



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Instituto de Física Armando Dias Tavares

Bruno Leonardo do Nascimento Dias

**Análise de meteoritos por técnicas não destrutivas
com aplicações para astrobiologia**

Rio de Janeiro
2018

Bruno Leonardo do Nascimento Dias

**Análise de meteoritos por técnicas não destrutivas
com aplicações para astrobiologia**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre, ao Programa
de Pós-Graduação em Física, da Universidade
do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino José dos Anjos
Co-orientador: Prof. Dr. Davi Ferreira de Oliveira

Rio de Janeiro
2018

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/ REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/D

D541

Dias, Bruno Leonardo do Nascimento.

Análise de meteoritos por técnicas não destrutivas com aplicações para astrobiologia / Bruno Leonardo do Nascimento Dias.- 2018.

131 f. : il.

Orientador: Marcelino José dos Anjos.

Co-orientador: Davi Ferreira de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Física Armando Dias Tavares.

1. Meteoritos - Teses. 2. Exobiologia - Teses.
3. Tomografia computadorizada por raios X - Teses.
4. Raios X - Fluorescência - Teses. 5. Raman,
Espectroscopia de – Teses. I. Anjos, Marcelino José dos.
II. Oliveira, Davi Ferreira de. III. Universidade do Estado
do Rio de Janeiro. Instituto de Física Armando Dias
Tavares. IV. Título.

CDU 523.681

Bibliotecária: Teresa da Silva CRB7/5209

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Bruno Leonardo do Nascimento Dias

Análise de meteoritos por técnicas não destrutivas com aplicações para astrobiologia

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Física, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 22 de Fevereiro de 2018.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcelino José dos Anjos (Orientador)
Instituto de Física Armando Dias Tavares – UERJ

Prof. Dr. Davi Ferreira de Oliveira (Co-orientador)
Instituto de Física Armando Dias Tavares – UERJ

Prof. Dra. Zélia Maria da Costa Ludwig
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dra. Catarine Canellas Godim Leitão
Instituto de Física Armando Dias Tavares – UERJ

Rio de Janeiro
2018

DEDICATÓRIA

Gostaria de dedicar este trabalho a uma constelação muito especial, que é composta pelos os meus pais Elaine Sampaio, Antonio Carlos, meu irmão Leandro e a Bruna Mayato, que sempre me incentivaram a cada dia a persistir com os meus objetivos, dando-me forças para alcançar minhas metas e principalmente, nos momentos mais difíceis, por terem guiado o meu caminho me auxiliando a refletir sempre sobre que decisão tomar, fosse através de conversas ou conselhos, tal como se fosse minha constelação do cruzeiro do sul.

Dedico ainda este trabalho a todos os meus familiares que já se foram e que hoje são poeira das estrelas fazendo parte da vasta imensidão cósmica deste Universo, mas que em algum momento dedicaram de alguma forma a contribuir no processo da síntese da formação deste que vos escreve. Dedico assim, em memória, este trabalho também aos meus tios Roberto, Eliane e ao meu avô Francisco.

Por fim, dedico também para todos aqueles que olham para o alto direcionado ao céu buscando descobertas e para todos que infelizmente ainda não fazem ou não sabem o porquê deveriam fazê-lo. Afinal, estamos todos conectados biologicamente uns com os outros; quimicamente com a Terra e atômicamente com o resto do universo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, fora Temer! Dito isso, gostaria de agradecer a vida pelo privilégio deste momento, por todas as alegrias e tristezas, por todas as lembranças, recordações inesquecíveis e por aqueles momentos que já não me lembro mais, pelo medo e pela coragem, pelos obstáculos e pelas conquistas, pelas vitórias e pelos fracassos (Por que não?), pelos dias de sol e pelos dias de chuva, pelo calor dos dias verão e pelos dias frios do inverno, pelas sementes que vi cair e pelas árvores que vi nascer, pelos sorrisos que recebi e pelas lágrimas que derramei, por as vezes me sentir sozinho ou estar sozinho e pelas vezes que estou rodeado de pessoas, pelos momentos fáceis que tive durante a Programa de Pós-Graduação de Física na UERJ (se é que realmente existiu rsrs..) e pelos momentos difíceis na PPGF, pela sabedoria que tenho adquirido com o tempo e pelo conhecimento que posso transmitir, obrigado por existir, por estar vivo e por todos esses sentimentos que são imprescindíveis à minha condição humana, realmente me fazendo sentir, vivo!

Nos meus agradecimentos não citarei nomes, pois se você está lendo, se você esteve ou está presente em minha vida ou mesmo você que pessoalmente não tenha feito parte de minha trajetória, mas que se deu o trabalho de ler estes agradecimentos tenha a certeza de que o seu nome está presente nesses agradecimentos, muito obrigado por esse desejo de se fazer presente e por essa preocupação em ler esses agradecimentos. Você também faz parte de tudo isso.

Por fim, agradeço a todos da família LIETA (orientadores e amigos de laboratório), a UERJ e a CAPES agência fomentadora da minha bolsa de estudos de mestrado que me auxiliou para realização deste trabalho deixando a mensagem de que: “Ninguém sabe o que realmente é a vida e talvez isso não tenha tanta importância assim. O que realmente importa é ter curiosidade e a vontade de explorar o mundo. Quase tudo é realmente interessante se você entrar de cabeça. Trabalhe tão duro e intensamente quanto você quiser nas coisas que você gosta de fazer. Não pense no que você quer ser, mas o que você quer fazer de maneira a manter apenas algum tipo de mínimo com outras coisas para que outras pessoas não o impeça de fazer nada. Afinal, para um homem de princípios e grandes realizações, vida ou morte pouco importa! O que realmente tem importância é o legado que se deixa. Um legado que seja capaz de transformar vidas de forma a tornar o mundo um lugar melhor e mais digno!” Resumindo, não busque se tornar um homem de sucesso, mas tente se tornar um homem de valor...

“Nosso maior medo não
é de sermos inadequados.
Nosso maior medo é não saber que
nós somos poderosos,
além do que podemos imaginar.
É nossa luz e não nossa escuridão
que mais nos apavora.
Nós nos perguntamos:
Quem sou eu para ser brilhante,
lindo, talentoso ou fabuloso?
Na verdade, quem é você para não ser?
Você pensando pequeno não ajuda o mundo.
Não há nenhuma bondade em você se diminuir,
recuar para que outros
não se sintam inseguros ao seu redor.
Todos nós fomos feitos pra brilhar,
como as crianças brilham.
Não é somente alguns de nós, mas todos nós.
E na medida que nós deixamos a nossa luz brilhar,
nós inconscientemente damos permissão
aos outros para fazerem o mesmo.
E na medida que nós nos libertamos do nosso próprio medo,
nossa presença automaticamente liberta outros.”

*Trecho do discurso de posse de Nelson Mandela em 1994
Fragmento do livro “A return to love” de Marianne Williamson*

RESUMO

NASCIMENTO-DIAS, B. L. *Análise de meteoritos por técnicas não destrutivas com relevância para Astrobiologia*. 2018. 140f. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física Armando Dias Tavares, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Os meteoritos são excelentes materiais de estudo para as ciências planetárias por serem artefatos históricos da nebulosa solar que possuem informações sobre as características da evolução química e física do material primordial que formou grande parte dos planetas e de outros corpos do nosso sistema solar. Além disso, os meteoritos possuem inúmeras implicações para o estudo da vida no sistema solar e consequentemente para a Astrobiologia. Os meteoritos condritos carbonáceos, por exemplo, possuem uma estrutura baseada em carbono e compostos orgânicos. Outros exemplos são os meteoritos marcianos e os lunares. Os meteoritos marcianos podem nos fornecer informações relacionadas à possibilidade de saber se no presente ou no passado recente de Marte existiram condições de habitabilidade, em que a vida poderia ter se estabelecido. E nos meteoritos lunares é possível estudar o processo da origem da Lua e sua relação com a formação do nosso planeta. Desse modo, o trabalho foi desenvolvido através das amostras de 3 meteoritos marcianos (NWA 6963, NWA 7397 e Zagami), 1 meteorito lunar (NWA 8277) e outros 2 meteoritos condritos carbonáceos (Murchison e Allende). Essas amostras meteoríticas foram analisadas por meio de técnicas analíticas não destrutivas, com o objetivo de demonstrar como essas técnicas podem ser utilizadas para auxiliar nos estudos e caracterização de materiais geológicos extraterrestres de forma esclarecedora, não destrutiva e bem ilustrativa de forma a ter relevância para a Astrobiologia na compreensão dos processos astrofísicos que ocorreram durante evolução de nosso sistema solar. Dessa forma, a metodologia utilizada para adquirir imagens de possíveis incrustações e da configuração estrutural interna desses materiais foi realizada através da técnica de microtomografia computadorizada e as análises da composição química desses meteoritos foram obtidas por meio das técnicas de Raman e de Fluorescência de raios X. Os resultados gerados a partir do desenvolvimento desse tipo de metodologia se mostraram bastante eficientes, pois foi possível obter dados sobre a formação estrutural, composição química e mineralógica dos meteoritos sem a necessidade do preparo das amostras, que geralmente ocasiona a perda das informações originais do material analisado.

Palavras-Chave: μ CT, μ XRF, μ Raman, meteoritos, Exobiologia

ABSTRACT

NASCIMENTO-DIAS, B. L. *Analysis of meteorites by non-destructive techniques with relevance to Astrobiology*. 2018. 140f. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física Armando Dias Tavares, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Meteorites are excellent study materials for the planetary sciences because they are historical artifacts of the solar nebula that have information on the characteristics of the chemical evolution and physical of the primordial material that formed a large part of the planets and other bodies of our solar system. In addition, meteorites have innumerable implications for the study of life in the solar system and consequently for Astrobiology. Carbonaceous meteorites, for example, have a structure based on carbon and organic compounds. Other examples are the Martian meteorites and the lunar ones. Martian meteorites can provide us with information regarding the possibility of knowing whether in the present or recent past of Mars there were living conditions in which life could have been established. And in lunar meteorites it is possible to study the process of the Moon's origin and its relation to the formation of our planet. In this way, the work was developed through the samples of 3 Martian meteorites (NWA 6963, NWA 7397 and Zagami), 1 lunar meteorite (NWA 8277) and 2 other carbonaceous chondrite meteorites (Murchison and Allende). These meteorological samples were analyzed by means of non-destructive analytical techniques, with the objective of demonstrating how these techniques can be used to assist in the study and characterization of extraterrestrial geological materials in an enlightening, non-destructive and well illustrative way to have relevance for the Astrobiology in the understanding of the astrophysical processes that occurred during evolution of our solar system. Thus, the methodology used to acquire images of possible incrustations and the internal structural configuration of these materials was carried out through the technique of computerized microtomography and the analyzes of the chemical composition of these meteorites were obtained by means of Raman and X-ray Fluorescence techniques. The results obtained from the development of this type of methodology were very efficient, since it was possible to obtain data on the structural formation, chemical and mineralogical composition of the meteorites without the need of the preparation of the samples, which usually causes the loss of the original information of the analyzed material.

