

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza - CCMN
Observatório do Valongo - OV

Análise Elementar dos Meteoritos Santa Vitória do Palmar e Cebollati

Karícia Fraga Godoy Jarrell

Orientadora: Diana P.P. Andrade
Coorientadora: Wania Wolff

Trabalho de Conclusão de Curso para Obtenção do Título de Astrônomo

Karícia Fraga Godoy Jarrell

**Análise Elementar dos Meteoritos
Santa Vitória do Palmar e Cebollati**

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza - CCMN
Observatório do Valongo - OV

Orientadora: Diana P. P. Andrade
Coorientadora: Wania Wolff

Brasil
2019

Karícia Fraga Godoy Jarrell
Análise Elementar dos Meteoritos
Santa Vitória do Palmar e Cebollati/ Karícia Fraga Godoy Jarrell. – Brasil, 2019-
110 p.
Orientadora: Diana P. P. Andrade
Coorientadora: Wania Wolff
Trabalho de Conclusão de Curso para Obtenção do Título de Astrônomo – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza - CCMN
Observatório do Valongo - OV, 2019.
1. meteorito 2. PIXE 3. MEV 4. SVP 5. Cebollati 6. composição química 7. análise mineralógica I. Diana P. P. Andrade II. Wania Wolff III. Universidade Federal do Rio de Janeiro. IV. Observatório do Valongo. V. Análise Elementar dos Meteoritos Santa Vitória do Palmar e Cebollati

Karícia Fraga Godoy Jarrell

Análise Elementar dos Meteoritos Santa Vitória do Palmar e Cebollati

Dra. Diana P. P. Andrade
Orientadora/Presidente
OV/UFRJ

Dra. Maria Elizabeth Zucolotto
Museu Nacional/UFRJ

Dra. Heloísa Maria Boechat-Roberty
OV/UFRJ

MSc. Amanda Tosi
LabSonda - IGEO/UFRJ

Brasil
2019

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

- Lauro César

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu Pai Celestial, a quem atribuo a existência deste Universo que despertou em mim a maravilha, a curiosidade e a necessidade de entendimento.

À minha mãe, Sonia, que me forneceu desde pequena um exemplo de mulher forte e estudiosa. Ao meu pai Adalberto, pela paciência e carinho que demonstrou ao me levar durante anos ao Rio para que eu pudesse participar de minhas atividades acadêmicas. Aos meus irmãos, pela ajuda nos estudos e trabalhos acadêmicos e por todo o amor que sempre demonstraram por mim. À minha cunhada e sobrinhos, pelos momentos leves de descontração e pelo incentivo. Aos meus pets, por serem um conforto emocional.

Agradeço à minha orientadora, Diana, pela orientação, paciência e tempo dedicados para que eu fosse capaz de concluir este trabalho. Agradeço a ela também por me acolher tão prontamente no projeto, abrindo as portas para que eu conhecesse uma área tão interessante e bonita de estudos.

Aos amigos e colegas que fiz durante minha passagem pelo Observatório do Valongo, obrigada pelas risadas e incentivos durante os muitos altos e baixos da graduação. Aos amigos de fora da Universidade, que também participaram ativamente em diversas etapas dessa fase da minha vida, me ajudando em tarefas, ouvindo minhas reclamações e me incentivando sempre, muito obrigada.

Por fim, ao meu marido, Logan. Obrigada por todo o amor e carinho que demonstrou por mim durante este período da minha vida, por me encorajar, me ouvir e o mais importante, sempre acreditar em mim e no meu potencial. Seu sacrifício e seu apoio foram essenciais para que eu conseguisse realizar esse sonho.

*“Os céus proclaimam a glória de Deus,
e o firmamento anuncia a obra das suas mãos.”*
(Salmos 19:1)

Resumo

Este trabalho teve como objetivo principal caracterizar os meteoritos Santa Vitória do Palmar e Cebollati, além de possivelmente classificar o meteorito Cebollati através de uma análise química e mineralógica de sua estrutura. Acredita-se que o meteorito brasileiro Santa Vitória do Palmar esteja relacionado ao meteorito Cebollati, visto que fragmentos dos dois foram encontrados na mesma época e em lados opostos de uma lagoa. Por esta razão, a estrutura química e mineralógica do já classificado meteorito brasileiro, Santa Vitória do Palmar, também foi realizada com as mesmas técnicas experimentais usadas para o Cebollati no presente trabalho, com intuito de comparação, visto que ambos possuem um histórico similar de relato de queda e achado de fragmentos. O estudo foi realizado utilizando-se as técnicas de Emissão de Raios-X Induzida por Partículas (PIXE), e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), ambas técnicas de análise elementar não destrutivas. A técnica PIXE consiste na detecção de fôtons de raios-X que foram emitidos pelos átomos presentes na amostra do meteorito, após o bombardeio por um feixe de prótons. A técnica MEV consiste na interação de elétrons com átomos da amostra, produzindo sinais que contêm informações sobre a topografia da superfície e composição da amostra. Nossos resultados mostram uma grande similaridade entre a composição química de ambos os meteoritos, resultando em uma estrutura mineralógica similar o suficiente para posicionar o meteorito Cebollati na classe dos meteoritos rochosos nomeada condritos ordinários, assim como o Santa Vitória do Palmar. Análises posteriores e futuras comparações estão em andamento para uma classificação mais completa, envolvendo o grupo e o tipo petrológico ao qual o meteorito Cebollati pertence.

Palavras-chaves: meteorito - PIXE - MEV - SVP - Cebollati - composição química - análise mineralógica

Abstract

This work aimed to characterize the Santa Vitória do Palmar e Cebollati meteorites, other than possibly classify the Cebollati meteorite through a chemical and mineralogical analysis of its structure. The Brazilian meteorite Santa Vitória do Palmar is believed to be related to the Cebollati meteorite, since fragments of the two were found at the same time and on opposite sides of a lagoon. For this reason, the chemical and mineralogical structure of the already classified Brazilian meteorite, Santa Vitória do Palmar, was also performed with the same analysis techniques used to study the Cebollati meteorite in this work, and used for comparison purposes, since both have a similar history of falling reports and fragment finding. The study was performed using Particle-Induced X-ray Emission (PIXE) and Scanning Electron Microscopy (SEM) techniques, both non-destructive elemental analysis techniques. The PIXE technique consists of detecting X-ray photons that were emitted by the atoms present in the meteorite sample after bombardment by a proton beam. The SEM technique consists of the interaction of electrons with sample atoms, producing signals that contain information about surface topography and sample composition. Our results show a great similarity between the chemical composition of both meteorites, resulting in a similar enough mineralogical structure to put the Cebollati meteorite in the class of rocky meteorites named ordinary chondrites, as well as the Santa Vitória do Palmar meteorite. Further analysis and future comparisons are underway for complete classification, involving the group and the petrologic type to which the Cebollati meteorite belongs.

Key-words: meteorite - PIXE - MEV - SVP - Cebollati - chemical composition - mineralogical analysis

Lista de ilustrações

Figura 1 – Imagem em escala do meteorito Einsisheim, caído em 7 de novembro de 1492, na região da Alsácia, França, e conservado por ordem do Imperador Maximiliano. Fonte: Meteorite Times Magazine.	23
Figura 2 – Cometa Halley em foto registrada durante sua passagem no ano de 1986. Fonte: NSSDC's Photo Gallery (NASA).	25
Figura 3 – Meteoro visto durante a chuva de meteoros anual Gemínidas, em 14 de dezembro de 2009. Fonte: Wally Pacholka/Barcroft Media.	26
Figura 4 – Esquema mostrando as diversas etapas da entrada de um meteoroide na atmosfera terrestre até sua queda como meteorito na superfície. Fonte: (ZUCOLOTTO et al., 2013).	28
Figura 5 – a) Textura condríctica do meteorito Clovis. b) Parte traseira do meteorito Pirapora, MG mostrando os regmaglitos (marcas de dedo). Fonte: (ZUCOLOTTO et al., 2013).	29
Figura 6 – Esquema simplificado da classificação dos meteoritos. Fonte: (ZUCOLOTTO et al., 2013)	32
Figura 7 – Imagem do meteorito Santa Vitória do Palmar (SVP) mostrando sua textura condríctica desenvolvida com côndrulos bem delineados e matriz vítreia.	34
Figura 8 – Evolução composicional e textural dos condritos ordinários L e H em função dos tipos petrológicos 3 a 6. Fonte:(VERNAZZA et al., 2015). .	36
Figura 9 – Imagem de um dos fragmentos encontrados do meteorito Santa Vitória do Palmar.	38
Figura 10 – Imagem do maior fragmento recuperado do meteorito Cebollati. . . .	39
Figura 11 – Mapa ilustrando a distância entre as cidades de Santa Vitória do Palmar e Cebollati, onde os fragmentos dos meteoritos de mesmo nome, respectivamente, foram encontrados. Fonte: Google Maps.	40
Figura 12 – Espectro obtido através da técnica PIXE do meteorito Santa Vitória do Palmar.	41
Figura 13 – Esquema representando o funcionamento da técnica de análise elementar PIXE. Fonte: Institute for Nuclear and Radiation Physics.	42
Figura 14 – Imagem mostrando a câmara de vácuo acoplada ao acelerador de íons TANDEM pertencente ao laboratório de Colisões Atômicas, em Bariloche, onde as análises PIXE dos meteoritos SVP e Cebollati foram realizadas. Fonte: Centro Atômico de Bariloche.	43
Figura 15 – Porta amostras contendo fragmentos de diversos meteoritos para análise PIXE. Fonte: allende.	43

Figura 16 – Esquema de comparação entre um microscópio óptico e um microscópio eletrônico de varredura	Fonte: (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).	44
Figura 17 – Microscópio de varredura de feixe duplo (SEM-FIB), onde as análises MEV dos meteoritos SVP e Cebollati foram realizadas.	Fonte: Centro Atômico de Bariloche.	45
Figura 18 – Imagem SEI do meteorito Cebollati obtida através da técnica MEV no Centro Atômico de Bariloche.		45
Figura 19 – Imagem SEI do meteorito SVP obtida através da técnica MEV no Centro Atômico de Bariloche.		46
Figura 20 – Imagem SEI de uma região nomeada site 5 do meteorito Santa Vitória do Palmar, obtida através da técnica MEV.		47
Figura 21 – Mapa composicional por EDS do site 5 do meteorito SVP, mostrando a predominância de certos elementos em cada uma delas. Linhas tracejadas foram sobrepostas nas figuras a fim de servir como guia para os olhos.		48
Figura 22 – Imagens SEI referentes à uma mesma região, sites 11 e 12, do meteorito Santa Vitória do Palmar, obtida através da técnica MEV.		50
Figura 23 – Imagem SEI de uma região nomeada site 20 do meteorito Santa Vitória do Palmar obtida através da técnica MEV.		51
Figura 24 – Imagem SEI de uma região nomeada site 22 do meteorito Santa Vitória do Palmar obtida através da técnica MEV.		52
Figura 25 – Imagem SEI de uma região nomeada site 17 do meteorito Santa Vitória do Palmar, obtida através da técnica MEV. Fonte: Arquivo Pessoal.		53
Figura 26 – Mapa composicional por EDS do site 16 do meteorito SVP, mostrando a predominância de certos elementos em cada uma delas.		55
Figura 27 – Imagem EDS de uma região nomeada site 24 do meteorito Santa Vitória do Palmar, obtida através da técnica MEV.		56
Figura 28 – Mapa composicional por EDS do site 24 do meteorito SVP, mostrando a predominância de certos elementos em cada uma delas.		56
Figura 29 – Imagem EDS de uma região nomeada site 5 do meteorito Cebollati, obtida através da técnica MEV.		58
Figura 30 – Mapa composicional por EDS do site 5 do meteorito Cebollati, mostrando a predominância de certos elementos em cada uma delas.		58
Figura 31 – Imagem EDS e imagem SEI de uma região nomeada site 6 do meteorito Cebollati, obtida através da técnica MEV.		60
Figura 32 – Mapa composicional por EDS do site 6 do meteorito Cebollati, mostrando a predominância de certos elementos em cada uma delas.		60
Figura 33 – Imagem EDS e imagem SEI das regiões nomeadas sites 2 e 3 do meteorito Cebollati, obtida através da técnica MEV.		62

Figura 34 – Mapa composicional do site 2 do meteorito Cebollati, mostrando a predominância de certos elementos em cada uma delas.	62
Figura 35 – Imagem SEI de uma região nomeada site 7 do meteorito Cebollati, obtida através da técnica MEV.	63
Figura 36 – Imagem EDS de uma região nomeada site 1 do meteorito Cebollati, obtida através da técnica MEV.	64
Figura 37 – Mapa Composicional por EDS do site 1 do meteorito Cebollati, mostrando a predominância de certos elementos em cada uma delas.	64
Figura 38 – Gráfico de energia por contagem de fótons do espectro nomeado M5a do meteorito SVP, através da técnica PIXE.	66
Figura 39 – Gráfico de energia por contagem de fótons do espectro nomeado M5b do meteorito SVP, na técnica PIXE.	68
Figura 40 – Gráficos de energia por contagem de fótons dos espectros nomeados M5c, M5e e, M5g do meteorito SVP, na técnica PIXE.	69
Figura 41 – Gráfico de energia por contagem de fótons do espectro nomeado M4a do meteorito Cebollati, na técnica PIXE.	71
Figura 42 – Composição química média, sem C, de todos os espectros analisados dos meteoritos SVP e Cebollati na técnica MEV.	75
Figura 43 – Composição química média, sem C, de todos os espectros analisados dos meteoritos SVP e Cebollati na técnica PIXE.	76
Figura 44 – Imagem do meteorito Cebollati mostrando as delimitações de côndrulos presentes na matriz. Fonte: Arquivo de Maria Elizabeth Zucolotto. . .	77
Figura 45 – Imagem do meteorito Santa Vitória do Palmar mostrando as delimitações de côndrulos alongados presentes na matriz. Fonte: Arquivo de Maria Elizabeth Zucolotto.	78
Figura 46 – Aros de material rico em sulfetos e metais ao redor de côndrulos nos meteorito SVP (fig a.) e Cebollati (fig.b). Fonte: Arquivo de Maria Elizabeth Zucolotto.	80

Listas de tabelas

Tabela 1 – Lista das chuvas de meteoros ao longo do ano junto com suas respectivas datas e corpos parentais. Adaptação de (SEEDS, 2008).	27
Tabela 2 – Exemplos de espécies minerais encontradas nos meteoritos. Fonte: (ZUCOLOTTO et al., 2013)	31
Tabela 3 – Divisão dos Meteoritos Condriticos em suas respectivas classes, grupos, e tipos petrográficos. Adaptação de (WEISBERG; MCCOY; KROT, 2006).	33
Tabela 4 – Tamanho médio estimado para côndrulos observados em diferentes tipos de meteoritos condriticos. Fonte: (SALAVERRY et al., 2017).	35
Tabela 5 – Propriedades de Meteoritos Condriticos Ordinários Equilibrados. Adaptação de (VERNAZZA et al., 2015).	35
Tabela 6 – Composição química elementar média do site 5 do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	49
Tabela 7 – Média da composição dos principais elementos químicos na região do pequeno elefante no site 5 do meteorito SVP.	49
Tabela 8 – Média da composição química na região rica em Fe e Ni no site 5 do meteorito SVP.	50
Tabela 9 – Composição química elementar média dos sites 11 e 12 do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	51
Tabela 10 – Composição química elementar média do site 20 do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	52
Tabela 11 – Composição química elementar média do site 22 do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	53
Tabela 12 – Composição química elementar média do site 16 do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	54
Tabela 13 – Composição química elementar média dos espectros retirados do site 17 do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	55
Tabela 14 – Frações de elementos químicos em porcentagem em peso e porcentagem atômica no site 24 do meteorito SVP.	57

Tabela 15 – Composição química elementar média do site 24 do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	57
Tabela 16 – Razão entre os principais elementos presentes na região rica em Si no site 5 do meteorito Cebollati.	59
Tabela 17 – Composição química elementar média do site 5 do meteorito Cebollati. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	59
Tabela 18 – Composição química elementar média do site 6 do meteorito Cebollati. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	61
Tabela 19 – Composição química na região do site 3 do meteorito Cebollati.	61
Tabela 20 – Composição química elementar média do site 7 do meteorito Cebollati. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	63
Tabela 21 – Composição química elementar média do site 1 do meteorito Cebollati. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	65
Tabela 22 – Composição química do espectro de nome M5a do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	67
Tabela 23 – Composição química do espectro de nome M5b do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	68
Tabela 24 – Composição química dos espectros de nomes M5d, M5f e, M5h do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	70
Tabela 25 – Composição química dos espectros de nomes M4a e M4b do meteorito Cebollati. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	72
Tabela 26 – Composição química dos espectros de nomes M4c e M4d do meteorito Cebollati. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	73
Tabela 27 – Composição química média, sem C, dos principais elementos encontrados em todos os mapas analisados dos meteoritos SVP e Cebollati na técnica MEV. Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	74
Tabela 28 – Frações de elementos da composição química média de todos os espectros analisados dos meteoritos SVP e Cebollati na técnica PIXE. Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	75

Tabela 29 – Composição química média, sem C, de todos os espectros analisados dos meteoritos SVP e Cebollati na técnica PIXE. Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	76
Tabela 30 – Classes e grupos de condritos ordinários equilibrados e suas respectivas porcentagens. O conteúdo de Fa da olivina e Fs dos piroxênios variam de maneira extrema em condritos não equilibrados. Fonte: Adaptação de (NORTON; CHITWOOD, 2008).	78
Tabela 31 – Porcentagens da composição química média dos meteoritos Santa Vitória do Palmar e Cebollati, na técnica PIXE e nos mapas obtidos na técnica MEV.	79
Tabela 32 – Porcentagens da composição química média do meteorito Cebollati, na técnica PIXE e nos mapas obtidos na técnica MEV.	79
Tabela 33 – Composição química do espectro 1 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	85
Tabela 34 – Composição química do espectro 2 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	85
Tabela 35 – Composição química do espectro 3 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	85
Tabela 36 – Composição química do espectro 4 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	86
Tabela 37 – Composição química do espectro 5 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	86
Tabela 38 – Composição química do espectro 6 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	86
Tabela 39 – Composição química do espectro 7 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	86
Tabela 40 – Composição química do espectro 29 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	87
Tabela 41 – Composição química do espectro 30 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	87

Tabela 42 – Composição química do espectro 33 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	87
Tabela 43 – Composição química do espectro 34 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	88
Tabela 44 – Composição química do espectro 35 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	88
Tabela 45 – Composição química do espectro 36 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	88
Tabela 46 – Composição química do espectro 37 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	89
Tabela 47 – Composição química do espectro 2 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	89
Tabela 48 – Composição química do espectro 3 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	89
Tabela 49 – Composição química do espectro 4 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	90
Tabela 50 – Composição química do espectro 5 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	90
Tabela 51 – Composição química do espectro 6 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	90
Tabela 52 – Composição química do espectro 7 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	91
Tabela 53 – Composição química do espectro 8 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	91
Tabela 54 – Composição química do espectro 9 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	91

Tabela 55 – Composição química do espectro 10 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	92
Tabela 56 – Composição química do espectro 11 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	92
Tabela 57 – Composição química do espectro 12 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	92
Tabela 58 – Composição química do espectro 13 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	93
Tabela 59 – Composição química do espectro 14 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	93
Tabela 60 – Composição química do espectro 15 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	94
Tabela 61 – Composição química do espectro 16 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	94
Tabela 62 – Composição química do espectro 17 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	94
Tabela 63 – Composição química do espectro 18 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	95
Tabela 64 – Composição química do espectro 19 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	95
Tabela 65 – Composição química do espectro 20 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	95
Tabela 66 – Composição química do espectro 21 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	96
Tabela 67 – Composição química do espectro 22 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	96

Tabela 68 – Composição química do espectro 23 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	96
Tabela 69 – Composição química do espectro 24 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	97
Tabela 70 – Composição química do espectro 25 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	97
Tabela 71 – Composição química elementar média do site 5 do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	97
Tabela 72 – Composição química elementar média dos sites 11 e 12 do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	98
Tabela 73 – Composição química elementar média do site 20 do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	98
Tabela 74 – Composição química elementar média do site 22 do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	98
Tabela 75 – Composição química elementar média dos espectros retirados do site 17 do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	99
Tabela 76 – Composição química elementar média do site 16 do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	99
Tabela 77 – Composição química elementar média do site 24 do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	100
Tabela 78 – Composição química elementar média do site 2 do meteorito Cebollati, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	100
Tabela 79 – Composição química elementar média do site 5 do meteorito Cebollati, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	100
Tabela 80 – Composição química elementar média do site 1 do meteorito Cebollati, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	101

Tabela 81 – Composição química elementar média do site 6 do meteorito Cebollati, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	101
Tabela 82 – Composição química dos espectros de nomes M5a e M5b do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	102
Tabela 83 – Composição química dos espectros de nomes M5c, M5e e M5g do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	103
Tabela 84 – Composição química dos espectros de nomes M5d, M5f e M5h do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	103
Tabela 85 – Composição química dos espectros de nomes M4a e M4b do meteorito Cebollati, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	104
Tabela 86 – Composição química dos espectros de nomes M4c e M4d do meteorito Cebollati, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	105
Tabela 87 – Composição química dos espectros de nomes M4e e, M4f do meteorito Cebollati, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	105
Tabela 88 – Composição química média de todos os espectros analisados dos meteoritos SVP e Cebollati na técnica MEV, sem C. Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.	106
Tabela 89 – Óxidos observados nos meteoritos Santa Vitória do Palmar e Cebollati na técnica PIXE, de acordo com sua composição química média. Também são mostradas as quantidades de Fe, na composição química total, que está ligada a óxidos, ao S, e ao Ni.	107
Tabela 90 – Óxidos observados nos meteoritos Santa Vitória do Palmar e Cebollati na técnica MEV, de acordo com a composição química média dos espectros analisados. Também são mostradas as quantidades de Fe, na composição química total, que está ligada a óxidos, ao S, e ao Ni.	108
Tabela 91 – Óxidos observados nos meteoritos Santa Vitória do Palmar e Cebollati na técnica MEV, de acordo com a composição química média dos mapas analisados. Também são mostradas as quantidades de Fe, na composição química total, que está ligada a óxidos, ao S, e ao Ni.	109
Tabela 92 – Porcentagens da composição química média dos meteoritos Santa Vitória do Palmar e Cebollati, nos espectros obtidos com a técnica MEV.	110

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
2	A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DOS METEORITOS	23
2.1	A Origem da Meteorítica	23
2.2	Corpos Menores do Sistema Solar	25
2.2.1	Cometas e Asteroides	25
2.2.2	Meteoros	26
2.2.3	Chuva de Meteoros	27
2.3	Meteoritos	27
3	A QUÍMICA DOS METEORITOS	30
3.1	Minerais nos Meteoritos	30
3.2	Classificação Taxonômica de Meteoritos	32
3.2.1	Meteoritos Rochosos Condriticos	33
3.2.1.1	Côndrulos	34
3.2.2	Condritos Ordinários	35
4	OS METEORITOS ANALISADOS	38
4.1	O Meteorito Santa Vitória do Palmar	38
4.2	O Meteorito Cebollati	39
5	METODOLOGIA	41
5.1	A Técnica PIXE	41
5.2	A Técnica MEV	44
6	RESULTADOS	47
6.1	Resultados na Técnica MEV	47
6.1.1	SVP	47
6.1.2	Cebollati	58
6.2	Resultados na Técnica PIXE	65
6.2.1	SVP	66
6.2.2	Cebollati	71
6.3	Comparações entre SVP e Cebollati	74
6.3.1	MEV	74
6.3.2	PIXE	75
7	DISCUSSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS	77

REFERÊNCIAS	81
ANEXOS	83
ANEXO A – TABELA PERIÓDICA DOS ELEMENTOS	84
ANEXO B – DADOS DE ESPECTROS E SITES NA TÉCNICA MEV	85
ANEXO C – DADOS DOS ESPECTROS DO METEORITO SVP NA TÉCNICA PIXE	102
ANEXO D – DADOS DOS ESPECTROS DO METEORITO CE- BOLLATI NA TÉCNICA PIXE	104
ANEXO E – COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DOS ESPECTROS DOS METEORITOS SVP E CEBOLLATI NA TÉC- NICA MEV	106
ANEXO F – ÓXIDOS	107
ANEXO G – PORCENTAGENS DOS ESPECTROS DOS METE- ORITOS SVP E CEBOLLATI	110

1 Introdução

As especulações sobre a natureza do Universo devem remontar aos tempos pré-históricos, por isso a astronomia é frequentemente considerada a mais antiga das ciências. Os registros astronômicos mais antigos datam de aproximadamente 3000 a.C. e se devem aos chineses, babilônios, assírios e egípcios. Naquela época, os astros eram estudados com objetivos práticos, como medir a passagem do tempo (fazer calendários) para prever a melhor época para o plantio e para a colheita, ou com objetivos relacionados à astrologia, tais como fazer previsões do futuro, já que, não tendo qualquer conhecimento das leis da natureza (física), acreditavam que os deuses tinham o poder da colheita, da chuva e mesmo da vida por meio dos astros (FILHO; SARAIVA, 2004).

Embora os meteoritos só tenham sido aceitos pela ciência como objetos de origem extraterrestre no início do século 19, o fenômeno de queda de rochas e ferro sobre a Terra (tanto na forma de meteoros quanto de bólidos) era conhecido desde a antiguidade. Papiros egípcios, de 4 mil anos, registram objetos luminosos riscando os céus numa representação típica de queda de meteoros. Além de escritos gregos, de 3,5 mil e 2,5 mil anos, que mencionam a queda de pedras e ferro do céu (MATSUURA; BARBOZA; MACIEL, 2014).

O reconhecimento de meteoritos como material extraterrestre e a descoberta do cinturão de asteroides ambos datam da mesma época. Com o passar do tempo, a conexão entre meteoritos e asteroides se tornou mais clara e aceita, e atualmente é reconhecido que a maioria dos meteoritos se originou a partir de asteroides e foram ejetados por colisões violentas (LEWIS, 2012).

A meteorítica é o ramo da astronomia que se dedica ao estudo dos meteoritos. A análise desses corpos pode ser por vezes extremamente complicada, já que o estudo dos meteoritos diz respeito ao estudo das condições e processos físicos da formação do Sistema Solar. Por serem fragmentos de corpos em diversos estágios de diferenciação planetária, muitas vezes são formados por matrizes não homogêneas, apresentando portanto, diferentes estruturas químicas em distintas partes de sua estrutura. São encontrados desde meteoritos primitivos, de composição solar, até representantes da crosta, manto e núcleo de corpos planetários diferenciados (MATSUURA; BARBOZA; MACIEL, 2014).

