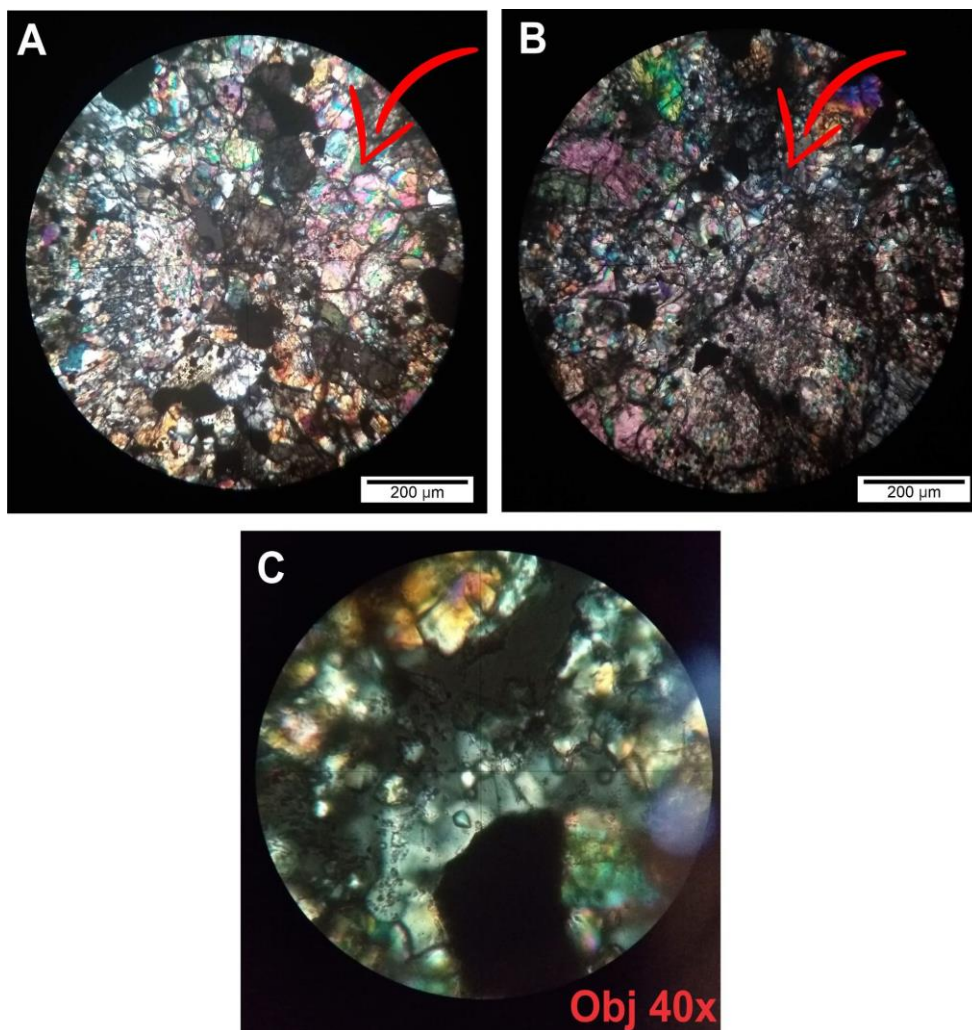


Figura 36 - Matriz recristalizada da amostra 3IR1, evidenciando os contatos poligonais entre os cristais do meteorito. C) Plagioclásio na matriz do meteorito.

As olivinas estão em geral muito fraturadas e possuem fraturas planares (Figura 37), a extinção é ondulante e não há evidências de mosaicismo. Entretanto, observam-se regiões onde os grãos maiores de olivina apresentam textura homogênea e a falta de fraturamento, contudo, no mesmo sítio é possível visualizar algumas fraturas planares ainda que em pequenos grãos dispersos (Figura 38).

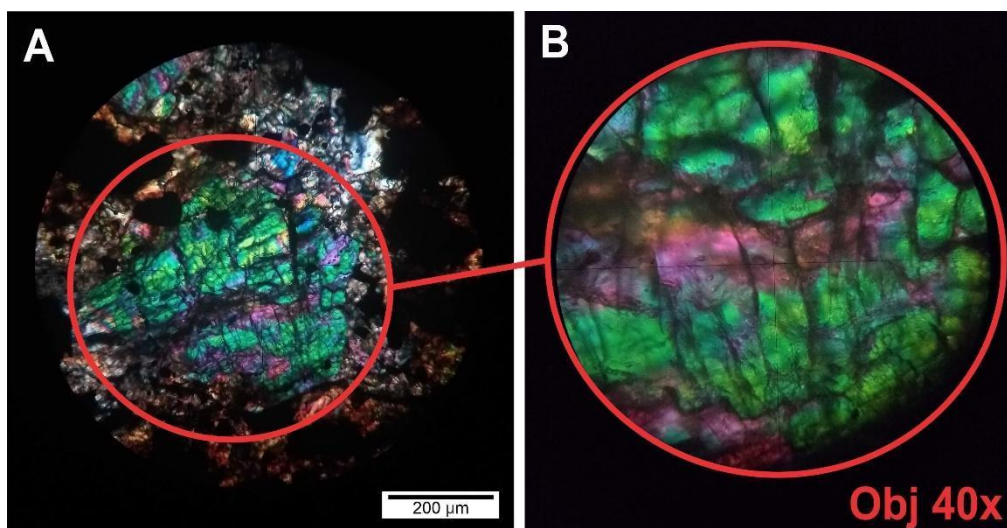


Figura 37 - A) Cristal de olivina fraturado na amostra 3IR1; B) Detalhe das fraturas planares presentes na olivina.

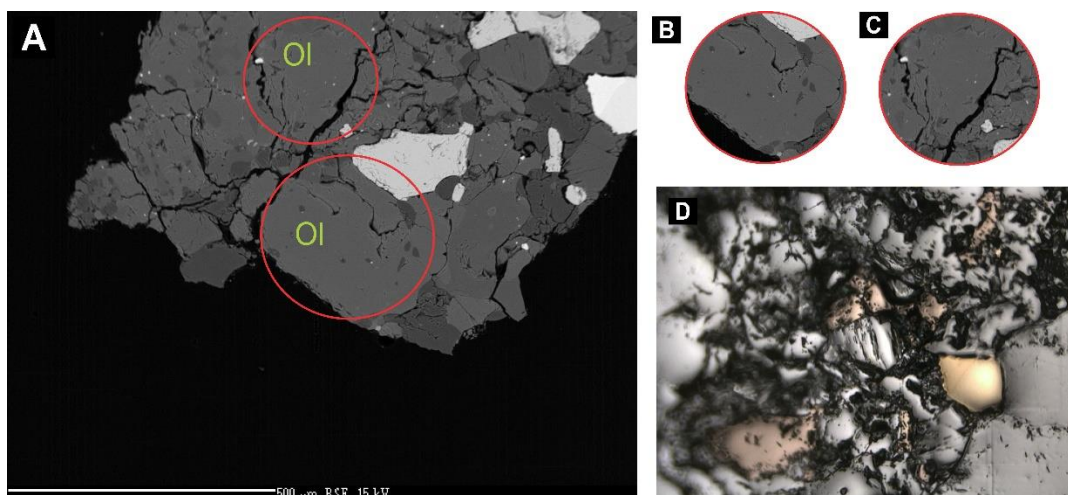


Figura 38 - A) Olivinas da amostra 3IR1 em BSE; B e C) Detalhe das olivinas da amostra 3IR1; D) Olivina em luz refletida.

O piroxênio ocorre como grandes cristais de até 100  $\mu\text{m}$  e sua quantidade modal é bem inferior à da olivina. Os grãos possuem fraturas que, por vezes, se confundem com a clivagem deste mineral, entretanto, o fraturamento é bem menos marcado que na olivina. Duas populações de piroxênios foram observadas, piroxênios com extinção reta e com extinção oblíqua. Essas duas populações apresentam morfologias diferentes como demonstrada na Figura 39, e posteriormente a diferença química foi confirmada pela química mineral que será apresentada no capítulo seguinte. Na Figura 39C é possível ver o contato poligonal bem marcado entre o piroxênio e a olivina da matriz.



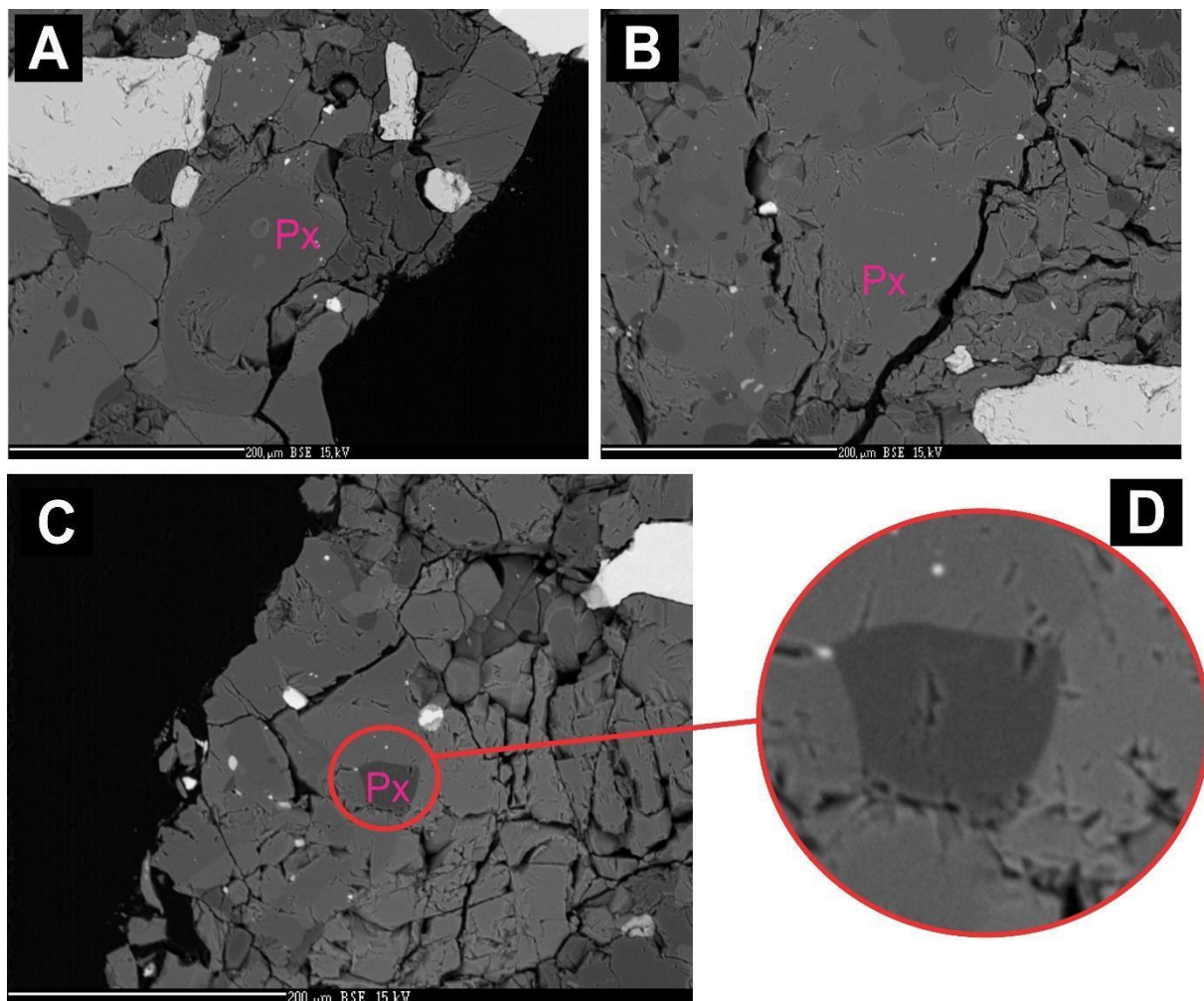


Figura 39 – Piroxênio em BSE do meteorito Três Irmãos.