Palavras-Chave: μ CT, μ XRF, μ Raman, meteorites, Exobiology

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de níveis eletrônicos e principais transições de raios X	29
Figura 2 – Esquema de um processo XRF e um processo Auger	30
Figura 3 – Uma representação esquemática do processo de XRF.....	31
Figura 4 – Imagens do μ CT da Bruker	32
Figura 5 – Processo de dispersão Raman	34
Figura 6 – Diagrama do método científico utilizado pela Astrobiologia	35
Figura 7 – Representação esquemática das diversas origens dos meteoritos	39
Figura 8 – Foto do fragmento do meteorito Zagami	43
Figura 9 – Foto do fragmento do meteorito mariano NWA 6963	44
Figura 10 – Foto do fragmento do meteorito mariano NWA 7397	45
Figura 11 – Foto do fragmento do meteorito lunar NWA 8277	45
Figura 12 – Foto do fragmento do meteorito Allende	46
Figura 13 – Foto do fragmento do meteorito Murchison	48
Figura 14 – Uma ilustração esquemática da visão superior do giro da amostra em torno de um eixo de rotação enquanto é efetuada a criação de imagens de CT.....	49
Figura 15 – Uma ilustração esquemática do processo de aquisição de dados por XRF	50
Figura 16 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de baixo Z do meteorito Zagami	54
Figura 17 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de alto Z do meteorito Zagami	55
Figura 18 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de baixo Z do meteorito NWA 6963.....	57
Figura 19 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de alto Z do meteorito NWA 6963.....	58
Figura 20 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de baixo Z do meteorito NWA 7397.....	60

Figura 21 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de alto Z do meteorito NWA 7397.....	61
Figura 22 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de baixo Z do meteorito NWA 8277.....	63
Figura 23 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de alto Z do meteorito NWA 8277.....	64
Figura 24 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de baixo Z do meteorito Allende	66
Figura 25 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de alto Z do meteorito Allende	67
Figura 26 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de baixo Z do meteorito Murchison.....	69
Figura 27 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de alto Z do meteorito Murchison.....	70
Figura 28 – Espectro Raman da região 1 obtido do meteorito Zagami no LNLS	72
Figura 29 – Espectro Raman 1 truncado (entre 200 cm ⁻¹ até 600 cm ⁻¹) do meteorito Zagami no LNLS	73
Figura 30 – Espectro Raman do mineral diopsídio	73
Figura 31 – Espectro Raman da região 2 obtido do meteorito Zagami no LNLS.....	74
Figura 32 – Espectro Raman do mineral magnetita	75
Figura 33 – Espectro Raman da região 1 obtido do meteorito NWA 6963 no LNLS ...	75
Figura 34 – Espectro Raman da região 2 obtido do meteorito NWA 6963 no LNLS ...	76
Figura 35 – Espectro Raman da região 3 obtido do meteorito NWA 6963 no LNLS ...	78
Figura 36 – Representação ilustrativa da sobreposição de curvas da Apatita e da Actinolita	80
Figura 37 – Espectro Raman da região 4 obtido do meteorito NWA 6963 no LNLS ...	81
Figura 38 – Espectro Raman da região 5 obtido do meteorito NWA 6963 no LNLS ...	81
Figura 39 – Espectro Raman da literatura dos minerais Clinopiroxênio e Ortopiroxênio	82

Figura 40 – Espectro Raman da região 1 obtido do meteorito NWA 7397.....	83
Figura 41 – Imagens dos espectros dos modos vibracionais de minerais na faixa~680 cm ⁻¹	83
Figura 42 – Imagens do espectro da Ilmenita.....	84
Figura 43 – Espectro Raman da região 2 obtido do meteorito NWA 7397.....	85
Figura 44 – Espectro Raman da região 3 obtido do meteorito NWA 7397.....	85
Figura 45 – Espectro Raman da região 4 obtido do meteorito NWA 7397.....	86
Figura 46 – Espectro Raman da região 5 obtido do meteorito NWA 7397.....	86
Figura 47 – Espectro Raman da região 6 obtido do meteorito NWA 7397.....	87
Figura 48 – Espectro Raman da região 1 obtido do meteorito Lunar.....	87
Figura 49 – Espectro Raman da região 2 obtido do meteorito Lunar.....	88
Figura 50 – Espectro Raman da região 1 obtido do meteorito Allende	90
Figura 51 – Espectro Raman do mineral forsterita obtido pela Caltech.....	90
Figura 52 – Espectro das Bandas De G do meteorito Allende obtido no LNLS.....	91
Figura 53 – Espectro Raman da região 1 obtido do meteorito Murchison.....	92
Figura 54 – Espectro das Bandas De G do meteorito Murchison obtido no LNLS	93
Figura 55 – Imagens das inclusões no meteorito marciano NWA 6963	95
Figura 56 – Imagem de densidade obtida por μ CT	95
Figura 57 – Geração de imagens por μ CT de material brechado no meteorito lunar NWA 8277.....	96
Figura 58 – Composição de imagens de densidade feita por μ CT do meteorito lunar NWA 8277.....	97
Figura 59 – Ilustração esquemática do processo de cristalização do piroxênio	100
Figura 60 – Ilustração esquemática do processo de cristalização e formação de precipitados.....	103
Figura 61 – Ilustração esquemática da diferentes falhas ou zonas de cisalhamento	104

Figura 62 – Ilustração esquemática da Escala comparativa dos tempos geológicos Marte x Terra.....	105
Figura 63 – Ilustração esquemática do tempo geológicos de Marte, contendo processos de vulvanismo, atividade fluvial, aformação de bacias e crateras.....	107
Figura 64 – Imagem da topografia obtida pela Mars orbiter Laser altimeter. Zonas azuis são lugares mais jovens e Zonas vermelhas as mais antigas	108
Figura 65 – Mapas de identificação das regiões em que foram detectados carbonatos em Marte.....	109
Figura 66 – Esquema um ambiente habitável que poderia se formar devido a processos hidrotermais associados à atividade magmática intrusiva.....	111
Figura 67 – Imagens obtidas por μ XRF do meteorito NWA 6963	112
Figura 68 – Imagens de densidade obtidas por μ XRF do meteorito NWA 6963.....	113
Figura 69 – Imagens da forsterita pura Mg_2SiO_4 e seu respectivo espectro.....	115
Figura 70 – Espectro Raman da região 5 obtido do meteorito marciano NWA 739....	115
Figura 71 – Espectro Raman da região 6 obtido do meteorito marciano NWA 739....	116
Figura 72 – Imagens da forsterita Mg_2SiO_4 dopada por Ferro e seu respectivo espectro	116
Figura 73 – Espectro Raman de forsterita obtido do meteorito marciano NWA 7397 com possível dopagem de Ferro	117
Figura 74 – Imagens da forsterita Mg_2SiO_4 dopada por Ferro, Níquel e seu respectivo espectro.....	117
Figura 75 – Espectro Raman da região 2 obtido do meteorito marciano NWA 739....	118
Figura 76 – Espectro Raman da região 3 obtido do meteorito marciano NWA 739....	118
Figura 77 – Ilustração esquemática da história de cristalização de minerais da forsterita à magnetita.....	119
Figura 78 – Imagens construídas por μ XRF de Fe, Mn e Ca do local que a Siderita foi detectada	122
Figura 79 – Imagens construídas por μ XRF de S e Ca do local que a gipsita foi detectada.....	122
Figura 80 – Composição de Fe presente no meteorito Allende.....	125

Figura 81 – Mosaico dos componentes elementares detectados por μ XRF e constituintes o mineral detectado por μ Raman no meteorito Murchison	127
Figura 82 – Fases hidratadas e minerais que podem se formar na nebulosa	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Organização das diferentes classes, clãs e grupos dos meteoritos Condritos	39
Tabela 2 – Organização das diferentes classes, clãs e grupos dos Acondritos, Sideritos e Siderolitos	40
Tabela 3 – Organização das diferentes classes, clãs e grupos dos meteoritos Planetários	40
Tabela 4 – Tabela comparativa entre os resultados de XRF obtidos do Zagami	56
Tabela 5 – Tabela comparativa entre os resultados de XRF obtidos do NWA 6963	59
Tabela 6 – Tabela comparativa entre os resultados de XRF obtidos do NWA 7397	62
Tabela 7 – Tabela comparativa entre os resultados de XRF obtidos do NWA 8277	65
Tabela 8 – Tabela comparativa entre os resultados de XRF obtidos do Allende	68
Tabela 9 – Tabela comparativa entre os resultados de XRF obtidos do Murchison	71
Tabela 10 – Tabela dos modos vibracionais do Diopsídio	76
Tabela 11 – Tabela dos modos vibracionais do Diopsídio e da Geikielita	77
Tabela 12 – Tabela dos modos vibracionais da Apatita	77
Tabela 13 – Tabela dos modos vibracionais do Diopsídio e da Calcita	79
Tabela 14 – Tabela dos modos vibracionais da Actinolita	80
Tabela 15 – Tabela dos modos vibracionais da Ilmenita	84
Tabela 16 – Tabela dos modos vibracionais do Diopsídio	88
Tabela 17 – Imagem comparativa dos modos vibracionais da siderita e da gipsita	89
Tabela 18 – Tabela dos modos vibracionais da Siderita e da Gipsita	89
Tabela 19 – Tabela dos modos vibracionais da Forsterite	91
Tabela 20 – Imagem dos modos vibracionais da ortoenstatita	93
Tabela 21 – Composição completa dos minerais em que a forsterita se faz presente com as fases composicionais da forsterita (Mg_2SiO_4) até faialita (Fe_2SiO_4)	125
Tabela 22 – Análise comparativa entre os resultados do meteorito Allende	126

Tabela 23 – Análise comparativa entre os resultados do meteorito Murchison 129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LIETA	Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Técnicas Analíticas
LNLS	Laboratório Nacional de Luz Síncrotron
LIN	Laboratório de Instrumentação Nuclear
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ExoMars	Missão não tripulada da Agência Espacial Europeia para explorar Marte
μ XRF	Micro Fluorescência de Raios X
μ CT	Microtomografia de Raios X
μ Raman	Micro Raman
INAA	Análise Instrumental de Ativação de Neutrônica
ICP-MS	Espectrometria de Massa por Plasma Acoplado Indutivamente
CCD	Sigla em inglês para Dispositivo de carga acoplada
CMOS	Sigla em inglês para Semicondutor de metal-óxido complementar
SNC	Abreviatura para Shergottitos, Nakhlitos e Chassignitos
NWA	Abreviatura para descrição de meteoritos de <i>Northwest Africa</i>
h	Constante de Planck
c	Velocidade da luz
e	Carga do elétron
V	Potencial acelerador
q	Carga de partículas em unidades da carga de elétrons
Z	Número atômico do material alvo
T	Energia cinética das partículas
M_0	Massa restante da partícula

m_0	Resto da massa do elétron
I	Intensidade medida com o elemento atenuador
I_0	Intensidade medida sem o elemento atenuador
μ	Coefficiente linear de atenuação
keV	Quilo elétron-Volts
μm	Micrometro
μA	MicroAmpère
g	Gramma

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	22
1	REVISÃO DA LITERATURA	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.2	Breve contexto histórico dos raios X e sua relevância	26
2.3	A produção de raios X	28
2.4	Emissão de fluorescência de raios X	30
2.5	Fluorescência de raios X e sua relação com a técnica de XRF	31
2.6	A produção de raios X e sua relação com a técnica de μCT	32
2.7	Interação da radiação com a matéria e a técnica de Raman	33
2.8	Astrobiologia	35
2.9	Meteoritos	37
2.9.1	<u>Classificação de meteoritos</u>	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Meteorito Marciano Zagami	42
3.2	Meteorito Marciano NWA 6963	43
3.3	Meteorito Marciano NWA 7397	44
3.4	Meteorito Lunar NWA 8277	45
3.5	Meteorito Allende (Condrito Carbonáceo CV3)	46
3.6	Meteorito Murchison (Condrito Carbonáceo CM2)	47
3.7	Método experimental para formação de imagens por μCT	48
3.7.1	<u>O instrumento de μCT</u>	49
3.8	Método experimental de análise química por técnica de μXRF	50
3.8.1	<u>O instrumento de μXRF</u>	51
3.9	Método experimental de análise química por técnica de Raman	51
3.9.1	<u>O instrumento de μRaman</u>	52
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	53
4.1	Composição química por μXRF	53
4.1.1	<u>Meteorito Marciano Zagami</u>	54
4.1.2	<u>Meteorito Marciano NWA 6963</u>	57

4.1.3	<u>Meteorito Marciano NWA 7397</u>	60
4.1.4	<u>Meteorito Lunar NWA 8277</u>	63
4.1.5	<u>Meteorito Allende</u>	66
4.1.6	<u>Meteorito Murchison</u>	69
4.2	Composição química por μRaman	72
4.2.1	<u>Meteorito Marciano Zagami</u>	72
4.2.2	<u>Meteorito Marciano NWA 6963</u>	75
4.2.3	<u>Meteorito Marciano NWA 7397</u>	82
4.2.4	<u>Meteorito Lunar NWA 8277</u>	87
4.2.5	<u>Meteorito Allende</u>	90
4.2.6	<u>Meteorito Murchison</u>	92
4.3	Composição química por μCT	94
4.3.1	<u>Meteorito Marciano NWA 6963</u>	94
4.3.2	<u>Meteorito Lunar NWA 8277</u>	96
5	DISCUSSÃO	98
5.1	Meteoritos Marcianos	98
5.1.1	<u>Meteorito Marciano Zagami</u>	99
5.1.2	<u>Meteorito Marciano NWA 6963</u>	102
5.1.3	<u>Meteorito Marciano NWA 7397</u>	114
5.2	Meteoritos Lunares	121
5.2.1	<u>Meteorito Lunar NWA 8277</u>	121
5.3	Meteoritos condritos carbonáceos	124
5.3.1	<u>Meteorito Allende</u>	124
5.3.2	<u>Meteorito Murchison</u>	126
	CONCLUSÃO	130
	REFERÊNCIAS	133

INTRODUÇÃO

Os meteoritos bombardeiam a Terra desde muito antes de haver quem os observassem. Eles são fragmentos desse vasto cosmo, viajantes cósmicos, verdadeiros sobreviventes e testemunhas fidedignas de todos os processos relacionados às nossas origens. Além disso, os meteoritos também podem ser vistos como cofres da nebulosa solar e seus minerais como as joias cósmicas que possuem informações preciosas do nosso sistema solar primitivo. Eles nos ajudam a desvendar as possíveis composições químicas da nebulosa solar, reações químicas e forças físicas produzidas durante os tempos mais primórdios da formação de nosso sistema planetário.