A pesquisa no ramo da meteorítica inclui a coleta, identificação e classificação dos meteoritos a partir de análises elementares dos fragmentos encontrados. Sendo assim, essa é uma área de estudos abrangente, envolvendo não só a astronomia, nas áreas de astrofísica, astroquímica e cosmologia, como também geologia, petrografia, mineralogia e metalurgia.

Atualmente, existem três tipos principais de classificação de meteoritos, sendo elas: meteoritos rochosos, formados em sua maior parte por silicatos, meteoritos metálicos,

constituídos principalmente pela liga ferro-níquel, e os meteoritos mistos, possuidores de partes iguais de silicatos e ferro-níquel ([ZUCOLOTTO et al., 2013](#)).

Neste trabalho, é realizada uma análise elementar e mineralógica do meteorito brasileiro Santa Vitória do Palmar e do meteorito uruguai Cebollati, ambos pertencentes à coleção de amostras do Museu Nacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), situado na Quinta da Boa Vista, no Rio de Janeiro. As análises foram realizadas no Centro Atómico de Bariloche, na Argentina, a partir de duas técnicas de análises superficiais, sendo elas a técnica de Emissão de raios-X induzida por partículas (PIXE do inglês Particle Induced X-ray emission) e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com o objetivo principal de caracterizar e possivelmente classificar o meteorito uruguai Cebollati ao compará-lo com o meteorito Santa Vitória do Palmar. Ambos meteoritos compartilham uma distância local e temporal de achado semelhante. Assim, este trabalho tem a intenção de verificar se ambos fizeram parte de um mesmo corpo original.

2 A Importância do Estudo dos Meteoritos

2.1 A Origem da Meteorítica

Os meteoritos foram muito importantes na história da humanidade. O mistério envolvendo suas quedas e origem fizeram com que esses objetos fossem fonte de adoração por muitos povos. Além disso, pode-se comprovar que os meteoritos metálicos também foram utilizados como talismãs, armas e ferramentas por diversos povos, como os astecas, os egípcios, os incas e os maias ([ZUCOLOTTO et al., 2013](#)).

Por serem objetos de origem desconhecida e misteriosa, muitas vezes eram associados a presentes ou sinais dos deuses por meio dos povos antigos. Sendo assim, os meteoritos na antiguidade eram objetos de veneração com grande importância em diversas civilizações ([ZUCOLOTTO et al., 2013](#)). Um exemplo disto é o meteorito Einsisheim, mostrado na figura 1, caído em 7 de novembro de 1492, na França, e preservado por ordem do imperador Maximiliano.



Figura 1 – Imagem em escala do meteorito Einsisheim, caído em 7 de novembro de 1492, na região da Alsácia, França, e conservado por ordem do Imperador Maximiliano.
Fonte: Meteorite Times Magazine.

De acordo com [Matsuura, Barboza e Maciel \(2014\)](#), o mineral de ferro puro é quase inexistente na superfície da Terra. Sendo assim, o ferro meteorítico teve influência em diversas outras áreas além das mencionadas acima, como a palavra grega *sider*, que significa estrela, sendo também aplicada ao ferro em palavras como siderúrgico, siderurgia etc.

Ao longo do tempo, a origem dos meteoritos foi atribuída a diversos fatores, entre eles estão rochas ejetadas de vulcões e fenômenos causados pela atmosfera terrestre. O

primeiro passo para que a teoria sobre a origem dos meteoritos começasse a se tornar aceita foi a publicação da tese do físico alemão Ernst Chladni (1756-1827), em 1794, intitulada “A Origem do ferro de Pallas e outros similares a ele”. Nesta tese, ele atribuiu uma origem extraterrestre às rochas cadentes e várias grandes massas de ferro puro então conhecidas ([SEARS, 1975](#)).

Segundo [Matsuura, Barboza e Maciel \(2014\)](#), na época da publicação, o trabalho de Chladni ainda não era levado a sério por grande parte da comunidade científica. Contudo, os fatos mudaram em 1795 com a queda do meteorito Wold Cottage, na Inglaterra. A análise da rocha por parte do químico britânico Sir Edward Charles Howard (1774-1816) comprovou a existência de ferro-níquel metálico, mostrando portanto, que o objeto era semelhante em composição ao ferro do meteorito Pallas, descrito pelo físico Chladni em 1794. Em 1801, quando o primeiro asteroide foi descoberto, a existência de corpos menores no Sistema Solar foi assim comprovada, resultando em um aumento na aprovação da teoria de Chladni. Sendo o assunto ainda amplamente comentado, Howard publicou os resultados de sua análise do meteorito Wold Cottage e suas conclusões em 1802, o que ajudou ainda mais a convencer cientistas contemporâneos da natureza extraterrestre dos meteoritos.

Em 1803, o físico Jean-Baptiste Biot, membro da Academia Francesa de Ciências, foi encarregado pelo ministro do Interior francês a investigar uma chuva de meteoros amplamente testemunhada sobre L'Aigle, na França. Biot seguiu então para a região com um mapa, uma bússola e uma amostra do meteorito Barbotan, caído no outono de 1790. Após uma pesquisa detalhada, comprovou que as rochas encontradas em L'Aigle eram similares às encontradas em Barbotan ([MATSUURA; BARBOZA; MACIEL, 2014](#)). Após esse fato, e a queda testemunhada, o mundo científico finalmente se convenceu da origem extraterrestre dos meteoritos, dando início à meteorítica no início do século XIX bendego.

Atualmente, após cerca de 200 anos desde o início do estudo, a meteorítica se tornou uma área importante de pesquisa científica. Suas aplicações compreendem as áreas de: mineralogia - identificando minerais ou fases minerais que ocorrem raramente na Terra; petrologia - estudando texturas responsáveis pelas aparências diferentes àquelas de rochas encontradas na Terra e fornecendo informações sobre processos geológicos ocorridos em seus corpos parentais; geoquímica - analisando suas composições principais, além de traços elementares e isotópicos; e cronologia - fornecendo idades da cristalização inicial e seus impactos meta.

2.2 Corpos Menores do Sistema Solar

2.2.1 Cometas e Asteroides

Asteroides, cometas e satélites naturais são denominados corpos menores do Sistema Solar. Esta categoria abrange todos os objetos do nosso sistema planetário que não o Sol e os planetas. Contudo, existe uma diferença na nomenclatura de um corpo celeste à medida que sua localização muda. Os termos asteroide e meteoroide pertencem à nomenclatura de um meteorito antes deste chegar ao solo terrestre, quando ainda se encontra em órbita ao redor do Sol.

Em 1801, foi descoberto o primeiro corpo menor em órbita do Sistema Solar, o planeta anão Ceres. A partir dessa descoberta, o Cinturão de Asteroides entre Marte e Júpiter foi então revelado. A maior parte dos asteroides conhecidos possuem órbitas situadas nessa região do Sistema Solar ([FILHO; SARAIVA, 2004](#)). Na época da descoberta de Ceres, acreditava-se que os asteroides eram resultados da explosão de um planeta que deveria se encontrar naquela órbita. Hoje em dia, sabe-se que estes são corpos que não foram capazes de se unir para formar um planeta na época da construção do nosso Sistema Solar ([SEEDS, 2008](#)), ou seja, são restos da formação deste.

Os cometas possuem um histórico similar aos asteroides, sendo também considerados resquícios da época em que nosso Sistema Solar se construiu. Contudo, esses corpos são provenientes de regiões mais geladas, que ficam além da órbita de Netuno. Sendo assim, são rochas cobertas de gelo, que possuem órbitas elípticas extremamente alongadas e apresentam atividade quando se aproximam do Sol, conforme mostrado na figura 2.



Figura 2 – Cometa Halley em foto registrada durante sua passagem no ano de 1986. Fonte: NSSDC's Photo Gallery (NASA).

Quando em atividade, desenvolvem a chamada coma, um halo de gás neutro e partículas de poeira ao redor do núcleo, e podem possuir três tipos de cauda distingíveis,

uma de íons, outra de poeira e a última composta de átomos de sódio neutro. Esta última nem sempre é visível. A cauda de íons se mostra mais reta e azulada, enquanto a de poeira é mais curva e clara.

Os cometas variam em seu brilho e órbita, e existem pelo menos dois tipos principais no nosso Sistema Solar. O primeiro se encontra no chamado Cinturão de Kuiper, região localizada logo após a órbita do planeta Netuno. Esses são conhecidos como cometas de curto período. O segundo tipo é proveniente de uma região chamada nuvem de Oort, uma nuvem teórica localizada muito depois do Cinturão de Kuiper que se estende até o limite do Sistema Solar. Esses cometas são classificados como cometas de longo período ([SEEDS, 2008](#)).

Asteroides e cometas representam corpos que se formaram a partir da nuvem que originou nosso Sistema Solar e podem ainda preservar informações intactas sobre as condições físico-químicas da época da formação do nosso sistema planetário. Por esta razão, quando os meteoritos atingem o solo, fornecem uma oportunidade única de estudar o Sistema Solar primitivo através de sua análise elementar e mineralógica. A espectroscopia dos cometas, à medida que estes passam perto do Sol, também permite o estudo de sua composição química ([SHAW, 2007](#)).

2.2.2 Meteoros

O termo meteoro vem do grego *meteoron*, que significa fenômeno no céu. O atrito gerado pelo meteoroide ao penetrar na atmosfera terrestre em alta velocidade, ioniza os gases nela contidos, de maneira a deixar um rastro brilhante visível a olho nu. Meteoro, portanto, é o nome atribuído ao fenômeno luminoso que ocorre quando um asteroide ou meteoroide se choca com a atmosfera da Terra ([FILHO; SARAIVA, 2004](#)). A figura 3 mostra o fenômeno citado.



Figura 3 – Meteoro visto durante a chuva de meteoros anual Gemínidas, em 14 de dezembro de 2009. Fonte: Wally Pacholka/Barcroft Media.

2.2.3 Chuva de Meteoros

Apesar do nome, as chuvas de meteoros acontecem quando a Terra, em sua órbita, cruza uma região em que há restos de algum cometa. À medida que este se aproxima do Sol, as partículas de gelo e poeira que envolvem seu núcleo se desprendem, deixando assim um rastro ao longo de sua órbita. Algumas vezes, essa órbita cometária cruza com a órbita da Terra. Como a Terra possui uma órbita fixa, os meteoros de uma mesma chuva sempre passam a impressão de surgirem todos a partir do mesmo ponto do céu, chamado de radiante. Esse ponto é sempre o mesmo para cada cometa. Assim, cada chuva recebe o nome da constelação a partir da qual parece se originar ([ZUCOLOTTO et al., 2013](#)). A tabela 1 cita as principais chuvas de meteoro que ocorrem durante o ano.

Chuva de Meteoros	Data	Cometa Associado
Quadrântidas	2-4 Janeiro	(196256) 2003 EH1
Líridas	20-22 Abril	C/1861 G1 (Thatcher)
η Aquarídeas	2-7 Maio	1P/Halley
δ Aquarídeas	26-31 Julho	96P/Machholz
Perseidas	10-14 Agosto	Swift-Tuttle
Oriónidas	18-23 Outubro	1P/Halley
Táuridas	1-7 Novembro	2P/Encke
Leónidas	14-19 Novembro	Temple-Tuttle
Gemínidas	10-13 Dezembro	3200 Faetonte

Tabela 1 – Lista das chuvas de meteoros ao longo do ano junto com suas respectivas datas e corpos parentais. Adaptação de ([SEEDS, 2008](#)).

Ao longo do tempo, cometas podem perder todos os seus voláteis, ao terem sua camada de gelo completamente derretida como resultado de suas passagens pelas redondezas interiores do Sistema Solar. Sendo assim, apesar de manterem sua órbita excêntrica, se tornam objetos semelhantes aos asteroides, sendo rochas inativas, sem a presença de coma ou caudas ao redor do Sol.

2.3 Meteoritos

Um corpo celeste pode ser atraído pela Terra e penetrar em sua atmosfera. O atrito faz com que o corpo aqueça, ionizando os gases presentes na atmosfera, gerando no céu um efeito luminoso chamado de meteoro. Ao sobreviver à entrada na atmosfera e atingir o solo, esse é então chamado de meteorito ([SEEDS, 2008](#)).

Sendo assim, os meteoritos são fragmentos de corpos que se encontravam naturalmente no espaço e caíram na superfície terrestre. Os meteoritos mais antigos são resíduos da formação do Sistema Solar, e portanto fizeram parte dos primeiros processos químicos ocorridos durante a formação dos planetesimais e consequente formação dos corpos

maiores. Sendo assim, pode-se dizer que a origem e composição química destes corpos está relacionada de maneira íntima à formação, composição, e evolução do nosso sistema planetário (BRICENO, 2014).

A figura 4 demonstra os diferentes estágios que ocorrem durante a queda de um meteoroide até que este seja referido como meteorito.

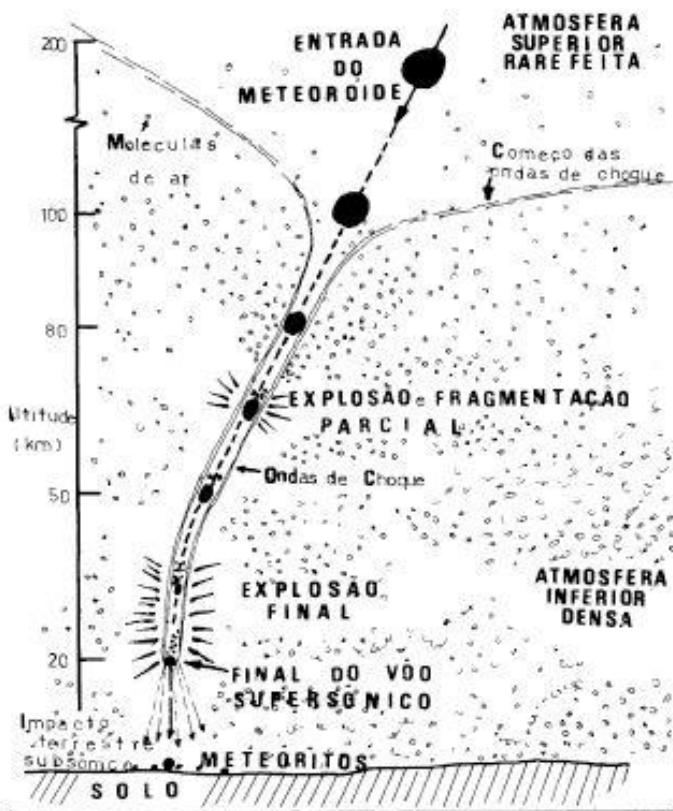


Figura 4 – Esquema mostrando as diversas etapas da entrada de um meteoroide na atmosfera terrestre até sua queda como meteorito na superfície. Fonte: (ZUCOLOTTO et al., 2013).

A classificação atual dos meteoritos teve início em 1860 com Gustav Rose da Universidade de Berlim, que os classificou de acordo com sua composição mineral e textura (BRICENO, 2014). Atualmente, os meteoritos são, de forma geral, classificados segundo sua concentração de ferro e silicatos. De maneira simplificada, existem três tipos de meteoritos: os metálicos (sideritos), formados basicamente da liga ferro-níquel; os rochosos (aerólitos), formados basicamente de silicatos; e os mistos (siderolitos), que consistem de uma mistura proporcional de ferro-níquel e silicatos. Cada um destes tipos é subdividido em classes e algumas classes são subdivididas em grupos menores, com propriedades distintas de maneira a tentar facilitar o entendimento de sua origem e relações (ZUCOLOTTO et al., 2013).

Segundo Kring (1998), como os meteoritos são formados através de uma variedade

de processos em muitos objetos diferentes, eles podem ter propriedades físicas e químicas substancialmente diferentes. Alguns meteoritos, particularmente os condritos primitivos, são muito diferentes de qualquer outro tipo de rocha encontrada na Terra e podem ser prontamente identificados. No entanto, outros meteoritos, particularmente os acondritos, foram produzidos pelos mesmos tipos de processos ígneos que ocorrem na Terra, sendo assim, algumas vezes, um pouco mais difícil diferenciá-los de rochas terrestres.

De acordo com [Zucolotto et al. \(2013\)](#), algumas das características mais marcantes na distinção entre meteoritos e rochas terrestres, são:

- Crosta de fusão - Camada fina de material fundido que fica aderida na superfície do meteorito como resultado da exposição deste à altas temperaturas durante sua passagem pela atmosfera terrestre.
- Regmaglitos - São depressões comuns em meteoritos que sofreram quedas recentes.
- Côndrulos - Pequenas esferas de silicatos. Devido ao fato de que se formaram ainda no disco que deu origem aos planetas, estes contêm informações importantes sobre a formação e estrutura do Sistema Solar primitivo.
- Tamanho e Forma - Os meteoritos não possuem dimensões fixas e seu peso pode variar de microgramas a várias toneladas. A maioria tem entre 100g e 10kg, sendo raro encontrar aqueles que pesam mais do que 100 kg. Também apresentam formas bem variadas, sofrendo modificações devido à erosão por colisões ainda no espaço, ao atrito durante sua passagem pela atmosfera terrestre.
- Presença de Ferro-Níquel e Magnetismo - Ao contrário de rochas terrestres, a grande maioria dos meteoritos contém a presença de ferro-níquel. Essa característica é facilmente vista pelo brilho metálico ao lixar a rocha. Com a presença de ferro-níquel, uma liga bastante magnética, a maioria também é atraída por ímãs.

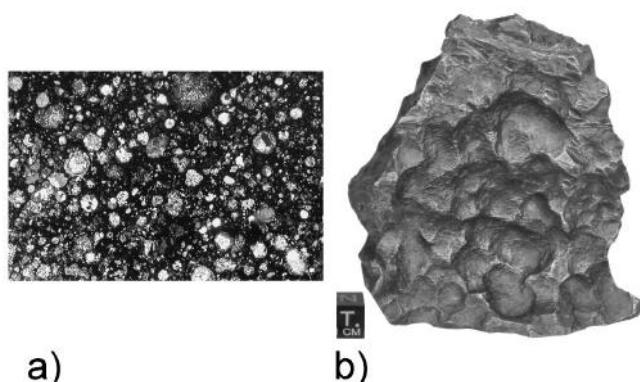


Figura 5 – a) Textura condríctica do meteorito Clovis. b) Parte traseira do meteorito Pira-pora, MG mostrando os regmaglitos (marcas de dedo). Fonte: ([ZUCOLOTTO et al., 2013](#)).

3 A Química dos Meteoritos

3.1 Minerais nos Meteoritos

Minerais são compostos químicos formados por processos naturais e caracterizados por uma composição química particular, possuindo uma estrutura cristalina definida.

Apesar do planeta Terra possibilitar a produção de minerais através de quase todos os elementos químicos naturais, alguns processos não geológicos formaram os minerais dos meteoritos no início da história do nosso Sistema Solar. Sendo assim, os minerais não só compõem uma considerável parte do Sistema Solar como um todo, como podem também ser considerados blocos de construção de todas as rochas terrestres e todos os meteoritos ([NORTON; CHITWOOD, 2008](#)).

A mineralogia é o estudo da formação, propriedades e usos dos minerais, sendo um dos ramos mais antigos da ciência. Segundo [Mason \(1979\)](#), as maiores diferenças entre a mineralogia terrestre e a de meteoritos são a presença de ferro-níquel, que é praticamente ausente nas rochas terrestres, e a composição dos minerais mais comuns, já que em meteoritos os silicatos de magnésio-ferro estão mais presentes, enquanto na crosta terrestre, quartzo e aluminossilicatos contribuem mais. Os minerais comuns presentes em meteoritos contém pouca ou nenhuma água em sua composição, enquanto os hidratados são comuns e presentes em maior escala na Terra.

Na mineralogia, os minerais são separados de acordo com sua importância na classificação da rocha, incluindo meteoritos. Minerais principais, ou essenciais, compõem a maior parte da rocha ou meteorito, definindo assim sua classificação. Minerais secundários são aqueles formados após a constituição da rocha, como resultado de processos de alteração. Minerais acessórios aparecem na rocha em pequenas quantidades, não afetando sua classificação. E, por último, minerais traços são aqueles vistos de maneira não significativa na rocha, não afetando sua classificação porém importantes para determinar sua origem ([ZUCOLOTTO et al., 2013](#)).

A tabela 2 lista exemplos de minerais e grupos de minerais encontrados em meteoritos.

Mineral	Fórmula	Mineral	Fórmula
Alabandita	(Mn, Fe)S	Andradita	$Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$
Apatita	$Ca_5(PO_4)_3Cl$	Awarita	Ni_3Fe
Berringerita	$(Fe, Ni)_2P$	Blenda	$Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$
Brezinaita	Cr_3S_4	Brianita	$CaNa_2Mg(PO_4)_2$
Calcita	$CaCO_3$	Carsbergita	CrN
Calcopirita	$CuFeS_2$	Caoita	C
Clorapatita	$Ca_5(PO_4)_3Cl$	Cromita	$FeCr_2O_4$
Clinopiroxênio	$(Ca, Mg, Fe)SiO_3$	Coheita	$(Fe, Ni)_3C$
Cobre	Cu	Cordierita	$Mg_2Al_4Si_5O_{18}$
Calcopirrotita	$(Cu, Fe)S$	Cristobalita	SiO_2
Daubreeleita	$FeCr_2S_4$	Diamante	C
Djerfrita	$K_3CuFe_12S_14$	Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$
Epsomita	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Enxofre	S
Farringtonita	$Mg_3(PO_4)_2$	Gentinerita	$Cu_8Fe_3Cr_11S_18$
Grafitonita	$(Fe, Mg)_3(PO_4)$	Grafita	C
Glossularita	$Ca_3Al_2Si_3O_{12}$	Gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
Haonita	$Fe_{23}C$	Heazlewoodita	Ni_3S_2
Hercinita	$(Fe, Mg)Al_2O_4$	Hibonita	$CaAl_12O_19$
Ilmenita	$FeTiO_3$	Kamacita	(Fe,Ni)
Krinovita	$NaMg_2CrSi_3O_{10}$	Lawrencita	$(Fe, Ni)Cl_2$
Lonsdalsita	C	Mackinawita	$FeSi_{I-x}$
Magnesita	$(Mg, Fe)CO_3$	Magnetita	Fe_3O_4
Majorita	$Mg_3(Mg, Si)Si_3O_{12}$	Melilita	$Ca_2(Mg, Al)Si, Al)2O_7$
Merrihueita	$(K, Na)_2Fe_5Si_12O_{30}$	Merrilita	$Na_2Ca_3(PO_4)_2O$
Monticelita	$Ca(Mg, Fe)SiO_4$	Nefelina	$NaAlSiO_4$
Niningerita	$(Mg, Fe)S$	Oldhamita	CaS
Olivina	$(Mg, Fe)2SiO_4$	Ortopiroxênio	$(Mg, Fe)SiO_3$
Osbornita	TiN	Panetita	$(Ca, Na)_2(Mg, Fe)_2(PO_4)_2$
Penlandita	$(Fe, Ni)_9S_8$	Perovskita	$CaTiO_3$
Perryita	$(Ni, Fe)_5(Si, P)_2$	Plagioclásio	$(Na, Ca)(AlSi)_4O_8$
Feldspato	$(K, Na)AlSi_3O_8$	Pirita	FeS_2
Pirrotita	$Fe_{1-x}S$	Quartzo	SiO_2
Rhoita	$CaMg_2TiAl_2SiO_{10}Na_2$	Rrichterita	$Na_2CaMg_5Si_8O_22F_2$
Ringwoodita	$(Mg, Fe)_2SiO_4$	Roederita	$(K, Na)_2Mg_5Si_12O_{30}$
Rutílo	TiO_2	Schreibersita	$(Fe, Ni)_3P$
Serpentina	$(Mg, Fe)_6Si_4O_{10}(OH)_8$	Sinoita	Si_2N_2O
Sodalita	$Na_8Al_6Si_6O_{24}Cl_2$	Spinel	$MgAl_2O_4$
Stanfieldita	$Ca_4(Mg, Fe)_5(PO_4)_6$	Taenita	(Fe,Ni)
Tridimita	SiO_2	Troilita	FeS
Ureilita	$NaCrSi_2O_6$	Whewelita	$CaC_2O_4 \cdot H_2O$
Whitlockita	$Ca_9MgH(PO_4)_7$	Wolastonita	$CaSiO_3$
Yagita	$(K, Na)_2(Mg, Al)_5(Si, Al_12O_30)$	Zircão	$ZrSiO_4$

Tabela 2 – Exemplos de espécies minerais encontradas nos meteoritos. Fonte: ([ZUCO-LOTTO et al., 2013](#))

3.2 Classificação Taxonômica de Meteoritos

Ao longo do tempo houve diversas tentativas de se classificar os meteoritos em grupos de uma maneira prática e ao mesmo tempo precisa. Contudo, à medida que o número de meteoritos descobertos aumentava, uma classificação conveniente se tornou cada vez mais difícil. A primeira tentativa de divisão de meteoritos em diferentes classes foi realizada no início do século XIX, quando Klaproth, um farmacêutico alemão, sugeriu que estes fossem divididos de acordo com a presença ou não de ligas metálicas (ferro-níquel) ([FARRINGTON, 1915](#)).

O objetivo principal da classificação taxonômica de meteoritos é agrupá-los de tal forma que seja possível distinguir suas diferentes espécies, através de sua composição química e mineralógica, de maneira a traçar suas origens, tais como asteroides, Lua, planetas e etc.

A classificação tal como conhecemos no presente momento se baseia em uma divisão de três categorias principais, sendo elas os meteoritos rochosos, os metálicos e os mistos. Ela teve início em 1864, quando o mineralogista alemão Gustav Rose propôs que os meteoritos rochosos fossem subdivididos de acordo com a presença (condritos), ou não (acondritos) de côndrulos em sua estrutura ([WANG; KOROTEV, 2019](#)). A figura 6 ilustra um esquema simplificado da classificação atual dos meteoritos.



Figura 6 – Esquema simplificado da classificação dos meteoritos. Fonte: ([ZUCOLOTTO et al., 2013](#))

Atualmente, a estrutura de classificação evoluiu para um sistema complexo com uma grande variedade de grupos que levam em consideração não somente as texturas,

como também a mineralogia e as composições elementares e isotópicas em massa. A separação utilizada hoje se baseia em meteoritos não diferenciados (condritos) e diferenciados (acondríticos, metálicos e mistos). Além disto, após a separação em classes e grupos, outros passos necessários para uma classificação completa são o tipo petrográfico, o estágio de choque (condritos ordinários e enstatita condritos) e o grau de intemperismo terrestre ([WANG; KOROTEV, 2019](#)).