Nos plagioclásios ainda é possível ver algum resquício de macla, o mineral não possui fraturas e tem leve extinção ondulante. Os cristais são geralmente subédricos (Figura 40). O plagioclásio na amostra 3IR2 possui textura intersticial e de diversos tamanhos (Figura 41). Faz contato com todos minerais e fases presentes na amostra: olivina, piroxênico, taenita, kamacita, plessita, troilita e cromita.

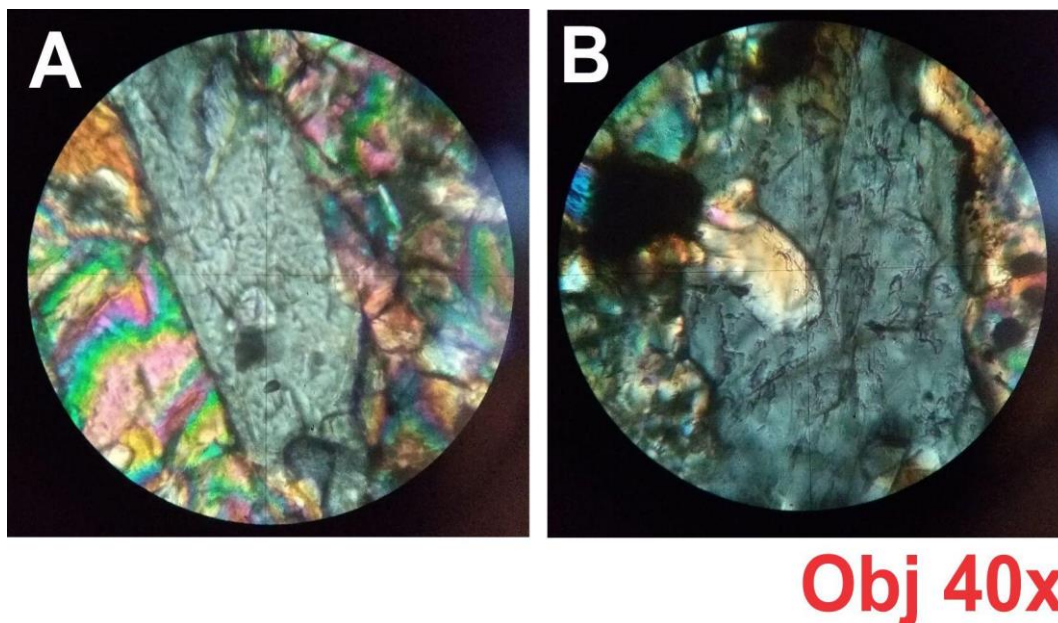


Figura 40 – Cristais subédricos de plagioclásio no meteorito Três Irmãos.

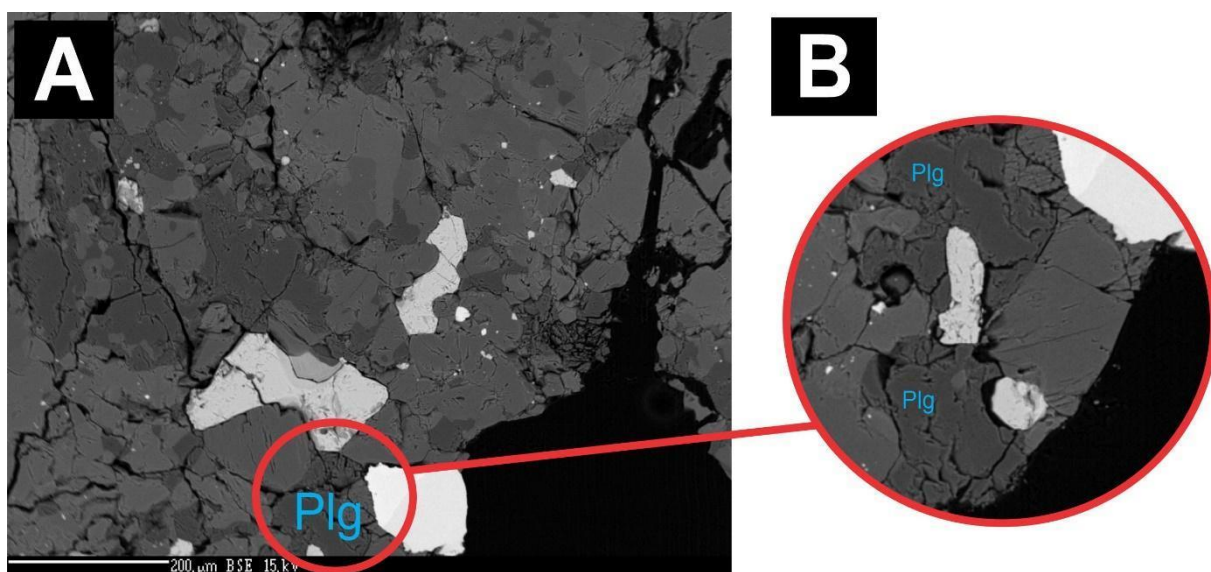


Figura 41 - A) Plagioclásio intersticial na amostra 3IR2; B) Detalhe do plagioclásio intersticial

A cromita do meteorito Três Irmãos não pode ser descrita na petrografia ótica e com as imagens de BSE foi possível caracterizar este mineral. São poucos cristais na amostra, fases primárias e com pouco fraturamento (Figura 42C). Também aparece muitas vezes associada à troilita (Figura 42 A, B e D). A troilita, assim como a cromita, não apresenta fraturamento.

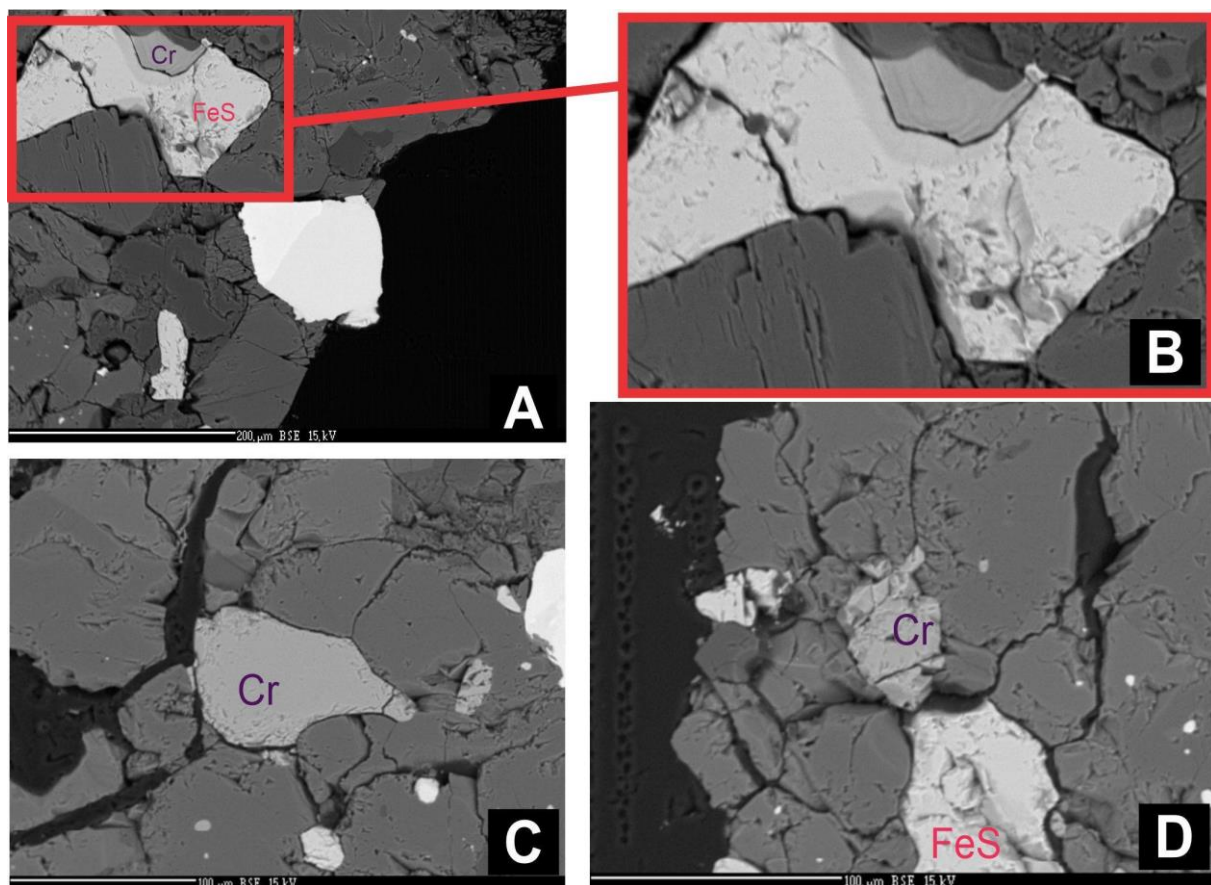
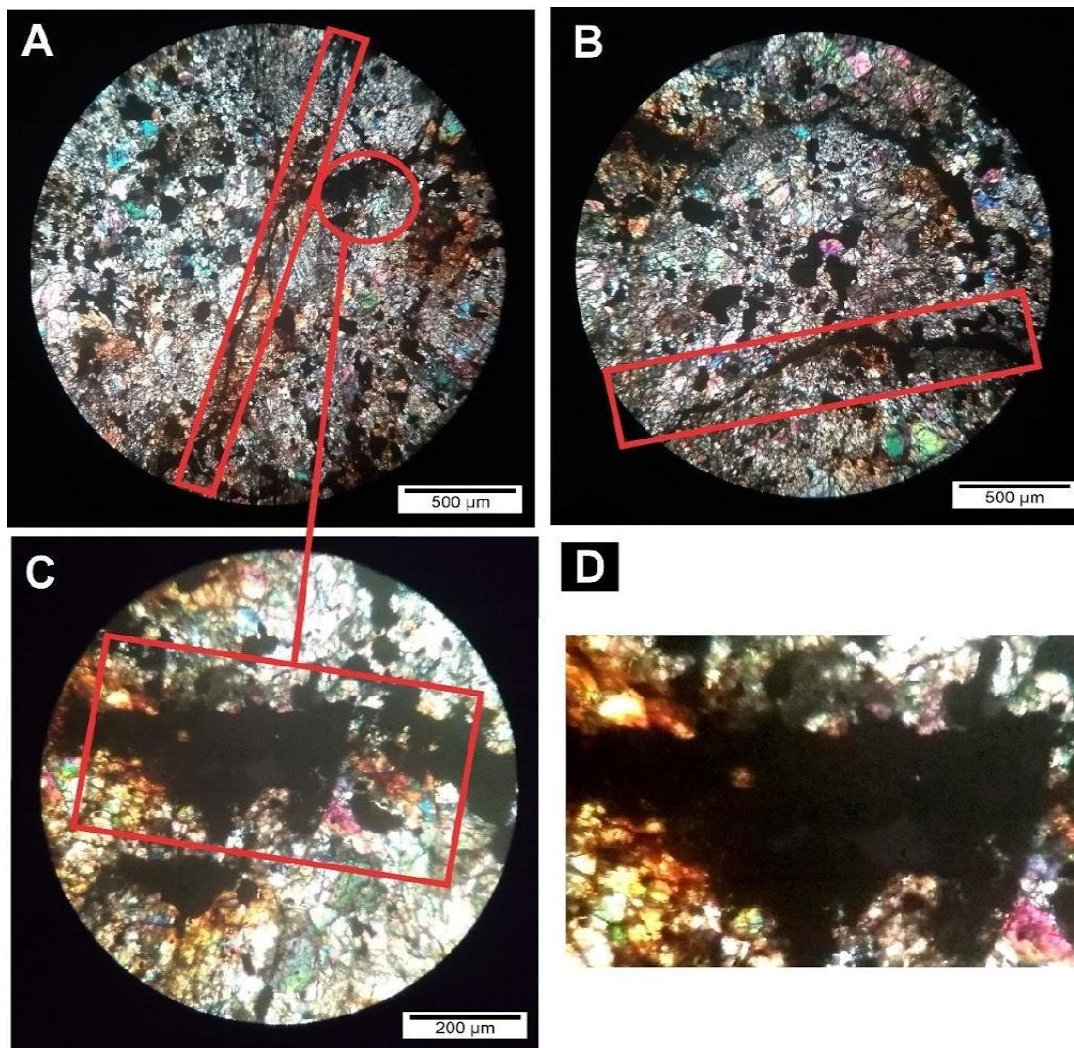


Figura 42 - A e D) Cromita associada à troilita na amostra 3IR2; B) Detalhe da cromita associada à troilita; C) Cromita sem fraturamento na amostra 3IR2.