Fundamentalmente, as primeiras hipóteses relacionadas à possibilidade de existência de rochas oriundas de fora da Terra, como área científica, ocorreram apenas no final do século XVIII. De modo geral, as análises químicas e mineralógicas de meteoritos realizadas pelo físico alemão Ernst Chladni (1756- 1827) auxiliaram no reconhecimento desses objetos como meteoritos, além de uma grande quantidade de testemunhos relacionados a quedas de materiais rochosos que teriam vindo do céu. Devido às suas análises sem ideias preconcebidas, Chladni é considerado o pai da meteorítica. Ele averiguou uma massa de 700 kg encontrada na Sibéria, chamada de “ferro de Pallas” bem como os relatos de sua queda. Basicamente, em seus resultados foi demonstrado que a gigantesca rocha não só poderia ter caído do céu, como também era de fora da Terra, ou seja, era uma rocha oriunda do espaço. As ideias revolucionárias do físico alemão e a maneira de analisar o material extraterrestre permanecem muito próximas das teorias atuais. Por volta do século XX, o geoquímico estadunidense Claire Patterson (1922-1995) foi o responsável por realizar um estudo relacionado ao cálculo da idade da Terra. Esse estudo de grande relevância para a ciência foi feito através do método de datação Pb-Pb por espectrometria de massa, examinando e analisando o meteorito Canyon Diablo.

De forma geral, as primeiras informações que se tem sobre estudos relacionados à análise composicional de meteoritos são de técnicas de análise química. Essas técnicas se baseavam em fazer as separações de fases do material por meios físicos seguidos por ataques químicos seletivos. A partir dos anos 1960, técnicas analíticas mais modernas pouco a pouco passaram a ser introduzidas, principalmente, por apresentarem algumas vantagens em relação às técnicas clássicas, por terem um menor tempo de análise e maior sensibilidade (HUTCHISON, 2004).

Atualmente, a meteorítica é desenvolvida por grupos de pesquisadores de diversas áreas, em muitos países e com diferentes abordagens. Entre os vários enfoques existentes, o estudo laboratorial de meteoritos pode auxiliar as ciências planetárias a complementar as interpretações de dados obtidos via observações telescópicas ou via missões de sondas espaciais. Por exemplo, Hutchinson *et al.* (2014) investigaram a viabilidade de se estudar

amostras de meteoritos marcianos através de técnica analítica, motivados pelos preparativos da nova missão para Marte, cuja sonda – ExoMarsRover 2020 – está equipada com vários desses instrumentos científicos modernos para análise química, física, biológica e mineralógica.

Além disso, a análise científica de meteoritos lunares e marcianos tem fornecido informações relevantes sobre a Lua, sobre Marte e sobre o nosso próprio planeta, de forma a gerar fortes implicações vinculadas ao estudo da vida em nosso sistema solar. Nesse sentido, pode se dizer também que o estudo e a análise realizada em meteoritos possuem conexões com a área da Astrobiologia que, segundo Blumberg (2003), é a área que estuda a origem, a evolução da vida na Terra, a distribuição e o futuro da vida no universo.

Desse modo, a análise através de técnicas não destrutivas dessas rochas astrofísicas que guardam os registros da evolução cósmica de nosso sistema solar, permite obter uma compreensão de como ocorreram os processos astrofísicos que forjaram os planetas, as luas e talvez a relação com a origem da vida no sistema solar e com a nossa própria existência no universo. Dessa forma, a finalidade de trabalhar com técnicas analíticas não destrutivas é de demonstrar como elas podem ser utilizadas para auxiliar nos estudos e na caracterização de materiais geológicos extraterrestres, de maneira que seja possível gerar informações importantes para a Astrobiologia e que possam esclarecer de forma bem ilustrativa sem que seja causado dano à amostra analisada.

O trabalho foi desenvolvido através das amostras de 3 meteoritos marcianos (NWA 6963, NWA 7397 e Zagami), 1 meteorito lunar (NWA 8277) e outros 2 meteoritos condritos carbonáceos (Murchison e Allende). As amostras dos 2 condritos carbonáceos e do meteorito marciano Zagami foram fornecidas pela Dra. Maria Elizabeth Zucolotto, professora e pesquisadora do Museu Nacional vinculado à UFRJ. As amostras do meteorito marciano NWA 6963 e do meteorito lunar NWA 8277 foram fornecidas por Paulo Anselmo Matioli, pesquisador e curador do Museu Joias da Natureza-SP. E o meteorito marciano NWA 7397 foi fornecido por André Moutinho, co-fundador da Sociedade Meteorítica Brasileira (SMB), membro da International Meteorite Collectors Association (IMCA) e membro da American Meteor Society (AMS).

O desenvolvimento metodológico além de buscar obter a maior quantidade de informações de cada um desses meteoritos, também possui o intuito de gerar um protocolo de etapas de análises iniciais de materiais extraterrestres, no qual a utilização da técnica anterior não produza efeitos destrutivos em informações que possam ser obtidas a partir da técnica subsequente. Dessa maneira, as análises primárias desse trabalho tiveram como preocupação inicial obter imagens relacionadas à estrutura interna desses meteoritos. Foi possível obter essas imagens através da técnica de microtomografia computadorizada de raios X (μ CT, sigla em inglês) realizada no Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN) da COPPE, na UFRJ, a qual proporcionou informações em 2D e 3D dos componentes estruturais de cada meteorito sem a necessidade de preparação das amostras. Posteriormente, com o conhecimento e baseado nas imagens geradas pela μ CT, utilizou-se a técnica de microfluorescência de raios X (μ XRF, sigla

em inglês) a partir da instrumentação disponível no LIETA (UERJ) para realizar a análise multielementar de cada uma dessas amostras meteoríticas. A técnica de μ XRF forneceu a composição química de cada amostra por meio de informações qualitativas e bem ilustrativas das regiões em que cada um dos elementos se encontrava nos meteoritos analisados. Com base nessas informações, foram feitas análises por μ Raman no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) que, de forma eficiente e sem o requerimento de qualquer preparação das amostras, gerou resultados das bandas dos modos vibracionais das moléculas que se relacionam diretamente com os aspectos mineralógicos de cada uma das amostra de meteorito.

Objetivos

Analisar os meteoritos através de técnicas não destrutivas demonstrando que as técnicas de μ CT, μ XRF, e μ Raman podem ser utilizadas para auxiliar à Astrobiologia de maneira esclarecedora e bem ilustrativa na caracterização de materiais geológicos extraterrestres.

Objetivos Específicos

- a) Examinar as estruturas dos meteoritos de forma não destrutiva por meio da μ CT
- b) Averiguar a composição química elementar através da μ XRF
- c) Verificar que tipos de minerais podem estar presentes nos meteoritos utilizando a técnica de μ Raman
- d) Averiguar as implicações que os resultados podem ter para o estudo da vida no sistema solar

O desenvolvimento deste trabalho está dividido em capítulos com os seguintes tópicos:

- a) Capítulo 1: Revisão da literatura sobre o tema do estudo;
- b) Capítulo 2: Serão discutidos sucintamente alguns conceitos físicos necessários para a compreensão do desenvolvimento dessa pesquisa. Além disso, será abordada a temática da Astrobiologia, seus conceitos e uma breve descrição sobre meteoritos;
- c) Capítulo 3: Serão apresentados os materiais, instrumentos e a metodologia das técnicas analíticas desenvolvidas neste trabalho;
- d) Capítulo 4: Serão apresentados os resultados obtidos de cada meteorito a partir de cada uma das técnicas analíticas utilizadas neste trabalho;
- e) Capítulo 5: Serão apresentadas às análises e a discussão dos resultados obtidos;
- f) Capítulo 6: Conclusão

1. REVISÃO DA LITERATURA

Ao longo dos últimos 10 anos, houve uma vasta quantidade de atividade relacionada ao estudo científico e à exploração de Marte. A NASA (sigla em inglês de National Aeronautics and Space Administration – Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço), juntamente com parceiros internacionais, iniciou várias missões orbitais. Do mesmo modo, missões com rovers (por exemplo, *Spirit*, *Opportunity* e a *Curiosity*) exploraram Marte desde 2004 até o presente, fornecendo muitos esclarecimentos sobre a mineralogia e a geologia da superfície do planeta vermelho. Por sua vez, os dados coletados dessas missões geraram um intenso trabalho em cálculos teóricos e experimentos sobre os campos de estabilidade das fases de alteração relevantes de Marte, que incluem sulfatos e silicatos (PAPIKE *et al* 2009). Segundo Gladman (1996; 1997), estudar os minerais presentes em meteoritos marcianos é extremamente importante para a ciência planetária e para Astrobiologia, pois auxiliam no norteamento de possíveis futuras missões espaciais a Marte, semelhante à missão *Exomars* 2020.

Embora a maioria dos registros geológicos tenha sido destruída, assim como aconteceu na Terra, a evolução geológica da superfície marciana, suas informações físicas e características químicas ainda podem ser estudadas através do meteorito marciano (NIMMO; TANAKA, 2004). Atualmente, são reconhecidos mais de 100 meteoritos marcianos e que estão relacionados na forma de basaltos, rochas máficas e ígneas ultramáficas intrusivos (MCCUBBIN; JONES, 2015). Essas amostras possuem alguns registros de vulcanismo de Marte durante a maior parte de sua história desde o acréscimo e a diferenciação, nos últimos tempos. Mais importante ainda, os meteoritos marcianos fornecem a "verdade do solo" sobre a superfície mineralógica de Marte.

Em 1988, Gooding *et al.* apresentaram dados relacionados possíveis vestígios de carbonato de cálcio detectado em meteoritos marcianos, demonstrando também, como isso serviu de motivação para buscas e tentativas de detecção de rochas calcárias e calcita em Marte através de técnicas de infravermelho. Posteriormente, em 2001 McSween Jr. descreveu a relação que a água poderia ter com os piroxênios em meteoritos e também como esses poderiam se relacionar com a superfície marciana de onde foram formados. De acordo com Dimanov e Dresen (2005), o diopsídio, por exemplo, pode contribuir para a constatação e para o entendimento da atividade geológica no passado de Marte, pois este seria um mineral formado em Zonas de Cisalhamento. Desse modo, uma contribuição que a análise e os estudos que esses minerais em meteoritos marcianos poderiam proporcionar à astrobiologia, seriam uma possível elucidação da evolução do manto e da crosta marciana. Segundo Szabó *et al.* (2009), as rochas ultramáficas tiveram uma grande importância no passado arqueano da Terra. Nesta época, a temperatura mais elevada do manto permitia maiores taxas de fusão, magmas ricos em magnésio (Mg) eram gerados, de maneira a conseguirem alcançar a superfície da crosta primitiva e consolidar-se na forma de derrames de komatiitos, que são rochas peculiares de grande interesse para estudo da evolução do manto e da crosta arqueana terrestre. Assim, poderia se trabalhar

de maneira análoga por meio de metodologia de estudo de mineralogia comparada de forma a entender mais sobre a evolução da geologia marciana (BUCHER; FREY, 1994; SPEAR, 1995; SZABÓ, 2009).

Além disso, a actinolita, segundo Greenberg (2012), um hidróxido de silicato de cálcio, magnésio e ferro, pode contribuir astrobiologicamente em um dos problemas clássicos da ciência planetária, que está relacionado ao mecanismo de retenção de água durante a formação planetária. E finalmente, de acordo com Mccubbin & Jones (2015), a apatita é outro mineral importantíssimo em meteoritos marcianos que pode ser um indicador de existência de meio aquoso no passado de Marte e assim poderia contribuir na questão de inferências de ter existido condições de habitabilidade em Marte.

No que cerne, a questão do desenvolvimento de pesquisas científicas relacionados à Lua possui como foco principal a origem, formação da Lua e sua relação com o planeta Terra. Essencialmente, os dados gerados por pesquisas sobre meteoritos lunares podem, segundo os autores Canup e Kevin, 2000; trazendo informações importantes sobre os processos astrofísicos necessários para formação da Lua. Além disso, a utilização de técnicas analíticas pode ser útil porque seus resultados podem ter implicações sobre as hipóteses de origem da Lua. De acordo com Ringwood, Kato e Hibberson (1990; 1991); a detecção de elementos, como por exemplo, Cromo (Cr), Vanádio (V) e o Manganês (Mn) através das análises químicas podem fornecer pistas sobre o passado de nosso satélite natural de maneira a compreendermos a sua verdadeira origem. Além disso, em 1991 estudos feitos por O'Neill relatam a relevância das análises químicas podem trazer para se obter informações sobre a possibilidade de ter ocorrido no passado um impacto gigante, o qual teria gerado a Lua.

Em relação aos outros dois meteoritos neste trabalho, o meteorito Murchison, assim como o Allende, são classificados como condritos carbonáceos. Fundamentalmente, o meteorito Murchison, juntamente com o meteorito Allende, compreende um dos meteoritos mais famosos e estudados da História. A composição do Murchison chama a atenção por já terem sido detectados inúmeros aminoácidos diferentes, açúcares, álcoois, ácidos carboxílicos e até bases nucleicas (BULLETIN, 2017). Esses resultados são uma composição de diversas análises. Historicamente, uma análise química foi relatada por Jarosewich (1971) e uma pequena descrição foi publicada por Ehmann et al. (1970). Posteriormente, uma descrição um pouco mais detalhada sobre a rocha extraterrestre foi dada por Fuchs, Jensen e Olsen (1970) antes da reunião de 1970 da *Meteoritical Society*.