O presente trabalho visa caracterizar dois meteoritos rochosos do tipo condrito. Desta forma, haverá uma ênfase a estes tipos de meteoritos nas próximas sessões.

3.2.1 Meteoritos Rochosos Condrílicos

Os condritos são meteoritos rochosos compostos basicamente por minerais do grupo das olivinas, piroxênios e sulfetos. Estudos relacionam a formação de condritos com a acreção de partículas sólidas dentro da nebulosa solar. Os côndrulos ocupam um grande volume da matriz na maior parte dos condritos. Contudo, sua abundância pode variar entre os diferentes grupos, além de ser possível observar côndrulos compostos, ou até mesmo nenhum, como no caso dos condritos CI ([JR; HUSS, 2010](#)). A tabela 3 mostra a divisão na classificação dos meteoritos condrílicos em detalhe, além de exemplos de cada um.

Classe	Grupo	Tipo Petrográfico	Meteorito
Condritos Carbonáceos	CI	1	Ivuna
	CM	1-2	Murchison
	CO	3-4	Ornans
	CV	3-4	Allende
	CK	3-6	Karourda
	CR	1-2	Renazzo
	CH	3	ALH85085
	CB	3	Bencubbin
Condritos Ordinários	H	3-6	Flandreau
	L	3-6	L'Aigle
	LL	3-6	St. Mesmin
Enstatita Condrito	EH	3-6	Saint-Sauveur
	EL	3-6	Eagle
Rumurutitos	R	3-6	Rumuruti
Kakangritos	K	3	Kakangari

Tabela 3 – Divisão dos Meteoritos Condrílicos em suas respectivas classes, grupos, e tipos petrográficos. Adaptação de ([WEISBERG; MCCOY; KROT, 2006](#)).

Segundo decm, os meteoritos condrílicos possuem composição similar à do Sol, com exceção dos elementos voláteis, e sua origem é atribuída a asteroides, ou cometas, que não sofreram diferenciação. Os meteoritos acondritos são rochas ígneas, cuja origem é

remetente a asteroides diferenciados ou superfícies de planetas e satélites, como Marte e a Lua.

O tipo petrográfico diz respeito à textura e composição mineralógica dos côndrulos do meteorito, sendo o tipo 3 o mais primitivo de todos e considerado como não equilibrado. As classificações dos tipos 1 e 2 indicam alterações aquosas nos côndrulos, com o tipo 1 sendo o mais alterado. Do tipo 4 ao 6, o grau de metamorfismo térmico aumenta e os côndrulos passam a ser cada vez menos definidos em relação à matriz. Meteoritos do tipo 3 possuem côndrulos extremamente bem definidos, enquanto aqueles do tipo 1 possuem côndrulos que sofreram forte alteração aquosa ([WANG; KOROTEV, 2019](#)).

3.2.1.1 Côndrulos

Os condritos tem como componentes mais abundantes os chamados côndrulos. Estas estruturas compõem a maior parte do volume de um meteorito condríctico, sendo na média, 70% do volume total de um condrito ordinário, por exemplo ([SALAVERRY et al., 2017](#)). A figura 7 mostra a textura condríctica bem definida do meteorito Santa Vitória do Palmar.



Figura 7 – Imagem do meteorito Santa Vitória do Palmar (SVP) mostrando sua textura condríctica desenvolvida com côndrulos bem delineados e matriz vítreia.

Côndrulos são estruturas esféricas ou semiesféricas presentes em meteoritos rochosos condrícticos. Seu tamanho pode variar dependendo do grupo em que se encontra, estando usualmente entre 0.01 e 10 mm, variando significativamente em textura e mineralogia também. Os côndrulos possuem uma estrutura vítreia, e uma propriedade interessante, sendo geralmente compostos de minerais de silicato ricos em magnésio e ferro, como, por exemplo, a olivina e o piroxênio, ou seja, minerais ígneos ([BRICENO, 2014](#)).

Sendo assim, acredita-se que estas estruturas estão entre as mais antigas do nosso Sistema Solar. Sua natureza sugere que estes foram derretidos, e acredita-se que se

solidificaram de maneira repentina, indicando que a fonte de calor foi um evento envolvendo energias extremamente altas. Além disso, a grande variedade de texturas observadas em côndrulos suporta a teoria de que estes se formaram ainda na nebulosa que deu origem ao Sistema Solar, já que as diferentes características exigem diferentes formações.

A tabela 4 mostra o tamanho médio estimado para côndrulos existentes em diferentes tipos de meteoritos condrílicos.

Classe	Grupo	Tamanho Médio dos Côndrulos (mm)
Condritos Carbonáceos	CM	0,27
	CR	0,7
	CK	0,8
	CV	1,0
Condritos Ordinários	H	0,3
	L	0,5
	LL	0,6
Enstatita Condrito	EH	0,2
	EL	0,55

Tabela 4 – Tamanho médio estimado para côndrulos observados em diferentes tipos de meteoritos condrílicos. Fonte: ([SALAVERRY et al., 2017](#)).

3.2.2 Condritos Ordinários

Dentre os meteoritos rochosos, os condritos ordinários recebem este nome pois são os mais comuns, representando cerca de 85% de todas as quedas observadas de meteoritos condrílicos. Segundo [Vernazza et al. \(2015\)](#), a origem de meteoritos deste tipo é atribuída a asteroides do tipo S, que recebem esta nomenclatura devido à palavra em inglês *stony*, ou rochoso. Asteroides deste tipo são basicamente compostos por silicatos e ferro-níquel, e compõem a maior parte do interior do cinturão de asteroides, entre Marte e Jupiter, contabilizando cerca de 17% do total de asteroides conhecidos. A tabela 5 mostra algumas das propriedades de meteoritos condrílicos ordinários equilibrados.

	H	L	LL
Estatísticas de Quedas (%)	34	37	9
Fe (wt%)	28	22	19
Fe/Si (Atómico)	0,81	0,57	0,52
Metal (vol%)	8,4	4,1	2

Tabela 5 – Propriedades de Meteoritos Condrílicos Ordinários Equilibrados. Adaptação de ([VERNAZZA et al., 2015](#)).

Em termos de mineralogia, os condritos ordinários são meteoritos ricos em silicatos e compostos principalmente por olivina e piroxênio, contendo baixo teor de cálcio. Tendo como base variações em razões moleculares, tais como $[FeO / (FeO + MgO)]$ e a razão

entre ferro metálico e ferro total, esta classe de meteoritos foi então subdividida em três grupos distintos, chamados H, L e LL. Entre as descobertas de meteoritos da classe, os pertencentes ao grupo H possuem o maior teor de ferro e uma porcentagem razoável de ferro metálico em sua composição. O grupo L é o intermediário entre os três grupos com relação à quantidade de ferro e ferro metálico em sua composição, porém supera o grupo H em número de quedas registradas. Por último, o grupo LL é formado por baixa quantidade de ferro e ferro metálico, contendo principalmente olivina e piroxênio em sua composição ([VERNAZZA et al., 2015](#)).

A figura 8 mostra a evolução da textura e composição de condritos ordinários dos grupos L e H, em função dos tipos petrológicos 3 a 6.

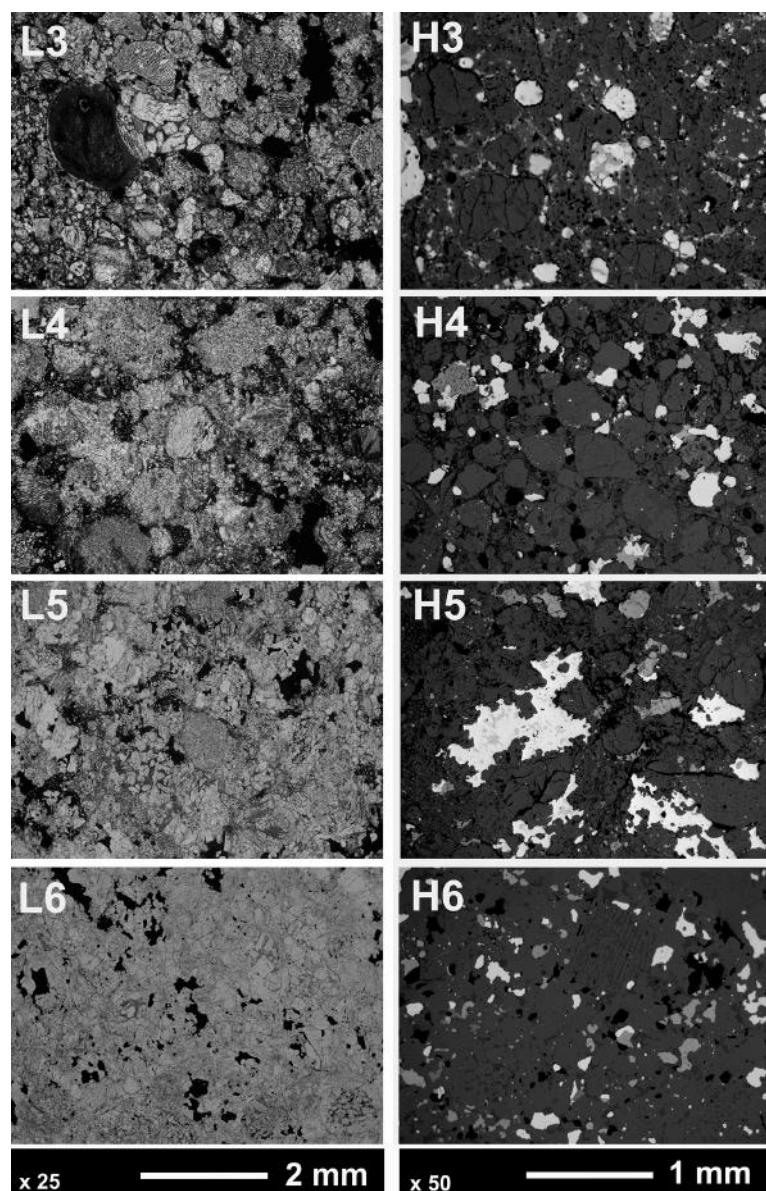


Figura 8 – Evolução composicional e textural dos condritos ordinários L e H em função dos tipos petrológicos 3 a 6. Fonte: ([VERNAZZA et al., 2015](#)).

O meteorito Santa Vitória do Palmar (SVP), uma das amostras deste trabalho, foi classificado como condrito ordinário L3, onde o L indica que este possui baixo teor em ferro, com a quantidade de ferro total entre 21 e 25% de sua composição, e o número 3 indica o tipo petrográfico, ou seja, a textura e composição dos minerais presentes nos côndrulos. No tipo 3, a textura é granular e os minerais principais são do grupo dos piroxênios (clinopiroxênios e ortopiroxênios), e do grupo das olivinas ([ZUCOLOTTO et al., 2013](#)).

4 Os Meteoritos Analisados

4.1 O Meteorito Santa Vitória do Palmar

Em 1997, um bólido foi avistado na região do Chuí, na fronteira do Brasil com o Uruguai. Apesar das buscas realizadas, nenhuma massa foi encontrada até 2003, quando o pesquisador Roberto Maciel procurava por pedaços de flechas indígenas na área. O fragmento maior encontrado por Roberto Maciel possuía 34kg e ao longo das duas semanas seguintes mais dois fragmentos foram encontrados, cada um pesando, respectivamente, 1,5kg e 4,3kg.



Figura 9 – Imagem de um dos fragmentos encontrados do meteorito Santa Vitória do Palmar.

As rochas foram associadas ao meteoro observado em 1997, e no ano seguinte dois outros pedaços, de respectivamente 300g e 10,5kg também foram encontrados na mesma região.

A massa maior se perdeu após ser doada a um suposto professor da Universidade Federal do Rio Grande, no Rio Grande do Sul. Contudo, a quantidade retida foi suficiente para que amostras fossem enviadas para Berlim, na Alemanha, para análise e classificação. A publicação oficial da classificação foi publicada no The Meteoritical Bulletin, No. 91, em março de 2007. A análise dos fragmentos encontrados por Maciel revelou a existência de uma crosta de fusão, e a análise petrológica definiu a amostra como um condrito formado

por metal rico em ferro-níquel, e com a presença de côndrulos bem definidos com grande variação nos tipos de textura.

Meteoritos sofrem intemperismo devido ao clima e relevo terrestre. Uma das escalas de intemperismo mais conhecidas é baseada nos efeitos observados nos meteoritos condrícticos ordinários, e varia de W0 (intocada) a W6 (alteração pesada). De acordo com [Zucolotto e Antonello \(2008\)](#), o SVP se encontra situado entre os graus W1 e W2 desta escala. Estas condições de intemperismo impossibilitariam a correlação do SVP com o evento celeste observado em 1997 na região do Chuí.

As composições de minerais do grupo das olivinas e do grupo dos piroxênios sugeriram a classificação do Santa Vitória do Palmar como um condrito da classe ordinário e grupo L. A textura dos côndrulos é bem definida e estes possuem a presença de material vítreo, indicativo do tipo petrológico 3. A textura e aparência de côndrulos externos sugeriu uma subclassificação de L3.4 a L3.6. Por fim, o meteorito foi classificado como condrito ordinário L3, tipo petrográfico 3.4-3.6 ([ZUCOLOTTO; ANTONELLO, 2008](#)).

4.2 O Meteorito Cebollati

Entre os anos de 2003 e 2004, uma massa foi encontrada na cidade de Cebollati no Uruguai, ao redor da Lagoa Mirim, na fronteira com o Brasil.



Figura 10 – Imagem do maior fragmento recuperado do meteorito Cebollati.

Devido à proximidade das duas cidades, de aproximadamente 100 km, e ao fato de que os fragmentos do Santa Vitória do Palmar (SVP) foram encontrados na mesma época, surgiu-se a necessidade de comprovar a origem da massa uruguaia, de maneira a determinar uma possível linhagem em comum com os fragmentos do SVP.

Análises da amostra do Cebollati comprovam que este possui a composição química dos côndrulos e outras características condizentes com meteoritos condritos ordinários de

tipo petrográfico baixo, assim como o SVP. Além disto, o formato alongado dos côndrulos é semelhante à forma daqueles encontrados nas amostras do SVP, aumentando assim a suspeita de que os dois meteoritos possam compartilhar do mesmo corpo parental.

Sendo assim, isto demonstra a importância do estudo da composição química e mineralógica do meteorito Cebollati realizada neste trabalho, já que o meteorito em questão não foi classificado ainda.

A astrônoma, doutora Maria Elizabeth Zucolotto, especialista no estudo de meteoritos realizou estudos com os meteoritos SVP e Cebollati. Sendo assim, os resultados discutidos na sessão 6 serão posteriormente comparados aos resultados do trabalho realizado por ela.

A figura 11 mostra o mapa da região em que os dois meteoritos foram encontrados.

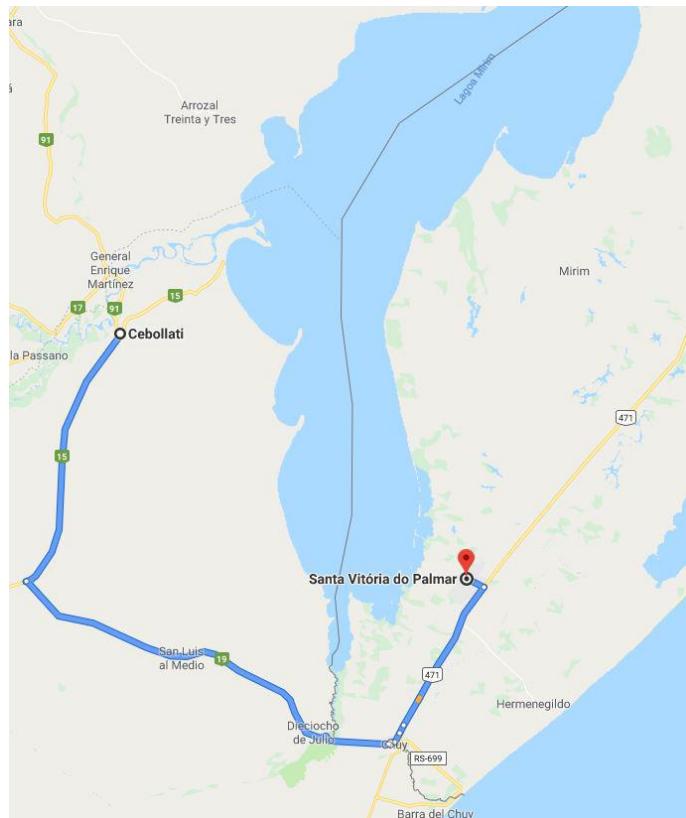


Figura 11 – Mapa ilustrando a distância entre as cidades de Santa Vitória do Palmar e Cebollati, onde os fragmentos dos meteoritos de mesmo nome, respectivamente, foram encontrados. Fonte: Google Maps.

5 Metodologia

5.1 A Técnica PIXE

A técnica de Emissão de Raios-X Induzida por Partículas (PIXE - do inglês Particle Induced X-Ray Emission) é uma técnica de análise elementar não destrutiva que pode ser utilizada para amostras sólidas, líquidas ou em aerossol simultaneamente. A PIXE funciona baseada em princípios básicos da teoria quântica. De acordo com esta, um átomo possui camadas, ou níveis de energia determinados em que um elétron pode orbitar ao redor de seu núcleo. A figura 12 mostra a forma de um espectro obtido através da técnica PIXE do meteorito Santa Vitória do Palmar.

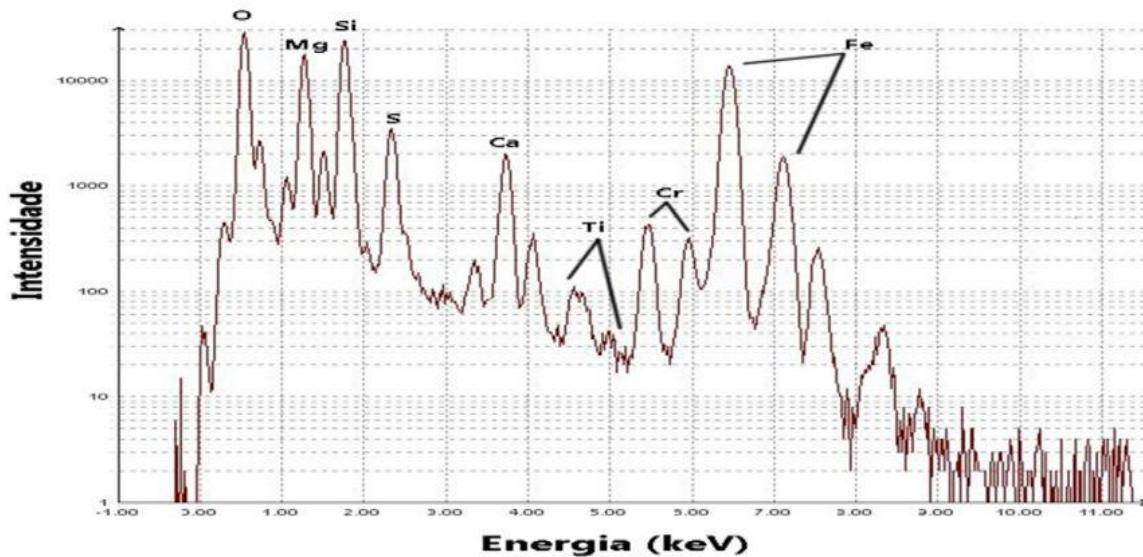


Figura 12 – Espectro obtido através da técnica PIXE do meteorito Santa Vitória do Palmar.

A técnica consiste em detectar fótons de raios-X emitidos através da alteração de estados eletrônicos, utilizando um acelerador de íons para interromper a estabilidade do átomo. A análise é realizada com um feixe de prótons energéticos, que excita os elétrons de maneira a proporcionar energia suficiente para que estes sejam expulsos de suas respectivas camadas, deixando vacâncias a serem preenchidas por elétrons de níveis energéticos superiores, e o espectro de raios-X é gerado através da detecção de fótons de determinadas energias emitidas durante o preenchimento das vacâncias. Essas transições e emissões de energia subsequentes são características de elementos independentes. Desta maneira, as energias emitidas são propriedades únicas dos elementos dos quais se originam.

A figura 13 mostra um esquema do funcionamento da técnica descrita acima. Nesta figura, o bombardeamento de íons resulta na expulsão de um elétron da camada interna K, de maneira que um elétron do nível superior L preenche a vaga e assim um fóton com a energia característica no comprimento de onda de raios-X é emitido.

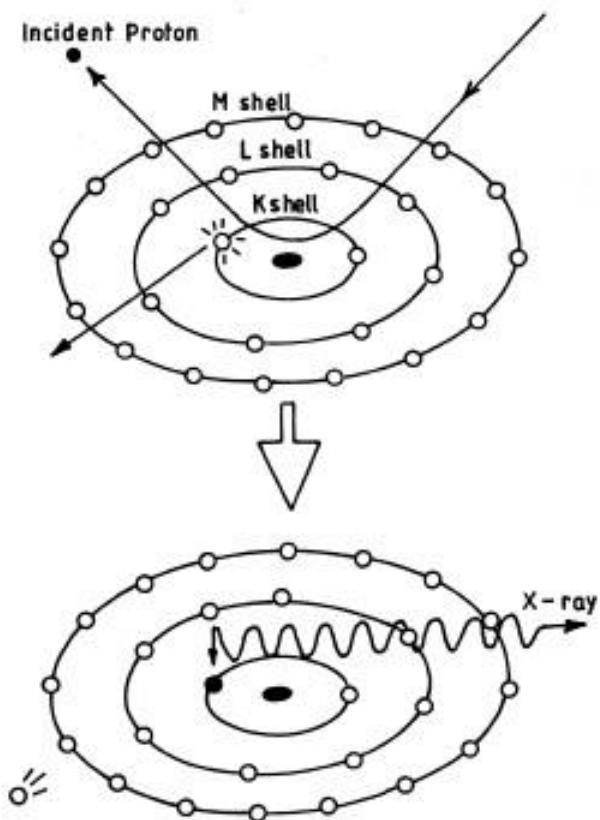


Figura 13 – Esquema representando o funcionamento da técnica de análise elementar PIXE. Fonte: Institute for Nuclear and Radiation Physics.

O acelerador de íons TANDEM, mostrado na figura 14, está localizado no setor de Colisões Atômicas do departamento de Física do Centro Atômico de Bariloche e foi o equipamento utilizado para realizar o estudo das superfícies dos meteoritos a partir da técnica PIXE. O aparelho possui aproximadamente 9 metros de extensão e uma tensão máxima de aceleração de 1,7 MV, considerado o valor ideal para obter a eficiência máxima neste tipo de técnica. O aparelho conta com duas fontes de tecnologia distintas, a primeira produz íons de luz a partir de gases atômicos e moleculares e a outra gera íons mais pesados, obtendo-os através da pulverização de sólidos, e também possui um módulo acelerador e um eletroímã com 7 saídas que permitem a instalação de diferentes experimentos. Sendo assim, o acelerador TANDEM pode ser utilizado para análise superficial em diversas técnicas, como PIXE, Espectrometria de Retroespalhamento de Rutherford (RBS), Análise de Detecção de Recuo Elástico (ERDA), e Análise por Reação Nuclear (NRA).



Figura 14 – Imagem mostrando a câmara de vácuo acoplada ao acelerador de íons TANDEM pertencente ao laboratório de Colisões Atômicas, em Bariloche, onde as análises PIXE dos meteoritos SVP e Cebollati foram realizadas. Fonte: Centro Atômico de Bariloche.

No aparelho também existe uma câmera com diversos instrumentos de precisão, o que permite a realização de estudos da composição e estrutura elementares de materiais, não somente para uso científico, mas também uso industrial ou tecnológico. Exemplos dessa aplicação fora do campo da pesquisa são os estudos feitos em peças de arte e peças forenses.

Para a realização do experimento, os fragmentos dos meteoritos SVP e Cebollati foram colados com uma fita de carbono dupla face em um porta-amostra e inseridas no equipamento, conforme mostrado na figura 15. Primeiramente estabiliza-se a pressão da câmara para então realizar o bombardeamento de prótons nos pontos através de um software.



Figura 15 – Porta amostras contendo fragmentos de diversos meteoritos para análise PIXE. Fonte: allende.

5.2 A Técnica MEV

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica de análise superficial que utiliza um microscópio eletrônico para escanear uma superfície a partir de um feixe de elétrons.

Assim como a técnica de análise elementar PIXE, a MEV é uma técnica de análise superficial não destrutiva. Além disso, permite que superfícies de materiais de diferentes tipos, como cerâmicos e metálicos sejam caracterizados, assim como tamanho de partículas, tamanho de poros, superfícies de fratura, desgastes, distribuição de grãos, defeitos de superfície, entre outros. A figura 16 mostra uma comparação entre um microscópio óptico e um microscópio eletrônico de varredura.

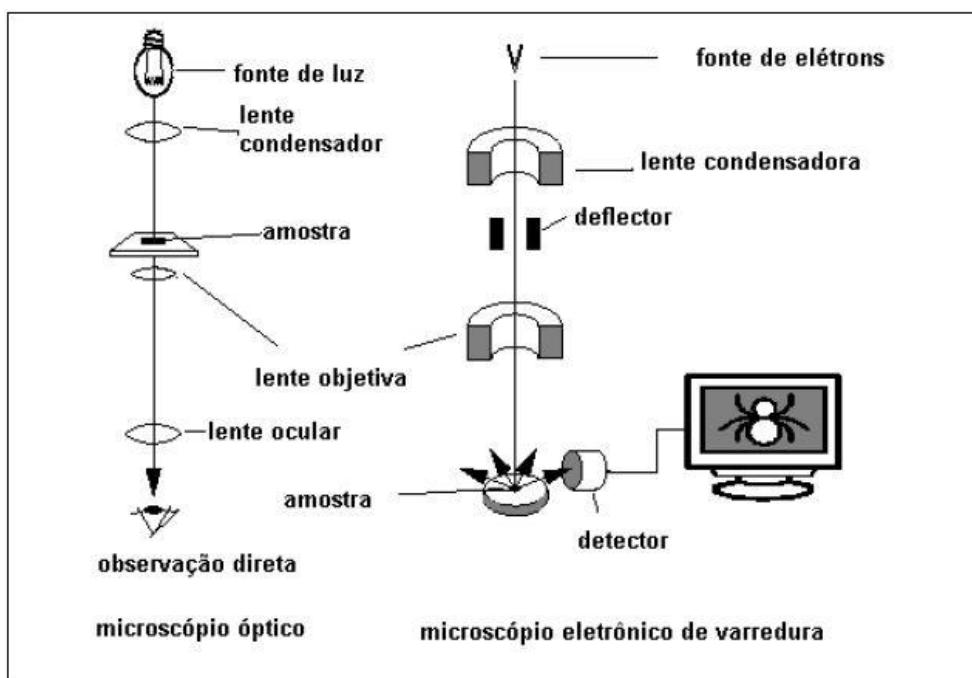


Figura 16 – Esquema de comparação entre um microscópio óptico e um microscópio eletrônico de varredura. Fonte: ([DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007](#)).