Este meteorito possui diversos veios de choque: um grande veio atravessando mais da metade da lâmina, com aproximadamente 1,5 cm de comprimento e de 0,14 mm de espessura em alguns locais (Figura 43 A); um veio cortando um dos côneos POP (Figura 43 B) e outro veio de igual espessura cortando outro côneo POP. Associados aos veios, ocorrem bolsões de fusão com tamanhos de 0,60 mm a 0,15mm (Figura 43 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**CD e Figura 43 EFG)



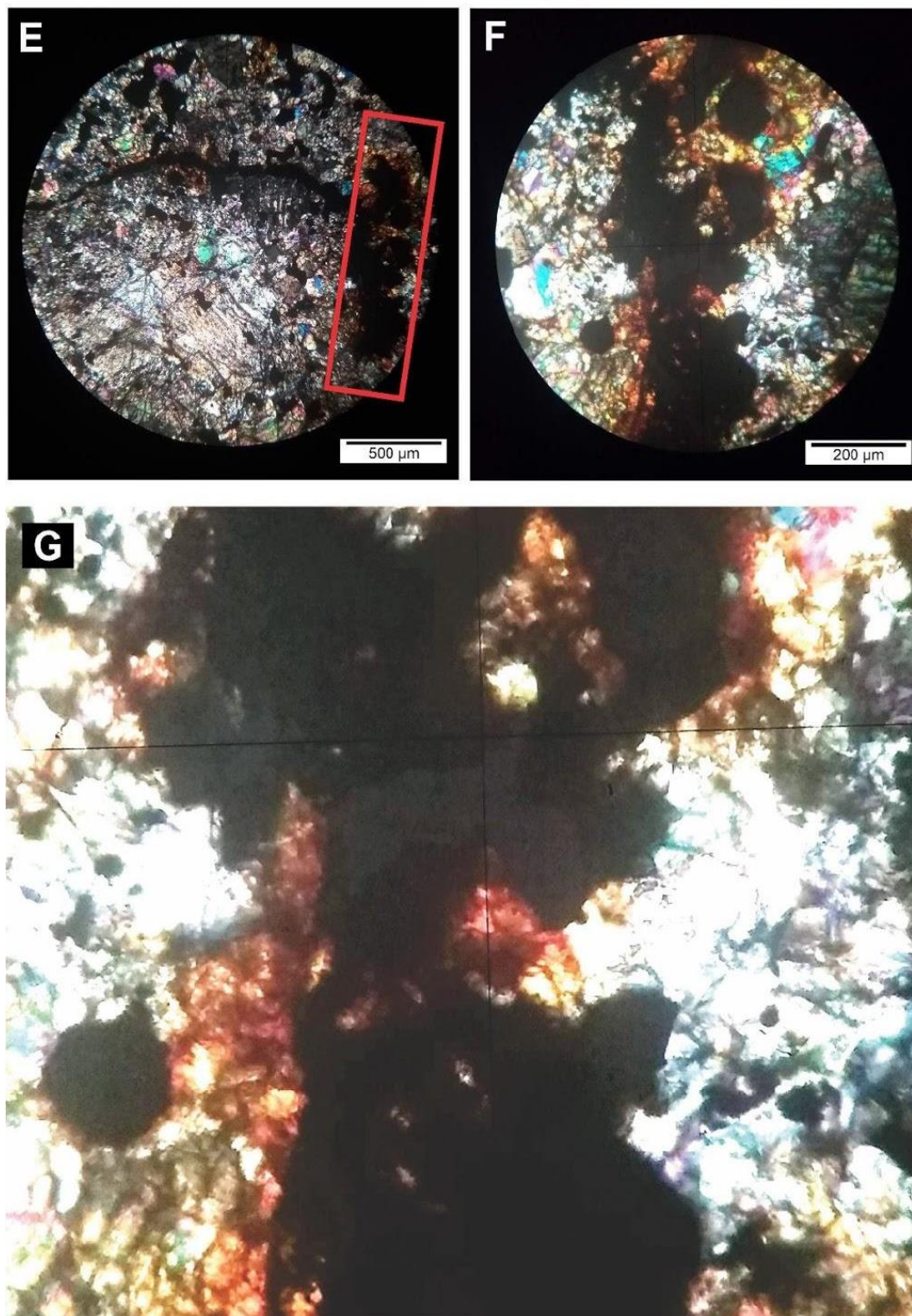


Figura 43 - A e B) Veios de choque da amostra 3IR1; C e E) Bolsões de fusão; D, F e G) Detalhes dos bolsões de fusão.

A amostra 3IR2 não possui veios visíveis, contudo há bolsões pervasivos de piroxênio e plagioclásio (Figura 44).

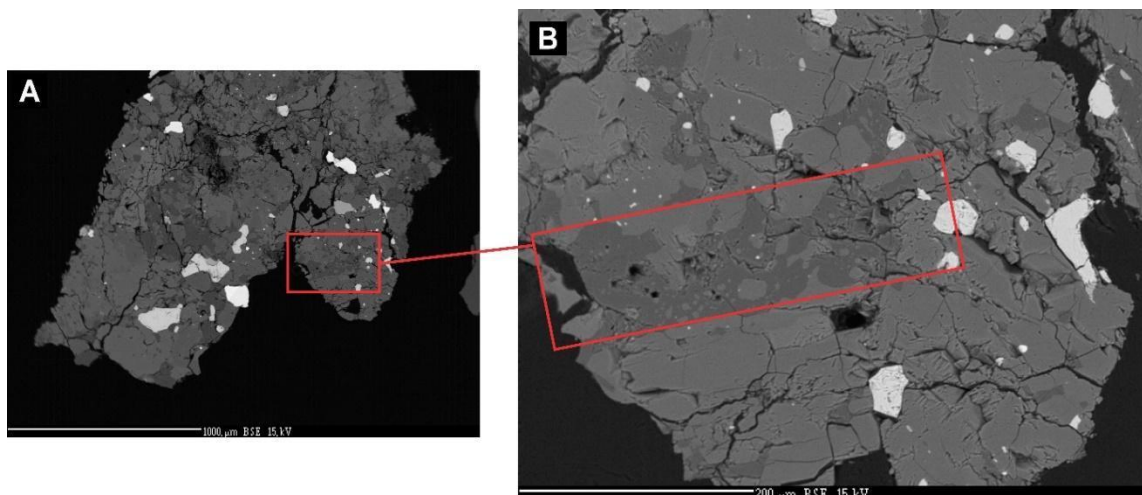


Figura 44 - Bolsão pervasivo na amostra 31R2

As fases de Fe-Ni (kamacita sendo a fase com até 7,5% de Ni e taenita com mais de 65%) (Figura 45) do Três Irmãos possuem diferentes formas e é possível ver a plessita – nome dado a mistura de kamacita e taenita. Seus tamanhos variam entre 0,30mm até > 0,70mm. A troilita, sulfeto presente no meteorito possui textura policristalina nos veios de choque e nos bolsões (Figura 3 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**CD, Figura 43 EFG e Figura 46) de fusão e apresentando fraturas em alguns grãos. Em algumas ocorrências do sulfeto, ele está associado às fases de Fe-Ni.

A kamacita e taenita ocorrem como minerais relacionados, porém não possuem textura e/ou morfologias que permitem a identificação de misturas como é o caso da amostra do meteorito Patrimônio, no qual são identificadas essas feições e entendidas como plessita (mistura de kamacita e taenita).

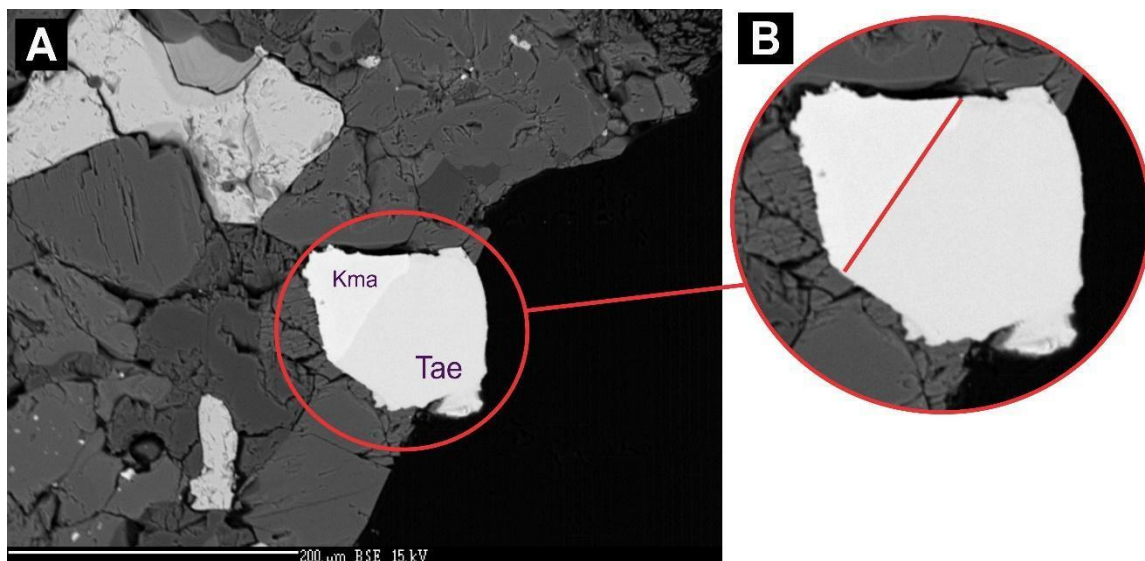


Figura 45 - A) Kamacita e taenita na amostra 3IR2; B) Detalhe da divisão das duas fases kamacita e taenita)