Por fim, segundo Greenberg, Mendoza-Gómez e Pirronello, 2012; relatam que os meteoritos condritos carbonáceos podem nos auxiliar em um dos problemas clássicos da ciência planetária relacionado ao mecanismo de retenção por grãos sólidos durante a formação planetária.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados, de forma sucinta, os conceitos físicos necessários para o desenvolvimento do trabalho realizado. Essencialmente, será discutido o processo de formação de raios X e abordado o fenômeno de interação da radiação com a matéria. Além disso, serão abordados também alguns temas que são importantes para o entendimento e compreensão das pesquisas com meteoritos, com a finalidade de demonstrar sua relevância para a Astrobiologia e suas possíveis implicações com o estudo da vida no sistema solar.

2.1. Breve contexto histórico dos raios X e sua relevância

No final do século XIX, muitos físicos eminentes acreditavam que a natureza do mundo físico estava substancialmente esclarecida. Porém, este paradigma foi rompido já durante a época por uma série de descobertas que ocorreram em um curto intervalo de tempo. Muitas dessas descobertas envolviam inovações científicas oriundas do estudo de radiações e ondas eletromagnéticas. Neste período, ocorreu a descoberta dos raios X em 1895 por Wilhelm Conrad Roentgen, a radioatividade foi observada pela primeira vez em 1896 por Henri Becquerel e o elétron foi descoberto por Joseph John Thomson em 1897. No entanto, dentre tantas descobertas e acontecimentos científicos marcantes que ocorreram nesta época, talvez possa ser dito que a descoberta que possuiu a maior importância para a origem e desenvolvimento das tecnologias baseadas em raios X tenha sido a de Wilhelm Conrad Roentgen a partir do experimento com raios catódicos (NASCIMENTO-DIAS *et al*, 2017). O fenômeno para se produzir raios X, nessa ocasião foi decorrente de feixes de elétrons que foram emitidos por um fio aquecido e que foram atraídos por uma placa metálica com polaridade positiva (anodo) com relação à placa emissora (catodo), com todo este esquema funcionando dentro de um recipiente com atmosfera rarefeita. Vale ressaltar que como naquela época a natureza desse fenômeno era desconhecida, Roentgen deu o nome de "raios X" (SAITOVITCH, 1995).

A utilização das aplicações tecnológicas baseadas nos princípios científicos em raios X, aconteceu primeiramente entre os anos 60 e 70. Nesta época, a evolução inicial a partir dessa nova tecnologia se concentrou principalmente na imagiologia diagnóstica médica. Porém, houve no final da década de 1970 esforços especiais feitos para a aplicação da tomografia computadorizada no ambiente industrial. De forma geral, isso se deve também muito ao desenvolvimento de estruturas matemáticas feitas por Johann Karl August Radon que possibilitou, por exemplo, o desenvolvimento da tomografia computadorizada (CT, sigla em inglês). Assim, Allan M. Cormack e Godfrey N. Hounsfield foram laureados com o Prêmio Nobel de Medicina em 1979, por construírem o primeiro scanner de tomografia computadorizada (SAITOVITCH, 1995).

Atualmente, as instrumentações que se baseiam em técnicas de raios X deixaram de ser utilizadas apenas para a realização de diagnósticos médicos e passaram a ser protagonistas no estudo de inúmeras aplicações de diversas áreas da química, biologia, meio ambiente e ciência dos materiais. Dessa forma, a *microtomografia de raios X* (μ CT, sigla em inglês) e a *fluorescência de raios X* (XRF, sigla em inglês) foram técnicas utilizadas neste trabalho que são desenvolvidas a partir do fenômeno dos raios X, passaram a chamar a atenção de diferentes áreas em virtude do alto potencial que ambas as técnicas possuem de fornecer informações de maneira não destrutiva.

A CT tem contribuído em diferentes campos de investigação como paleontologia na análise de imagens em 2D e até 3D das estruturas ósseas, houve na década seguinte o interesse e a utilização dessa técnica aplicada pesquisa de solo, através da análise de estruturas sedimentares, porosidade e densidade desse material. a partir de imagens tridimensionais. Além disso, mais recentemente ela passou a ter um papel fundamental como técnica analítica não destrutiva, utilizada para análise de materiais valiosos e raros como os meteoritos (ARNOLD *et al*, 1982).

A XRF, que é a outra técnica utilizada neste trabalho, com o tempo também foi aprimorada com o desenvolvimento de novas tecnologias. Hoje em dia, ela também vem contribuindo em diversas áreas. A utilização da XRF tem sido empregada em pesquisas de ciências ambientais relacionadas à determinação de elementos químicos em águas contaminadas e águas naturais (CARVALHO *et al*, 2002; PATACA *et al*, 2005; YAMINI *et al*, 2009) e também em estudos vinculados a análises de metais em solos (ANJOS, 2000). Além disso, na Botânica, é possível ver a técnica de XRF sendo utilizada na classificação de algumas espécies, gêneros e famílias de plantas, além da possibilidade de analisar e determinar a presença de cobre e molibdênio em plantas (ALEXANDRE; BUENOO, 2006). Em outras áreas, temos exemplos de aplicações em arqueologia sendo utilizada em análises de peças de ouro e em estudo de fluídos mineralizadores em depósitos epitermais (RIOS, 2016; GAMA FILHO, 2015). Além disso, ainda existem aplicações em arqueometria na análise de peças e acervos culturais (GIGANTE; CESAREO, 1998; CALZA, 2007). Através da técnica de XRF também é possível realizar a análise de elementos químicos presentes em amostras de meteoritos (MAYNE; EHLMANN; DAVIAU, 2011; DAVIAU; EHLMANN; MAYNE, 2012; DUNN, 2015), que é o grande interesse deste trabalho.

Por se tratarem de técnicas complementares a utilização delas, é de grande relevância, pois permite ter um entendimento maior das relações entre as diferentes fases do material e os tipos de compostos químicos presentes em uma determinada região do objeto analisado. Assim, a combinação entre as técnicas de XRF e tomografia computadorizada permite ter caracterização da composição do material analisado.

2.2. A produção de raios X

Os raios X são radiações eletromagnéticas com frequências $> 3 \times 10^{18} \text{s}^{-1}$. Este fenômeno pode ser produzido experimentalmente através de instrumentos científicos, em que elétrons são emitidos por um cátodo de filamento quente e acelerados por um campo elétrico muito intenso. Neste caso, temos que a energia cinética após a aceleração será:

$$\frac{1}{2}mv^2 = Ve \quad (1)$$

m = massa

v = velocidade

V = Potencial acelerador

e = carga do elétron

Quando estes elétrons atingem o ânodo são desacelerados através de colisões com o material do alvo. O grande aumento de temperatura no alvo indica que a maior parte desta energia cinética é transformada em calor no processo de desaceleração dos elétrons enquanto somente 0.01 - 1% é transformada em radiação. Os elétrons liberam sua energia em forma de radiação por um ou mais sub-processos. É por esta razão que o fenômeno de produção de raios X pode gerar um espectro de energia de duas formas distintas que dependerá do tipo de interação que ocorrerá durante este processo. O espectro contínuo de raios-X, tem um comprimento de onda limite λ_0 :

$$\lambda_0 = \frac{hc}{eV} \quad (2)$$

Nesta equação o “h” é a constante de Planck, “c” a velocidade da luz, “e” a carga do elétron e o “V” é o potencial acelerador.

O *brehmsstrahlung* responsável pela formação dos espectros contínuos de raios X ocorre quando elétrons ou partículas carregadas perdem energia ao interagirem com o campo coulombiano de um núcleo atômico. Esse processo resulta na emissão da radiação eletromagnética na forma de raios X. A probabilidade de perda de energia radiativa (*Bremsstrahlung*) é aproximadamente proporcional q^2z^2T/M_0^2 , onde q é a carga de partículas em unidades da carga de elétrons, Z é o número atômico do material alvo, T é a energia cinética das partículas e M_0 é a massa restante da partícula.

De modo geral, proporção de energia perdida por *Bremsstrahlung* em relação a perda por ionização pode ser aproximado por:

$$\left(\frac{m_0}{M_0}\right)^2 \frac{ZT}{1600 m_0 c^2}, \quad (3)$$

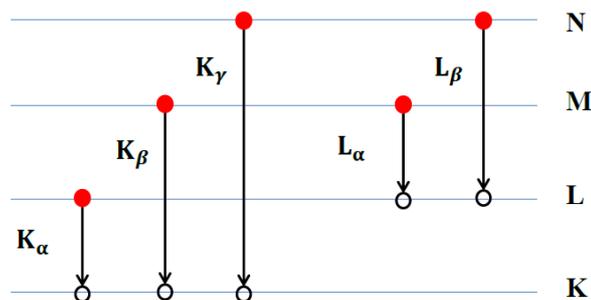
Sendo aqui o m_0 o resto da massa do elétron.

Experimentalmente, observam-se picos superpostos ao espectro *brehmsstrahlung*, picos estes que são característicos do alvo. O espectro característico é gerado pela interação de partículas carregadas do feixe com os átomos do alvo, uma vez que as colisões os ionizam ou excitam seus estados atômicos.

Todavia, quando a partícula incidente possui uma energia suficiente para ejetar um elétron de um orbital que se encontra em uma das camadas eletrônicas mais internas, isso gera um espectro discreto. Assim, neste caso, ocorre uma “vaga temporária”, que torna o átomo instável e faz com que elétrons das camadas mais externas se desloquem para preenchê-la. Desse modo, quando o elétron se desloca de um nível mais externo para um mais interno na estrutura eletrônica, ele libera o excesso de energia na forma de radiação eletromagnética ionizante, cuja intensidade é igual a diferença das energias de ligação das camadas eletrônicas correspondentes, gerando os chamados raios X característicos responsáveis pela formação dos espectros discretos.

Dependendo da transição realizada pelo elétron, os raios X emitidos são classificados segundo a nomenclatura mostrada no diagrama de níveis de energia (Figura 1).

Figura 1 – Diagrama de níveis eletrônicos e principais transições de raios X. A estrutura fina dos orbitais de energia não é mostrada.



Fonte: O Autor, 2018.

Na espectroscopia de raios X utiliza-se a seguinte notação: as linhas características emitidas são identificadas pela camada para onde ocorre a transição eletrônica (K, L, M, etc.), seguido de uma letra grega de ordem crescente e que em geral indica a intensidade da linha (TABACNIKS, 2005). Se o átomo é ionizado pela ejeção de um elétron da primeira camada então é K. No caso de um elétron da segunda camada realizar uma transição para ocupar vacância, o raios X emitido recebe a notação K_α . Um detector sensível às energias dos raios X emitidos (K_α , K_β , L_α , L_β , etc) pela amostra permite identificar o átomo emissor.

2.3. Emissão de fluorescência de raios X

A fração da radiação incidente que leva a emissão de uma determinada linha de raios X característicos é determinada por uma probabilidade de excitação que é produto de três outras probabilidades (LACHANCE; CLAISSE, 1995):

$$p_{E_i} = p_{nível} \cdot p_{linha} \cdot p_{fluorescência} \quad (4)$$

onde:

$p_{nível}$ é a probabilidade que a radiação incidente retire elétrons de um dado nível quântico, sendo possível ser do nível K, L, M ou outros.

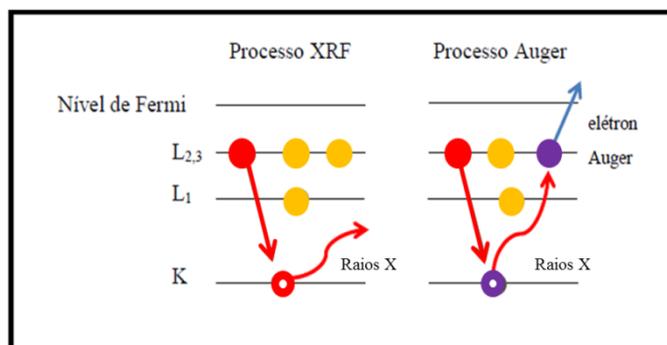
p_{linha} é a probabilidade que uma determinada linha seja emitida dentro de sua série. Para um elétron retirado do *nível* K podemos ter as seguintes transições do *nível* L: K-L₂ e K-L₃;

$p_{fluorescência}$ é a probabilidade de ocorrer emissão de Fluorescência de raios X ao invés de elétron Auger, a partir de uma transição realizada entre dois estados quânticos.

De acordo com Lachance e Claisse (1995), quando um elétron orbital é liberado o átomo fica excitado e dessa forma os elétrons de níveis mais energéticos vão preenchendo as vacâncias. Desse modo, a energia de transição é liberada de duas formas:

- Como um fóton na forma de Fluorescência de raios X;
- Como um elétron na forma de elétron Auger, ilustrado na Figura 2. Neste caso, o fóton liberado é reabsorvido dentro do átomo por outro elétron. Este elétron é liberado do átomo com uma energia igual à diferença entre a energia do fóton absorvido e sua energia de ligação.