A MEV utiliza um feixe de elétrons para bombardear a superfície de uma amostra de maneira pontual. A maior parte dos equipamentos funciona a partir de um filamento de tungstênio, como fonte de geração de elétrons, e operam com tensões de aceleração que variam de 1 a 50 kV. A alta tensão criada no aparelho acelera o feixe, que em seguida é focalizado na amostra através de lentes eletromagnéticas. Os elétrons e fôtons produzidos através da interação do feixe com a amostra são detectados e convertidos em um sinal. A imagem fornecida através do sinal captado é capaz de apresentar características distintas, já que é um resultado da amplificação de sinais adquiridos através de diferentes interações entre o material da amostra e o feixe de elétrons. Os sinais captados mais usuais têm sua origem a partir de elétrons secundários, que produzem a imagem SEI (secondary electrons

image) e/ou elétrons retroespalhados, que produzem a imagem COMPO, muito comum em produções científicas (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

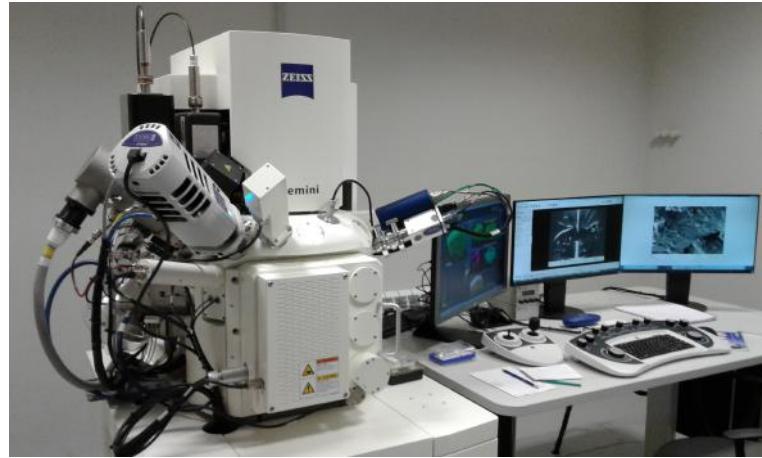


Figura 17 – Microscópio de varredura de feixe duplo (SEM-FIB), onde as análises MEV dos meteoritos SVP e Cebollati foram realizadas. Fonte: Centro Atômico de Bariloche.

O equipamento utilizado, mostrado na figura 17, é o microscópio de varredura de feixe duplo pertencente ao departamento de físico-química de materiais do Centro Atômico de Bariloche, na Argentina. O aparelho possui detectores de elétrons secundários, elétrons retro-espalhados e raios-X dispersivos em energia (EDS). Além disto, possui também um limpador de plasma interno, um nanomanipulador e um sistema de injeção para cinco gases precursores diferentes. As figuras 18 e 19 mostram imagens SEI dos meteoritos Cebollati e SVP, respectivamente, obtidas através da técnica MEV.

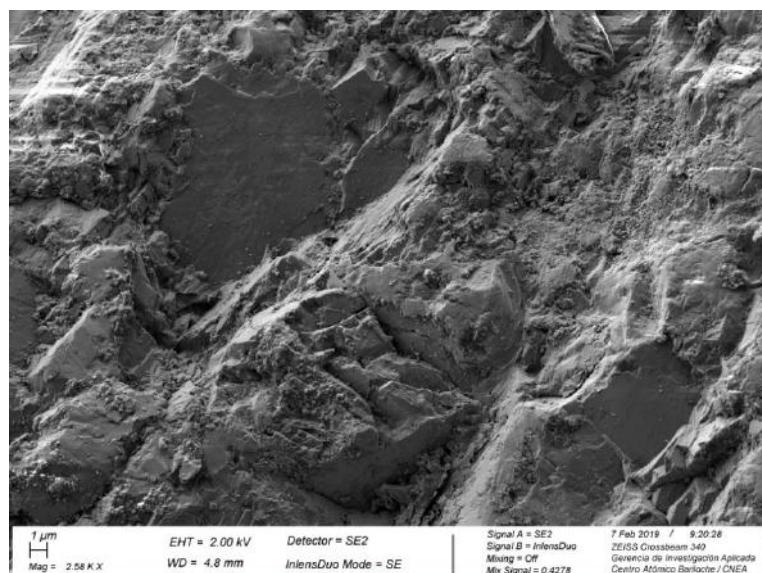


Figura 18 – Imagem SEI do meteorito Cebollati obtida através da técnica MEV no Centro Atômico de Bariloche.

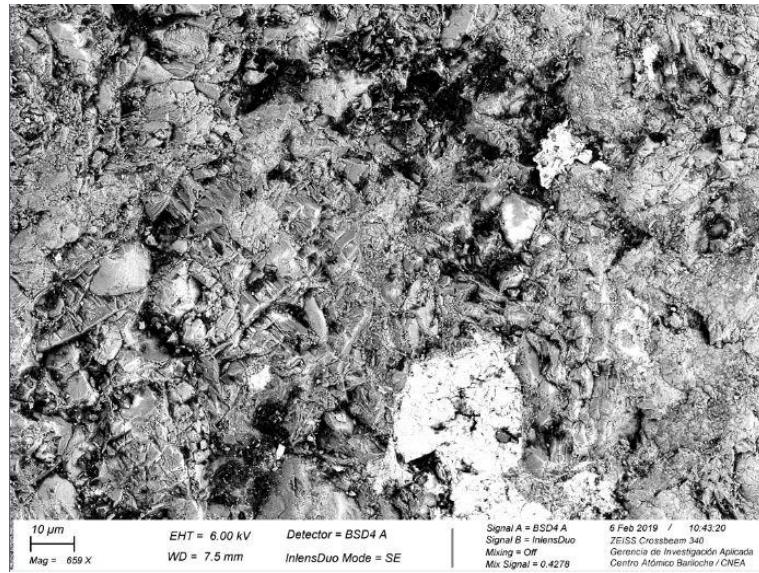


Figura 19 – Imagem SEI do meteorito SVP obtida através da técnica MEV no Centro Atômico de Bariloche.

A coleta de dados experimentais com ambas as técnicas utilizadas neste trabalho, PIXE e MEV, foi realizada no Centro Atômico de Bariloche pelas professoras doutoras Diana Andrade e Wania Wolff, do Observatório do Valongo (OV) e Instituto de Física (IF) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), respectivamente. Enquanto as análises dos dados foram realizadas como parte de um projeto de iniciação científica pela aluna Karícia Jarrell, do Observatório do Valongo, sob orientação da professora doutora Diana Andrade.

6 Resultados

Todas as tabelas apresentadas nesta e nas próximas sessões estão em ordem decrescente de abundância em porcentagem em peso (wt%). As tabelas contendo dados de dois ou mais espectros seguem essa regra referente à última coluna, e nas tabelas contendo comparações entre os dois meteoritos, a regra é seguida pelos dados referentes ao SVP.

6.1 Resultados na Técnica MEV

A análise elementar com a técnica MEV gera diversas imagens da amostra, de forma a detalhar a composição química desta em diferentes pontos de sua estrutura. Em nossos dados, os chamados sítios (do inglês sites), determinam uma área específica da superfície que foi escaneada, gerando diversos espectros referentes a pontos distintos e previamente escolhidos da amostra. Estes espectros mostram então a composição elementar daquela região através de mapas coloridos referentes à diferentes elementos químicos. Nas subseções a seguir, são mostrados exemplos detalhados dos espectros obtidos pela MEV e da análise elementar realizada a partir destes para os dois meteoritos estudados, Santa Vitória do Palmar e Cebollati. Os resultados apresentados contêm a média da composição química encontrada sem o elemento carbono, pois este é superestimado em análises com esta técnica. As tabelas contendo a composição química média com C podem ser vistas no anexo B.

6.1.1 SVP

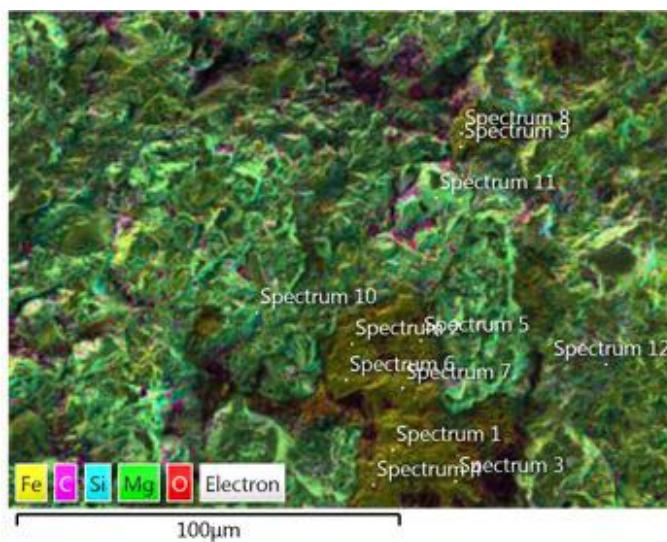


Figura 20 – Imagem SEI de uma região nomeada site 5 do meteorito Santa Vitória do Palmar, obtida através da técnica MEV.

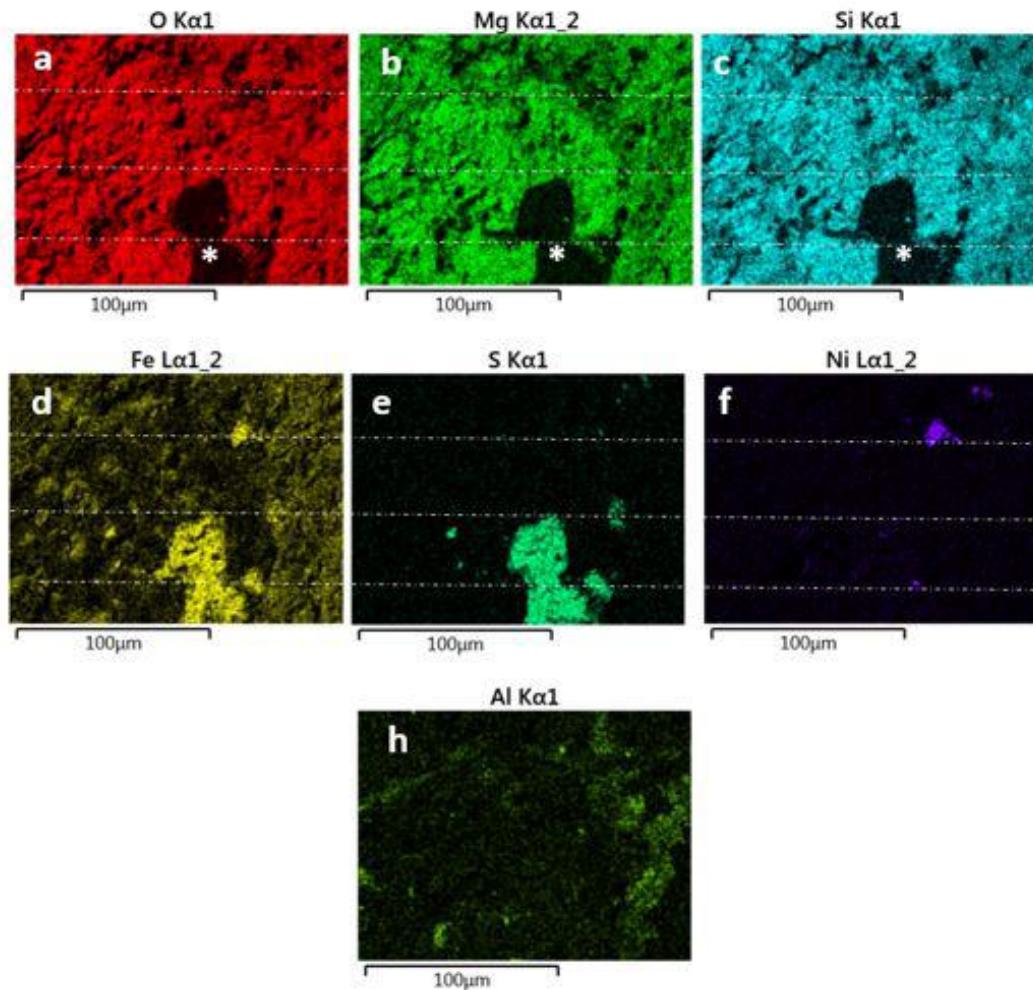


Figura 21 – Mapa composicional por EDS do site 5 do meteorito SVP, mostrando a predominância de certos elementos em cada uma delas. Linhas tracejadas foram sobrepostas nas figuras a fim de servir como guia para os olhos.

O primeiro exemplo da descrição realizada acima é mostrado na figura 20. A imagem em questão delimita uma região do meteorito Santa Vitória do Palmar com área igual a aproximadamente $0,2 \text{ mm}^2$. Esta região é denominada site 5 em nosso banco de dados, onde nela é possível observar diferentes cores, indicativas de elementos químicos distintos.

A figura 21 é a mesma região apresentada na figura 20, mas, agora, separada por elementos químicos. É possível perceber que a região estudada na imagem 20 possui pontos distintos com predominância de diferentes elementos químicos. Uma região pode conter mais de um elemento químico predominante, o que indica que estes elementos estão combinados na estrutura do meteorito. As figuras 21a, 21b e 21c mostram uma região onde os elementos oxigênio (O), magnésio (Mg) e silício (Si) parecem estar combinados de alguma maneira, enquanto há uma depleção destes elementos nos pontos marcados com (*), que se assemelham à imagem de um pequeno elefante. Já nas figuras 21d e 21e percebe-se a predominância de ferro (Fe) e enxofre (S) na região do pequeno elefante, além

de uma concentração de Fe um pouco espalhada, onde há ainda níquel (Ni) 21f, e S. O alumínio (Al) também está presente, porém em baixa concentração e espalhado, figura 21g.

A tabela 6 mostra uma média dos elementos nesta região, a qual foi obtida através de um mapa de todo o site 5 .

Elemento	At%	Wt%
O	55,7	37,9
Fe	9,1	21,7
Si	16,6	19,8
Mg	14,5	15,0
S	2,3	3,2
Al	1,1	1,3
Ca	0,7	1,2
Fe/Si	0,6	1,1
Mg/Si	0,9	0,8
Al/Si	0,07	0,06

Tabela 6 – Composição química elementar média do site 5 do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Uma análise grosseira diz que a maior parte do Fe na região está combinada com o S, neste caso estaria formando o mineral troilita (FeS), ou pirrotita ($Fe_{1-x}S$) ou pirita (FeS_2), sendo apenas uma pequena parcela combinada ainda com o Ni. Uma análise mais detalhada que será feita adiante pode nos fornecer uma composição mais segura.

Os espectros de 1 a 7 foram obtidos na região do pequeno elefante e mostram uma composição bem parecida. Os valores de cada espectro podem ser vistos no anexo B, nas tabelas 33, 34, 35, 36, 37, 38 e 39. Os elementos predominantes são basicamente Fe e S, com traços de carbono (C), O, e outros elementos. A média dos valores de Fe e S são mostradas na tabela 7. Estes resultados sugerem que o Fe se encontra principalmente na composição do mineral troilita (FeS), tendo basicamente um átomo de ferro para cada átomo de enxofre.

	At%	Wt%
Fe	43,9	57,2
S	39,4	29,6
Fe/S	1,1	1,9

Tabela 7 – Média da composição dos principais elementos químicos na região do pequeno elefante no site 5 do meteorito SVP.

Os espectros 8 e 9 foram obtidos da região rica em Ni, onde o Fe também está presente com traços de outros elementos. Uma análise desta região revelou a composição

química mostrada na tabela 8, a qual sugere a presença de tetrataenita. A tabela 8 mostra a média da composição química na região rica em Ni e Fe no site 5 do meteorito SVP.

	At%	Wt%
Ni	40,8	50,7
Fe	33,6	39,9
Fe/Ni	0,82	0,78

Tabela 8 – Média da composição química na região rica em Fe e Ni no site 5 do meteorito SVP.

A figura 22 mostra dois arquivos do nosso banco de dados referentes ao meteorito SVP, denominados sites 11 e 12, respectivamente. Estes dois arquivos (spectros 29 e 30) mostram a mesma região do meteorito.

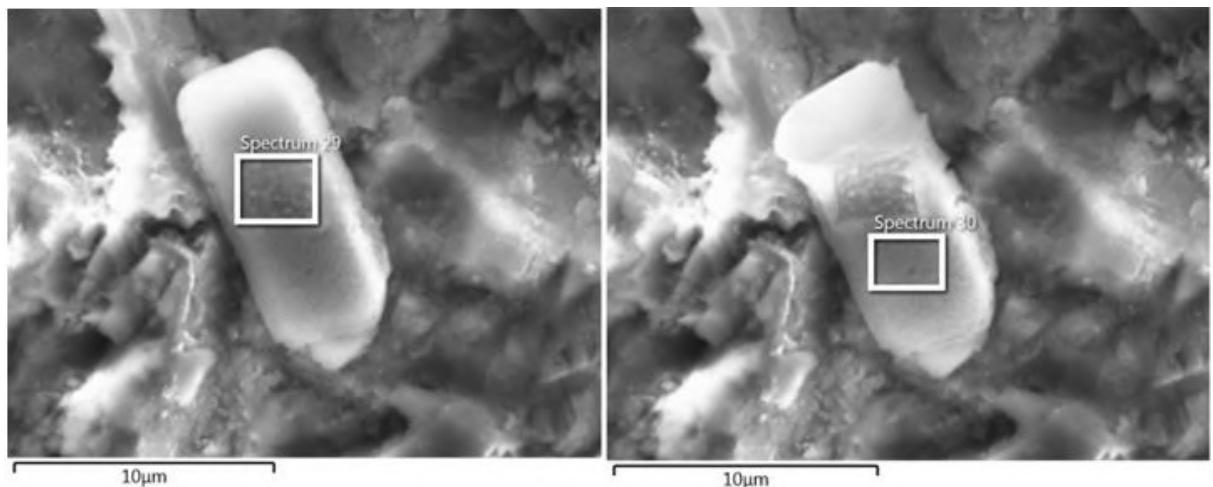


Figura 22 – Imagens SEI referentes à uma mesma região, sites 11 e 12, do meteorito Santa Vitória do Palmar, obtida através da técnica MEV.

Os espectros mostram uma alta concentração dos elementos químicos potássio e oxigênio. Outros elementos também presentes, porém não em abundância, são: silício, magnésio, carbono, ferro, sódio, alumínio, cálcio, enxofre e níquel. Assim como no caso do site 5, os valores em cada espectro também podem ser vistos no anexo B, nas tabelas 40 e 41.

A média das porcentagens dos elementos encontrados nos dois espectros pode ser vista na tabela 9.

Elemento	At%	Wt%
K	30,9	47,9
O	55,8	35,7
Si	5,3	5,9
Mg	4,0	3,9
Fe	1,4	3,3
Ca	1,0	1,6
Na	0,6	0,6
Al	0,5	0,5
Ni	0,1	0,3
S	0,1	0,1
Mg/Si	0,8	0,7
Fe/Si	0,3	0,5
Al/Si	0,09	0,09

Tabela 9 – Composição química elementar média dos sites 11 e 12 do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

As figuras 23 e 24, mostram os sites nomeados 20 e 22, relativos aos espectros 38 e 40, respectivamente. Assim como os sites 11 e 12 mencionados anteriormente, essas figuras mostram regiões do SVP ricas em K. A composição química destes 4 sites sugere a presença de minerais formados principalmente por combinações de K e O em todos os sites.

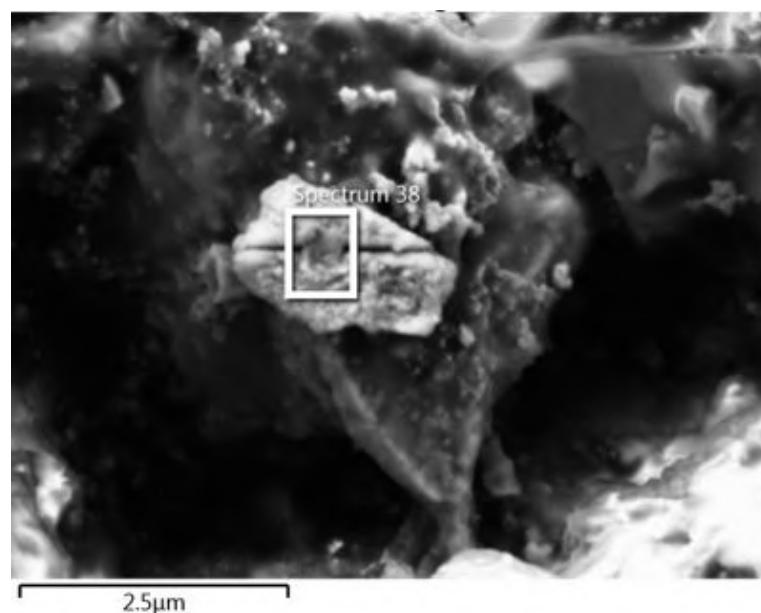


Figura 23 – Imagem SEI de uma região nomeada site 20 do meteorito Santa Vitória do Palmar obtida através da técnica MEV.



Figura 24 – Imagem SEI de uma região nomeada site 22 do meteorito Santa Vitória do Palmar obtida através da técnica MEV.

De acordo com a tabela 2, algumas das possibilidades são minerais do grupo dos feldspatos ($(K,Na)AlSi_3O_8$). Além disto, no site 20, pode-se sugerir a presença de cloreto de potássio (KCl) e perclorato de potássio ($KClO_4$). A composição química média do site 20 pode ser vista na tabela 10.

Elemento	At%	Wt%
K	45,7	51,6
Cl	40,1	41,1
O	11,0	5,1
Na	2,3	1,5
Si	0,5	0,4
Mg	0,4	0,3
Mg/Si	0,8	0,8

Tabela 10 – Composição química elementar média do site 20 do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

A presença de O, Mg e Si, além da proporção Mg/Si apresentada na tabela 10, indica também a existência de minerais do grupo das olivinas no local, que são minerais essenciais comuns em condritos ordinários, tal como o SVP. A ausência de Fe nesta área em específico, indica que a olivina presente estaria na forma de forsterita (Mg_2SiO_4). Outros minerais possíveis são os do grupo dos ortopiroxênios ($(Mg, Fe)SiO_3$), também minerais essenciais em condritos ordinários, onde novamente a ausência do Fe indica uma possível presença desse grupo provavelmente na forma do mineral enstatita ($MgSiO_3$). A existência

de Na no local também poderia indicar a presença de feldspato ($(\text{K},\text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$), mas a ausência de alumínio sugere que o sódio deva estar na forma de halite (NaCl) no meteorito.

Para o site 22, com exceção do cloreto de potássio, as possibilidades de minerais podem ser consideradas como basicamente as mesmas do site 20, visto que os dois contêm a presença dos mesmos elementos químicos, com exceção de cloro (Cl) e Na. A tabela 11 mostra a composição química elementar média do site 22.

Elemento	At%	Wt%
K	55,9	73,2
O	34,9	18,7
Si	4,3	4,0
Mg	4,9	4,0
Mg/Si	1,2	1,0

Tabela 11 – Composição química elementar média do site 22 do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

A figura 25 mostra uma região do meteorito Santa Vitória do Palmar com área igual a aproximadamente 1mm^2 . Este é o denominado site 17. Foram obtidos cinco espectros a partir desta região, conforme escrito na figura. Todos os espectros, de 33 a 37, contêm uma composição química parecida, mostrando basicamente a presença dos mesmos elementos em todos eles. A tabela 13 mostra a média dos valores de todos os espectros. Os dados de cada espectro separadamente podem ser vistos no anexo B, nas tabelas 42, 43, 44, 45 e 46.

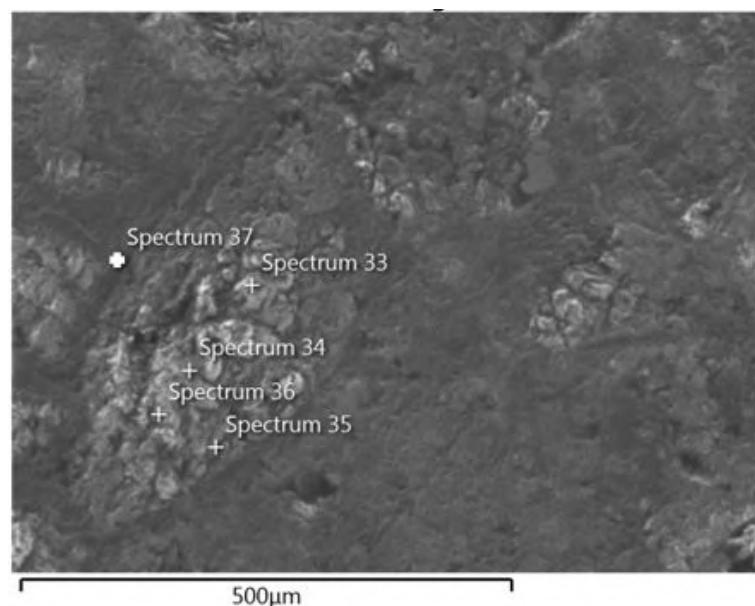


Figura 25 – Imagem SEI de uma região nomeada site 17 do meteorito Santa Vitória do Palmar, obtida através da técnica MEV. Fonte: Arquivo Pessoal.

De acordo com a tabela mencionada, os elementos mais predominantes são O, Mg, Si e Fe. A região contém também quantidades similares de Na e Ca, além de traços de Al e K. Assim como mencionado no caso anterior, referente aos sites 20 e 22, a presença de minerais do grupo dos piroxênios ($(Ca,Mg,Fe)SiO_3$) e do grupo das olivinas ($(Mg,Fe)_2SiO_4$), ambos minerais essenciais abundantes em condritos ordinários, pode ser comprovada através dos dados apresentados na tabela. Contudo, a presença de Fe desta vez sugere que os ortopiroxênios podem estar tanto na forma de enstatita ($MgSiO_3$), quanto ferrosilita ($FeSiO_3$). Assim como as olivinas podem se encontrar na forma de forsterita (Mg_2SiO_4) ou fayalita (Fe_2SiO_4).