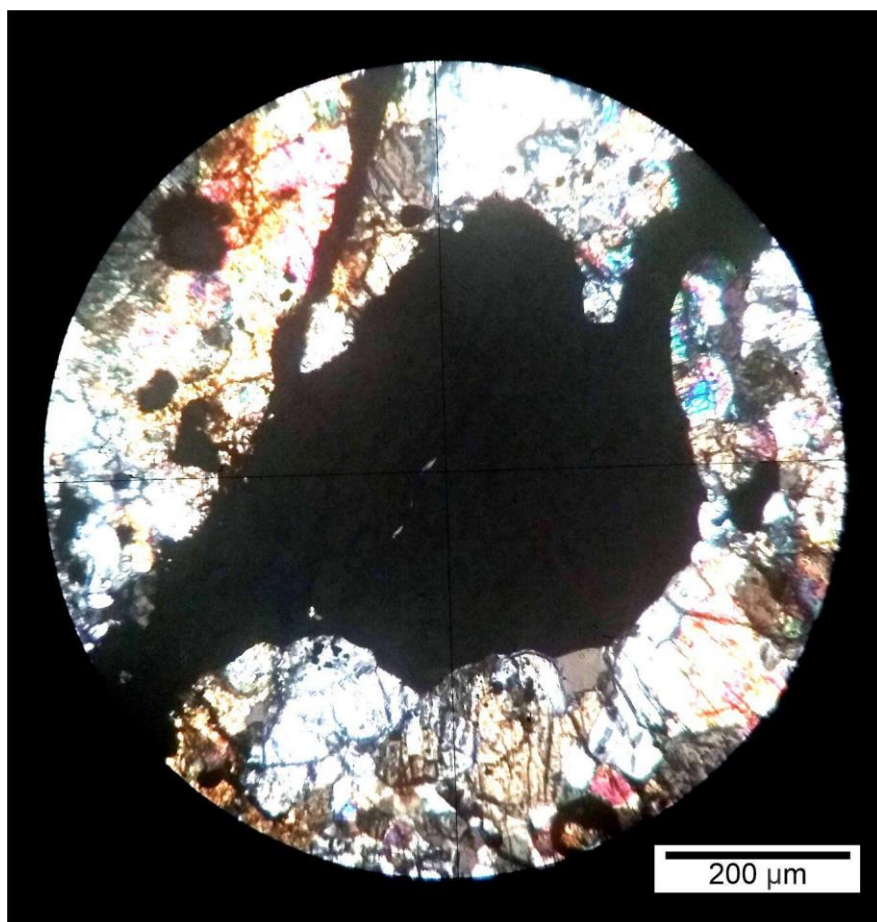


Figura 46 - Detalhe do bolsão de fusão com textura de troelita policristalina

A apatita ocorre no Três Irmãos com cristais bem formados e com pouco fraturamento (Figura 47).

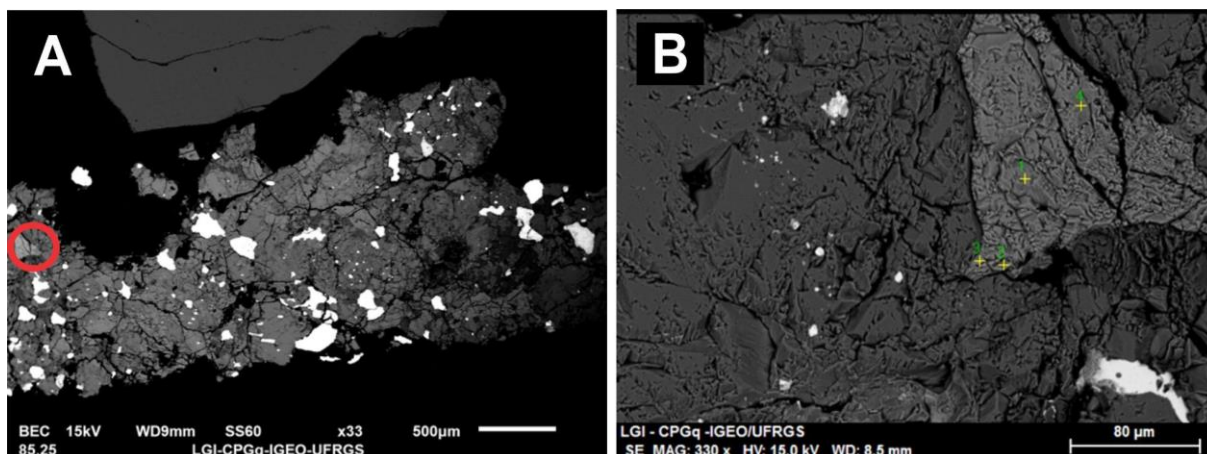


Figura 47- Apatita do meteorito Três Irmãos.

A alteração por intemperismo do meteorito Três Irmãos é visível em torno dos veios e dos minerais opacos metálicos, que mostram bordas e contornos de oxidação bem marcados.

#### 4.2.2. Química Mineral

##### 4.2.2.1. Olivina

A análise química da olivina contou com 13 pontos na amostra 3IR2.

A olivina da amostra 3IR2 possui uma composição química homogênea, e é classificada como Forsterita (Fo= 62-58%) com MgO entre 36 e 38%, FeO entre 22 e 26%, manganês entre 0,4 e 0,5% e níquel e cromo menores que 0,1%. A Figura 48 apresenta a variação da composição de sílica vs número de magnésio.

A fórmula mineral calculada para este mineral é  $Mg_{(1,44-1,49)}Fe_{(0,5-0,58)}Si_1O_4$ .



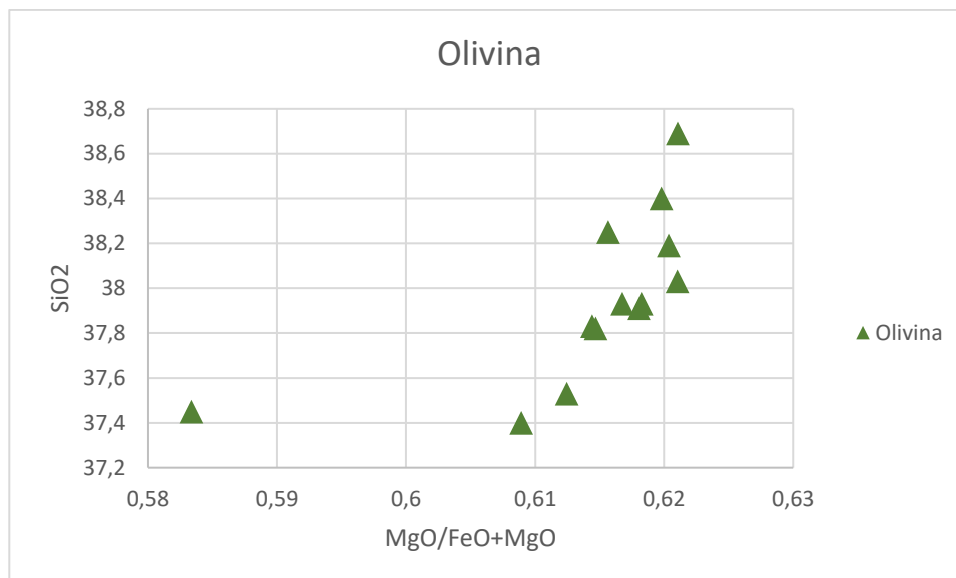


Figura 48 - Gráfico binário sílica vs MgO/FeO+MgO das olivinas do meteorito três irmãos analisadas em microsonda eletrônica.

#### 4.2.2.2. Piroxênio

A análise química da olivina contou com 16 pontos na amostra 3IR2.

Os piroxênios foram classificados em duas populações conforme a química mineral (Figura 49). A primeira população é de ortopiroxênios classificados como enstatita e refere-se aos piroxênios com textura granular. Possuem MgO entre 26 e 29%, FeO com aproximadamente 14%, Ca entre 0,6 e 0,9%, MnO entre 0,4 e 0,5%, TiO<sub>2</sub> entre 0,17 e 0,22%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 0,1 e 0,22%, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 0,04 e 0,24% e NiO menor que 0,06. As análises dos ortopiroxênios resultaram na seguinte fórmula: Ca<sub>0,02-0,02</sub>Mg<sub>1,50-1,53</sub>Fe<sub>0,42-0,45</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>.

A segunda população são os clinopiroxênios que plotam no campo do diopsídio, estes minerais ocorrem com feições e/ou associados a feições de fusão. Possuem MgO entre 15 e 16%, Ca de 21%, FeO entre 4 e 5%, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, entre 0,68 e 0,90%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 0,43 e 0,57%, TiO<sub>2</sub> entre 0,44 e 0,47%, MnO entre 0,15 e 0,23% e NiO menor que 0,04.

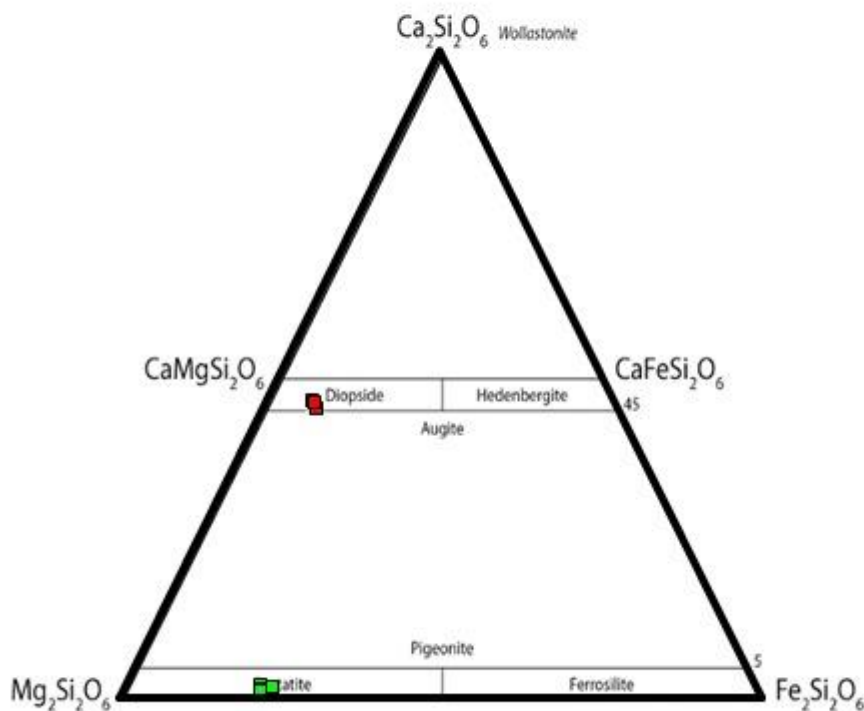


Figura 49 – Classificação dos piroxênios do meteorito Três Irmãos.

#### 4.2.2.3. *Plagioclásio*

A análise de plagioclásio da amostra 3IR2 contou com 8 pontos (Figura 50).

Foram identificadas duas populações de plagioclásios. A primeira, referente a masquelinita que possui  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de aproximadamente 21%,  $\text{Na}_2\text{O}$  entre 9 e 10%, Ca de 2%,  $\text{K}_2\text{O}$  entre 0,7 e 1,0%, FeO entre 0,1 e 0,5%,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  até 0,09% e MgO menor que 0,03% . A outra população é representada por apenas um ponto analisado que corresponde ao plagioclásio mais rico em CaO (14%), MgO (7,36%), FeO (2,11%) e  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (0,38%) e empobrecido em  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (4,5%),  $\text{K}_2\text{O}$  (0,9%).

A fórmula estequiométrica para os plagioclásios sódicos do Três Irmãos:  $K_{0,04-0,06}Na_{0,82-0,88}Ca_{0,1}Si_3Al_{1-1,3}O_8$ . Para a amostra do plagioclásio que possuem maior teor de cálcio a fórmula estequiométrica fica:  $K_{0,051}Na_{0,413}Ca_{0,07}Si_3Al_{0,672}O_8$ .