Figura 2 – Esquema de um processo XRF e um processo Auger



Fonte: O Autor, 2018.

Uma importante consequência na emissão de elétrons Auger é a menor produção do número de raios X característicos em relação ao esperado. Assim, podemos definir o

rendimento de fluorescência de um modo geral como o número de raios X efetivamente emitidos em relação ao número de vacâncias produzidas em um dado nível.

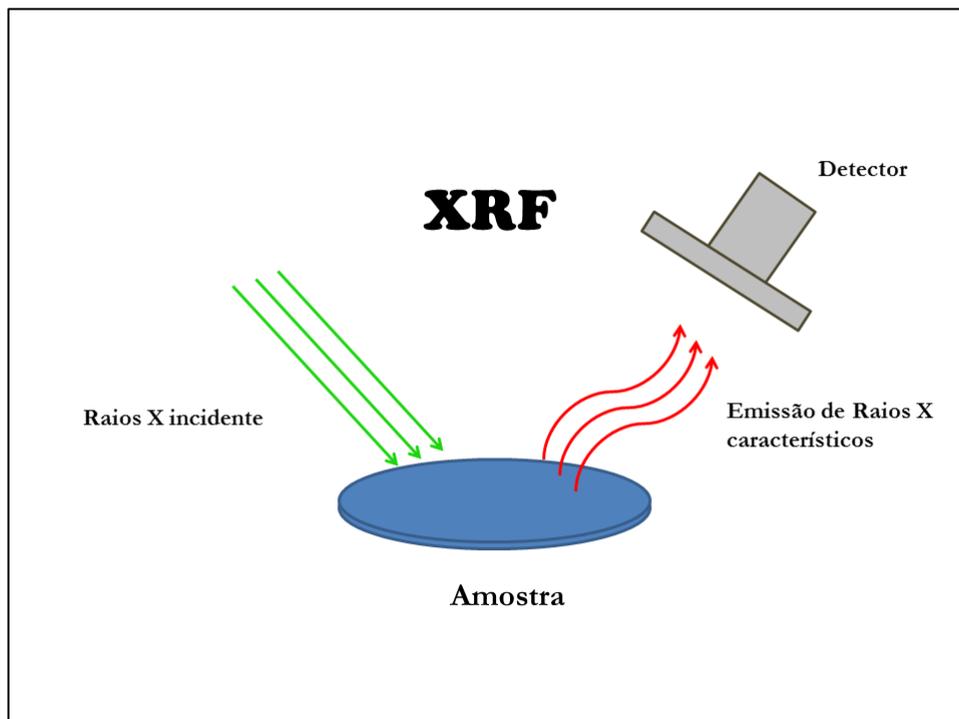
2.4. Fluorescência de raios X e sua relação com a técnica de XRF

A XRF é uma técnica elementar não destrutiva capaz de realizar a análise e as determinações quantitativa e qualitativa da concentração de elementos em uma ampla variedade de tipos de amostras, em que suas aplicações incluem análises químicas de elementos em ciências ambientais, arqueologia, análise de meteoritos, análises biológicas, perfil de profundidade química em filmes finos e mapeamento químico. Fundamentalmente, essa análise é feita e baseada em princípios físicos da fluorescência X, simples e bem conhecidos, de que os elementos químicos emitem radiações características quando submetidos a uma excitação adequada (BERTIN, 1975).

Dessa forma, é possível considerar que a análise por Fluorescência de raios X ilustrada na Figura 3, pode ser dividida em três etapas:

- Incidência dos raios X provocando a excitação dos elementos que constituem a amostra;
- Produção dos raios X característicos emitidos pelos elementos presentes na amostra;
- Deteção dos raios X característicos e obtenção dos espectros de XRF.

Figura 3 – Uma representação esquemática do processo de XRF.

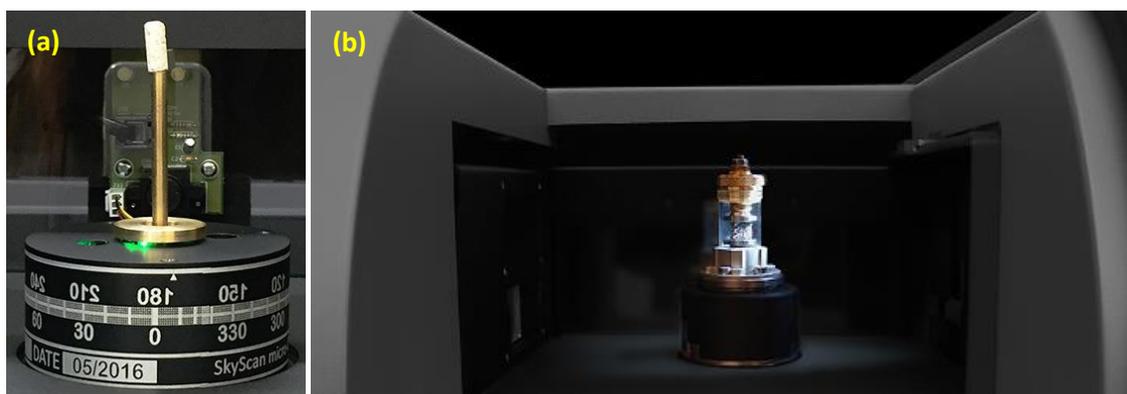


De modo geral, as aplicações qualitativas de XRF utilizando instrumentação moderna podem ser consideradas diretas, sendo essas informações geradas através das *linhas* de emissão detectadas e classificadas de acordo com seu valor energético. Assim, é importante mencionar que as determinações quantitativas utilizando a técnica de XRF vão desde a simples utilização de curvas intensidade por concentração padrão até sofisticados programas que convertem intensidade para concentração.

2.5. A produção de raios X e sua relação com a técnica de μ CT

A técnica de microtomografia computadorizada, também denominada de μ CT, é baseada na produção de raios X e desenvolvida a partir da equação de atenuação dos raios X. Em geral, todos esses instrumentos tecnológicos possuem o mesmo princípio de funcionamento, em que o objeto fixado em uma base que rotacional e posicionado entre uma fonte de raios X e um detector de raios X, tal como apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Imagens do μ CT da Bruker



Legenda: Na imagen (a) o porta amostra e seu sistema de rotação, na imagem (b) do porta amostra e o interior do microtomógrafo ilustrando como as amostras ficam posicionadas para serem adquiridas as imagens computadorizadas. Fonte: <http://bruker-icroct.com/products/stages.htm>

Essa é uma técnica não destrutiva que permite a análise de cortes internos do material analisado, ou seja, são feitas centenas de seções transversais microtomográficas que permitem a visualização tridimensional interna das amostras, além de nos fornecer quantificações automatizadas de área e/ou volume (FERNANDES.; APPOLONI; FERNANDES, 2012).

A aquisição das imagens é obtida devido à propriedade que os materiais possuem de atenuarem este tipo de radiação de forma diferenciada, em que a resposta que recebemos depende da composição química e densidade do material analisado. Desse modo, é importante notar então que cada material possui um coeficiente de atenuação intrínseco, lembrando que a atenuação está vinculada à redução de intensidade de um feixe, conforme ele atravessa a matéria antes de chegar ao detector.

A relação da radiação incidente e a diminuição ao atravessar o material é medida por um detector que se baseia na lei de Lambert-Beer:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (5)$$

I = intensidade medida com o elemento atenuador

I_0 = intensidade medida sem o elemento atenuador

μ = coeficiente linear de atenuação

x = espessura do objeto atenuador

Além disso, da equação de Lambert-Beer, é possível determinar uma expressão analítica para μ :

$$\mu = \frac{\ln(I_0/I)}{x} \quad [\text{cm}^{-1}] \quad (6)$$

Dessa forma, também é possível relacionar o coeficiente linear de absorção com a densidade do material (ρ) através do coeficiente de absorção por massa, μ_m

$$\mu_m = \mu/\rho \quad [\text{cm}^{-2}/\text{g}] \quad (7)$$

Vale ressaltar que o coeficiente de absorção por massa μ_m é característico para cada substância, independente do estado de agregação de modo a ser possível fornece a probabilidade de um fóton de Raios X ser absorvido por um determinado elemento. Assim, podemos dizer que as imagens microtomográficas que visualizaremos serão formadas através da medida da radiação atenuada gerada pelos diferentes materiais que compõem a amostra, pois cada material possui diferentes taxas de absorção de radiação eletromagnética (MEES et al, 2003).

2.6. Interação da radiação com a matéria e a técnica de Raman

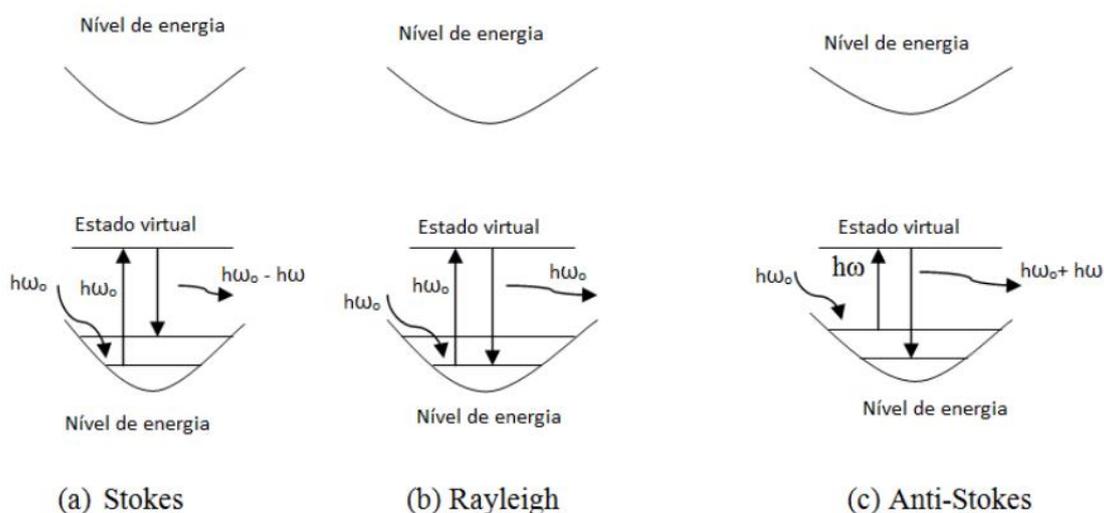
As técnicas de espectroscopia são baseadas na interação da radiação eletromagnética com a matéria. Nesses casos, dependendo da energia da radiação empregada, é possível obter informações sobre diferentes propriedades do sistema, sendo esses de extrema relevância para a caracterização de materiais em diversos campos científicos.

Existem diferentes comprimentos de onda e obviamente de radiação. Dessa forma, o uso da radiação na região do ultravioleta ou do visível (UV-Vis) muda a energia dos elétrons em moléculas e íons (o que confere cor aos objetos), ao passo que a radiação no infravermelho altera as vibrações dos átomos nessas espécies químicas (RODRIGUES; GALZERANI, 2012).

Essencialmente, quando uma onda eletromagnética atinge a superfície de um meio qualquer, uma fração da luz é retida enquanto que o resto é transmitido para dentro do material. Nesse momento, temos uma parcela da radiação sendo transmitida através da superfície, em que parte dessa radiação é então absorvida na forma de calor e outra parte é retransmitida na forma de luz espalhada. Desse modo, ao final desse processo a luz emergente apresenta em seu bojo uma pequena parcela composta de frequências diferentes daquela incidente inicialmente. Este processo é denominado *espalhamento Raman* (DOUGLAS; HOLLER; NIEMAN, 2002).

A interação que ocorre nesse processo entre a luz incidente e o modo vibracional, provoca perdas e ganhos de energia no feixe, dando origem à dispersão Raman, composta por diferentes radiações com comprimento de onda inferior (dispersão Stokes) e superior (dispersão anti-Stokes) à radiação incidente. É preciso ressaltar que o lado analisado é o da dispersão Stokes por ser o lado mais intenso devido a perda de energia se tratar do fenômeno mais provável de acontecer (Figura 5).

Figura 5 – Processo de dispersão Raman



Legenda: Representação esquemática dos processos de espalhamento Rayleigh, Raman Stokes e Raman anti-Stokes. ω_0 está relacionado a frequência de fóton incidente.

Fonte: Rodrigues; Galzerani (2012).

O espectro Raman gerado por este processo fornece uma medida direta das energias dos modos normais de oscilação de um meio, que dependem intrinsecamente das interações entre os átomos que constituem a matéria. Dessa forma, o resultado obtido a partir da técnica de Raman, fornece um registro da intensidade da radiação espalhada pela amostra em função da energia dessa radiação. Assim, para que exista a possibilidade de se realizar uma comparação com a transição direta do estado fundamental ao vibracional, seja ela proibida ou não, o espectro Raman é apresentado como um gráfico da intensidade da radiação espalhada em função da diferença ou perda de energia os números de onda incidente e espalhado (Δk) expressa em comprimento de onda (cm^{-1}) (FARIA; AFONSO; EDWARDS, 2002).