O site 17 pode ser visto em maiores detalhes com a análise do site 16. A tabela 12, referente ao site 16, mostra os valores encontrados na região como um todo .

Elemento	At%	Wt%
O	53,7	35,0
Fe	8,0	18,1
Si	15,5	17,7
Mg	13,7	13,6
Cr	4,5	9,5
Ca	1,3	2,2
Al	1,4	1,5
Na	1,3	1,2
S	0,5	0,6
K	0,1	0,2
P	0,2	0,2
O/Si	3,5	2,0
Fe/Si	0,5	1,0
Mg/Si	0,9	0,8

Tabela 12 – Composição química elementar média do site 16 do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Enquanto a tabela 13 mostra o valor médio das porcentagens encontradas em cada um dos cinco espectros retirados do site 17.

A figura 26 mostra a presença de Al, 26e, juntamente com Na, 26f, Ca, 26g e Si, 26b. Novamente, os elementos mais abundantes na amostra são O, Si e Mg, figuras 26a, 26b e 26c, assim como na maioria dos meteoritos condríicos. Vê-se também, que estes últimos estão espalhados de maneira a se encontrar em sua maioria em pontos coincidentes com os outros elementos vistos no local.

Elemento	At%	Wt%
O	55,2	39,0
Mg	19,7	21,2
Si	15,8	19,7
Fe	6,4	15,8
Na	3,8	14,8
Ca	1,5	2,6
Al	0,3	0,4
K	0,06	0,10
O/Si	3,5	2,0
Mg/Si	1,2	1,0
Fe/Si	0,4	0,8

Tabela 13 – Composição química elementar média dos espectros retirados do site 17 do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

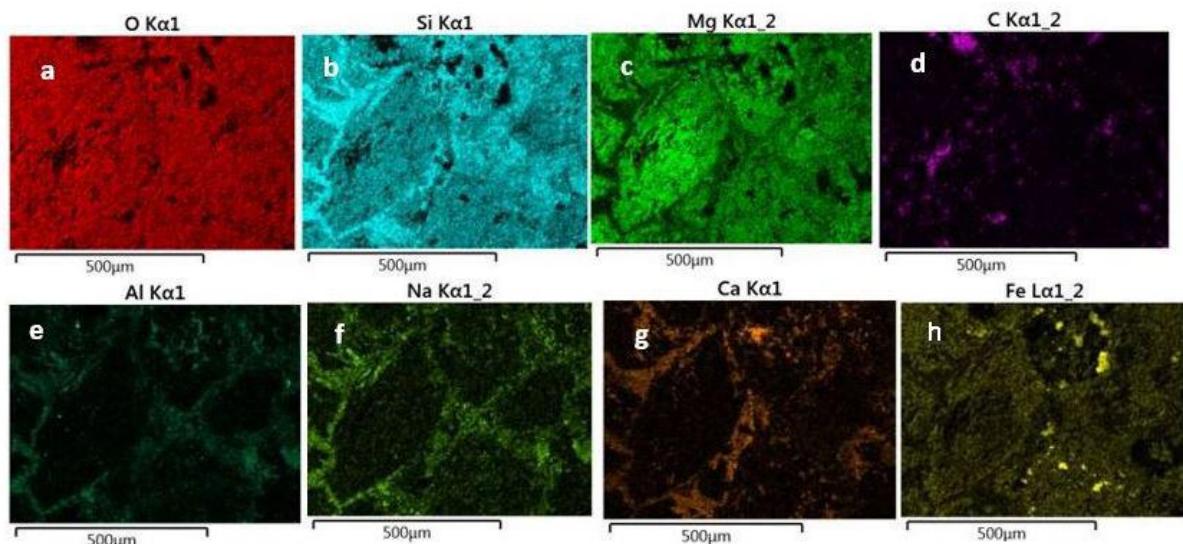


Figura 26 – Mapa composicional por EDS do site 16 do meteorito SVP, mostrando a predominância de certos elementos em cada uma delas.

Desta forma, pode-se mais uma vez presumir a presença de minerais do grupo dos piroxênios e do grupo das olivinas, estando os minerais do grupo dos clinopiroxênios ($(Ca,Mg,Fe)SiO_3$), provavelmente presentes, como augita, diopsídio, fassaïta e pigeonita. A clinoenstatita ($MgSiO_3$), um mineral com baixo teor em Ca, também pertencente ao grupo dos clinopiroxênios, pode estar presente, já que também é comum em condritos ordinários.

Outro site interessante para menção neste trabalho é o chamado site 24. A figura 27 mostra a área referente ao site em questão. Nela, é novamente possível observar as

diferentes cores referentes a elementos químicos distintos.

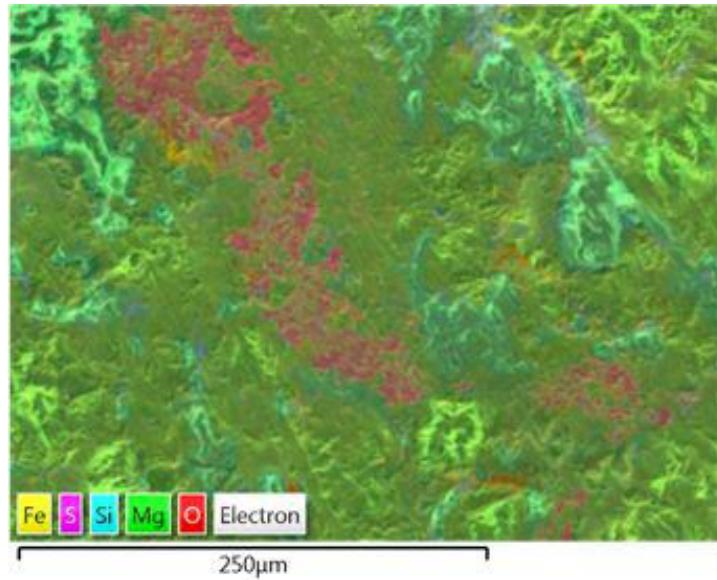


Figura 27 – Imagem EDS de uma região nomeada site 24 do meteorito Santa Vitória do Palmar, obtida através da técnica MEV.

A figura 28 realça a predominância de diferentes elementos químicos em pontos da região mostrada na figura 27. Levando-se em consideração pequenas mudanças, nota-se a presença dos mesmos elementos químicos encontrados nas regiões analisadas anteriormente, nos sites 5, 11, 12, 20, 22, 16 e 17. Alguns elementos, como titânio (Ti) e Mn são vistos no site 24, em discrepância aos mencionados, porém em quantidades extremamente pequenas, sendo considerados traços.

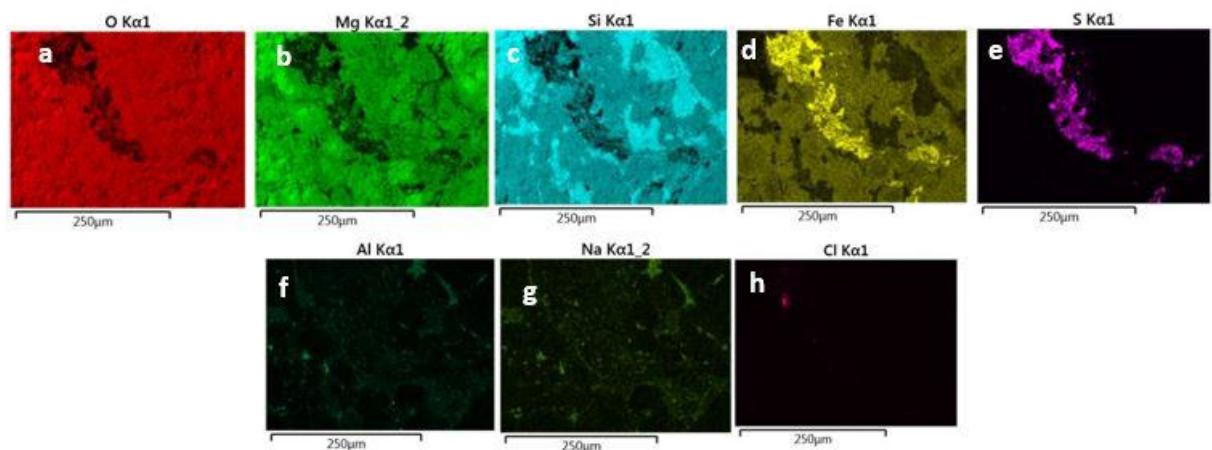


Figura 28 – Mapa composicional por EDS do site 24 do meteorito SVP, mostrando a predominância de certos elementos em cada uma delas.

Uma análise simples da imagem 28 mostra a predominância, já mencionada, de O, Mg e Si na região. É possível ver que estes estão presentes, em sua grande maioria, nos mesmos pontos uns dos outros, nas figuras 28a, 28b, e 28c. Sendo esta, uma comprovação da existência de minerais do grupo dos piroxênios (ortopiroxênios e clinopiroxênios) e do grupo das olivinas. É possível também perceber a presença de Al, Na e Cl, de maneira espalhada e em baixa concentração. Traços de K, Mn e Ti também foram encontrados. A figura 28e mostra que praticamente todo o S encontrado na região está ligado ao Fe, figura 28d. Desta maneira, pode-se assumir, assim como no site 5, a presença de troilita (FeS), um mineral acessório presente em praticamente todos os meteoritos, e na forma de bolhas ou grãos pequenos nos côndrulos os matrizess de meteoritos condíticos (NORTON; CHITWOOD, 2008).

A tabela 14 mostra algumas frações dos elementos químicos encontrados no site 24, enquanto a tabela 15 mostra a média dos elementos encontrados nesta região, obtida através de um mapa da área do site 24.

	At%	Wt%
Fe/S	4,6	8,0
O/Si	4,3	2,5
Fe/Si	0,6	1,1
Mg/Si	1,1	0,9

Tabela 14 – Frações de elementos químicos em porcentagem em peso e porcentagem atômica no site 24 do meteorito SVP.

Elemento	At%	Wt%
O	59,2	42,2
Fe	7,7	19,2
Si	13,7	17,2
Mg	14,9	16,2
S	1,7	2,4
Al	0,9	1,1
Ca	0,5	0,9
Na	0,8	0,8
Ni	0,2	0,5
Cr	0,1	0,3
Ti	0,05	0,10
K	0,05	0,10

Tabela 15 – Composição química elementar média do site 24 do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

A presença de Cr nos sites 16 (tabela 12) e 24 (tabela 14), é indicativa da presença do óxido mineral cromita ($FeCr_2O_4$), presente em diversos grupos de meteoritos. Outro elemento a ser mencionado é o C. Aparecendo em vários dos sites analisados, este é

provavelmente encontrado na forma de grafita (C) no SVP, já que é um mineral acessório comum em condritos ordinários (NORTON; CHITWOOD, 2008).

6.1.2 Cebollati

A figura 29 é referente à uma área denominada site 5 do meteorito Cebollati e mostra os mapas compostos dos elementos Si, Mg, O, K e C.

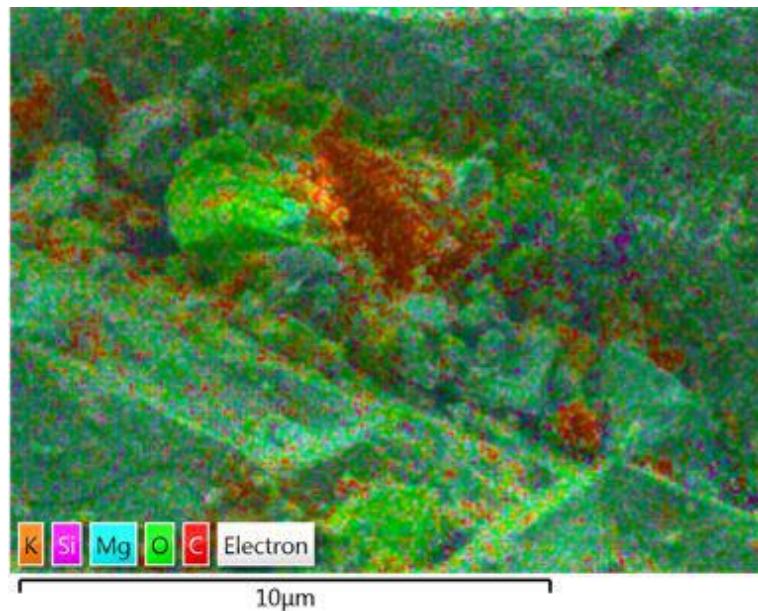


Figura 29 – Imagem EDS de uma região nomeada site 5 do meteorito Cebollati, obtida através da técnica MEV.

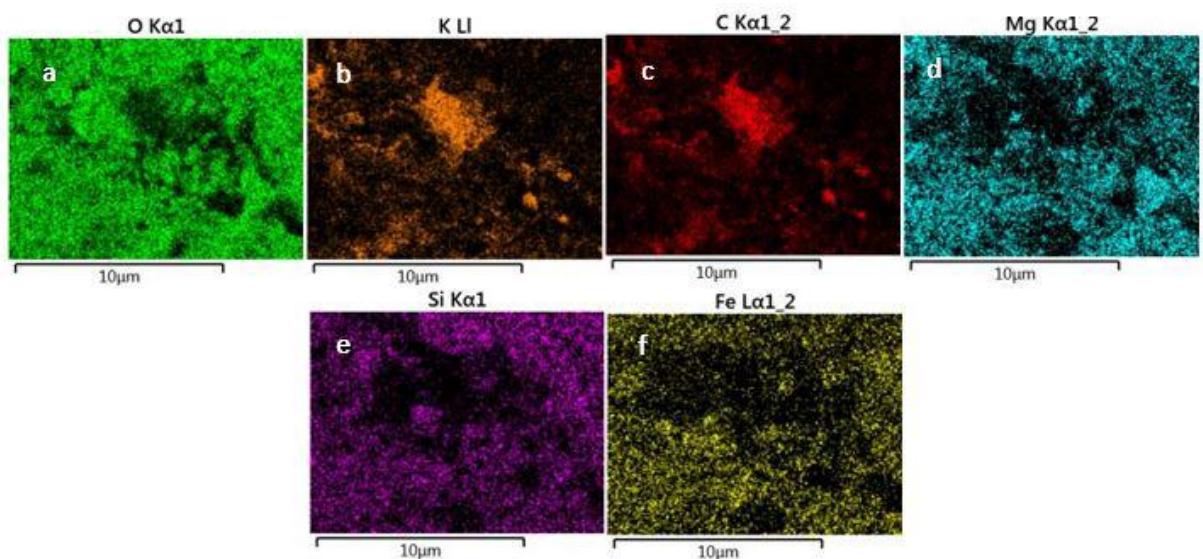


Figura 30 – Mapa composicional por EDS do site 5 do meteorito Cebollati, mostrando a predominância de certos elementos em cada uma delas.

Na figura 30 é observada uma grande quantidade de O, Si, Mg e Fe espalhados na região de maneira geral. As figuras 30b, e 30c indicam a presença de potássio e carbono nos mesmos pontos do site. Já as figuras 30d, e 30e mostram a presença de Mg e Si juntos na maioria dos pontos em que se encontram. A figura 29f indica que o Fe na região se encontra presente nos mesmos pontos que os dois últimos elementos, embora de maneira um pouco mais espalhada.

A tabela 16 mostra a média da composição química na região rica em Si no site 5 do meteorito Cebollati, enquanto a tabela 17 mostra a soma dos elementos encontrados no mapa da região. Ambas em porcentagens atômica e em peso.

	At%	Wt%
O/Si	4,4	2,5
Fe/Si	0,7	1,4
Mg/Si	0,9	0,8

Tabela 16 – Razão entre os principais elementos presentes na região rica em Si no site 5 do meteorito Cebollati.

Elemento	At%	Wt%
O	58,9	40,8
Fe	9,3	22,5
Si	13,3	16,2
Mg	12,4	13,1
Al	3,3	3,9
S	1,7	2,4
Na	1,0	1,0

Tabela 17 – Composição química elementar média do site 5 do meteorito Cebollati. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

A análise mostra a predominância dos elementos O, Mg, Si e Fe, indicando assim, a provável presença de minerais do grupo dos ortopiroxênios ($(Mg,Fe)SiO_3$), e do grupo das olivinas ($(Mg,Fe)_2SiO_4$).

A figura 31 é uma imagem de alta resolução referente ao denominado site 6 do meteorito Cebollati. Novamente, as cores distintas na figura são referentes aos diferentes elementos presentes na área em questão. Os elementos mais abundantes são Si, Mg, O e Fe. Os espectros 2 a 25 foram gerados a partir do site em questão, como mostrado na figura em preto e branco na imagem 31. Os dados de cada espectro estão apresentados no anexo B, nas tabelas 47 a 70.

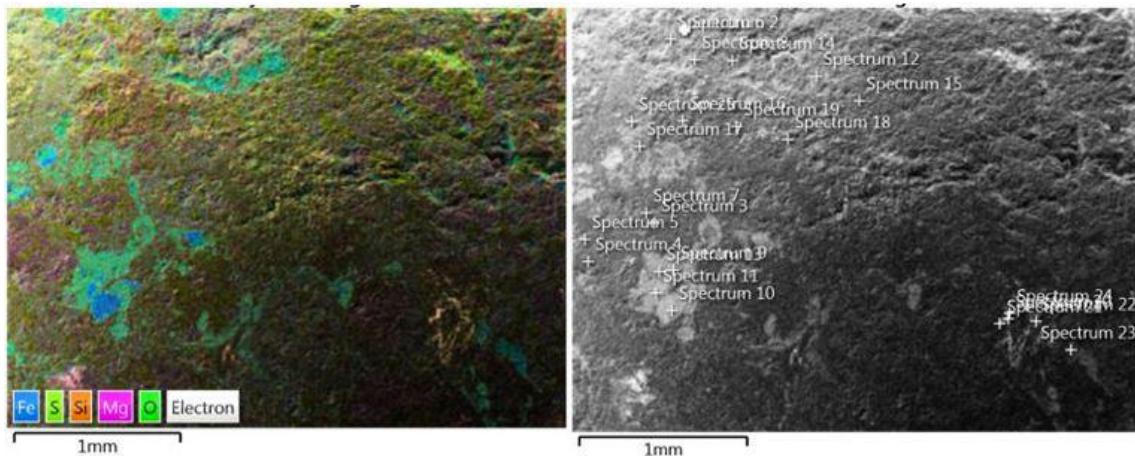


Figura 31 – Imagem EDS e imagem SEI de uma região nomeada site 6 do meteorito Cebollati, obtida através da técnica MEV.

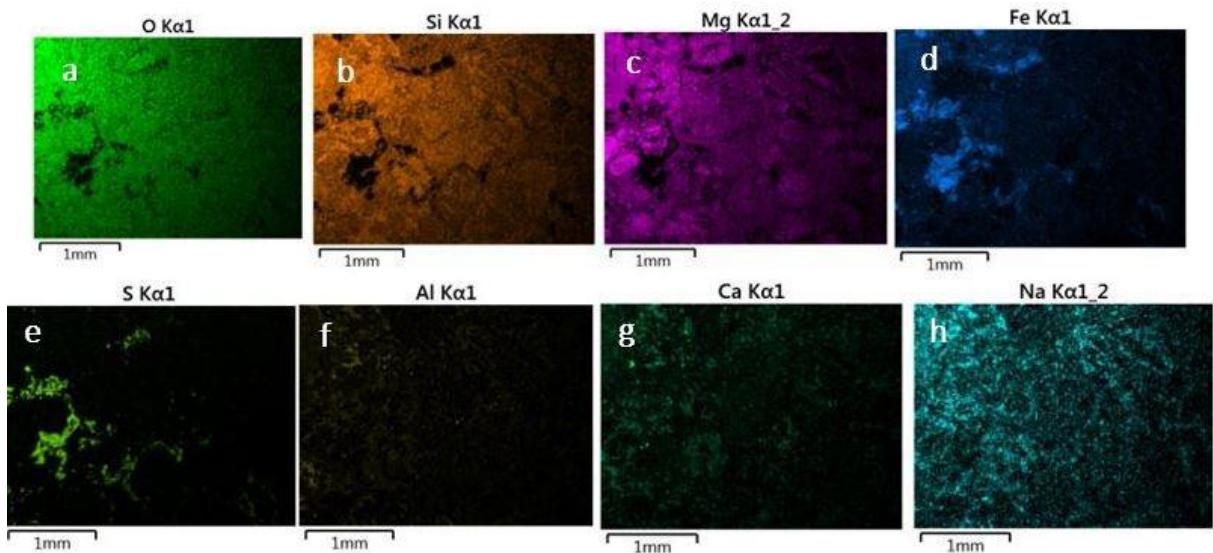


Figura 32 – Mapa composicional por EDS do site 6 do meteorito Cebollati, mostrando a predominância de certos elementos em cada uma delas.

Na figura 32, é possível perceber com detalhes os elementos químicos predominantes, e onde estes estão combinados na estrutura do meteorito. As figuras 32a, 32b e 32c sugerem que O, Si e Mg parecem estar presentes nos mesmos pontos. Enquanto isso, há uma depleção destes elementos nas regiões das figuras 32d e 32e, onde existe abundância de Fe e S. As figuras 32f, 32g e 32h, mostram que os elementos Al, Ca e Na se encontram espalhados pela região de uma maneira geral, sendo a região pobre nesses elementos. O site também contém traços de K, P e Ti.

A tabela 18 mostra a composição química elementar média do site, enfatizando que os elementos mais abundantes são, novamente O, Mg e Si. Existe também uma alta

quantidade de Fe em comparação aos outros elementos. Isto sugere a presença de minerais do grupo das olivinas ($(Mg, Fe)_2SiO_4$), como no site anterior. A presença de Ca, mesmo que baixa e espalhada, pode também ser um indicativo da presença de minerais do grupo dos clinopiroxênios ($(Ca, Mg, Fe)SiO_3$) pobres em Ca. A presença de S na mesma região em que o Fe está presente, sugere a presença de troilita (FeS). K e Al sugerem que minerais do grupo dos feldspatos ($(K, Na, Ca)(Si, Al)_4O_8$) podem ser encontrados.

Elemento	At%	Wt%
O	58,5	40,6
Fe	8,0	19,4
Si	14,4	17,6
Mg	13,6	14,4
S	1,5	2,1
Ca	0,9	1,5
Al	1,3	1,5
Na	1,0	1,0
Ni	0,3	0,7
Cr	0,2	0,4
Mn	0,1	0,3
K	0,06	0,10
Mg/Si	0,9	0,8
O/Si	4,0	2,3
Fe/Si	0,5	1,1

Tabela 18 – Composição química elementar média do site 6 do meteorito Cebollati. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

A tabela 19 mostra a composição química encontrada na área nomeada site 3 do meteorito Cebollati. Se trata de uma área rica em K e Cl, sugerindo a presença de cloreto de potássio (KCl). O local também contém traços de O e Si, que podem ou não estar relacionados às camadas abaixo do material formado por K e Cl.

Elemento	At%	Wt%
Cl	50,0	49,3
K	44,0	47,9
O	5,2	2,3
Si	0,6	0,5

Tabela 19 – Composição química na região do site 3 do meteorito Cebollati.

A figura 33 é referente aos chamados sites 2 e 3. As diferentes cores na figura 34 representam, mais uma vez, os diferentes elementos químicos presentes na região. É possível perceber a presença abundante de O e Si, enquanto os outros elementos se encontram em menores quantidades, espalhados pela área., de onde foi obtido o espectro 1.

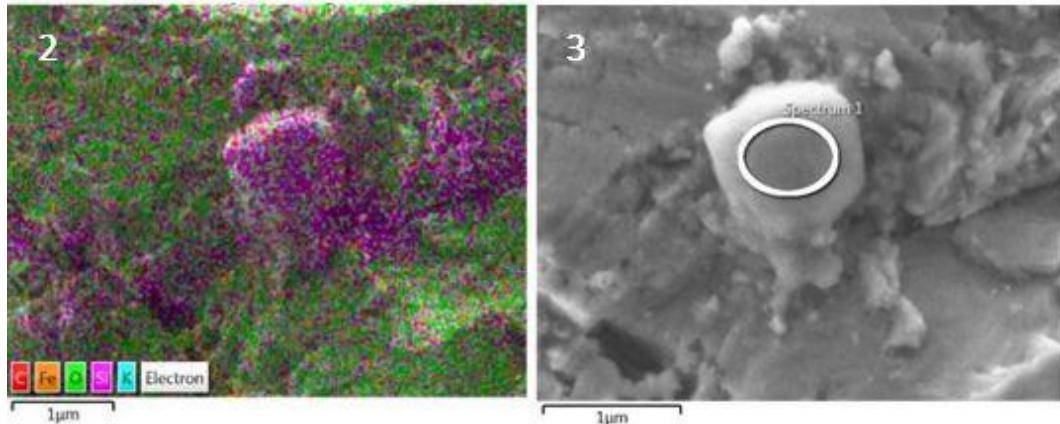


Figura 33 – Imagem EDS e imagem SEI das regiões nomeadas sites 2 e 3 do meteorito Cebollati, obtida através da técnica MEV.

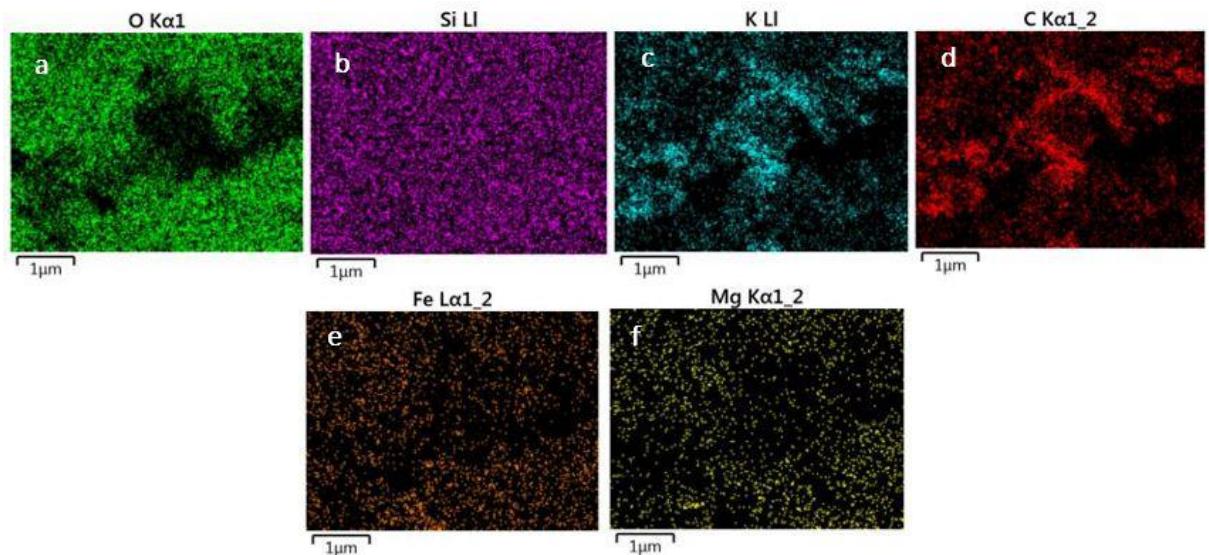


Figura 34 – Mapa composicional do site 2 do meteorito Cebollati, mostrando a predominância de certos elementos em cada uma delas.