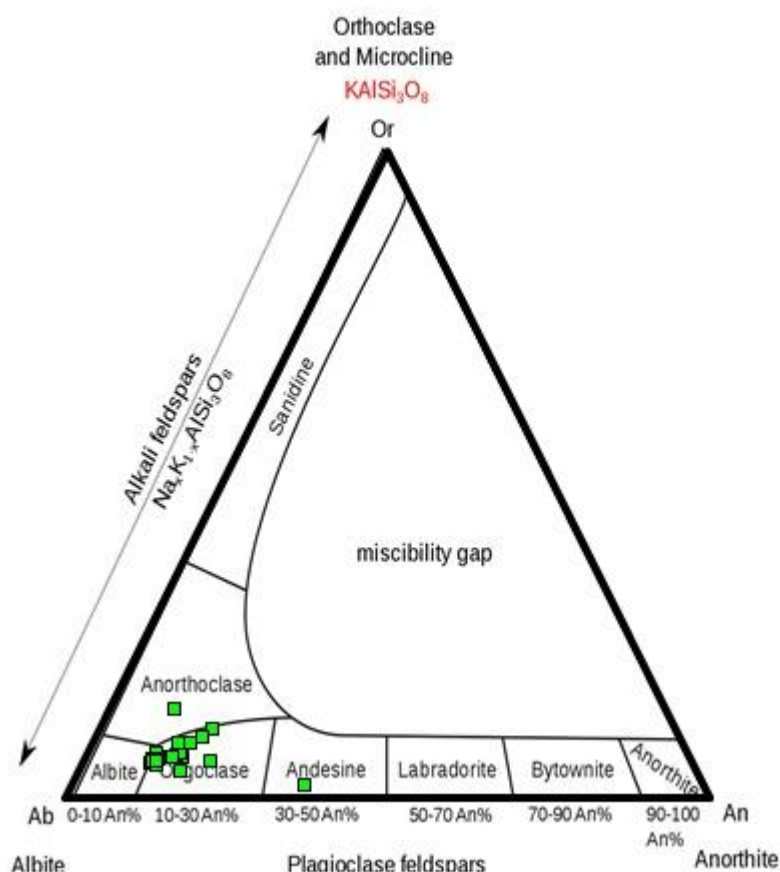


Figura 50 – Classificação dos plagioclásios do meteorito Três Irmãos

#### 4.2.2.4. Cromita

A análise química da cromita da amostra 3IR2 contou com 7 pontos (Figura 51).

Conforme apresentado na petrografia, a cromita da amostra não possui diferença de textura e/ou relação com plagioclásio. Logo, as diferenças químicas não são atribuídas às relações texturais ou aos minerais que circundam a cromita. Estes minerais possuem um teor de  $Cr_2O_3$  entre 56 e 57%,  $FeO$  entre 30 e 31%,  $Al_2O_3$  entre

3,67 e 6,5%,  $\text{TiO}_2$  entre 2,2 e 3%,  $\text{MgO}$  entre 2 e 3%,  $\text{MnO}$  entre 0,6 e 0,8%  $\text{SiO}_2$  entre 0,03 e 0,2%,

A fórmula estequiométrica da cromita do meteorito Três Irmãos foi calculada como:  $\text{Fe}_{(7,31-7,6)}\text{Cr}_{(12,73-13,17)}\text{O}_4$ .

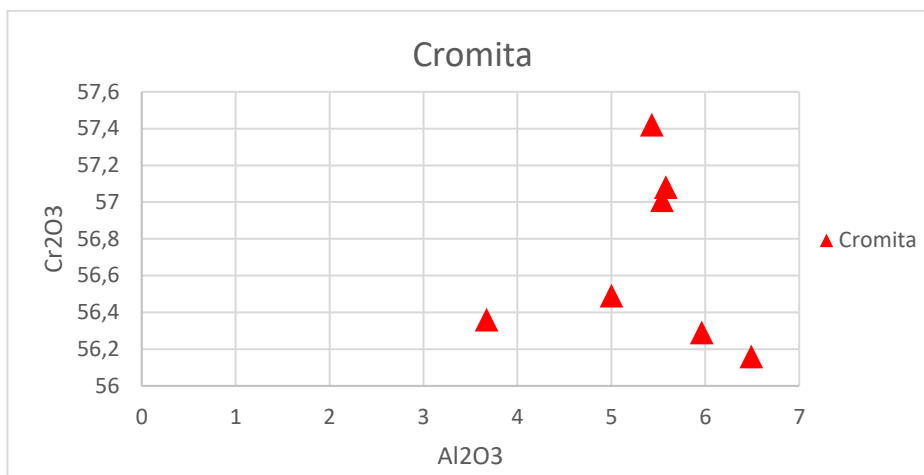


Figura 51 – Gráfico  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  x  $\text{Al}_2\text{O}_3$  das cromitas do meteorito Três Irmãos.

#### 4.2.2.5. *Apatita*

A apatita presente no meteorito Três Irmãos foi analisada em EDS no MEV e foi classificada como uma cloro-apatita. Não é verificada zonação composicional neste mineral (Figura 52).

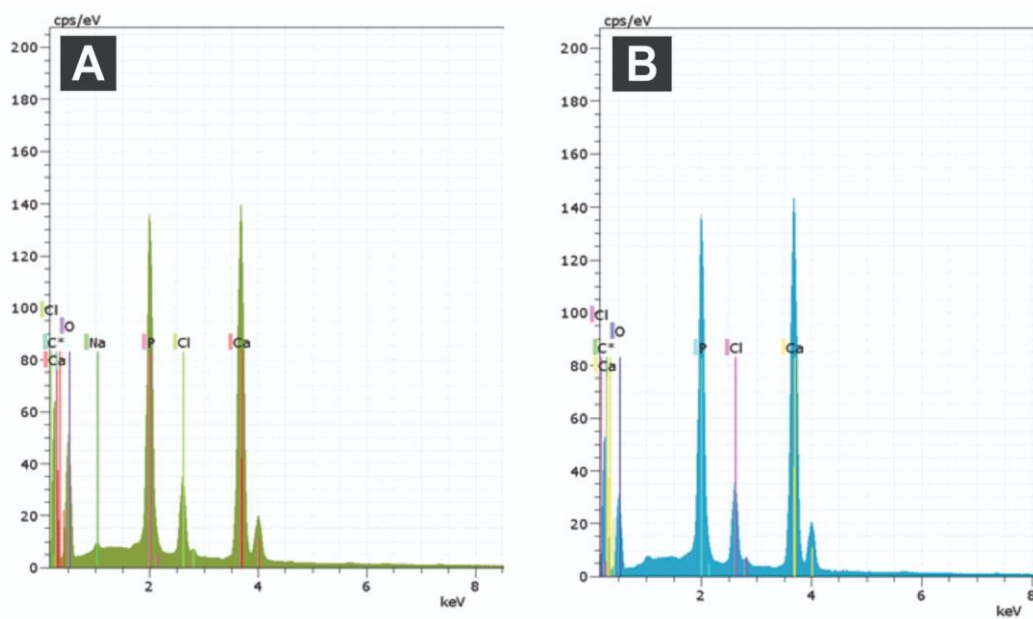


Figura 52 - A) Espectro EDS da borda da apatita. B) Espectro EDS do centro do grão de apatita.

## 5. DISCUSSÃO

Os cõndrulos dos meteoritos estudados possuem praticamente todas texturas de cõndrulos descritas na literatura: olivina piroxênio porfirítico, olivina barrada, criptocristalino, piroxênio radial e o tipo granular. Diversos autores realizaram trabalhos de comparação de texturas e abundância de cõndrulos. Gooding & Keil (1981), analisando diversos meteoritos chegaram há algumas conclusões como: a abundância de texturas de cõndrulos nos grupos de OC são relativamente iguais, conseqüentemente tal comportamento sugere que, se forem provenientes de fontes distintas, os cõndrulos tiveram uma mistura pré incorporação aos cõndrulos, ou ainda, se de mesma fonte, que processos iguais colaboraram para a incorporação dos mesmos. Logo, falando-se em variedade textural e também em tamanho de cõndrulos, os dois meteoritos estudados possuem o mesmo comportamento.

Se a textura dos constituintes e o tamanho dos cõndrulos não são parâmetros para a interpretação petrológica dos condritos em si, já o estado em que eles se encontram faz diferença para classificações de tipo petrológico e de choque de OCs. Van Schmus & Wood (1967), ao separarem os tipos de OC a partir de texturas petrográficas, explicam que meteoritos sem metamorfismo possuem seus cõndrulos muito bem definidos e delineados, de fácil distinção. Já os OC que passaram por episódios metamórficos de alto grau, terão cõndrulos indiscerníveis e não reconhecidos (ou muito pouco), pois o material não possui mais matriz ou cõndrulos – tudo foi fundido em um único material e isso caracteriza o estágio L6 – S6/S7.

Tanto o meteorito Patrimônio quanto o Três Irmãos possuem diversos cõndrulos discerníveis e de texturas reconhecidas. Mesmo alguns estando em partes, muitos estão em estado reconhecível. A classificação vigente de tipo petrológico afirma que condritos L5 possuem cõndrulos de fácil distinção, já nos L6 os cõndrulos são indiscerníveis.

Stöffler et al., (1991) descreve que algumas das deformações mecânicas que podem ocorrer nos silicatos em condritos são: extinção ondulante; fraturas planares e deformação na olivina, entre outras. Ainda, as transformações de fases como plagioclásio em masquelinita; recristalização da olivina em estado sólido ou a formação de olivina policristalina após fusão; entre outras.

Tanto as olivinas das amostras do Patrimônio quanto dos Três Irmãos apresentam olivina com extinção ondulante e fraturas planares bem marcadas; já indicando uma pressão de choque entre 5 e 50 GPa na classificação de Stöffler et al., (1991). Já o plagioclásio das amostras não mostra mosaicismo, contudo possui extinção ondulante e também presença de masquelinita, restringindo já a pressão de choque entre 35 a 45 GPa para o plagioclásio. A macla ainda está presente em alguns grãos de plagioclásio do Patrimônio, demonstrando que o choque pode não ter sido tão intenso a ponto de preservar a feição.

A homogeneidade composicional dos minerais é uma característica dos tipos petrológicos L5 e L6, diminuindo nos L4. No meteorito Patrimônio, a homogeneidade composicional é atingida na maior parte dos grãos de olivina de côndrulo e matriz, entretanto há presença de algumas composições com maior teor de Fa e mais ricas em Ni. O piroxênio também apresenta heterogeneidade, em que os distintos grãos têm composição levemente diferente quanto ao conteúdo de Mg e Fe. Da mesma forma, o plagioclásio tem composição albítica predominante, o que corresponde à presença de masquelinita, mas composições mais cálcicas foram determinadas em alguns grãos. O meteorito Três Irmãos possui também homogeneidade química em relação as olivinas, com teor de Fo constante. Já o piroxênio, mesmo possuindo também heterogeneidade, ela se diferencia do Patrimônio: suas duas populações são enstatita e diopsídio. A enstatita possui predominância, contudo o piroxênio monoclinico também foi observado na petrografia, logo tal população não é tão rara no meteorito e deve ser levada em conta ao classificar o tipo petrológico e grau de choque do meteorito. O plagioclásio do Três Irmãos também possui duas populações distintas: uma mais albítica assim como o Patrimônio, indicando a presença de masquelinita (confirmada em lâmina petrográfica). A outra, um plagioclásio mais rico em cálcio e empobrecido em alumínio. A presença das duas populações, atrelado ao fato também de ainda terem grãos com macla preservada no Três Irmãos, indica que o metamorfismo de choque não foi tão alto a ponto de alterar todos os plagioclásios e fundi-los para masquelinita.

A matriz do meteorito Patrimônio, mesmo sendo fina, ainda possui uma textura mais grossa que a matriz do meteorito Três Irmãos e seus contatos poligonais são mais visíveis tanto em lâmina quanto em BSE. Tal diferença de textura relaciona-se com os intervalos de aumento de temperatura pós-choque definidos por Stöffler et al.,

(1991), em que provavelmente o Patrimônio experienciou uma temperatura mais elevada que o Três Irmãos.

Ainda utilizando a classificação de Stöffler et al., (1991), o autor afirma que a presença de veios de choque opacos e bolsões de fusão são parâmetros a serem analisados em petrografia a serem considerados para a definição do choque – mesmo que não sejam conclusivos, segundo o autor. Meteoritos que possuem tais feições são classificados já com estágio de choque S3 ou maior que isso: pressões de pico de choque de 15-20 GPa até 75-90 GPa e aumento de temperatura pós-choque de 100-150 °C até 1500-1750 °C.