2.7. Astrobiologia

Desde o início das civilizações, o ser humano sempre expressou curiosidade em saber sobre as suas origens. Embora, a pergunta “o que é vida?” possa aparentar ser uma questão simples, há nela, entretanto, uma enorme complexidade, fundamentalmente, por causa das inúmeras interpretações que cada pessoa pode ter a cerca disso. Por milênios, questões fundamentais como essa e outras tais como “de onde viemos?”, “por que estamos aqui?” e “para onde vamos?” ou se “estamos sós no Universo”, instigaram líderes religiosos, artistas, filósofos e cientistas a encontrarem respostas que pudessem satisfazer nossa inquietação natural.

Dessa forma, a Astrobiologia se mostra extremamente importante para a busca de respostas que satisfaçam essas questões, pois ela se propõe a investigar não apenas a origem e a evolução da vida na Terra, mas também a distribuição e o futuro da vida no universo (BLUMBERG, 2003). Além disso, segundo GALANTE *et al* (2016), ela busca compreender o fenômeno da vida em um contexto cósmico através de técnicas modernas e com o uso do rigor da metodologia científica.

De acordo com o diagrama apresentado na Figura 6, a Astrobiologia é uma ciência emergente do método científico, a partir da qual é possível se trabalhar com abordagens indutivas e dedutivas.

Figura 6 – Diagrama do método científico utilizado pela Astrobiologia



Fonte: Paulino_Lima & Lage, 2010.

A abordagem indutiva é feita por meio de coleta de dados através de observações, trabalhos de campo ou em experimentos de laboratório, para que a partir desses resultados venha se criar uma hipótese científica. Em contraponto, na abordagem dedutiva, primeiro se cria uma hipótese, para então coletar dados que possam dar embasamento, fundamentação e comprovação à hipótese formulada. Dessa forma, pela primeira vez na história da humanidade, é possível investigar com o método científico utilizado pela Astrobiologia, questões relacionadas à origem da vida na Terra, habitabilidade planetária e a possível existência e distribuição de vida fora de nosso planeta (PAULINO-LIMA; LAGE, 2010).

Historicamente, existem diversos nomes considerados sinônimos à astrobiologia tais como; exobiologia, bioastronomia, xenobiologia, cosmobiologia, astrobotânica,

exossociologia e exopaleontologia. Antes do termo Astrobiologia se consolidar com a fundação do Instituto de Astrobiologia da NASA (NAI, sigla em inglês), cada um desses termos eram utilizados por diversos grupos e associações de pesquisas. Porém, inúmeros desses prefixos caíram em desuso ao longo do tempo por dependerem da descoberta de vida extraterrestre. Outros prefixos, no entanto, apesar de ainda encontrados com significados muito similares à temática astrobiológica, perderam força devido a fazerem alusão a algo fora da Terra (PAULINO-LIMA; LAGE, 2010). Um exemplo disso é o termo “exobiologia”, que se difundiu bastante por causa do apoio de nomes fortes na ciência dos Estados Unidos, como o de Joshua Lederberg, prêmio Nobel de Medicina em 1958 e autor do termo (GALANTE *et al*, 2016). Dessa forma, quando os conceitos “restritos” da exobiologia são expandidos para a atual astrobiologia, a orientação pela busca de vida fora da Terra passa a ter um novo contexto, o qual é norteado pelo melhor conhecimento da vida no próprio planeta. Por isso, o termo Astrobiologia vem sendo utilizado com maior frequência em diversos centros de pesquisa, pois coloca as questões sobre origem, evolução da vida na Terra como motivação central da palavra.

Dessa forma, se procura por vida em outros planetas, deve-se tomar como base “a vida tal como a conhecemos na Terra” e as condições necessárias para ela existir. Desse modo, é preciso estudar amplamente o ambiente terrestre, os eventos atmosféricos, a geologia planetária e as reações físico-químicas que ocorrem em ambiente da Terra, com a finalidade de entendermos se a vida pode se originar em outro planeta, através da extrapolação do conhecimento biológico existente para possíveis condições ambientais extraterrestres. Então, resumidamente é necessário conhecer a história da Terra e posteriormente ou paralelamente entender como se deu o processo de formação e evolução do sistema solar.

O início de nossa história se passa a partir da formação do planeta Terra. A Terra foi formada a partir de materiais provenientes de subprodutos das reações nucleares em estrelas e supernovas antigas, oriundas de uma química forjada nas nuvens moleculares do espaço. Apesar de terem se passados bilhões de anos, o nosso planeta permanece recebendo energia do Sol, sendo atingido constantemente por partículas de raios cósmicos e bombardeado por impactos de matéria trazida dos confins do Sistema Solar através de viajantes cósmicos como cometas, asteroides ou meteoroides. Todas essas relações e conexão cósmica ficam ainda mais evidentes quando nota-se que toda matéria viva é composta, segundo Daminieli, A.; Daminieli, D. (2007), basicamente por quatro elementos químicos, que são o carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, que, somados, dariam aproximadamente 99,9% da composição dos seres orgânicos vivos conhecidos e presentes na Terra. Assim, os estudos ligados às análises físicas e químicas de meteoritos por meio de técnicas analíticas são de vital importância para a busca de informações relacionadas a diversos tipos de moléculas e de talvez nos auxiliar a compreender essa relação cósmica da Terra, tal como a evolução de sistema solar.

2.8. Meteoritos

Primeiramente, para que haja um bom entendimento a cerca do que iremos discutir nesse tópico, é necessário que algumas considerações sejam feitas em relação a certas terminologias. Embora, os termos **meteoróide**, **meteoro** e **meteorito** tenham a mesma raiz grega “meta” (acima) a qual gerou 'meteor(o)' e serem o mesmo material astrofísico, existem certas diferenças e conceitos que os distinguem um do outro.

Os **meteoróides** são corpos que se encontram no Universo, com tamanhos variados em torno de 10 μm a alguns milhares de metro, e que estão a circular o meio interplanetário de forma a estarem suscetíveis a cair na Terra devido à ação da gravidade. Quando esses objetos celestes entram em no planeta, basicamente, provocam um fenômeno visual de rastros luminosos, o qual é associado à sua passagem através da atmosfera terrestre. Geralmente, é mais fácil ver esses clarões cruzando rapidamente e repentinamente o céu em cidades distantes com baixa poluição luminosa, em praias ou em campos durante noites límpidas e sem luar. Este fenômeno, que é popularmente conhecido como “estrela cadente”, na verdade, são os corpos celestes cientificamente denominados como **meteoros**. Por fim, os **meteoritos**, são então, meteoróides que conseguiram “vencer” à atmosfera terrestre, devido a ter tamanho e resistência suficiente para sobreviver à queima como meteoro e assim atingir a superfície. Assim, esse material residual dessas “bolas de fogo” que cai sob a superfície terrestre é o que chamamos de **meteoritos**.

Dessa forma, os meteoritos são artefatos astrofísicos provenientes de materiais ejetados de planetas, satélites ou de corpos celestes como meteoroides, asteroides e cometas. Porém, uma parte desses objetos é oriunda da nebulosa solar, de um material forjado no início da formação de nosso sistema solar. Basicamente, é possível dizer que a formação desses pequenos corpos provenientes da nebulosa solar era de materiais que giravam ao redor da protoestrela (o Sol) e que começaram a se aglutinar em pequenas partículas de poeira. Esse material precipitado em diversas zonas formou primeiramente os corpos menores, como os meteoritos metálicos e condriticos. Posteriormente, esses objetos iniciaram pequenos processos diversificados de fusão por decaimento de isótopos de vida curta, metamorfismo por hidrotermalismo e impacto, entre tantos outros. Desse modo, à medida que esses materiais coalesceram, originaram os planetesimais e que à medida que passaram a ganhar ainda mais massa e limpavam a sua órbita, deram origem ao número reduzido de planetas que vemos atualmente. Assim, pode-se dizer que os meteoritos são fragmentos históricos de todo esse processo astrofísico que formou nosso sistema solar.

Em geral, devido aos meteoritos terem essa origem em comum com os demais objetos do sistema solar, eles nos permitem obter informações importantes a respeito das características da evolução química e física do material primordial que formou grande parte dos planetas e de outros corpos do nosso sistema solar. Além disso, os meteoritos possuem inúmeras implicações para o estudo da vida no sistema solar. Os meteoritos condritos carbonáceos, por exemplo, possuem uma estrutura baseada em carbono e

compostos orgânicos. Outros exemplos são os meteoritos marcianos e os lunares. Os meteoritos marcianos podem fornecer informações relacionadas à possibilidade de saber se no presente ou no passado recente de Marte existiram condições de habitabilidade, em que a vida poderia ter se estabelecido. E nos meteoritos lunares é possível estudar o processo da origem da Lua e sua relação com a formação do nosso planeta.

Assim, a análise dessas rochas astrofísicas por técnicas não destrutivas possibilita construir modelos evolutivos, que permite e ajuda a obter uma compreensão das complexidades da história de como ocorreram os processos astrofísicos durante a evolução do sistema solar até os dias atuais.

2.8.1. Classificação de meteoritos

Primeiramente, em relação à nomenclatura que esses objetos recebem é feita referenciando-se o nome do local onde caíram ou onde foram encontrados. Posteriormente, os meteoritos identificados são registrados no *Meteoritical Bulletin Database* e pela *The Meteoritical Society*.

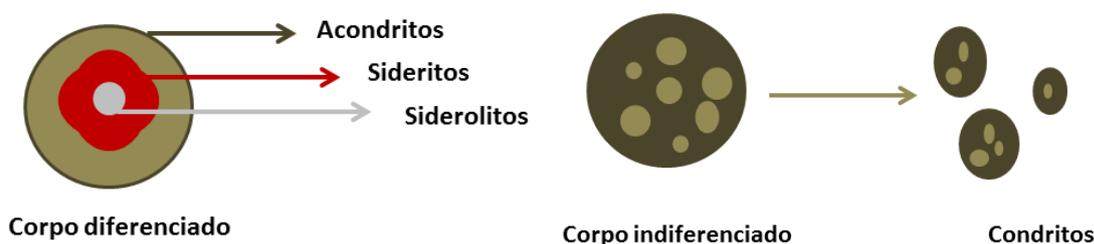
No que cerne os critérios adotados para a classificação de meteoritos, elas se referem à sua entrada na atmosfera, gênese, origem, composição, textura e seus processos, podendo ser abordadas sob as técnicas mais diversificadas, que vão desde as mais simples até as mais complexas. Atualmente, a classificação dos meteoritos seguem a proposta de Krot *et al.* (2005), que tem por objetivo reunir os meteoritos em grupos de origem similar e com histórico de formação parecido, na tentativa de relacioná-los a possíveis corpos parentais.

Todos os meteoritos recebem sua primeira classificação em relação a sua entrada na atmosfera e sua queda em nossa superfície terrestre. Quando a queda do meteorito é observada e o fragmento é encontrado, de forma a ser vinculado com o evento na atmosfera, este é classificado como meteorito de **queda**. No entanto, quando sua queda não é observada e este é encontrado, sem que seja possível determinar quando caiu, este é denominado como meteorito **achado**.

Posteriormente, a classificação mais básica dos meteoritos é baseada na composição primária dos meteoritos, a qual se considerando a concentração de ferro e silicatos. Dessa forma, os meteoritos são, inicialmente, divididos em três tipos: **rochoso ou aerolitos** (formados majoritariamente de silicatos), **metálicos ou sideritos** (basicamente liga ferro-níquel) e **mistos ou siderolitos** (silicato e ferro-níquel em proporções equivalentes), em que os dois últimos passaram por episódios de fusão responsáveis pelo processo chamado de diferenciação.

Dessa forma, quando os meteoritos são analisados e classificados em relação a sua origem, pode se dizer que os sideritos são oriundos de núcleos de corpos diferenciados e os siderolitos são forjados a partir da transição núcleo-manto desses mesmos tipos de corpos. Porém, os meteoritos rochosos podem ou não ter experimentado esse processo de **diferenciação planetária**. De modo geral, esses aerólitos são classificados como acondritos quando passaram por esse processo e como condritos quando estes são indiferenciados, ou seja, não passaram pelo processo de diferenciação planetária que são representados de forma ilustrativa na Figura 7. Assim, a principal divisão feita no sistema proposto por Krot *et al.* (2005), é em dois tipos: os **condritos** e os **não condritos**.

Figura 7 – Representação esquemática das diversas origens dos meteoritos



Fonte: O Autor, 2018.