As figuras 34c e 34d mostram que os mesmos pontos que contêm K, possuem também a presença de C, sugerindo que estes podem estar juntos na formação de compostos como carbonato de potássio (K_2CO_3), assim como ocorreu no site 5, figura 30. Nas imagens 34b, 34e e 34f é possível ver que os elementos Si, Fe e Mg estão espalhados, contudo os dois últimos parecem estar juntos basicamente nos mesmos pontos.

Outro site interessante é o chamado site 7, cujos resultados são mostrados com a média contendo C. O site chama atenção pela presença abundante de nitrogênio (N), em contraste com os sites analisados tanto do meteorito SVP, quanto do próprio Cebollati. A figura 35 mostra a região com detalhes, e a tabela 20 mostra a composição química média dos espectros 27 e 28.

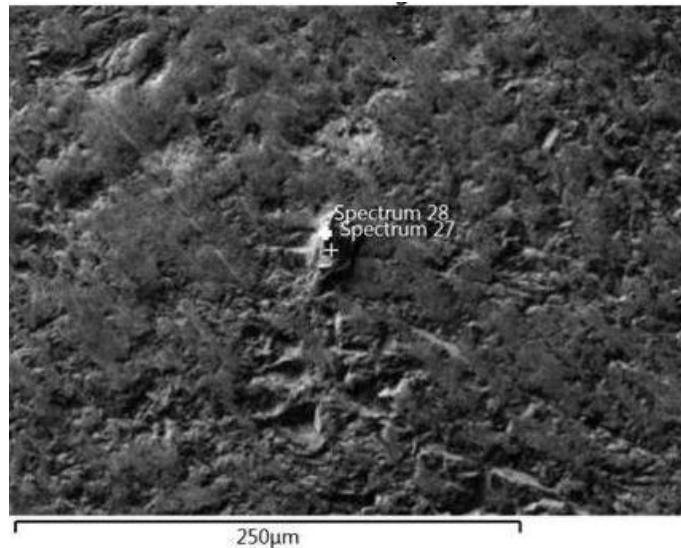


Figura 35 – Imagem SEI de uma região nomeada site 7 do meteorito Cebollati, obtida através da técnica MEV.

Elemento	At%	Wt%
C	82,3	78,9
O	9,3	11,8
N	8,4	9,3

Tabela 20 – Composição química elementar média do site 7 do meteorito Cebollati. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

A presença de carbono em tamanha abundância sugere a presença de minerais tais como, grafita (C). C e N podem também estar combinados com outros elementos encontrados em outros sites do meteorito Cebollati, tais como titânio, na formação de osbornita (TiN), que não é encontrado em rochas terrestres. Outras possibilidades são carsbergita (CrN) e, sinoita (Si_2N_2O). Embora aminoácidos e outras espécies orgânicas contendo C, O e N já tenham sido encontrados em meteoritos do tipo condritos carbonáceos, não achamos conveniente sugerí-los neste meteorito, uma vez que nunca foram observadas estas espécies em meteoritos do tipo do Cebollati.

A figura 36 é referente ao chamado site 1 do meteorito Cebollati. É possível ver que os elementos mais abundantes na região são, O, Si, Mg e Fe.

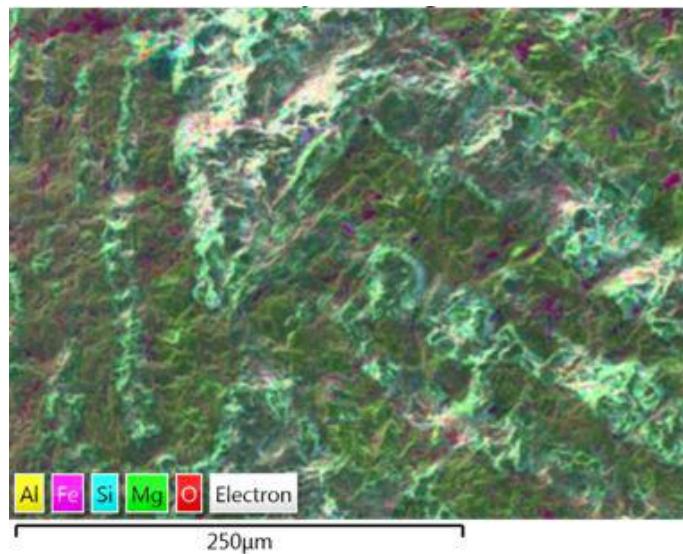


Figura 36 – Imagem EDS de uma região nomeada site 1 do meteorito Cebollati, obtida através da técnica MEV.

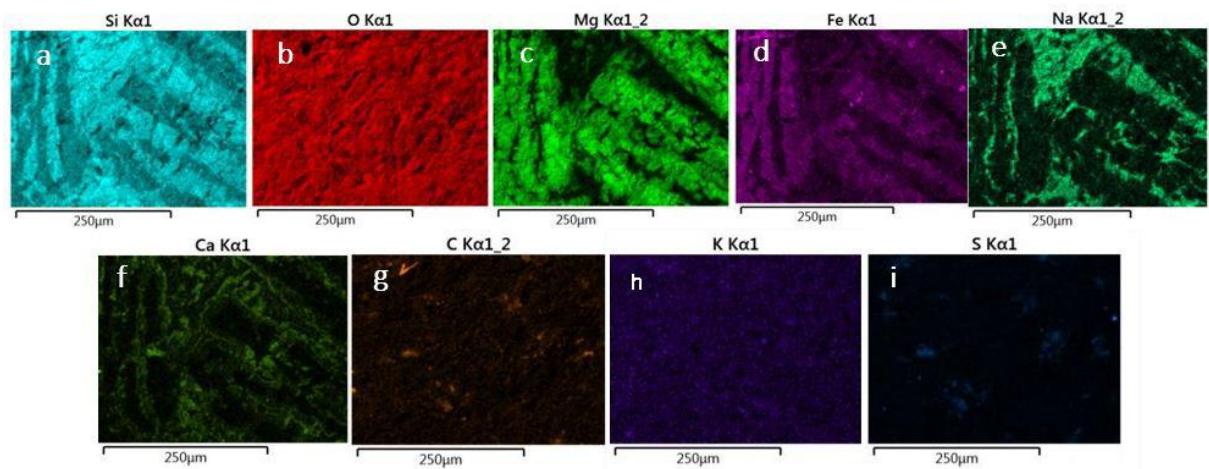


Figura 37 – Mapa Composicional por EDS do site 1 do meteorito Cebollati, mostrando a predominância de certos elementos em cada uma delas.

Na figura 37, os diferentes elementos são mostrados em maior detalhe. As figuras 37c e 37d sugerem que Mg e Fe se encontram provavelmente juntos nos mesmos pontos. Em 37a e 37e, a presença de Si está ligada aos mesmos pontos em que o Na se encontra. Outros elementos presentes, porém mais espalhados pela região são, O, Ca, C, S e K. A tabela 21 mostra a composição química média da região do site 1.

Elemento	At%	Wt%
O	62,0	45,4
Si	16,0	20,6
Fe	5,5	14,0
Mg	11,0	12,3
Ca	1,1	2,1
Na	2,0	2,1
Al	1,7	2,1
Cr	0,2	0,4
S	0,2	0,3
Mn	0,1	0,3
K	0,05	0,10
Ti	0,04	0,10
Mg/Si	0,68	0,59
Fe/Si	0,30	0,68

Tabela 21 – Composição química elementar média do site 1 do meteorito Cebollati. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Novamente, é mostrado que o meteorito contém a presença de minerais do grupo das olivinas ($(Mg, Fe)_2SiO_4$), do grupo dos ortopiroxênios ($(Mg, Fe)SiO_3$) e do grupo dos clinopiroxênios ($(Ca, Mg, Fe)SiO_3$), pobres em Ca, já que o Ca parece se combinar mais com o Na indicando se tratar de feldspatos ($(K, Na, Ca)(Si, Al)_4O_8$), e uma vez que Ca, Na, Si e O estão na mesma região. Fe e S podem também estar ligados em alguns pontos, na formação de troilita (FeS). A presença de C, mesmo que superestimada, pode sugerir a presença de minerais formados por variações deste elemento, como a grafita, ou ainda a presença de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, uma vez que este tipo de molécula já foi encontrada em meteoritos.

6.2 Resultados na Técnica PIXE

A análise elementar com a técnica PIXE fornece gráficos de energia por contagem de fótons detectados. Nossas análises com esta técnica foram realizadas com o software GUPIXWIN. A análise começa com a calibração do espectro em energia, a qual irá fornecer a energia dos picos presentes característica de cada elemento químico detectado. A seguir, ajustes matemáticos são feitos a partir da escolha dos elementos possíveis e, é gerada uma planilha que contém a concentração de cada elemento em partes por milhão (ppm), capaz de fornecer a porcentagem de cada elemento presente. A técnica PIXE fornece resultados baseados em uma área mais extensa do que a técnica MEV, já que esta última permite a análise de pequenos pontos, tais como côndrulos e cristais específicos na superfície da amostra, como visto na sessão anterior. Por esta razão, os resultados na técnica PIXE são

mostrados nesta sessão como uma maneira de corroborar aqueles obtidos com a técnica MEV. Sendo assim, as composições químicas médias são mostradas sem a presença do elemento C, assim como na sessão anterior. As tabelas contendo as composições químicas médias com carbono são mostradas no anexo C.

6.2.1 SVP

As análises do meteorito SVP com a técnica PIXE foram realizadas a partir de oito espectros, nomeados M5a, M5b, M5c, M5d, M5e, M5f, M5g e M5h. Ao contrário da técnica MEV, a técnica PIXE não permite a visão da região de maneira a detectar áreas em que dois ou mais elementos podem estar presentes ao mesmo tempo. Sendo assim, o estudo mineralógico da amostra com esta técnica é realizado de maneira mais ampla do que na técnica MEV.

A figura 38 mostra o gráfico do espectro M5a. O eixo vertical indica a contagem de fótons de raios-X detectados, enquanto o eixo horizontal indica a energia destes fótons em keV. Como mencionado no capítulo 4, cada valor de energia é associado a um elemento químico diferente. Sendo assim, alguns dos elementos presentes neste espectro são mostrados de acordo com seus respectivos picos de energia no gráfico.

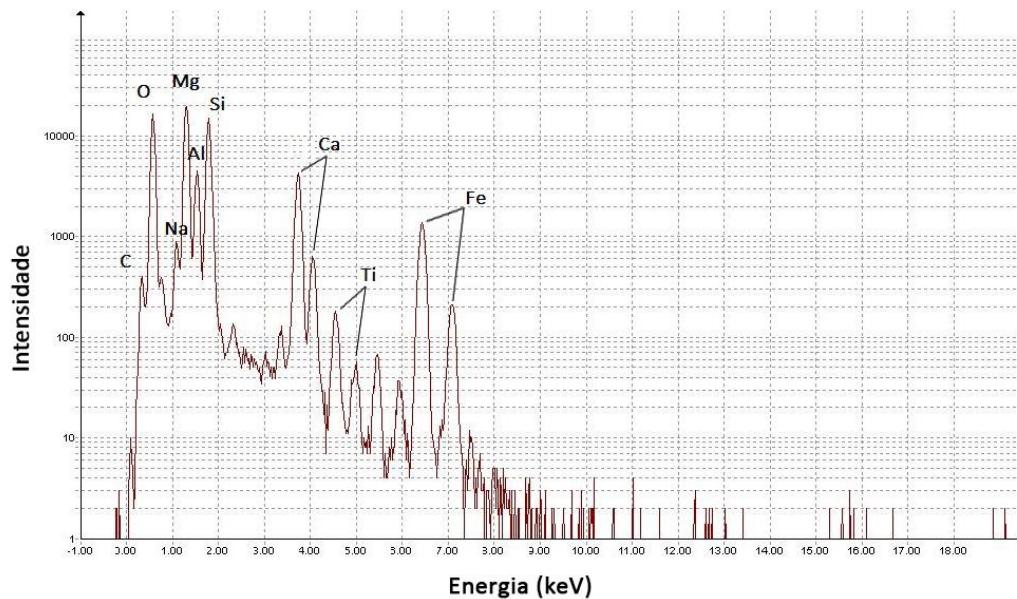


Figura 38 – Gráfico de energia por contagem de fótons do espectro nomeado M5a do meteorito SVP, através da técnica PIXE.

A tabela 22 indica os elementos encontrados na análise do espectro M5a, em porcentagens atômica e em massa.

Elemento	At%	Wt%
O	43,0	29,2
Si	19,6	23,3
Mg	21,5	22,0
Fe	3,4	8,1
Ca	4,7	8,0
Al	6,2	7,0
Na	1,1	1,1
Ti	0,20	0,47
Cr	0,09	0,20
K	0,08	0,10
Mn	0,05	0,10
S	0,07	0,09
Sc	0,05	0,09
V	0,02	0,05
Ni	0,01	0,04
Mg/Si	1,1	0,9
Fe/Si	0,2	0,3

Tabela 22 – Composição química do espectro de nome M5a do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Através dela, percebe-se a predominância de O, Si e Mg. Elementos menos presentes são Al, Ca e Fe. Enquanto outros como Ni, Mn, Cr, e K estão presentes em quantidades extremamente pequenas, de maneira a serem considerados como traços.

Enquanto elementos como Sc e V não foram encontrados nas análises com a técnica MEV, a predominância de O, Mg e Si, corroboram os resultados obtidos em diversos sites mostrados na sessão anterior, como nas tabelas 6 e 13, indicando a possível presença de minerais do grupo dos piroxênios ($(Ca,Mg,Fe)SiO_3$), mais uma vez. Exemplos disto são a enstatita ($MgSiO_3$) e a clinoenstatita ($MgSiO_3$), muito comuns em condritos ordinários, além do mineral hiperstena ($(Mg, Fe)SiO_3$), também da série de ortopiroxênios e comum em meteoritos condritos ordinários do tipo L, assim como o SVP. Além disso, a presença de minerais do grupo das olivinas ($(Mg, Fe)_2SiO_4$) é também extremamente provável, já que estes são comuns em todos os tipos de condritos e alguns acondritos.

A figura 39 é referente ao espectro M5b. Nela, é possível perceber contagens parecidas com as da figura 38. Novamente, vê-se a predominância dos elementos O, Mg e Si. Alguns picos pouco intensos são aqueles referentes aos elementos Cr, V e Ti.

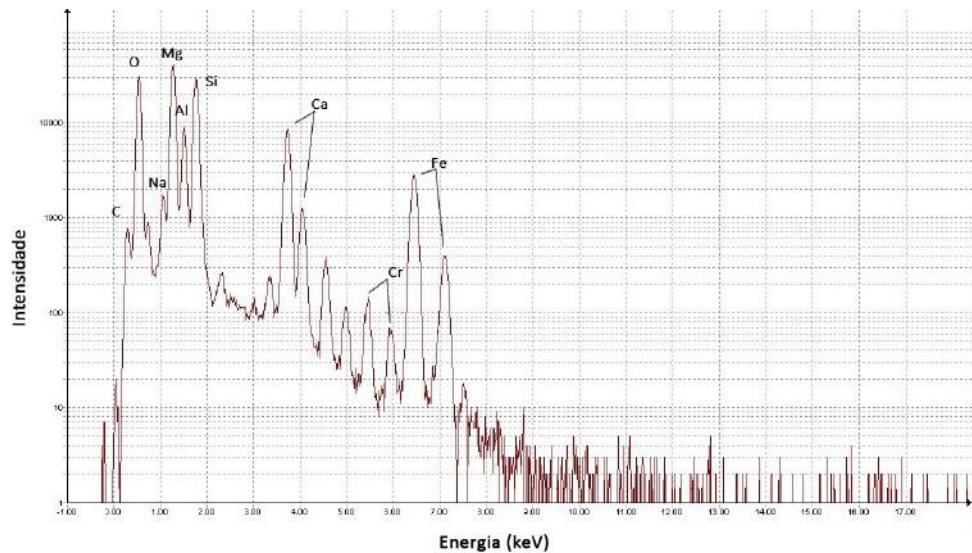


Figura 39 – Gráfico de energia por contagem de fótons do espectro nomeado M5b do meteorito SVP, na técnica PIXE.

A composição química do espectro M5b é mostrada na tabela 23, apresentando valores extremamente similares aos do espectro M5a.

Elemento	At%	Wt%
O	43,5	29,7
Si	19,3	23,1
Mg	21,3	22,1
Fe	3,3	7,9
Ca	4,6	7,8
Al	6,2	7,1
Na	1,2	1,2
Ti	0,2	0,5
Cr	0,09	0,20
Mn	0,05	0,10
K	0,08	0,10
Sc	0,05	0,09
S	0,06	0,09
V	0,02	0,05
Ni	0,02	0,04
Mg/Si	1,1	1,0
Fe/Si	0,2	0,3

Tabela 23 – Composição química do espectro de nome M5b do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Os resultados novamente corroboram com a provável presença de minerais comuns em condritos ordinários do grupo dos piroxênios, como a enstatita, clinoenstatita e

iperstena, mencionados anteriormente. Além da provável presença de minerais do grupo das olivinas.

Na figura 40, se encontram os gráficos gerados pela técnica PIXE dos espectros do SVP chamados M5c, M5e e M5g, respectivamente. É possível observar que novamente, em todos os gráficos, os elementos mais abundantes são O, Mg e Si, como esperado em meteoritos deste tipo.

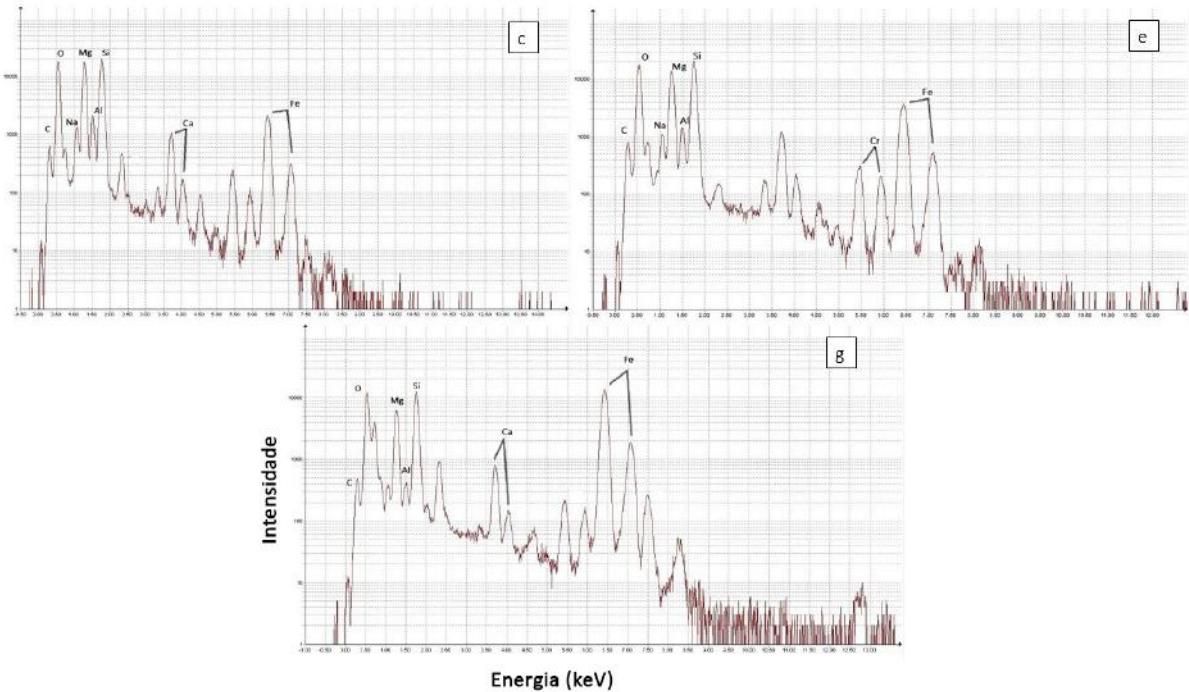


Figura 40 – Gráficos de energia por contagem de fótons dos espectros nomeados M5c, M5e e, M5g do meteorito SVP, na técnica PIXE.

A tabela 24 mostra a composição química das diferentes regiões obtidas a partir dos espectros restantes utilizados nas análises durante este trabalho, M5d, M5f e M5h. Nela, nota-se a presença de todos os elementos contidos nos outros espectros vistos anteriormente, com exceção do cobre (Cu). O cobre é um elemento químico comumente encontrado em pequenas quantidades em condritos ordinários, como o SVP, e em meteoritos metálicos. Pequenas quantidades também são encontradas em alguns condritos carbonáceos do grupo CV.

Além dos minerais gerados pelos elementos mais predominantes (O, Mg e Si), é possível estimar a presença de outros, provenientes de elementos claramente existentes no meteorito, que foram vistos tanto na sessão anterior, referente à técnica MEV, quanto agora, utilizando-se a técnica PIXE. Alguns exemplos são a presença de Al, C, Ca e Fe.

Elemento	At% (M5d)	Wt% (M5d)	At% (M5f)	Wt% (M5f)	At% (M5h)	Wt% (M5h)
O	45,0	30,7	43,4	27,4	43,2	27,4
Si	23,8	28,5	22,1	24,4	20,7	23,0
Fe	4,9	11,6	11,1	24,3	10,2	22,5
Mg	19,0	19,7	18	17,2	19,7	19,0
Al	3,0	3,4	1,8	1,9	2	2,2
Ca	1,1	1,9	1,1	1,7	1,2	1,9
Na	1,9	1,9	1,6	1,4	1,8	1,6
Mn	0,1	0,3	0,3	0,7	0,4	0,9
Cr	0,3	0,8	0,3	0,7	0,4	0,8
K	0,08	0,10	0,09	0,10	0,20	0,30
Ni	0,04	0,10	0,02	0,04	0,10	0,30
Ti	0,09	0,20	0,05	0,10	0,06	0,10
S	0,60	0,80	0,10	0,10	0,06	0,08
Cu	0,01	0,03	0,05	0,10	0,02	0,05
Sc	0,02	0,04	0,02	0,03	0,01	0,02
V	0,004	0,009	0,006	0,010	0,004	0,008
Mg/Si	0,80	0,69	0,81	0,70	0,95	0,83
Fe/Si	0,20	0,41	0,50	0,99	0,49	0,98

Tabela 24 – Composição química dos espectros de nomes M5d, M5f e, M5h do meteorito SVP. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

A existência de Ca e Al sugere a presença de anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) um mineral acessório comum em condritos. Outra possibilidade é a presença de maskelinita ($(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$), um material vítreo encontrado em meteoritos condritos ordinários. O vidro, apesar de não ser considerado um mineral, é comum em meteoritos condrílicos e acondrílicos. Este pode se cristalizar quando aquecido e resfriado de maneira lenta. Minerais como a maskelinita podem se transformar em vidro devido a impactos de alta pressão (NORTON; CHITWOOD, 2008).

A presença de C na técnica PIXE, ao contrário da técnica MEV, não é superestimada, porém, todas as médias apresentadas nesta sessão não contam com a presença deste elemento, como forma de melhorar a comparação com os resultados obtidas na técnica PIXE. Os dados das composições químicas médias contendo C são vistos no anexo C. O carbono costuma aparecer comumente como mineral acessório na forma de grafita (C) em meteoritos metálicos, condritos ordinários e acondritos da classe ureilitos. Sendo portanto, uma possibilidade de material presente no SVP.

A existência de Fe no meteorito também é de grande importância. Por não ser um meteorito metálico, este não é um dos elementos de maior predominância. Contudo, pode estar presente juntamente com C e Ni na formação de cohenita ($(\text{Fe,Ni})_3\text{C}$), um carboneto encontrado principalmente como mineral acessório em meteoritos metálicos,

porém também visto como um mineral não principal em condritos ordinários com tipo petrológico 3, como o SVP. Quando junto com O, o Fe pode ser visto na forma de magnetita (Fe_3O_4), um mineral magnético e opaco comumente encontrado na crosta de fusão de meteoritos rochosos e visto em pequenas quantidades em condritos ordinários. Quando visto juntamente com Cr e O, pode estar na forma de cromita ($FeCr_2O_4$), um óxido encontrado em diversos grupos de meteorito, porém mais comum em condritos ordinários (NORTON; CHITWOOD, 2008).

O anexo C mostra as tabelas contendo a composição química das diferentes regiões do meteorito obtida a partir dos espectros PIXE M5c, M5e e M5g, não mostrados nesta sessão. Todos os espectros contêm a presença de C, além das porcentagens atômica e em massa dos elementos presentes na amostra estudada do meteorito.

6.2.2 Cebollati

As análises do meteorito Cebollati com a técnica PIXE foram realizadas a partir de seis espectros, nomeados M4a, M4b, M4c, M4d, M4e e M4f. A figura 41 mostra o gráfico do espectro M4a. Conforme dito na sessão anterior, o eixo vertical indica a contagem de fótons de raios-X detectados, enquanto o eixo horizontal indica a energia destes fótons em keV. Como mencionado no capítulo 5, cada valor de energia é associado a um elemento químico diferente. Alguns dos elementos presentes neste espectro estão indicados no gráfico, de acordo com seus respectivos picos de energia.