Os dois meteoritos do presente trabalho possuem tanto veios de choque quanto bolsões de fusão. O meteorito Patrimônio possui a formação das duas feições de forma interconectada – estabelecida tanto em petrografia óptica quanto em imagem eletrônica - e não possui bolsões de fusão pervasivos, sendo assim, seu estágio de choque pode ser restringido entre S3 e S4. O meteorito Três Irmãos também possui as feições interconectadas – visíveis apenas em petrografia óptica e apenas uma feição pervasiva, sendo assim, também restringido aos estágios de choque S3 e S4.

Entretanto, outros parâmetros podem ser usados para classificar o choque ou ao menos restringir os intervalos das pressões. Rubin (2003) utiliza texturas de cromita para indicar o estágio de choque. Não somente a textura das cromitas, mas também suas relações com a troilita e plagioclásio.

O meteorito Três Irmãos possui cromitas sem fratura e a troilita associada não está em veios ou em formato policristalino, encaixando-se na primeira classificação de Rubin, que seria um choque relativamente baixo. Já as texturas de cromita do Patrimônio são bem divergentes de um baixo choque. O fraturamento, mesmo que sem fusão; a associação com troilita policristalina e a associação de cromita policristalina com plagioclásio, também chamados de “cluster de agregados de cromita” (termo de Rubin, 2003). Essa última textura é classificada pelo autor como uma feição de alto choque. Ainda, o fato de o meteorito Patrimônio possuir cromita-plagioclásio, mas também possuir troilita em associação com a cromita dá indícios de que a fusão do plagioclásio pode ter fundido cromitas adjacentes, devido ao fato que as cromitas que não estão associadas ao mesmo não possuem feições de fusão. Outra questão que corrobora com essa fusão é o fato do ponto eutético da troilita ser baixo (988°C) e também podem ter sido derretidas pelo plagioclásio.



Celia *et al.*, (2019a, 2019b) já haviam levantado as questões a respeito da classificação desses dois meteoritos. Os autores propõem uma classificação de choque entre S3 e S4 para o meteorito Patrimônio e diverge da classificação de choque já estabelecida para o Três Irmãos de S3. As evidências apresentadas no presente trabalho para o meteorito Patrimônio, como a heterogeneidade do piroxênio e o fato de possuir côndrulos discerníveis, sugerem que a classificação de tipo petrológico L6 não é a mais adequada para tal meteorito. Ainda, evidências como a diferença composicional no plagioclásio e as texturas de plagioclásio e cromita, indicam que o choque sofrido pelo meteorito está no intervalo de pressão entre 15 a 35GPa e intervalo de aumento de temperatura após choque de 100 a 350°C - classificações S3 e S4 de Stöffler *et al.*, 1991. As evidências para o meteorito Três Irmãos como côndrulos discerníveis, duas populações de piroxênio bem distintas, a presença de masquelinita e as texturas de cromita sem fraturamento, levam a crer que mesmo estando entre o mesmo intervalo de pressão e temperatura que o meteorito Patrimônio, o seu grau de choque é mais baixo que este. Tal hipótese/afirmação é corroborada pela diferença de textura e tamanho de matriz dos dois meteoritos, propondo que o meteorito Patrimônio deve ser classificado como S4.

## 6. CONCLUSÕES

A utilização das diversas técnicas de análise petrográfica e mineralógica permitiu a caracterização de detalhe dos dois meteoritos brasileiros Patrimônio e Três Irmãos e possibilitou a comparação entre estes meteoritos previamente classificados como do tipo petrológico L6.

O meteorito Patrimônio possui côndrulos discerníveis, piroxênios com extinção reta e ondulante, composições que variam em relação ao MgO e FeO, olivina com composição homogêna e com fraturas planares e plagioclásio com composições sódicas e cálcicas, além da relação do plagioclásio com a cromita policristalina, portanto, se propõe que em relação ao grau de choque seja classificado como S4.

O meteorito Três Irmãos também possui côndrulos discerníveis e matriz recristalizada muito fina, além disso a heterogeneidade química dos constituintes, tais como os dois piroxênios presentes (enstatita e diopsídio) e a presença de plagioclásios albiticos e cálcicos, todos esses fatores sugerem que a classificação L6 deve ser revista uma vez que as características descritas acima não se encaixam de forma satisfatória na classificação vigente, podendo ser não menor que L5.

As feições de choque observadas não se encaixam em um choque S3 - classificação atual do meteorito - pois ele possui feições de deformação no plagioclásio e seus veios de choque estão interconectados com bolsões de fusão, indicando um choque de grau mais alto. Contudo, a ausência de mosaicismo, a presença apenas de cromita primária, não fraturada, em associação somente com troilita monocristalina, indicam que o choque do meteorito está abaixo de S4. Comparativamente ao meteorito Patrimônio, um possível S4, sua matriz é, mesmo que recristalizada, mais fina, indicando um metamorfismo de choque mais baixo que o do Patrimônio.

## 7. REFERÊNCIAS

Adams, F. & Myers, P. 2001. Modes of Multiple Star Formation. *The Astrophysical Journal*, 533(2), p. 744-753.

Carter N.L., Raleigh, C. B., De Carli P.S. 1968. Deformation of olivine in stony meteorites. *Journal of Geophysical Research*, 73, p. 5439-5461.

Celia, R. S., Gomes, M. E. B., Salerno, G. M., Zucolotto, E., Porcher., C. C. 2019. Meteorito Patrimônio: Caracterização e Classificação. *In: SIMPÓSIO SUL BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 17, 2019, Bento Gonçalves. *Anais...: Bento Gonçalves, SBG*, v.1, p.358

Celia, R. S., Gomes, M. E. B., Salerno, G. M., Zucolotto, E., Porcher., C. C. 2019. Meteorito Três Irmãos: aspectos mineralógicos, petrográficos e isotópicos. *In: SIMPÓSIO SUL BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 17, 2019, Bento Gonçalves. *Anais...: Bento Gonçalves, SBG*, v.1, p.359

Gomes, C. B., Keil, K., Curvello, W. S., & Jarosewich, E. (1978). Studies of Brazilian meteorites VI. Mineralogy, petrology and chemistry of the Patrimônio, Minas Gerais, Chondrite. *Jornal de Mineralogia*, 7, 67-71.

Dodd R. T. & Jarosewich, E. 1979. Incipient melting in and shock classification of L-group chondrites. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(2), p. 355-363.

Dominik, C. & Tielens, A. 1997. The Physics of Dust Coagulation and the Structure of Dust Aggregates in Space. *The Astrophysical Journal*, 480(2), p. 647-673.

Gil, A. 2014. Como elaborar projetos de pesquisas. *Editora Atlas*, 38(4), p. 519-531.

Gillet, P., Goresy, A. E., Beck, P., Chen, M. 2007. High-pressure mineral assemblages in shocked meteorites and shocked terrestrial rocks: Mechanisms of

phase transformations and constraints to pressure and temperature histories. Special Paper of the Geological Society of America, 421(5), p. 57-82.

Gomes, C. B., Keil, K., Curvello, W. S., & Jarosewich, E. 1978. Studies of Brazilian meteorites VI. Mineralogy, petrology and chemistry of the Patrimônio, Minas Gerais, Chondrite. *Jornal de Mineralogia*, 7, p. 67-71.

Gooding, J. L. & Keil, K. 1981. Relative abundances of chondrule primary textural types in ordinary and their bearing on conditions of chondrule formation. *Meteoritics*, 16(1), p. 17-43.

Grady, D. E. 1980. Shock deformation of brittle solids. *Journal of Geophysical Research*, 85(B2), p. 913-924.

Reipurth, B. & Bally, J. 2001. Herbig-Haro Flows: Probes of Early Stellar Evolution. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 39, p. 403-455.

Keil, K. & Fredriksson, K. 1964. The Iron, Magnesium, and Calcium Distribution in Coexisting Olivines and Rhombic Pyroxenes of Chondrites. *Journal of Geophysical Research*. 69(16), p. 3487-3515.

Krot, A. N., Keil, K., Scott, E. R. D. 2017. Classification of Meteorites. *Meteoritics and Planetary Science*. 52(8), p. 1660-1668.

Leonard, A. 1956. A Classificational Catalog of the meteoritic falls of the World. p.8.

Leroux, H. 2001. Microstructural shock signatures of major minerals in meteorites. *European Journal of Mineralogy*, 13(2), p. 253-272.

Milton, D. J. & De Carli, P. S. 1963. Maskelynite: Formation by Explosive Shock. *Science*, 140, p. 670-671.

Montmerle, T., Augereau, J., Chaussidon, M., Gounelle, M., Marty, B., Morbidelli, A. 2006. Solar system formation and early evolution: The first 100 million years. *Earth, Moon and Planets*. 98(1-4), p. 39-95.

Norton, O. R. & Chitwood, L. A. 2011. *Field Guide to Meteors and Meteorites*. Patrick Moore's Practical Astronomy Series, p. 287.

Pfalzner, S., Davies, M., Gounelle, M., et al., 2015. The formation of the solar system. *Physica Scripta*, 90(6).

Reed, S. J. B. 2015. *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. 2. ed. New York: Cambridge University Press.

Rubin, A. E. 2003. Chromite-plagioclase assemblages as a new shock indicator; implications for the shock and thermal histories of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(14), p. 2695-2709.

Scott, E. R. D. & Krot, A. N. 2003. *Chondrites and their Components*. Treatise on Geochemistry, 1, p. 144-190.

Sears D. W. G. & Dood, R. T. 1988. Overview and classification of meteorites. *Meteorites and the Early Solar System*, p. 3-31.

Shu, F. H., Adams, F. C., Lizano, S. 1987. Star Formation in Molecular Clouds: Observation and Theory. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 25(1), p. 23-81.

Stöffler, D., Harman, C., Metzler, L. 2018 Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system. *Meteoritics and Planetary Science*, 53(1), p. 5–49.

Stöffler, D., Keil, K., & Edward, R.D.S. 1991. Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12), p. 3845–3867.

Urey, H. C. & Craig, H. 1953. The composition of the stone meteorites and the origin of the meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4(1-2), p. 36-82.

Van Schmus W.R. & Ribbe P.H. 1968 The composition and structural state of feldspar from chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 32, p. 1327-1342.

Van Schmus, W. R. & Wood, J. A. 1967. A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5), p. 747-765.

Velbel, M. A. 1988. The Distribution and Significance of Evaporitic Weathering Products on Antarctic Meteorites. *Meteoritics*, 23(2), p. 151-159.

Villaça, C. V. N. & Zucolotto, M. E. Z., 2018. Classificação e interpretação de meteoritos condritos ordinários e o eucrito Serra Pelada. Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio De Janeiro, p. 68.

Wlotzka, F., 1993. A Weathering Scale for Ordinary Chondrites. *Meteoritics*, 28(3), p. 460-460.

Zucolotto, M. E., Fonseca, A. C., Antonello, L. L. 2013. Decifrando os Meteoritos. Museu Nacional – Série Livros, 52.