Os critérios adotados à classificação de meteoritos podem variar de acordo com cada autor. Neste trabalho utilizou-se a proposta de Krot *et al.* (2005) exibida nas Tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1 – Organização das diferentes classes, clãs e grupos dos meteoritos condritos

Classe	Clã	Grupo	Queda	Total
Condritos	Carbonáceos	CI	5	10
		CM	15	446
		CR	3	140
		CO	6	322
		CV	7	224
		CK	2	214
		CH	0	21
	Ordinários	H	353	16615
		L	476	20592
		LL	83	5443
	Enstatita	EH	9	168
		EL	8	106
	R	-	1	19
	K	-	1	2

Legenda: O Total refere-se ao número absoluto de quedas ocorridas sendo estas observadas

Fonte adaptada: Krot *et al.* (2005)

Tabela 2 – Organização das diferentes classes, clãs e grupos dos Acondritos, Sideritos e Siderolitos.

Classe	Clã	Grupo	Queda	Total
Acondritos e outros meteoritos ígneos	Acondritos primitivos	-	1	60
		Acapulcoitos	Lodranitos	1
	Acondritos diferenciados	Winoaitos	1	24
		Angritos	1	20
		Aubritos	9	68
		Brachnitos	0	27
		Ureilitos	6	307
	Meteoritos HED	Eucritos	34	617
		Howarditos	166	222
Diogenitos		11	243	
Classe	Clã	Grupo	Queda	Total
Siderolitos (Metálicos e Rochosos)	Palasitos	Grupo Principal	3	48
		Eagle Station	0	3
		Outros	0	41
		Mesosideritos	7	175
Sideritos (Metálicos)	IAB	-	10	257
	IC	-	0	12
	IIAB	-	6	117
	IIC	-	0	8
	IID	-	3	21
	IIE	-	2	22
	IIF	-	1	6
	IIG	-	0	6
	IIIAB	-	11	289
	IIIE	-	0	15
	IIIF	-	0	9
	IVA	-	4	74
	IVB	-	0	13
	Não agrupados	-	4	113
Não classificados	-	7	97	

Legenda: O Total refere-se ao número absoluto de *quedas* ocorridas sendo estas observadas

Fonte adaptada: Krot *et al.* (2005)

Tabela 3 – Organização das diferentes classes, clãs e grupos dos meteoritos Planetários

Classe	Clã	Grupo	Queda	Total
Planetários	Marcianos	Shergotitos	3	87
		Nakhlitos	1	13
		Chassignitos	1	2
		Ortopiroxenitos	0	1
	Lunares	Breccias	0	30
		Basaltos	-	4
		Gabbros	-	5

Legenda: O Total refere-se ao número absoluto de *quedas* ocorridas sendo estas observadas

Fonte adaptada: Krot *et al.* (2005)

Tendo sido utilizado neste trabalho amostras de meteoritos condritos e acondritos, cabe relatar uma breve explicação sobre essa tabela. Fundamentalmente, a classe de meteoritos condritos possui este nome devido aos glóbulos esféricos ou elipsoidais de minerais denominados de côndrulos.

Conforme foram apresentados os condritos, eles podem se subdividir em grupos menores, tais como Carbonáceos, Ordinários, Enstatita, Rumirutitos e Kakangaritos. Ressaltando que, na maioria desses condritos, é detectável a presença de carbono em sua composição química.

- ✓ **Carbonáceos:** apresentam oito grupos **CI, CM, CO, CV, CK, CR, CB** e **CH**, sendo a primeira letra (C) referente a carbonáceo e a segunda representa o nome do meteorito típico que dá nome ao grupo. (I) Ivuna; (M) Mighei; (O) Orans; (V) Vigarano; (K) Karoonda; (R) Renazzo; (B) Bencubbin e (H) ALH85005.
- ✓ **Ordinários:** o conteúdo de ferro total nesses meteoritos é usado como critério para sua subdivisão em três grupos: **H** (High), de 25% a 30%; **L** (Low), de 20% a 25%; e **LL** (Low-Low) de 19% a 20% de ferro em massa do total da massa da amostra do meteorito analisado.
- ✓ **Enstatitos:** como os ordinários, os enstatitos são subdivididos segundo o teor de ferro. O **EH** (High), com aproximadamente 30% de ferro e o **EL** (Low) com 25% ou menos.
- ✓ Os semelhantes ao meteorito **Rumuruti**.
- ✓ Os semelhantes ao meteorito **Kakangari**.

Em relação aos meteoritos acondritos ou não condritos, podem ser subdivididos de acordo com o grau de fusão a que foram submetidos. Dessa forma eles são particionados em primitivos e diferenciados.

- ✓ **Primitivos:** não sofreram diferenciação completa, sendo apenas parcialmente fundidos apresentando características mineralógicas próximas das dos condritos. São subdivididos em dois grupos. Os Pétreos, que por sua vez são subdivididos em Acapulcoítos, Lodranitos e Winonaitos, e os Férreos (IAB e IIICD).
- ✓ **Diferenciados:**
 - Acondritos: sofreram diferenciação completa e apresentam muito pouco conteúdo metálico em sua composição.
 - Ferrosos e Rochosos: são subdivididos em pallasitos, que foram formados na interface entre o núcleo interno e o manto inferior de corpos parentais diferenciados, e em mesosideritos formados por fusão durante o impacto de diferentes corpos parentais

3. MATERIAIS E MÉTODOS

À medida que o tempo passa, o conhecimento científico e as tecnologias utilizadas para realizar as pesquisas avançam dando cada vez mais suporte e detalhes fundamentais em diversas áreas científicas. Um exemplo são as técnicas analíticas para análise química e física de materiais que nos ajudam a realizar estudos em meteoritos. Isso nos traz informações de extrema relevância para Astrobiologia e possíveis pistas sobre o estudo da vida no sistema solar. Os materiais analisados neste trabalho foram 6 fragmentos de meteoritos através de técnicas não destrutivas. Essas amostras extraterrestres são compostas por 3 meteoritos marcianos (NWA 6963, NWA 7397 e Zagami), 2 condritos carbonáceos (Murchison e Allende) e 1 meteorito lunar (NWA 8277) e as técnicas utilizadas foram de raios X (μ CT e μ XRF) e de infravermelho (μ Raman). Assim, cada um desses itens será descrito e apresentado a seguir.

3.1. Meteorito Marciano Zagami

O meteorito Zagami caiu em 3 de outubro de 1962 a cerca de 1,2 km de Zagami Rock, província de Katsina, Nigéria (GRAHAM *et al.* 1985). Em 1985, a massa principal de 18 kg foi enviada primeiramente para estudos na Geological Survey of Nigeria in Kaduna, porém, a partir de 1988, quando Robert Haag (revendedor de meteoritos) obteve uma grande peça do meteorito Zagami, foi cortado e "distribuído" amplamente.

Este meteorito é classificado como acondrito diferenciado do grupo SNC (Shergottitos, Nakhlitos e Chassignitos), grupo de meteoritos que possuem muitas semelhanças indicando uma mesma origem, possivelmente marciana. Fundamentalmente, essa indicação é baseada na similaridade da composição de gases que foram detectados no interior de minerais pertencentes ao meteorito, sendo esta composição semelhante a da atmosfera de Marte. Vale ressaltar que este objeto foi o segundo meteorito encontrado contendo uma quantidade significativa de atmosfera marciana confinada em seus minerais (MARTI *et al.*, 1995).

De modo geral, o meteorito Zagami na Figura 8, é reconhecido mais especificamente dentro do grupo SNC como do tipo Shergotito. Embora o plagioclásio do meteorito Zagami esteja agrupado com a *masquelinita devido a choques*, e em geral serem petrologicamente e quimicamente diferentes do resto dos acondritos basálticos, tanto os Shergottitos quanto o Zagami, são considerados mineralogicamente análogos aos diabásios terrestres. Basicamente, pelo que agora se conhece sobre Zagami, parece ser uma rocha heterogênea que combina diversas litologias texturalmente distintas. No geral, a sua mineralogia apresenta grãos médios, os quais aparentam ser constituídos por três tipos de litologias basálticas inter-relacionadas e sinais de metamorfismo de choque que levaram a formação de pequenos clastos de vidros derretidos (MCCOY *et al.*, 1992).

Figura 8 – Foto do fragmento do meteorito Zagami



Fonte: O Autor, 2018.

Aparentemente, essas veias finas de vidro preto foram formadas por "derramamento de cisalhamento durante o choque" (LANGENHORST; POIRIER, 2000), e poderiam conter informações recentes raras de fases de alta pressão. Todavia, o mais interessante é que no meteorito Zagami já foi encontrado evidências de incorporação ou assimilação de um antigo solo marciano previamente irradiado (HIDAKA et al., 2009). Isso, por exemplo, pode explicar variações na idade e composição isotópica inicial de diferentes litologias encontradas nele (NYQUIST et al., 2010).

O meteorito Zagami utilizado para o desenvolvimento deste projeto foi cedido pelo Museu Nacional do Rio de Janeiro (UFRJ), que nos confirmou que a amostra corresponde à mineralogia e descrição texturizada no *Meteoritical Bulletin* (BULLETIN, 2017).

Por fim, a título de curiosidade, o meteorito Zagami foi o primeiro meteorito marciano da coleção do Museu Nacional e foi adquirido através de uma permuta por um fragmento do Angra dos Reis (JORNAL ESTADÃO, 05/09/2000).

3.2. Meteorito Marciano NWA 6963

O Meteorito marciano NWA 6963, apresentado na Figura 9, foi encontrado em setembro de 2011 no Marrocos mais precisamente em Guelmim-Es-Semara e é considerada uma rocha ígnea de origem basáltica, devido à sua composição mineralógica e características de textura. Na verdade, ele é representado por numerosos fragmentos e rochas quebradas parcialmente, das quais juntas compõem aproximadamente 8 a 10 kg de meteoritos (BULLETIN, 2017).

Figura 9 – Foto do fragmento do meteorito mariano NWA 6963



Fonte: O Autor, 2018.

Este meteorito é classificado como um acondrito pertencente ao grupo SNC (Shergottitos, Nakhlitos e Chassignitos), sendo reconhecido mais especificamente como um Shergottito em meio ao grupo de meteoritos oriundos do planeta vermelho. Fundamentalmente, essa inferência foi feita com base na sua composição de massa, química mineralógica e atestada através da similaridade de compostos isotópicos de oxigênio encontrados no interior de minerais da rocha pertencente ao meteorito NWA 6963, os quais são semelhantes aos gases da atmosfera de Marte (WILSON et al., 2012).

Para o desenvolvimento deste projeto, foi adquirido um fragmento deste meteorito com o Museu Joias da Natureza, que confirmou a sua correspondência mineralógica e descrição texturizada no *Meteoritical Bulletin* (BULLETIN, 2017).

3.3. Meteorito Marciano NWA 7397

O Meteorito marciano Northwest Africa (NWA) 7397 foi recentemente descoberto, e é um lherzolite shergotito, sendo este apenas o terceiro exemplo descrito deste grupo. Dessa maneira, é classificado como pertencente ao grupo SNC (Shergottitos, Nakhlitos e Chassignitos), do grupo de meteoritos oriundos do planeta Marte. Este meteorite foi encontrado perto de Guelmim-Es-Semara em junho de 2012, no Marrocos, por um negociante em Zagora e repassado para Darryl Pitt e David Gheesling (BULLETIN, 2017).

Este meteorito possui um total de 20 g de material em forma de fragmentos e algumas fatias finas polidas, depositadas na UWB nos Estados Unidos. Porém, a massa principal permanece conjuntamente com Pitt e Gheesling. Basicamente, O NWA 7397 consiste em duas litologias texturizadas distintas (1) composta de piroxeno zonado, com

crístais de cromita e olivina, e (2) composto por olivina, e piroxeno, masquelenita, em menor abundância, millerita, espinel, ilmenita e pirrotita (HOWARTH et al., 2014)

Por fim, o fragmento do meteorito NWA 7397 utilizado para o desenvolvimento deste trabalho ilustrado na Figura 10 foi adquirido com o Museu Joias da Natureza, o qual confirmou a autenticidade com a descrição no *Meteoritical Bulletin* (BULLETIN, 2017).

Figura 10 – Foto do fragmento do meteorito mariano NWA 6963



Fonte: O Autor, 2018.

3.4. Meteorito Lunar NWA 8277

O NWA 8277 é um meteorito Lunar achado em 2013 no Marrocos. Ele possui uma formação estrutural brechada, ou seja, é uma rocha sedimentar clástica formada de fragmentos grandes e angulosos de clastos de minerais bem compactados variando de 10 a 300 μm em meio a uma matriz principal composta por uma textura uniforme de material de grãos mais finos e menos densos, o que indica existir múltiplas litologias de brechas com fragmentos amalgamados (Figura 11).

Figura 11 – Foto do fragmento do meteorito lunar NWA 8277



Fonte: O Autor, 2018.

Este meteorito possui um total de 21 g, com uma pequena parte de seu material exposta em uma montagem de sonda em depósito na UNM. Para o desenvolvimento deste projeto, foi adquirido um fragmento deste meteorito através do Museu Joias da Natureza, que confirmou que a amostra corresponde à mineralogia e descrição texturizada no *Meteoritical Bulletin* (BULLETIN, 2017).