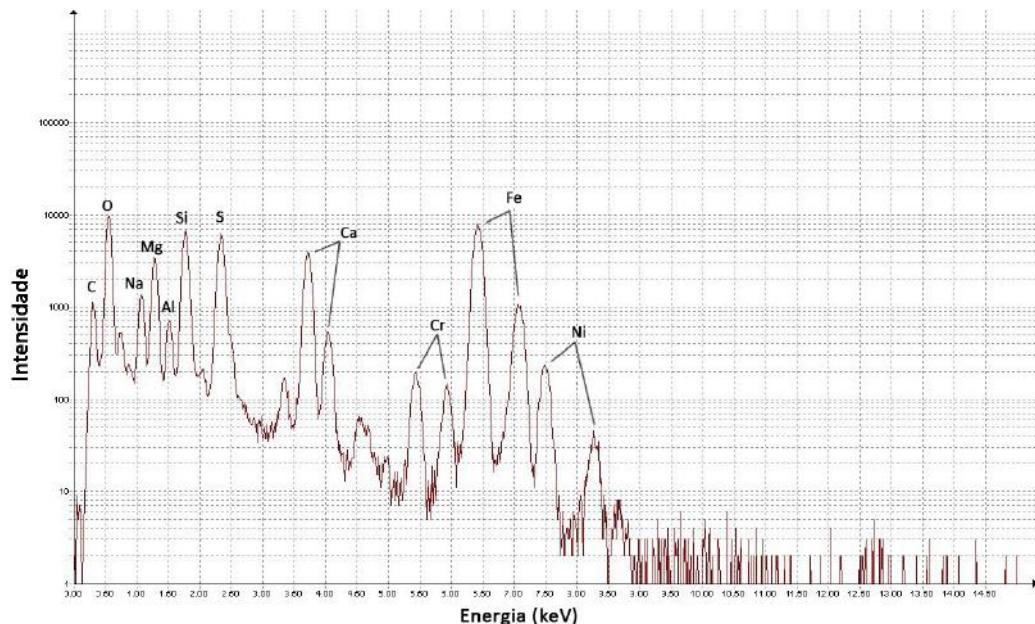


Figura 41 – Gráfico de energia por contagem de fótons do espectro nomeado M4a do meteorito Cebollati, na técnica PIXE.

Pela tabela 25 referente à composição química dos espectros M4a e M4b, é possível

perceber que, assim como no SVP, os elementos O, Mg e Si estão entre os mais abundantes. Contudo, a quantidade de C e Fe é mais elevada do que aquela encontrada, em média, nos espectros do SVP. Outros elementos novamente encontrados, são: Na, Al, S, K, Ca, Cr, Mn e Ni, além de traços de Ti e Cl, que também foram observados em alguns dos espectros do Cebollati obtidos utilizando-se a técnica MEV, mostrados na sessão anterior.

Elemento	At% (M4a)	Wt% (M4a)	At% (M4b)	Wt% (M4b)
Fe	24,9	43,5	15,9	32,5
O	36,2	18,1	41,5	24,3
Si	10,4	9,2	21,1	21,6
Mg	6,8	5,2	13,8	12,2
Ca	5,6	7,0	2,0	2,9
Al	0,9	0,8	2,0	2,0
Na	3,5	2,5	2,1	1,7
Cr	0,4	0,6	0,4	0,7
Mn	0,3	0,5	0,3	0,6
Ni	1,6	3,0	0,3	0,6
S	9,0	9,0	0,4	0,5
Cl	0,1	0,1	0,1	0,1
K	0,20	0,20	0,09	0,10
Ti	0,09	0,10	0,09	0,1
Mg/Si	0,6	0,6	0,7	0,6
Fe/Si	2,4	4,7	0,75	1,5

Tabela 25 – Composição química dos espectros de nomes M4a e M4b do meteorito Cebollati. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Minerais do grupo dos piroxênios estão provavelmente presentes novamente, como os clinopiroxênios. O grupo inclui a augita ($Mg(Fe,Ca)Si_2O_8$), um mineral rico em Ca encontrado em alguns acondritos, e em inclusões refratárias de condritos carbonáceos, a diopsida ($CaMgSi_2O_6$), encontrada em condritos da classe enstatita e em quantidades pequenas de inclusões refratárias em condritos carbonáceos do grupo CM e, por fim, a clinoenstatita ($MgSiO_3$), comum em condritos ordinários e vista nas análises do SVP (NORTON; CHITWOOD, 2008).

Outras análises mostram que a presença de traços de Cl foram detectados somente no Cebollati, enquanto traços de Cu foram somente detectados SVP. Isto ocorreu tanto no estudo com a técnica PIXE, quanto naquele com a técnica MEV. Portanto, a presença de minerais como o cloreto de potássio (KCl) também é uma possibilidade no Cebollati. Além disto, o Ca se encontra no Cebollati em proporções parecidas com àquelas do Mg, e também em maior quantidade do que a encontrada no SVP. Isto pode sugerir a presença de minerais não mencionados contendo este elemento no grupo dos piroxênios.

Os minerais do grupo das olivinas ($(Mg, Fe)_2SiO_4$) também possuem grande possibilidade de existência no Cebollati, devido à quantidade de O, Mg e Si, estando de acordo com o observado no SVP. As olivinas ricas em Mg são mais encontradas em meteoritos do que aquelas ricas em Fe. Como mencionado anteriormente, estes minerais são essenciais em todos os condritos, com exceção da classe enstatita, além de serem observados também em alguns acondritos. Exemplos de olivinas são a forsterita (Mg_2SiO_4), rica em Mg, e a fayalita (Fe_2SiO_4), cuja quantidade é utilizada para a determinação do tipo petrológico de condritos ordinários (NORTON; CHITWOOD, 2008).

A tabela 26 mostra a composição química de duas outras regiões analisadas do Cebollati, M4c e, M4d. Os elementos C, O, Mg, Fe e, Si, estão novamente entre os mais abundantes. As porcentagens encontradas são equivalentes àquelas vistas na tabela 25. Corroborando, portanto, a possível presença de minerais do grupo de ortopiroxênios e do grupo das olivinas.

Elemento	At% (M4c)	Wt% (M4c)	At% (M4d)	Wt% (M4d)
Fe	18,7	35,5	18,7	35,6
O	40,3	22,0	40,3	21,9
Si	14,3	13,7	14,3	13,7
Ca	7,2	9,8	7,2	9,8
Mg	8,6	7,1	8,6	7,1
S	5,8	6,3	5,8	6,3
Na	2,4	1,8	2,3	1,8
Al	1,3	1,2	1,3	1,2
Cr	0,5	0,8	0,5	0,8
Ni	0,4	0,7	0,3	0,7
Mn	0,3	0,5	0,3	0,5
K	0,2	0,3	0,2	0,3
Cl	0,09	0,10	0,09	0,10
Ti	0,09	0,10	0,09	0,10
Fe/Si	1,3	2,6	1,3	2,6
Fe/S	3,2	5,6	3,2	5,6

Tabela 26 – Composição química dos espectros de nomes M4c e M4d do meteorito Cebollati.

At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Através de uma análise simples, é possível notar que a quantidade de S e Fe no Cebollati parece ser maior do que aquela vista no SVP. Outras possibilidades de minerais, baseadas nas proporções Fe/S, Fe/Si e, Mg/Si contidas nas tabelas 25 e, 26, são o carbeto de silício (SiC), encontrado em condritos carbonáceos da classe CM e em outros grupos de condritos, a hiperstena ($(Mg, Fe)SiO_3$), já mencionada, e comum em condritos ordinários do grupo L e a enstatita ($MgSiO_3$), um mineral essencial nos condritos das classes ordinários, carbonáceos e rumurutitos. A ringwoodita ($(Mg, Fe)_2SiO_4$), também

pode ser uma possibilidade, sendo uma olivina encontrada pela primeira vez em 1969 em um meteorito condríctico ordinário ([NORTON; CHITWOOD, 2008](#)).

A tabela contendo a composição química dos espectros M4e e M4f se encontra no anexo D, juntamente com as tabelas de composição química média mostradas durante esta sessão. Todas as tabelas no anexo contêm a presença de C, além das porcentagens atômica e em massa dos elementos químicos.

6.3 Comparações entre SVP e Cebollati

Nesta parte do trabalho, serão apresentadas algumas comparações entre as composições químicas do SVP e do Cebollati em ambas as técnicas utilizadas, MEV e PIXE. Estas comparações serão feitas na forma de gráficos e tabelas devidamente separados em suas respectivas técnicas de análise.

6.3.1 MEV

A tabela [27](#) mostra a composição química média em porcentagem por massa de todos os mapas, ou sites, analisados dos meteoritos SVP e Cebollati utilizando a técnica MEV. Nela, é possível ver que os elementos encontrados em maior abundância no Cebollati, são: O, Mg, Si e Fe, assim como no SVP. A média da composição química dos espectros analisados pode ser vista na tabela [88](#), no anexo E.

Elemento	Média (Wt%) SVP	Média (Wt%) Cebollati
O	35,9	42,3
Fe	19,8	18,7
Si	14,9	14,6
Mg	12,7	12,3
Cr	2,1	0,1
S	1,5	1,3
Al	1,4	2,1
Ca	1,3	0,7
Na	0,9	2,2
Ni	0,13	0,15
K	0,1	5,3
Mn	0,06	0,13
Ti	0,01	0,04
Mg/Si	0,76	0,84
Fe/Si	1,32	1,28
Al/Si	0,094	0,14

Tabela 27 – Composição química média, sem C, dos principais elementos encontrados em todos os mapas analisados dos meteoritos SVP e Cebollati na técnica MEV. Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

As proporções elementares sugerem que tanto o meteorito SVP, como descrito na literatura, quanto o Cebollati, são do grupo L da classe de meteoritos condríticos ordinários. A figura 42 mostra a comparação da tabela 27 em forma de gráfico.

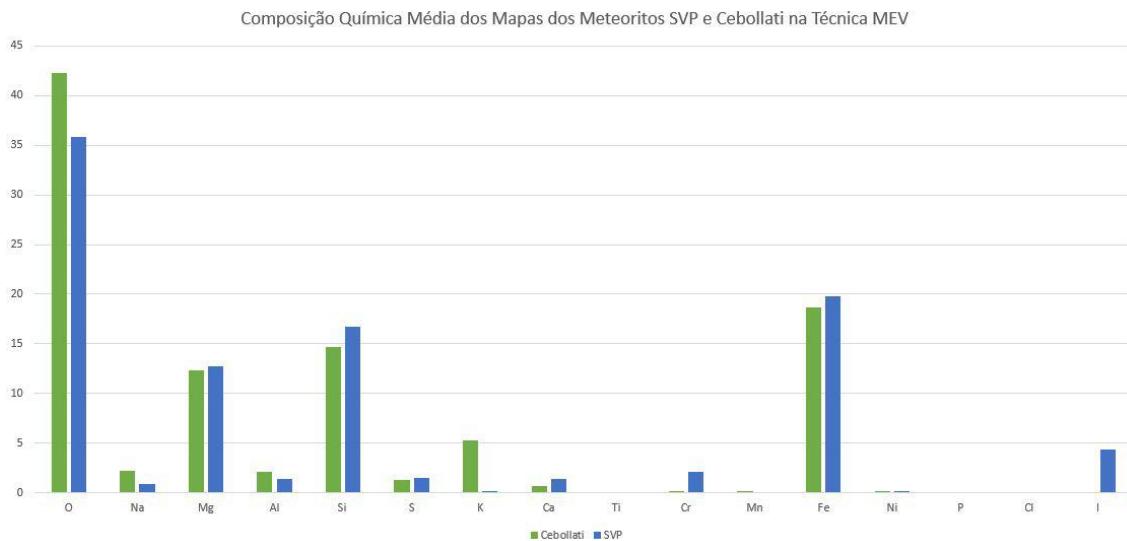


Figura 42 – Composição química média, sem C, de todos os espectros analisados dos meteoritos SVP e Cebollati na técnica MEV.

6.3.2 PIXE

A tabela 28 mostra as frações dos elementos Fe, Mg, Si e Al contidos nos meteoritos analisados, em porcentagem de peso.

	Média (Wt%) SVP	Média (Wt%) Cebollati
Mg/Si	0,74	0,62
Fe/Si	0,8	2,4
Al/Si	0,14	0,07

Tabela 28 – Frações de elementos da composição química média de todos os espectros analisados dos meteoritos SVP e Cebollati na técnica PIXE. Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

A tabela 29 mostra a composição química média de todos os espectros analisados dos meteoritos SVP e Cebollati, na técnica PIXE. Nela, vemos diversas características também citadas na sessões anteriores. O meteorito Cebollati contém maior porcentagem de Na, S, Ca, Cr, Fe e Ni. Além disto, contém Cl, que não é visto no meteorito SVP. No SVP, os elementos de maior porcentagem são, O, Mg, Al e Si. O meteorito também contém traços de Sc, V e Cu, que não existem no Cebollati.

Por fim, o gráfico mostrado na figura 43 foi gerado através das composições químicas médias mostradas na tabela 29, servindo de auxílio para o estudo.

Elemento	Média (Wt%) SVP	Média (Wt%) Cebollati
O	26,8	24,0
Si	24,4	14,6
Fe	20,2	34,7
Mg	18,1	9,1
Al	3,4	1,1
Ca	3,3	6,7
Na	1,4	1,8
Cr	0,6	0,7
S	0,45	5,30
Mn	0,43	0,48
Ni	0,4	1,0
Ti	0,2	0,1
K	0,15	0,16
Sc	0,04	0
Cu	0,03	0
V	0,02	0
Cl	0	0,1
Mg/Si	0,74	0,62
Fe/Si	0,82	2,37
Al/Si	0,14	0,075

Tabela 29 – Composição química média, sem C, de todos os espectros analisados dos meteoritos SVP e Cebollati na técnica PIXE. Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

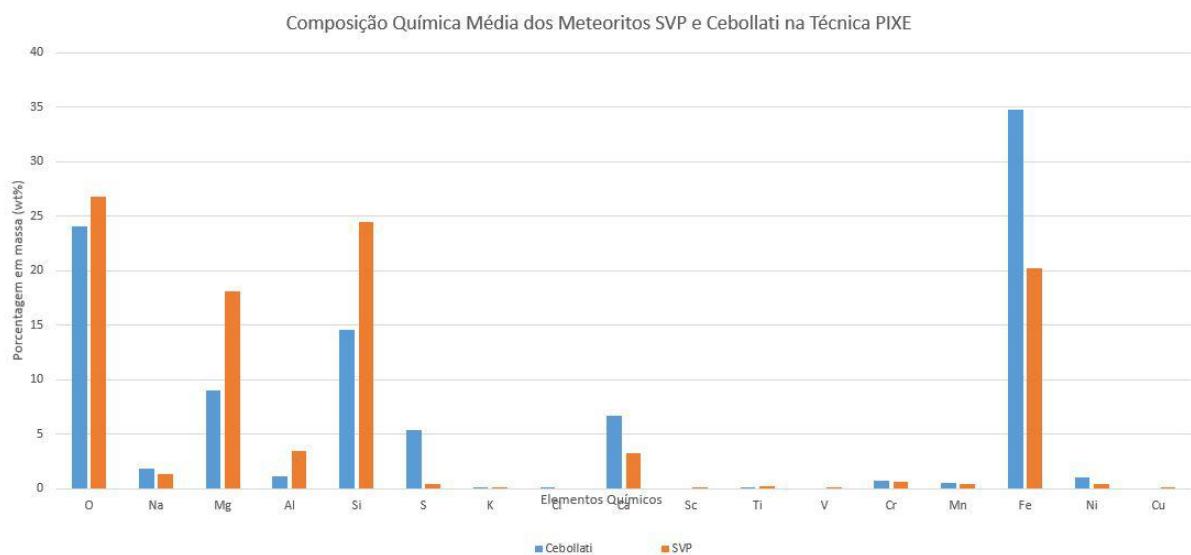


Figura 43 – Composição química média, sem C, de todos os espectros analisados dos meteoritos SVP e Cebollati na técnica PIXE.

7 Discussão e Perspectivas Futuras

Neste trabalho foi realizada uma análise elementar e mineralógica do meteorito brasileiro Santa Vitória do Palmar, e do uruguai Cebollati. Devido ao histórico dos dois meteoritos, o objetivo principal do trabalho foi caracterizar e possivelmente classificar o meteorito Cebollati com base no estudo do meteorito Santa Vitória do Palmar, classificado como um condrito ordinário L3.

A análise foi realizada utilizando as técnicas de análise de superfície PIXE (Emissão de Raios-X Induzida por Partículas) e MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura).

Ao todo, foi constatada a presença de aproximadamente 23 elementos distintos, levando em consideração as duas técnicas. Sendo eles, carbono, oxigênio, sódio, magnésio, alumínio, silício, enxofre, potássio, cálcio, escândio, titânio, vanádio, cromo, manganês, ferro, níquel, fósforo, cobre, flúor, cloro, nitrogênio, estanho e iodo. Devido à taxa de erro associada às medidas tanto na PIXE quanto na MEV, alguns destes elementos são, provavelmente, provenientes de uma superestimação da respectiva contagem ou contaminação da amostra por parte do ambiente circundante.



Figura 44 – Imagem do meteorito Cebollati mostrando as delimitações de côndrulos presentes na matriz. Fonte: Arquivo de Maria Elizabeth Zucolotto.

A análise mineralógica do meteorito Cebollati revela uma estrutura similar entre este e o meteorito Santa Vitória do Palmar. Nas análises com ambas as técnicas utilizadas, viu-se que ambos os meteoritos apresentam uma composição elementar similar, consequentemente

apresentando também uma estrutura mineralógica semelhante, composta principalmente de minerais do grupo dos piroxênios e do grupo das olivinas, além de não conter minerais hidratados. Na figura 44, também é possível detectar a existência de côndrulos na matriz do Cebollati, que apresentam a mesma estrutura alongada vista nos côndrulos do SVP, como mostrado na figura 45. Sendo assim, considerando estas informações e o histórico dos dois corpos, pode-se atestar que o meteorito Cebollati se trata de um meteorito rochoso da classe condritos ordinários, assim como o SVP.



Figura 45 – Imagem do meteorito Santa Vitória do Palmar mostrando as delimitações de côndrulos alongados presentes na matriz. Fonte: Arquivo de Maria Elizabeth Zucolotto.

A tabela 30 mostra os dados encontrados na literatura referentes às porcentagens de cada grupo pertencente à classe de condritos ordinários. Estas informações foram utilizadas como base para comparação dos dados obtidos durante o estudo neste trabalho, como parte do processo de análise elementar para aprofundar o conhecimento sobre o meteorito, e tentativa de uma possível classificação deste. As colunas referentes a Fa e Fs dizem respeito aos conteúdos de faialita ($\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$) e forsterita ($\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO}+\text{CaO})$). De acordo com (NORTON; CHITWOOD, 2008), a porcentagem de metal é correspondente à liga FeNi.

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

Tabela 30 – Classes e grupos de condritos ordinários equilibrados e suas respectivas porcentagens. O conteúdo de Fa da olivina e Fs dos piroxênios variam de maneira extrema em condritos não equilibrados. Fonte: Adaptação de (NORTON; CHITWOOD, 2008).

Os condritos ordinários de tipo petrológico 3, não equilibrados, possuem um grande alcance em relação aos valores de Fa e Fs presentes. De acordo com os resultados obtidos pela astrônoma Maria Elizabeth Zucolotto, o conteúdo de Fa e Fs no SVP varia entre 0,5 e 35,2 e 0,5 e 31,6, respectivamente. A tabela 31 mostra os resultados obtidos para o meteorito SVP neste estudo. É possível notar que, ao compararmos com a tabela 30, as porcentagens referentes ao grupo L, levando em consideração seu já conhecido tipo petrológico, são condizentes, em sua maioria, com a literatura. Os dados encontrados com a composição química média dos espectros não foi utilizada na conclusão, já que estes são referentes à áreas pontuais da amostra, não representando assim, o meteorito como um todo, e podendo ser muito discrepantes em relação à literatura. Os dados das porcentagens dos espectros se encontram no anexo G.

	Fe Total (wt%)	Metal (wt%)	Fa (mol%)	Fs (mol%)
SVP PIXE	20,2	0,3	2,8	2,5
SVP MEV	19,8	8,3	27,1	25,9

Tabela 31 – Porcentagens da composição química média dos meteoritos Santa Vitória do Palmar e Cebollati, na técnica PIXE e nos mapas obtidos na técnica MEV.

Na tabela 32, mostra-se as porcentagens obtidas para o meteorito Cebollati na técnica PIXE, e nos mapas obtidos com a técnica MEV. Comparando-a com a tabela 30, percebe-se que a quantidade de Fe total varia consideravelmente entre a técnica PIXE, que possui um valor similar à quantidade observada no grupo H dos condritos ordinários, e a técnica MEV, que possui um resultado semelhante ao encontrado em condritos ordinários do grupo LL. Em relação à quantidade de metal, os resultados são ambos condizentes com os valores observados para o grupo L.

	Fe Total (wt%)	Metal (wt%)	Fa (mol%)	Fs (mol%)
Cebollati PIXE	34,7	4,6	40,1	31,6
Cebollati MEV	18,7	10	30,5	29,7

Tabela 32 – Porcentagens da composição química média do meteorito Cebollati, na técnica PIXE e nos mapas obtidos na técnica MEV.

Na técnica PIXE o resultado referente a Fa é maior do que o esperado, e portanto, discrepante com o observado na literatura para condritos equilibrados. Porém, na técnica MEV, a porcentagem está dentro do alcance do grupo LL. Por fim, ao analisar a porcentagem de Fs, percebe-se que, na técnica PIXE, esta condiz com aquelas referentes ao grupo LL, enquanto na técnica MEV o valor está de acordo com aqueles do grupo L.

A figura 46 mostra imagens dos aros ricos em sulfetos e metais que envolvem muitos dos côndrulos observados nos meteoritos SVP e Cebollati. A presença destes aros é uma característica associada a condritos ordinários de tipo petrológico baixo. É possível

perceber também, a estrutura alongada dos côndrulos, mencionada anteriormente em ambos.

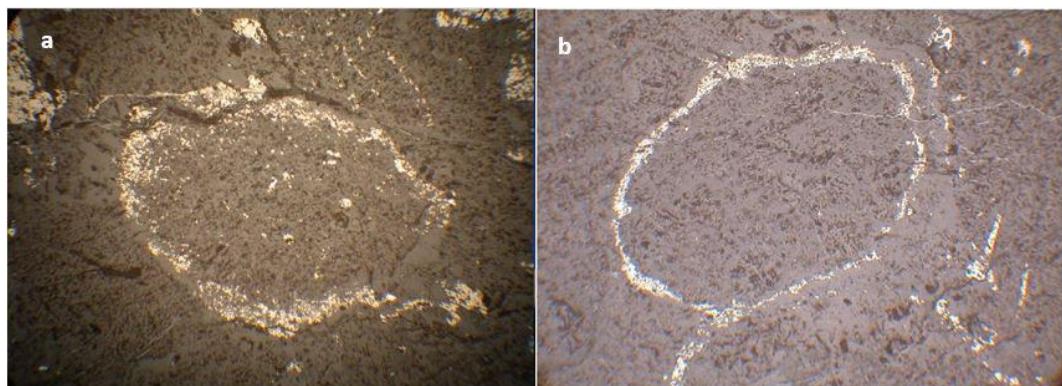


Figura 46 – Aros de material rico em sulfetos e metais ao redor de côndrulos nos meteorito SVP (fig a.) e Cebollati (fig.b). Fonte: Arquivo de Maria Elizabeth Zucolotto.

A partir dos resultados apresentados, o meteorito Cebollati aparenta estar entre os grupos L e LL da classe OC. Como mencionado na descrição, a tabela 30 diz respeito a meteoritos condrícticos de tipo petrológico 4 a 6 (equilibrados), pois os valores de Fa e Fs tendem a variar consideravelmente em meteoritos do tipo 3 (não equilibrados). Com isso, seria possível atribuir as discrepâncias encontradas neste trabalho à uma classificação de tipo petrológico 3, já que outras características apresentadas também seriam capazes de corroborar este resultado.

Contudo, a classificação exata e completa de um meteorito exige o uso de diversas técnicas, e consiste na obtenção de cinco características principais, sendo elas: classe, grupo, tipo petrológico, classificação de choque e grau de intemperismo. Sendo assim, as técnicas utilizadas neste trabalho, embora tenham mostrado resultados relevantes, devem ser empregadas junto com outras técnicas de análise. Por esta razão, existe a necessidade da realização de estudos futuros, com outras técnicas para detalhes de classificação de cada característica, sendo esta a perspectiva para o futuro próximo.

De qualquer forma, como um primeiro trabalho do grupo utilizando tais técnicas aplicadas aos meteoritos, acreditamos que os resultados são de alta relevância e as futuras análises devem ser aprimoradas.

Referências

- BRICENO, E. R. *Características Físicas e Composicionais de Meteoritos Condritos*. Tese (Doutorado) — Observatório Nacional, 2014. Citado 2 vezes nas páginas [28](#) e [34](#).
- DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. *Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores*. [S.l.]: EdiPUCRS, 2007. Citado 3 vezes nas páginas [10](#), [44](#) e [45](#).
- FARRINGTON, O. C. *Meteorites: Their structure, composition, and terrestrial relations*. [S.l.]: The author, 1915. Citado na página [32](#).
- FILHO, K. d. S. O.; SARAIVA, M. d. F. O. Astronomia e astrofísica. *São Paulo: Editora Livraria da Física*, v. 780, 2004. Citado 3 vezes nas páginas [21](#), [25](#) e [26](#).
- JR, H. Y. M.; HUSS, G. R. *Cosmochemistry*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2010. Citado na página [33](#).
- KRING, D. A. *Meteorites and their Properties*. [S.l.]: University of Arizona, Lunar and Planetary Laboratory, Department of . . . , 1998. Citado na página [28](#).
- LEWIS, J. *Physics and chemistry of the solar system*. [S.l.]: Academic Press, 2012. Citado na página [21](#).
- MASON, B. *Data of Geochemistry - Sixth Edition*. [S.l.]: United States Government Printing Office, 1979. Citado na página [30](#).
- MATSUURA, O. T.; BARBOZA, C. H.; MACIEL, W. J. História da astronomia no brasil (2013). *Recife: Cepe*, v. 1, 2014. Citado 3 vezes nas páginas [21](#), [23](#) e [24](#).
- NORTON, O. R.; CHITWOOD, L. *Field guide to meteors and meteorites*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2008. Citado 10 vezes nas páginas [14](#), [30](#), [57](#), [58](#), [70](#), [71](#), [72](#), [73](#), [74](#) e [78](#).
- SALAVERRY, R. N. et al. The buritizal meteorite: classification of a new brazilian chondrite. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 81, n. 2, 2017. Citado 3 vezes nas páginas [12](#), [34](#) e [35](#).
- SEARS, D. Sketches in the history of meteoritics 1: The birth of the science. *Meteoritics*, Wiley Online Library, v. 10, n. 3, p. 215–226, 1975. Citado na página [24](#).
- SEEDS, M. A. *The Solar System, Sixth Edition*. [S.l.]: Thomson Brooks/Cole, 2008. Citado 4 vezes nas páginas [12](#), [25](#), [26](#) e [27](#).
- SHAW, A. M. *Astrochemistry: From astronomy to astrobiology*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. Citado na página [26](#).
- VERNAZZA, P. et al. The formation and evolution of ordinary chondrite parent bodies. In: _____. [S.l.: s.n.], 2015. ISBN 9780816532131. Citado 4 vezes nas páginas [9](#), [12](#), [35](#) e [36](#).