# 1 APÊNDICE A – RESULTADOS DE QUÍMICA MINERAL: OLIVINA

Meteorito Patrimônio													
Análise 1													
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	K2O	CaO	TiO2	Cr2O3	MnO	FeO	NiO	MgO	CoO	Total
5 / 1 .	0,03	0,01	37,93	0,00	0,02	0,00	0,03	0,45	23,23	0,02	37,73	x	99,45
17 / 1 .	0,00	0,00	38,04	0,00	0,00	0,02	0,08	0,43	22,78	0,03	37,59	x	98,97
Análise 2													
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	K2O	CaO	TiO2	Cr2O3	MnO	FeO	NiO	MgO	CoO	Total
30 / 1 .	0,00	0,01	37,99	0,00	0,05	0,01	0,04	0,45	23,22	0,05	38,38	0,04	100,23
31 / 1 .	0,00	0,02	37,79	0,00	0,00	0,01	0,00	0,46	23,24	0,00	38,12	0,00	99,65
32 / 1 .	0,02	0,02	37,98	0,00	0,00	0,03	0,04	0,52	23,25	0,00	38,50	0,00	100,37
36 / 1 .	0,03	0,00	37,78	0,01	0,04	0,03	0,01	0,46	23,20	0,03	37,93	0,00	99,53
37 / 1 .	0,01	0,00	37,83	0,00	0,00	0,01	0,05	0,44	23,22	0,06	38,04	0,00	99,67
38 / 1 .	0,01	0,00	37,59	0,01	0,04	0,00	0,00	0,51	23,61	0,08	37,61	0,03	99,48
42 / 1 .	1,47	3,43	38,08	0,20	0,38	0,02	0,00	0,31	27,51	1,04	28,24	0,08	100,77
43 / 1 .	2,89	5,34	40,47	0,35	0,79	0,01	0,00	0,22	28,91	1,00	21,82	0,07	101,89
52 / 1 .	0,00	0,00	37,84	0,00	0,00	0,00	0,02	0,45	23,30	0,01	38,15	0,00	99,78
53 / 1 .	0,00	0,00	36,84	0,00	0,01	0,00	0,00	0,44	23,16	0,00	37,62	0,00	98,07
54 / 1 .	0,01	0,00	37,52	0,01	0,03	0,02	0,13	0,46	22,94	0,02	38,43	0,00	99,58
55 / 1 .	0,00	0,01	37,27	0,00	0,02	0,01	0,06	0,45	23,07	0,00	37,50	0,00	98,39
65 / 1 .	0,01	0,03	37,48	0,00	0,01	0,04	0,06	0,44	23,02	0,00	38,36	0,00	99,46
66 / 1 .	0,00	0,01	37,30	0,00	0,00	0,02	0,07	0,44	23,07	0,05	37,78	0,00	98,75
67 / 1 .	0,00	0,01	36,53	0,00	0,01	0,02	0,00	0,47	23,92	0,13	36,92	0,02	98,04
68 / 1 .	0,00	0,00	37,48	0,01	0,04	0,03	0,00	0,48	23,12	0,02	38,04	0,01	99,25
69 / 1 .	0,00	0,00	37,96	0,00	0,02	0,00	0,11	0,49	22,79	0,00	38,54	0,00	99,92
86 / 1 .	0,00	0,02	37,50	0,00	0,00	0,00	0,10	0,51	23,10	0,04	38,22	0,04	99,54
87 / 1 .	0,00	0,00	37,74	0,01	0,02	0,00	0,00	0,49	23,26	0,01	37,89	0,00	99,42
89 / 1 .	0,00	0,00	37,16	0,00	0,00	0,03	0,08	0,40	22,88	0,00	38,04	0,00	98,59
90 / 1 .	0,00	0,00	37,09	0,00	0,02	0,02	0,03	0,54	22,89	0,00	38,05	0,00	98,63

Meteorito Três Irmãos													
Análise 1													
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	FeO	Cr2O3	MnO	NiO	K2O	TiO2	Total	
2 / 1 .	0,00	0,00	38,03	37,61	0,00	22,95	0,07	0,50	0,00	0,01	0,00	99,17	
4 / 1 .	0,00	0,00	37,53	37,09	0,00	23,47	0,10	0,47	0,00	0,00	0,01	98,67	
5 / 1 .	0,00	0,00	37,91	37,41	0,01	23,12	0,01	0,51	0,00	0,00	0,00	98,98	
15 / 1 .	0,00	0,00	37,40	36,76	0,00	23,61	0,02	0,48	0,00	0,00	0,00	98,29	
16 / 1 .	0,01	0,01	38,25	37,72	0,00	23,55	0,02	0,43	0,01	0,00	0,01	100,03	
17 / 1 .	0,00	0,01	37,83	37,30	0,00	23,41	0,04	0,46	0,08	0,00	0,01	99,13	
Análise 2													
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	FeO	Cr2O3	MnO	NiO	K2O	TiO2	Total	
1 / 1 .	0,03	0,01	37,45	36,60	0,03	26,14	0,06	0,41	0,08	0,00	0,00	100,83	
5 / 1 .	0,00	0,00	38,69	38,45	0,06	23,46	0,07	0,45	0,00	0,00	0,03	101,21	
12 / 1 .	0,00	0,00	38,19	38,50	0,03	23,56	0,09	0,50	0,04	0,00	0,01	100,91	
13 / 1 .	0,01	0,03	37,93	37,95	0,06	23,43	0,00	0,51	0,04	0,00	0,00	99,95	
14 / 1 .	0,00	0,00	38,40	37,92	0,00	23,26	0,04	0,43	0,02	0,00	0,01	100,09	
15 / 1 .	0,00	0,02	37,82	37,76	0,00	23,67	0,03	0,51	0,00	0,00	0,00	99,80	
16 / 1 .	0,00	0,00	37,93	37,67	0,03	23,41	0,00	0,47	0,00	0,00	0,02	99,55	

## 2 APÊNDICE B – RESULTADOS DE QUÍMICA MINERAL: PIROXÊNIO

Meteorito Patrimônio													
Análise 1													
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	FeO	Cr2O3	MnO	NiO	K2O	TiO2	CoO	Total
2 / 1 .	0,02	0,12	55,89	28,50	0,67	14,09	0,07	0,46	0,02	0,00	0,19	X	100,04
11 / 1 .	0,00	0,15	55,77	28,43	0,70	13,65	0,13	0,42	0,08	0,00	0,20	X	99,54
12 / 1 .	0,00	0,15	56,23	28,37	0,83	13,75	0,13	0,48	0,01	0,00	0,15	X	100,11
14 / 1 .	0,01	0,12	55,41	28,01	0,92	13,90	0,17	0,48	0,00	0,00	0,18	X	99,20
15 / 1 .	0,00	0,20	54,49	27,85	0,68	13,50	0,13	0,49	0,00	0,00	0,18	X	97,52
18 / 1 .	0,04	0,17	55,49	28,06	0,71	14,51	0,10	0,47	0,00	0,01	0,20	X	99,76
20 / 1 .	0,00	0,14	52,25	26,57	0,77	17,28	0,30	0,41	0,21	0,01	0,21	X	98,13
21 / 1 .	0,01	0,14	54,87	27,67	0,78	14,88	0,39	0,49	0,10	0,01	0,20	X	99,54
22 / 1 .	0,01	0,16	55,51	28,07	0,86	13,81	0,63	0,48	0,00	0,01	0,18	X	99,72
23 / 1 .	0,03	0,10	50,30	25,51	0,76	19,78	0,21	0,45	0,66	0,00	0,18	X	97,97
Análise 2													
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	FeO	Cr2O3	MnO	NiO	K2O	TiO2	CoO	Total
56 / 1 .	0,01	0,14	55,30	28,73	0,85	13,89	0,24	0,45	0,07	0,00	0,19	0,00	99,88
57 / 1 .	0,03	0,15	54,57	28,29	0,86	14,62	0,21	0,50	0,11	0,00	0,23	0,00	99,57
58 / 1 .	0,03	0,17	54,03	28,09	0,70	14,66	0,14	0,51	0,13	0,00	0,20	0,00	98,67
59 / 1 .	0,01	0,15	54,80	28,46	0,81	13,99	0,17	0,42	0,00	0,00	0,20	0,01	99,01
71 / 1 .	0,02	0,16	54,68	28,32	0,71	14,09	0,16	0,48	0,00	0,00	0,22	0,00	98,84
73 / 1 .	0,01	0,17	55,18	28,82	0,49	13,84	0,05	0,49	0,04	0,00	0,17	0,00	99,27
74 / 1 .	0,00	0,18	54,94	28,43	0,69	14,01	0,21	0,45	0,03	0,00	0,18	0,00	99,12
75 / 1 .	0,04	0,16	54,78	28,81	0,60	14,43	0,10	0,45	0,01	0,00	0,19	0,00	99,56
78 / 1 .	0,62	0,57	52,68	15,91	20,89	5,02	0,96	0,26	0,00	0,01	0,49	0,00	97,41
81 / 1 .	0,68	0,79	54,39	27,15	0,71	15,14	0,11	0,40	0,09	0,06	0,21	0,00	99,72
82 / 1 .	0,04	0,19	46,32	24,03	0,66	25,04	0,13	0,38	0,78	0,00	0,18	0,00	97,74
83 / 1 .	0,01	0,19	54,45	28,15	0,91	14,77	0,04	0,48	0,05	0,00	0,21	0,02	99,30
84 / 1 .	0,02	0,12	55,19	28,52	0,68	14,19	0,16	0,49	0,00	0,00	0,16	0,00	99,54
85 / 1 .	0,01	0,11	54,75	28,55	0,82	13,87	0,18	0,52	0,06	0,00	0,13	0,00	98,98



Meteorito Três Irmãos													
<b>Análise 1</b>													
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	FeO	Cr2O3	MnO	NiO	K2O	TiO2	CoO	Total
3 / 1 .	0,04	0,10	55,31	27,79	0,94	14,17	0,24	0,48	0,01	0,00	0,18	x	99,25
7 / 1 .	0,56	0,49	52,79	15,75	21,90	5,10	0,84	0,26	0,05	0,01	0,48	x	98,22
11 / 1 .	0,01	0,14	55,19	27,66	0,73	14,14	0,12	0,51	0,03	0,00	0,17	x	98,70
<b>Análise 2</b>													
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	FeO	Cr2O3	MnO	NiO	K2O	TiO2	CoO	Total
2 / 1 .	0,00	0,13	56,23	28,62	0,61	14,17	0,11	0,47	0,00	0,00	0,17	0,00	100,51
3 / 1 .	0,00	0,14	56,68	29,20	0,65	14,46	0,09	0,45	0,01	0,01	0,19	0,00	101,88
4 / 1 .	0,04	0,17	56,32	28,91	0,89	14,21	0,20	0,52	0,00	0,00	0,20	0,02	101,48
6 / 1 .	0,02	0,15	55,99	28,56	0,62	14,20	0,02	0,45	0,00	0,00	0,19	0,00	100,21
7 / 1 .	0,03	0,21	55,89	28,20	0,79	14,21	0,16	0,50	0,04	0,00	0,22	0,01	100,26
8 / 1 .	0,03	0,15	55,84	28,61	0,99	14,05	0,17	0,54	0,01	0,00	0,19	0,01	100,59
9 / 1 .	0,01	0,15	55,85	28,35	0,80	14,20	0,16	0,46	0,03	0,00	0,16	0,01	100,20
10 / 1 .	0,00	0,13	55,78	28,54	0,67	14,48	0,16	0,51	0,03	0,00	0,20	0,00	100,51
11 / 1 .	0,00	0,13	56,23	28,76	0,59	14,29	0,04	0,49	0,06	0,00	0,20	0,01	100,81
23 / 1 .	0,20	0,58	54,41	26,98	0,87	14,71	0,15	0,41	0,16	0,02	0,21	0,04	98,73
<b>Análise 3</b>													
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	FeO	Cr2O3	MnO	NiO	K2O	TiO2	CoO	Total
50 / 1 .	x	0,43	53,89	15,96	21,81	4,46	0,73	0,17	0,04	x	0,44	0,06	97,99
52 / 1 .	x	0,50	53,38	16,05	21,32	5,08	0,90	0,23	0,00	x	0,48	0,00	97,94
54 / 1 .	x	0,57	54,23	15,95	21,64	4,53	0,68	0,15	0,00	x	0,47	0,00	98,22

### 3 APÊNDICE C – RESULTADOS DE QUÍMICA MINERAL: PLAGIOCLÁSIO

Meteorito Patrimônio													
Análise 1													
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	FeO	Cr2O3	MnO	NiO	K2O	TiO2	CoO	Total
3 / 1 .	8,12	19,02	53,31	0,92	2,78	8,83	5,99	0,07	0,17	1,02	0,39	x	100,62
4 / 1 .	7,69	22,66	66,33	0,00	2,14	0,46	0,01	0,02	0,01	0,92	0,09	x	100,34
6 / 1 .	7,94	20,93	62,84	0,16	1,87	2,99	0,34	0,02	0,06	2,21	0,04	x	99,40
7 / 1 .	9,18	19,75	58,37	0,39	2,06	5,91	0,37	0,00	0,44	0,89	0,08	x	97,44
8 / 1 .	9,45	20,92	64,96	0,02	2,20	0,61	0,21	0,00	0,00	1,23	0,09	x	99,68
9 / 1 .	6,97	21,60	64,21	0,01	2,16	0,40	0,02	0,03	0,00	0,88	0,07	x	96,35
19 / 1 .	9,10	22,54	65,14	0,01	2,18	0,63	0,06	0,00	0,09	0,91	0,06	x	100,72
Análise 2													
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	FeO	Cr2O3	MnO	NiO	K2O	TiO2	CoO	Total
33 / 1 .	8,40	20,91	62,13	0,04	1,88	5,04	0,01	0,02	0,23	0,90	0,07	0,07	99,71
34 / 1 .	6,67	22,82	64,09	0,03	2,17	1,39	0,05	0,00	0,19	0,92	0,06	0,03	98,42
35 / 1 .	9,64	20,57	63,67	0,00	2,17	1,76	0,10	0,00	0,04	1,04	0,05	0,03	99,06
40 / 1 .	8,65	22,30	65,24	0,85	2,17	1,10	0,04	0,02	0,02	0,83	0,03	0,02	101,29
41 / 1 .	8,02	18,90	61,85	3,59	1,98	4,89	0,00	0,08	0,37	0,89	0,05	0,09	100,71
44 / 1 .	5,63	23,16	65,15	0,06	2,65	0,85	0,07	0,05	0,01	0,67	0,08	0,00	98,37
45 / 1 .	6,16	26,70	60,16	0,00	6,47	0,21	0,16	0,00	0,00	0,32	0,06	0,00	100,24
46 / 1 .	5,26	23,35	66,58	0,00	2,31	0,29	0,04	0,00	0,07	1,20	0,05	0,00	99,15
47 / 1 .	5,41	22,97	66,72	0,00	2,19	0,33	0,00	0,02	0,00	1,06	0,03	0,00	98,74
49 / 1 .	7,92	21,82	62,02	0,11	2,83	1,59	0,30	0,00	0,10	0,61	0,05	0,06	97,39
50 / 1 .	6,00	23,09	65,34	0,03	2,16	0,66	0,13	0,00	0,09	1,00	0,05	0,00	98,55
60 / 1 .	8,91	20,45	59,79	0,10	2,03	4,91	0,02	0,00	0,15	0,93	0,07	0,03	97,38
61 / 1 .	8,78	23,18	65,27	0,00	2,12	0,54	0,01	0,00	0,05	0,90	0,07	0,01	100,94
62 / 1 .	7,06	22,94	65,18	0,09	2,10	0,97	0,02	0,00	0,03	0,85	0,06	0,00	99,29
63 / 1 .	6,99	21,55	62,85	0,09	2,13	2,13	0,10	0,00	0,12	1,18	0,04	0,00	97,18
64 / 1 .	6,27	22,84	64,79	0,04	2,10	0,70	0,07	0,01	0,14	1,06	0,03	0,00	98,05
76 / 1 .	5,28	22,97	65,91	0,00	2,17	0,33	0,00	0,02	0,04	1,10	0,05	0,01	97,89
80 / 1 .	7,37	22,81	66,46	0,04	2,32	0,50	0,00	0,03	0,00	0,87	0,04	0,02	100,45
91 / 1 .	5,54	23,33	66,72	0,00	2,23	0,40	0,00	0,01	0,06	1,04	0,07	0,00	99,41
92 / 1 .	7,00	19,97	56,39	0,24	1,85	9,41	0,00	0,02	1,19	0,92	0,06	0,06	97,10
93 / 1 .	9,69	22,23	65,09	0,03	2,14	0,78	0,04	0,01	0,07	0,95	0,05	0,00	101,07
95 / 1 .	5,97	23,25	66,43	0,00	2,11	0,97	0,02	0,00	0,02	1,02	0,04	0,00	99,84
Meteorito Três Irmãos													
Análise 1													
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	FeO	Cr2O3	MnO	NiO	K2O	TiO2	CoO	Total
9 / 1 .	10,04	21,73	64,95	0,01	2,20	0,25	0,00	0,03	0,00	1,00	0,07	x	100,30
10 / 1 .	10,31	21,63	64,77	0,00	2,03	0,38	0,09	0,01	0,01	0,70	0,05	x	99,98
12 / 1 .	10,08	21,70	65,54	0,02	2,18	0,56	0,08	0,00	0,00	0,98	0,05	x	101,18
13 / 1 .	9,60	21,23	65,41	0,00	2,23	0,46	0,00	0,00	0,07	0,83	0,06	x	99,89
14 / 1 .	9,61	21,13	63,94	0,00	2,14	0,47	0,02	0,01	0,01	0,97	0,05	x	98,34
Análise 2													
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	FeO	Cr2O3	MnO	NiO	K2O	TiO2	CoO	Total
24 / 1 .	10,11	21,35	65,68	0,01	2,24	0,10	0,00	0,00	0,03	0,94	0,06	0,02	100,55
25 / 1 .	4,59	12,28	58,45	7,36	14,04	2,11	0,38	0,14	0,00	0,87	0,28	0,03	100,54
26 / 1 .	10,15	21,53	65,28	0,00	2,14	0,23	0,00	0,06	0,03	0,84	0,04	0,00	100,30

## 4 APÊNDICE D – RESULTADOS DE QUÍMICA MINERAL: CROMITA

Meteorito Patrimônio												
Análise 1												
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	FeO	Cr2O3	MnO	NiO	TiO2	CoO	Total
1 / 1 .	0,00	5,45	0,01	2,53	0,02	30,13	56,62	0,70	0,04	3,10	X	98,60
Análise 2												
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	FeO	Cr2O3	MnO	NiO	TiO2	CoO	Total
2 / 1 .	X	7,07	0,17	3,62	0,07	28,74	55,07	0,60	0,10	2,57	0,00	98,01
4 / 1 .	X	5,64	0,03	2,83	0,04	31,63	53,88	0,65	0,26	2,78	0,01	97,74
5 / 1 .	X	5,81	0,11	2,64	0,04	30,88	54,47	0,64	0,29	2,62	0,02	97,51
14 / 1 .	X	5,90	0,04	2,61	0,00	30,03	55,83	0,75	0,05	2,58	0,00	97,79
15 / 1 .	X	5,87	0,07	2,43	0,00	32,31	54,82	0,79	0,08	2,66	0,04	99,07
16 / 1 .	X	5,85	0,03	2,51	0,01	31,77	55,11	0,84	0,00	2,45	0,01	98,58
17 / 1 .	X	5,74	0,02	2,13	0,06	31,46	56,20	0,56	0,09	2,76	0,00	99,03
18 / 1 .	X	5,46	0,23	2,60	0,04	31,18	54,94	0,70	0,13	2,97	0,00	98,25
20 / 1 .	X	5,58	0,02	2,56	0,02	30,91	55,99	0,65	0,07	3,02	0,01	98,84
21 / 1 .	X	6,13	0,00	2,34	0,00	30,59	56,33	0,76	0,00	2,30	0,00	98,46
22 / 1 .	X	6,26	0,05	2,24	0,00	30,83	56,19	0,79	0,04	2,47	0,00	98,87
23 / 1 .	X	6,15	0,05	2,28	0,03	30,99	56,65	0,84	0,04	1,98	0,00	99,02
25 / 1 .	X	5,74	0,05	2,71	0,11	30,40	55,97	0,77	0,00	2,68	0,00	98,43
26 / 1 .	X	5,89	0,07	2,87	0,02	30,67	55,78	0,77	0,04	2,60	0,03	98,74
28 / 1 .	X	5,80	0,13	2,74	0,00	31,66	54,54	0,74	0,40	2,75	0,00	98,75
29 / 1 .	X	5,63	0,00	2,63	0,05	30,38	55,86	0,67	0,00	2,89	0,00	98,12
30 / 1 .	X	5,53	0,06	2,70	0,02	32,08	55,25	0,74	0,03	2,86	0,04	99,31
31 / 1 .	X	5,51	0,04	2,52	0,02	31,33	55,49	0,65	0,02	2,85	0,13	98,56
32 / 1 .	X	5,34	0,00	2,60	0,01	30,77	56,16	0,70	0,03	3,04	0,05	98,71
33 / 1 .	X	5,44	0,03	2,65	0,00	31,08	56,85	0,74	0,05	3,13	0,03	100,01
34 / 1 .	X	5,46	0,04	2,51	0,04	30,89	56,62	0,63	0,01	3,03	0,00	99,23
35 / 1 .	X	5,70	0,19	2,59	0,00	30,61	56,68	0,68	0,14	3,02	0,00	99,62
36 / 1 .	X	5,13	0,05	2,03	0,06	31,24	55,09	0,57	0,00	2,92	0,00	97,09
37 / 1 .	X	5,90	0,03	2,14	0,00	31,33	56,61	0,75	0,09	2,85	0,00	99,71
38 / 1 .	X	5,71	0,01	2,16	0,02	31,60	55,03	0,63	0,00	2,79	0,00	97,94
39 / 1 .	X	5,83	0,18	2,50	0,03	30,98	55,28	0,78	0,01	2,60	0,00	98,19
40 / 1 .	X	5,82	0,08	2,43	0,00	31,28	55,74	0,79	0,00	2,99	0,03	99,17
41 / 1 .	X	5,62	0,01	2,32	0,00	30,79	56,06	0,67	0,00	2,92	0,00	98,38
42 / 1 .	X	5,67	0,00	2,31	0,00	30,96	57,30	0,81	0,07	2,96	0,00	100,07
43 / 1 .	X	5,55	0,15	2,48	0,00	30,85	55,92	0,68	0,00	3,02	0,00	98,65
44 / 1 .	X	5,46	0,05	2,44	0,02	30,99	56,76	0,74	0,04	2,92	0,00	99,43

<b>Meteorito Três Irmãos</b>													
<b>Análise 1</b>													
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	FeO	Cr2O3	MnO	NiO	K2O	TiO2	CoO	Total
1 / 1 .	0,02	5,54	0,00	2,33	0,03	30,63	57,01	0,61	0,03	0,00	2,74	x	98,93
8 / 1 .	0,02	6,49	0,08	2,18	0,00	31,00	56,16	1,04	0,00	0,00	2,22	x	99,19
<b>Análise 2</b>													
DataSet/Point	Na2O	Al2O3	SiO2	MgO	CaO	FeO	Cr2O3	MnO	NiO	K2O	TiO2	CoO	Total
45 / 1 .	x	5,00	0,15	1,98	0,02	31,07	56,49	0,80	0,00	x	2,95	0,08	98,55
47 / 1 .	x	3,67	0,20	2,58	0,01	30,71	56,36	0,67	0,00	x	2,97	0,00	97,16
48 / 1 .	x	5,43	0,11	2,33	0,00	30,49	57,42	0,68	0,00	x	2,75	0,02	99,24
49 / 1 .	x	5,58	0,03	2,49	0,01	30,93	57,08	0,63	0,00	x	2,85	0,01	99,62
57 / 1 .	x	5,96	0,12	2,31	0,01	31,07	56,29	0,79	0,00	x	2,91	0,00	99,46