- WANG, K.; KOROTEV, R. Meteorites. In: *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science*. [S.l.: s.n.], 2019. Citado 3 vezes nas páginas [32](#), [33](#) e [34](#).
- WEISBERG, M. K.; MCCOY, T. J.; KROT, A. N. Systematics and evaluation of meteorite classification. *Meteorites and the early solar system II*, Univ. of Arizona Press, 2006. Citado 2 vezes nas páginas [12](#) e [33](#).
- ZUCOLOTTO, M. E.; ANTONELO, L. L. Studies of brazilian meteorites of the museu nacional-i: Petrography and mineralogy of the santa vitória do palmar, rio grande do sul, l3 chondrite meteorite. *Arquivos do Museu Nacional*, v. 66, n. 3-4, p. 611–629, 2008. Citado na página [39](#).
- ZUCOLOTTO, M. E. et al. *Decifrando os meteoritos*. [S.l.]: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Museu Nacional, 2013. Citado 11 vezes nas páginas [9](#), [12](#), [22](#), [23](#), [27](#), [28](#), [29](#), [30](#), [31](#), [32](#) e [37](#).

Anexos

ANEXO B – DADOS DE ESPECTROS E SITES NA TÉCNICA MEV

Elemento	At%	Wt%
Fe	49,7	66,7
S	38,1	29,4
C	9,2	2,7
O	3,0	1,2

Tabela 33 – Composição química do espectro 1 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
Fe	39,1	56,0
S	43,8	36,0
C	9,7	3,0
O	6,0	2,5
Cu	1,5	2,4

Tabela 34 – Composição química do espectro 2 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
Fe	45,3	62,8
S	41,3	32,9
C	9,5	2,8
O	3,9	1,5

Tabela 35 – Composição química do espectro 3 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
Fe	36,3	53,7
S	35,1	29,8
O	15,5	6,6
Ca	5,3	5,6
P	3,7	3,0
C	4,2	1,3

Tabela 36 – Composição química do espectro 4 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
Fe	37,6	57,1
S	40,5	35,3
C	17,1	5,6
O	4,8	2,1

Tabela 37 – Composição química do espectro 5 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
Fe	49,3	67,1
S	36,4	28,4
C	10,4	3,0
O	3,8	1,5

Tabela 38 – Composição química do espectro 6 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
Fe	49,3	66,0
S	40,5	31,1
C	10,2	3,0

Tabela 39 – Composição química do espectro 7 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
K	26,0	43,7
O	54,2	37,3
Si	5,2	6,3
Mg	4,6	4,8
C	7,5	3,9
Fe	1,2	2,8
Al	0,6	0,7
Na	0,6	0,6

Tabela 40 – Composição química do espectro 29 do meteorito SVP na técnica MEV, com C.
At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
K	32,3	49,5
O	50,9	31,9
Si	4,7	5,2
Fe	1,6	3,5
Ca	2,0	3,1
Mg	3,0	3,0
C	3,8	1,8
Ni	0,3	0,6
Na	0,7	0,6
Al	0,4	0,4
S	0,2	0,3

Tabela 41 – Composição química do espectro 30 do meteorito SVP na técnica MEV, com C.
At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	50,5	37,8
Mg	25,1	28,5
Si	14,7	19,3
Fe	4,4	11,4
C	5,3	3,0

Tabela 42 – Composição química do espectro 33 do meteorito SVP na técnica MEV, com C.
At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	52,9	37,1
Fe	9,1	22,4
Mg	19,5	20,8
Si	13,4	16,5
C	3,8	2,0
Na	1,3	1,3

Tabela 43 – Composição química do espectro 34 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	35,3	30,2
C	35,2	22,6
Mg	14,5	18,9
Si	9,3	13,9
Fe	4,2	12,4
Na	1,5	1,9

Tabela 44 – Composição química do espectro 35 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	53,6	38,6
Mg	21,2	23,2
Fe	7,9	19,8
Si	12,5	15,8
C	4,8	2,6

Tabela 45 – Composição química do espectro 36 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	54,0	38,6
Si	21,3	26,7
Ca	7,1	12,8
Fe	3,2	8,0
Mg	6,5	7,1
Na	2,5	2,6
Al	1,7	2,0
C	3,4	1,8
K	0,3	0,5

Tabela 46 – Composição química do espectro 37 do meteorito SVP na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	52,6	40,8
Si	15,7	21,4
Fe	3,7	10,0
C	15,6	9,1
Ca	3,3	6,4
Mg	3,0	3,5
Al	2,6	3,4
Na	2,6	2,9
S	0,5	0,8
Cr	0,2	0,6
Mn	0,1	0,3

Tabela 47 – Composição química do espectro 2 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	59,3	49,0
Si	17,4	25,3
C	10,8	6,7
Al	4,3	6,0
Na	3,4	4,0
Fe	0,86	2,5
Mg	2,0	2,5
Ca	1,1	2,3
K	0,7	1,5
Ti	0,08	0,20

Tabela 48 – Composição química do espectro 3 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	57,8	45,7
Si	16,4	22,8
Mg	6,2	7,5
Ca	3,4	6,7
C	10,5	6,2
Fe	2,1	5,9
Al	1,4	1,9
Na	1,2	1,4
Cr	0,4	1,0
Mn	0,2	0,5
K	0,3	0,5

Tabela 49 – Composição química do espectro 4 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	53,8	43,2
Mg	23,3	28,5
Si	12,5	17,6
Fe	2,0	5,5
C	8,5	5,1

Tabela 50 – Composição química do espectro 5 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	49,1	35,4
Fe	8,7	21,8
Mg	17,4	19,1
Si	12,6	16,0
C	10,9	5,9
Al	0,7	0,8
Mn	0,1	0,3
Na	0,3	0,3
Ca	0,1	0,2
S	0,07	0,10

Tabela 51 – Composição química do espectro 6 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	53,6	41,1
Mg	20,1	23,4
Si	12,2	16,4
Fe	5,1	13,6
C	8,9	5,1
Mn	0,1	0,3

Tabela 52 – Composição química do espectro 7 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	56,5	43,8
Si	14,7	20,0
Fe	4,1	11,1
Mg	9,1	10,7
C	8,6	5,0
Al	3,4	4,4
Na	2,5	2,8
Ca	0,5	1,0
K	0,4	0,8
Mn	0,07	0,2
Cr	0,08	0,20

Tabela 53 – Composição química do espectro 8 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
Fe	26,6	50,9
S	22,2	24,4
C	31,6	13,0
O	16,8	9,2
Mg	1,4	1,2
Si	0,9	0,9
Al	0,2	0,2
Na	0,1	0,1
Ca	0,07	0,10

Tabela 54 – Composição química do espectro 9 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
Fe	52,4	75,4
Ni	4,6	6,9
C	20,7	6,4
O	14,5	6,0
Mg	3,0	1,9
Si	1,9	1,4
Al	1,4	1,0
S	1,2	1,0
Na	0,2	0,1

Tabela 55 – Composição química do espectro 10 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
Fe	46,7	59,7
Ni	23,4	31,5
C	26,5	7,3
F	3	1,3
Al	0,2	0,1
Si	0,2	0,1

Tabela 56 – Composição química do espectro 11 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
Fe	27,2	52,3
O	41,4	22,8
C	16,4	6,8
Ca	3,5	4,9
S	4,3	4,7
Mg	3,0	2,6
Ni	1,1	2,3
Co	0,7	1,5
Si	1,1	1,1
Na	0,9	0,7
Al	0,2	0,2

Tabela 57 – Composição química do espectro 12 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	47,7	33,6
Ca	13,1	23,1
P	11,5	15,7
Fe	4,1	10,1
C	16,6	8,8
S	3,4	4,8
Na	1,8	1,8
Mg	1,7	1,7
Si	0,08	0,1
Al	0,08	0,10

Tabela 58 – Composição química do espectro 13 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	56,0	42,5
Ca	11,8	22,4
P	9,9	14,6
C	14,6	8,3
Fe	2,0	5,3
Mg	2,1	2,4
Na	1,7	1,8
Si	0,9	1,2
S	0,7	1,1
Al	0,2	0,3
K	0,05	0,10

Tabela 59 – Composição química do espectro 14 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	55,5	43,8
Si	15,0	20,8
Mg	9,3	11,1
Fe	2,7	7,5
C	12,3	7,3
Ca	2,9	5,8
Cr	0,5	1,2
Na	0,7	0,8
Al	0,6	0,8
Mn	0,2	0,5
S	0,3	0,4

Tabela 60 – Composição química do espectro 15 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	58,7	47,8
Si	16,9	24,1
Al	7,4	10,2
Na	4,6	5,4
C	8,7	5,3
Ca	1,9	3,9
Fe	0,6	1,6
Mg	0,97	1,2
S	0,1	0,2
Ti	0,08	0,20

Tabela 61 – Composição química do espectro 16 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	57,9	41,8
Si	15,0	19,0
Fe	5,9	15,0
Mg	11,2	12,3
Al	7,6	9,2
Na	1,6	1,7
Ca	0,4	0,8
K	0,2	0,3

Tabela 62 – Composição química do espectro 17 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	50,6	35,4
Fe	9,9	24,3
Mg	16,6	17,6
Si	13,4	16,4
C	8,2	4,3
Al	0,7	0,8
Cr	0,3	0,7
Ca	0,2	0,3
S	0,07	0,10

Tabela 63 – Composição química do espectro 18 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	44,9	32,7
Fe	8,5	21,7
Si	9,6	1,3
C	18,1	9,9
Mg	8,9	9,9
Al	6,4	7,8
Na	1,5	1,6
Cr	0,6	1,5
Ca	0,5	1,0
S	0,5	0,7
Ni	0,2	0,5

Tabela 64 – Composição química do espectro 19 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	56,6	48,8
Si	12,4	18,8
Mg	9,8	12,8
C	18,2	11,8
Fe	1,9	5,7
Ca	0,4	0,9
Cr	0,2	0,5
Al	0,3	0,4
Mn	0,1	0,4

Tabela 65 – Composição química do espectro 20 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	54,7	45,9
Si	14,5	21,3
Mg	12,7	16,2
C	15,7	9,9
Fe	1,9	5,7
Cr	0,2	0,5
Mn	0,1	0,3
Ca	0,09	0,20

Tabela 66 – Composição química do espectro 21 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	49,2	43,3
C	27,7	18,3
Si	9,8	15,1
Mg	8,6	11,5
Fe	2,8	8,5
Al	1,0	1,5
Ca	0,3	0,6
Cr	0,13	0,4
Na	0,2	0,3
S	0,2	0,3
Mn	0,06	0,20

Tabela 67 – Composição química do espectro 22 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
Fe	31,7	60,9
O	35,9	19,8
C	26,9	11,1
Ni	1,9	3,8
Co	0,6	1,3
Mg	1,1	0,9
Si	0,9	0,9
Cl	0,4	0,5
S	0,5	0,5
Al	0,1	0,1

Tabela 68 – Composição química do espectro 23 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	57,4	49,8
Si	12,2	18,6
Mg	9,9	13,1
C	17,6	11,5
Fe	1,5	4,6
Ca	0,5	1,0
Na	0,5	0,6
Cr	0,1	0,4
Al	0,3	0,4

Tabela 69 – Composição química do espectro 24 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	54,1	43,5
C	28,5	17,2
Fe	5,5	15,3
Ca	6,1	12,2
Ni	2,6	7,6
Mg	1,6	2,0
Si	0,6	0,8
S	0,4	0,7
Na	0,4	0,5
Al	0,2	0,3

Tabela 70 – Composição química do espectro 25 do meteorito Cebollati na técnica MEV, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	45,8	34,0
Fe	7,5	19,5
Si	13,6	17,8
Mg	11,9	13,5
C	17,9	10,0
Al	0,9	1,1
S	1,9	2,8
Ca	0,6	1,1

Tabela 71 – Composição química elementar média do site 5 do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
K	29,2	46,6
O	52,6	34,6
Si	5,0	5,8
Mg	3,9	3,9
Fe	1,4	3,0
C	5,7	2,9
Ca	1,0	1,6
Al	0,5	0,6
Na	0,6	0,6
Ni	0,1	0,3
S	0,1	0,1

Tabela 72 – Composição química elementar média dos sites 11 e 12 do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
K	37,9	48,2
Cl	33,3	38,4
C	16,9	6,6
O	9,2	4,8
Na	1,9	1,4
Si	0,4	0,4
Mg	0,4	0,3
Mg/Si	0,8	0,8

Tabela 73 – Composição química elementar média do site 20 do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
K	29,2	53,5
C	47,7	26,9
O	18,3	13,7
Mg	2,6	3,0
Si	2,2	2,9

Tabela 74 – Composição química elementar média do site 22 do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	49,3	36,5
Mg	17,4	19,7
Si 14,3	18,5	
Fe	5,8	14,8
C	10,0	6,4
Ca	1,0	2,6
Na	1,1	1,2
Al	0,3	0,4
K	0,06	0,10

Tabela 75 – Composição química elementar média dos espectros retirados do site 17 do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	44,0	31,7
Fe	6,5	16,3
Si	12,7	16,0
Mg	11,3	12,3
C	17,8	9,7
Cr	3,7	8,6
Ca	1,1	2,0
Al	1,2	1,4
Na	1,1	1,1
S	0,3	0,5
K	0,1	0,2
P	0,1	0,2

Tabela 76 – Composição química elementar média do site 16 do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	52,5	39,0
Fe	6,9	17,8
Si	12,2	15,9
Mg	13,3	15,0
C	11,3	6,3
S	1,5	2,2
Al	0,8	1,0
Ca	0,4	0,8
Na	0,7	0,7
Ni	0,2	0,5
Cr	0,1	0,3
Mn	0,08	0,20
Ti	0,04	0,10
K	0,06	0,10

Tabela 77 – Composição química elementar média do site 24 do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	56,1	42,6
Fe	6,5	17,2
K	8,0	14,8
Mg	11,3	13,0
C	14,4	8,2
Na	3,8	4,1

Tabela 78 – Composição química elementar média do site 2 do meteorito Cebollati, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	58,8	35,2
Fe	9,3	19,4
Si	13,3	14,0
C	30,7	13,8
Mg	12,4	11,3
Al	3,4	3,4
S	1,8	2,1
Na	1,0	0,9

Tabela 79 – Composição química elementar média do site 5 do meteorito Cebollati, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	52,7	41,4
Si	13,6	18,8
Fe	4,7	12,8
Mg	9,4	11,2
C	14,9	8,8
Ca	1,0	1,9
Na	1,7	1,9
Al	1,4	1,9
Cr	0,2	0,4
S	0,2	0,3
Mn	0,1	0,3
K	0,05	0,10
Ti	0,04	0,10

Tabela 80 – Composição química elementar média do site 1 do meteorito Cebollati, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At%	Wt%
O	58,4	37,2
Fe	8,0	17,8
Si	14,4	16,1
Mg	13,7	13,2
C	17,6	8,4
S	1,5	1,9
Ca	0,9	1,4
Al	1,3	1,4
Na	1,0	0,9
Ni	0,3	0,7
Cr	0,2	0,4
Mn	0,1	0,3
K	0,06	0,10
Ti	0,05	0,10
P	0,08	0,10

Tabela 81 – Composição química elementar média do site 6 do meteorito Cebollati, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

ANEXO C – DADOS DOS ESPECTROS DO METEORITO SVP NA TÉCNICA PIXE

Elemento	At% (M5a)	Wt% (M5a)	At% (M5b)	Wt% (M5b)
O	41,4	28,6	42,2	29,2
Si	18,8	22,8	18,7	22,7
Mg	20,7	21,7	20,7	21,7
Fe	3,3	7,9	3,2	7,8
Ca	4,5	7,8	4,4	7,6
Al	5,9	6,9	5,9	6,9
C	3,6	1,9	3,0	1,6
Na	1,0	1,0	1,1	1,1
Ti	0,2	0,4	0,2	0,4
Cr	0,09	0,20	0,08	0,20
Mn	0,04	0,10	0,04	0,10
K	0,07	0,10	0,07	0,10
Sc	0,04	0,09	0,04	0,09
S	0,06	0,09	0,06	0,09
V	0,02	0,05	0,02	0,04
Ni	0,01	0,03	0,01	0,04

Tabela 82 – Composição química dos espectros de nomes M5a e M5b do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At% (M5c)	Wt% (M5c)	At% (M5e)	Wt% (M5e)	At% (M5g)	Wt% (M5g)
Fe	4,6	11,3	7,8	18,3	34,3	55,6
Si	22,5	27,6	22,6	26,7	20,3	16,6
O	42,7	29,9	41,9	28,1	21,9	10,2
Mg	17,9	19,1	15,1	15,5	12,0	8,5
Ni	0,05	0,1	0,03	0,09	1,6	2,8
C	5,2	2,7	6,6	3,3	5,5	1,9
S	0,5	0,7	0,1	0,1	1,5	1,4
Ca	1,0	1,8	1,2	2,0	1,0	1,2
Al	2,8	3,3	1,9	2,2	0,6	0,5
Cr	0,3	0,7	0,4	0,9	0,3	0,4
Mn	0,1	0,3	0,3	0,7	0,2	0,3
Na	1,8	1,8	1,6	1,5	0,4	0,3
K	0,08	0,10	0,10	0,20	0,03	0,04
Ti	0,09	0,10	0,05	0,09	0,03	0,04
Sc	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03
V	0	0	0,01	0,02	0,01	0,01

Tabela 83 – Composição química dos espectros de nomes M5c, M5e e M5g do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At% (M5d)	Wt% (M5d)	At% (M5f)	Wt% (M5f)	At% (M5h)	Wt% (M5h)
O	42,7	29,8	41,9	26,8	41,4	26,8
Si	22,6	27,7	21,3	23,9	19,8	22,5
Fe	4,6	11,2	10,7	23,8	9,7	22,0
Mg	18,1	19,1	1,5	1,4	18,8	18,5
Al	2,8	3,3	1,7	1,8	1,9	2,1
C	5,0	2,6	3,3	1,6	4,2	2,0
Ca	1,0	1,8	1,0	1,6	1,2	1,9
Na	1,8	1,8	1,5	1,4	1,7	1,6
Mn	0,1	0,3	0,3	0,6	0,4	0,8
Cr	0,3	0,7	0,3	0,7	0,3	0,7
Ni	0,03	0,09	0,02	0,04	0,1	0,3
S	0,5	0,8	0,1	0,1	0,05	0,07
K	0,07	0,1	0,09	0,1	0,2	0,3
Ti	0,08	0,2	0,05	0,1	0,05	0,1
Cu	0,01	0,03	0,05	0,1	0,02	0,04
Sc	0,01	0,03	0,02	0,03	0,01	0,02
V	0,004	0,009	0,005	0,010	0,004	0,008

Tabela 84 – Composição química dos espectros de nomes M5d, M5f e M5h do meteorito SVP, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

ANEXO D – DADOS DOS ESPECTROS DO METEORITO CEBOLLATI NA TÉCNICA PIXE

Elemento	At% (M4a)	Wt% (M4a)	At% (M4b)	Wt% (M4b)
Fe	22,4	41,7	14,7	31,3
O	32,5	17,4	38,3	23,4
Si	9,4	8,8	19,5	20,8
Mg	6,1	4,9	12,7	11,7
C	10,1	4,1	7,8	3,5
Ca	5,0	6,7	1,8	2,8
Al	0,8	0,7	1,8	1,9
Na	3,2	2,4	1,9	1,6
Cr	0,3	0,6	0,4	0,7
Ni	1,50	2,90	0,25	0,60
Mn	0,2	0,4	0,2	0,5
S	8,1	8,6	0,3	0,4
Cl	0,1	0,1	0,1	0,1
K	0,10	0,20	0,08	0,10
Ti	0,07	0,10	0,08	0,10

Tabela 85 – Composição química dos espectros de nomes M4a e M4b do meteorito Cebollati, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At% (M4c)	Wt% (M4c)	At% (M4d)	Wt% (M4d)
Fe	16,6	33,8	16,7	33,9
O	35,8	20,9	35,9	20,9
Si	12,7	12,9	12,8	13,0
Ca	6,4	9,3	6,4	9,3
Mg	7,6	6,7	7,6	6,7
S	5,1	6,0	5,2	6,0
C	11,1	4,9	10,8	4,7
Na	2,1	1,8	2,1	1,7
Al	1,2	1,1	1,2	1,2
Cr	0,4	0,8	0,4	0,8
Ni	0,3	0,6	0,3	0,6
Mn	0,2	0,5	0,3	0,5
K	0,2	0,2	0,2	0,3
Cl	0,08	0,10	0,08	0,10
Ti	0,08	0,10	0,08	0,10
Fe/S	3,2	5,6	3,2	5,6
Fe/Si	1,3	2,6	1,3	2,6

Tabela 86 – Composição química dos espectros de nomes M4c e M4d do meteorito Cebollati, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

Elemento	At% (M4e)	Wt% (M4e)	At% (M4f)	Wt% (M4f)
O	35,8	20,7	47,9	33,7
Fe	16,9	34,1	9,7	23,8
Mg	7,6	6,8	13,8	14,7
Si	12,8	13,0	11,7	14,6
C	10,7	4,7	12,0	6,4
S	5,2	6	2,3	3,3
Na	2,0	1,7	1,2	1,2
Ca	6,4	9,4	0,5	0,8
Ni	0,3	0,7	0,2	0,5
Al	1,2	1,1	0,2	0,3
Cr	0,4	0,8	0,1	0,3
Mn	0,30	0,50	0,09	0,20
Cl	0,09	0,10	0,08	0,10
K	0,02	0,02	0,05	0,09
Ti	0,08	0,10	0	0

Tabela 87 – Composição química dos espectros de nomes M4e e, M4f do meteorito Cebollati, com C. At% é o percentual atômico e Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

ANEXO E – COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DOS ESPECTROS DOS METEORITOS SVP E CEBOLLATI NA TÉCNICA MEV

Elemento	Média (Wt%) SVP	Média (Wt%) Cebollati
Fe	32,0	20,0
O	23,3	39,1
K	9,6	1,6
Si	9,1	12,7
S	7,2	1,6
Mg	6,9	10,4
Ni	4,1	1,8
Cl	1,0	1,5
Ca	0,9	3,2
Na	0,9	1,0
Sn	0,8	0
Al	0,7	2,0
Cr	0,08	0,20
P	0,08	1,0
N	0,08	3,60
Cu	0,07	0
Mn	0,05	0,10
Ti	0,003	0,010
F	0	0,04

Tabela 88 – Composição química média de todos os espectros analisados dos meteoritos SVP e Cebollati na técnica MEV, sem C. Wt% é o percentual em peso de cada elemento presente.

ANEXO F – ÓXIDOS

Óxido	Média SVP (Wt%)	Média Cebollati (Wt%)
Al_2O_3	6,6	2,1
CaO	4,6	9,4
Cl	0	0,2
Cr_2O_3	0,9	1,0
CuO	0,03	0
FeO	1,5	17,9
Fe_2O_3	1,7	19,9
K_2O	0,2	0,2
MgO	29,9	15,0
MnO	0,6	0,6
Na_2O	1,8	2,4
Sc_2O_3	0,07	0
SiO_2	52,2	31,2
TiO_2	0,3	0,2
V_2O_5	0,04	0
Fe ligado a óxidos	0,1	0,03
FeS	0,8	9,3
FeNi	0,3	4,6

Tabela 89 – Óxidos observados nos meteoritos Santa Vitória do Palmar e Cebollati na técnica PIXE, de acordo com sua composição química média. Também são mostradas as quantidades de Fe, na composição química total, que está ligada a óxidos, ao S, e ao Ni.

Óxido	Média SVP (Wt%)	Média Cebollati (Wt%)
Al_2O_3	1,3	3,7
CaO	1,3	4,5
Cl	1,0	1,5
CoO	0	0,1
Cr_2O_3	0,1	0,3
CuO	0,09	0
F	0,07	0,04
FeO	23,5	12,4
Fe_2O_3	26,2	13,8
K_2O	11,6	2,0
MgO	11,6	17,2
MnO	0,07	0,1
N_2O_5	0,3	13,9
Na_2O	1,3	1,4
P_2O_5	0,2	2,2
SiO_2	19,4	27,1
SnO_2	1,1	0
SnO	1,0	0 TiO_2
0,005	0,02	
Fe ligado a óxidos	0,03	0,1
FeS	12,7	2,7
FeNi	5,6	6,8

Tabela 90 – Óxidos observados nos meteoritos Santa Vitória do Palmar e Cebollati na técnica MEV, de acordo com a composição química média dos espectros analisados. Também são mostradas as quantidades de Fe, na composição química total, que está ligada a óxidos, ao S, e ao Ni.

Óxido	Média SVP (Wt%)	Média Cebollati (Wt%)
Al_2O_3	2,6	3,9
CaO	1,9	1,0
Cl	0,01	0
CoO	0	0
Cr_2O_3	3,0	0,3
FeO	14,0	15,9
Fe_2O_3	15,6	17,7
I	4,4	0
K_2O	0,1	6,4
MgO	21,1	20,4
MnO	0,08	0,2
Na_2O	1,2	3,0
P_2O_5	0,2	0,05
SiO_2	35,9	31,3
TiO_2	0,02	0,07
Fe ligado a óxidos	0,04	0,02
FeS	2,5	2,3
FeNi	8,3	10

Tabela 91 – Óxidos observados nos meteoritos Santa Vitória do Palmar e Cebollati na técnica MEV, de acordo com a composição química média dos mapas analisados. Também são mostradas as quantidades de Fe, na composição química total, que está ligada a óxidos, ao S, e ao Ni.

ANEXO G – PORCENTAGENS DOS ESPECTROS DOS METEORITOS SVP E CEBOLLATI

	Fe Total (wt%)	Metal (wt%)	Fa (mol%)	Fs (mol%)
SVP Espectros MEV	32,0	5,6	53,2	51,4
Cebollati Espectros MEV	20,0	6,7	28,8	25,4

Tabela 92 – Porcentagens da composição química média dos meteoritos Santa Vitória do Palmar e Cebollati, nos espectros obtidos com a técnica MEV.