3.5. Meteorito Allende (Condrito Carbonáceo CV3)

O meteorito Allende teve a sua queda observada na cidade de Allende, no México, no dia 8 de fevereiro de 1969. O Allende é classificado como um condrito carbonáceo do grupo de meteoritos CV3, ou seja, possui côndrulos altamente definidos de 1mm ou maior em diâmetro, compostos de olivinas ricas em magnésio. Fundamentalmente, a característica mais marcante dos condritos CV3 é a presença de inclusões grandes e irregulares em sua matriz cinza, denominadas CAI (Inclusões de Cálcio e Alumínio) (CLARKE *et al.*, 1971) (Figura 12).

Figura 12 – Foto do fragmento do meteorito Allende



Fonte: O Autor, 2018.

Além disso, o Allende e os meteoritos desse grupamento apresentam uma quantidade menor de água em seu interior em relação aos outros meteoritos carbonáceos e, devido a isso, acabam sendo mais resistentes ao intemperismo do ambiente terrestre.

O meteorito Allende é considerado padrão de referência por ter sido recolhido após a queda testemunhada. Diversas amostras foram igualmente preparadas e depois distribuídas para diversos laboratórios para serem analisadas e comparadas. A nossa amostra de meteorito Allende foi cedida pela professora Dra. Maria Elizabeth Zucolotto, do Museu Nacional do Rio de Janeiro (UFRJ), que nos confirmou que a amostra corresponde à mineralogia e descrição texturizada no *Meteoritical Bulletin* (BULLETIN, 2017).

Por fim, pode-se dizer que o Allende é o mais famoso exemplar desse tipo de carbonáceo por ter sido observada a sua entrada na atmosfera e queda no México em 1969, espalhando cerca de 2 toneladas de material em Chihuahua. As amostras desse meteorito também podem ser solicitadas a divisão de meteoritos do *Smithsonian National Museum of Natural History*, em Washington (EUA), para serem usadas como padrão.

3.6. Meteorito Murchison (Condrito Carbonáceo CM2)

Em 28 de setembro de 1969 durante uma chuva de meteoros, às 10 horas 45min, perto da cidade de Murchison, Victoria, na Austrália, foi testemunhada a queda do maior condrito carbonáceo já observado do tipo II e que hoje leva o nome da cidade em que caiu. Ele foi observado desde a sua entrada na atmosfera, rasgando o céu de forma incandescente, semelhante a uma bola de fogo brilhante até o momento de sua queda. À medida que o mesmo descia, se fragmentava de maneira a partir-se em três pedaços antes de desaparecer, deixando apenas uma nuvem de fumaça que exalava um cheiro muito forte associado a acetona e/ou outros possíveis compostos orgânicos. Os detalhes da queda e uma descrição inicial são dados por (LOVERING *et al.*, 1971).

Muitos exemplares deste meteorito foram encontrados em uma área com mais de 13 km quadrados, com massas individuais de até 7 kg. Um fragmento, pesando 680 g, atravessou um telhado e caiu em um monte de feno. A massa total coletada foi superior a 100 kg. Além disso, foram reunidos diversos detalhes pertinentes ao terreno em que os fragmentos foram espalhados. Uma análise química foi relatada por Jarosewich (1971) e uma pequena descrição foi publicada por Ehmann *et al.* (1970). Uma descrição um pouco mais detalhada foi dada por Fuchs, Jensen e Olsen (1970) antes da reunião de 1970 da *Meteoritical Society*.

O meteorito Murchison apresenta, dispersos em sua matriz, vários tipos de inclusões distintos:

- ✓ Cristais únicos e fragmentos de cristal de minerais individuais que variam de alguns microns até o tamanho do milímetro;
- ✓ Inclusões multi-granuladas de até 2 mm, que chamaremos de inclusões brancas;
- ✓ Segmentos esféricos ou fragmentados esféricos com tamanhos variados de 0,05 a 0,8 mm;
- ✓ Fragmentos angulares de xenolítico de outro tipo de material condritico, que variam de alguns milímetros até 13 mm, o que chamaremos de fragmentos xenolíticos ou de xenocristais.

O meteorito Murchison na Figura 13, assim como o Allende, é classificado como condrito carbonáceo. Porém, o Murchison é especificamente reconhecido como pertencente ao grupo CM2, que é o tipo mais abundante de condrito carbonáceo, tendo já sido encontrado e registrados 446 meteoritos desse grupo até o momento no *Meteoritical Bulletin Database*. Além disso, juntamente com o meteorito Allende, compreende um dos meteoritos mais famosos e estudados da História. Sua composição chama a atenção por já terem sido detectados inúmeros aminoácidos diferentes, açúcares, álcoois, ácidos carboxílicos e até bases nucleicas (BULLETIN, 2017).

Figura 13 – Foto do fragmento do meteorito Murchison



Fonte: O Autor, 2018.

O desenvolvimento de nosso trabalho com este meteorito foi realizado a partir da amostra cedida pela professora Dra. Maria Elizabeth Zucolotto, do Museu Nacional do Rio de Janeiro (UFRJ), que confirmou a autenticidade e correspondência à mineralogia e descrição texturizada no *Meteoritical Bulletin* (BULLETIN, 2017).

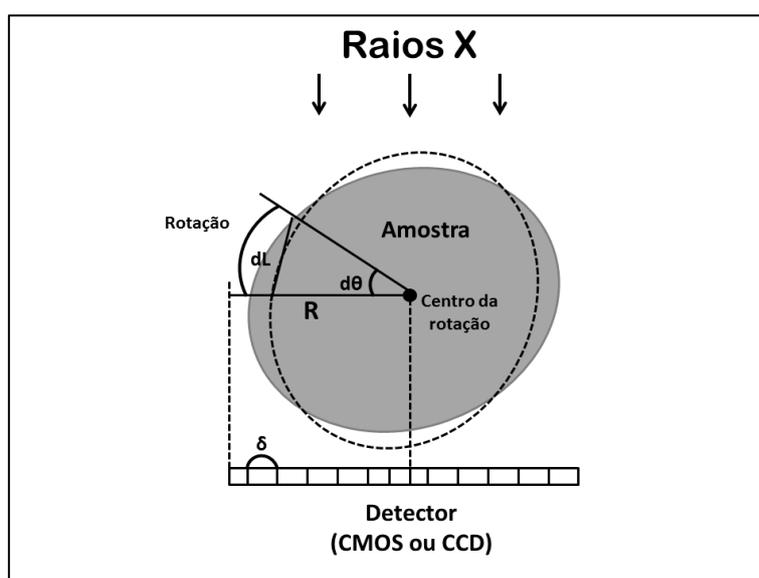
Outras porções deste meteorito raro estão localizadas no Museu Nacional de História Natural, *Smithsonian Institution*, Washington, D.C. (aproximadamente 30 kg), o Museu Australiano de Sydney (aproximadamente 4 kg) e a Universidade de Melbourne (aproximadamente 7 kg), na Austrália. Além disso, quantidades bem menores, até vários alguns gramas, foram adquiridas em todo o mundo por vários museus, universidades públicas e privadas, assim como por pessoas colecionadoras.

3.7. Método experimental para formação de imagens por μ CT

Em geral, a obtenção das imagens tomográficas (secções transversais) é realizada em duas etapas (Figura 14):

- ✓ Aquisição das imagens radiográficas é obtida através de diversas projeções angulares da amostra ao longo de uma rotação de 180 graus ou 360 graus com passos de rotação precisos, ou seja, através de alguns décimos de graus de rotação.
- ✓ Reconstrução das imagens das secções transversais a partir das imagens das projeções angulares por meio do algoritmo de reconstrução de feixe cônico de feldkmp modificado que roda no cluster de computadores

Figura 14– Uma ilustração esquemática da visão superior do giro da amostra em torno de um eixo de rotação enquanto é efetuada a criação de imagens de CT.



Fonte: O Autor, 2018.

Por fim, para se reconstruir e visualizar o material analisado em 3D, é necessário realizar um processo de renderização, que converterá os slices da amostra em um empilhamento ordenado, gerando assim uma imagem em 3D (ARNOLD, 1982).

3.7.1. O Instrumento de μ CT

As imagens de μ CT deste trabalho foram obtidas através do aparelho Skyscan / Bruker, modelo 1173. Este aparelho é composto por um tubo de raios x de microfoco com fonte de alta tensão, uma porta amostra de acrílico, na qual as amostras eram fixadas dentro do equipamento para evitar movimentos durante o processo de aquisição de imagem e um detector de tela plana baseado em CMOS (2240 x 2240 pixels) conectado a um computador de controle, ambos usados na reconstrução das imagens.

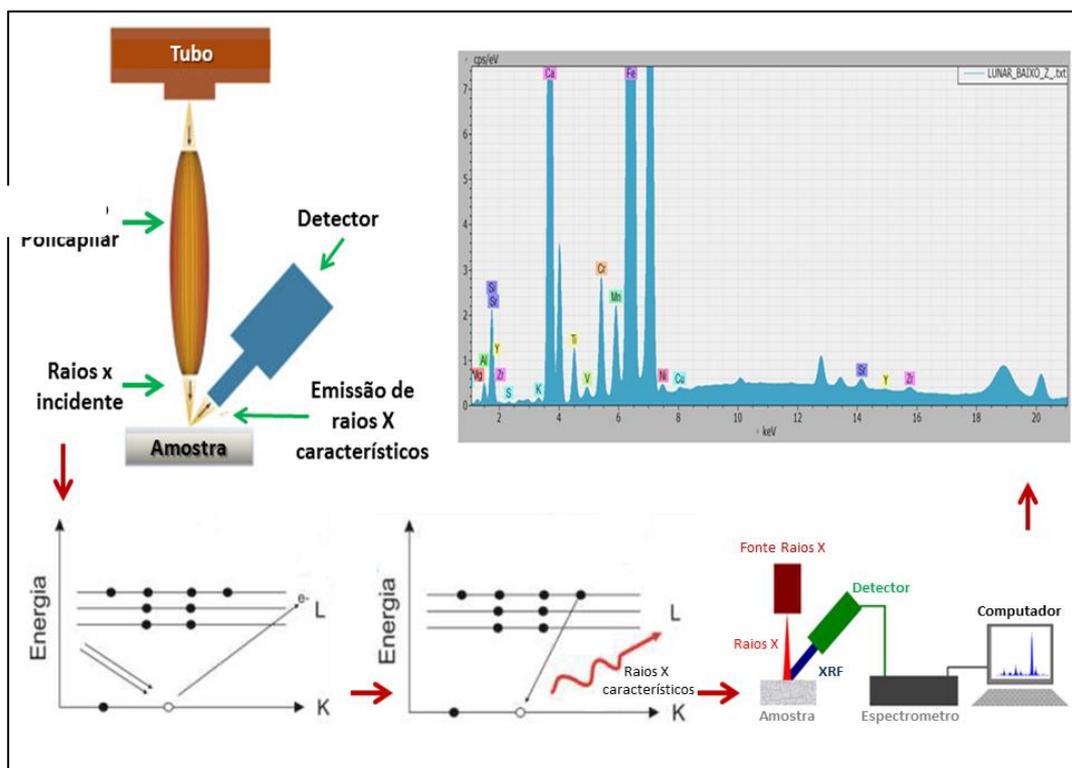
A varredura para a obtenção das imagens foi obtida fixando os seguintes parâmetros; 50 kV de tensão, 160 μ A, tamanho de pixel isotrópico de 5,70 micrómetros, passo angular de 0,4 graus, 1000 ms de tempo de exposição, usando um filtro de alumínio (Al) de 1 mm de espessura na saída do feixe.

Após a digitalização, as projeções tomográficas foram reconstruídas usando o software InstaRecon® versão 1.3.9.2. Este programa gerou as imagens 3D, que foram formadas a partir das fatias bidimensionais da amostra gerada durante o processo de aquisição e que foram convertidas em uma pilha ordenada, gerando assim uma imagem em 3D. As amostras foram verificadas nos três eixos espaciais e o programa DataViewer Versão 1.5.2.4 foi utilizado para visualização e avaliação em 2D (medidas lineares) dos eixos coronal, transaxial e sagital. Finalmente, o software CTVox Versão 3.2 foi utilizado para a visualização tridimensional e para a análise anatômica externa e interna dos materiais obtidos após o processo de renderização.

3.8. Método experimental de análise química por técnica de μ XRF

O experimento de XRF deve ter, primeiramente, a amostra excitada através de um feixe primário de raios X. A partir daí os elementos presentes na amostra absorverão os fótons de raios X decaindo e emitindo uma fluorescência característica. Dessa forma, a fluorescência emitida pela amostra, chamada de feixe secundário, é detectada e “classificada” de acordo com sua energia. Desse modo, o sistema de aquisição de dados transforma os pulsos elétricos provenientes da detecção dessa etapa em um espectro de fluorescência formando um gráfico de comprimento de onda por intensidade. Assim, através do espectro de fluorescência é possível se obter informações sobre as concentrações de elementos pertencentes à amostra, o mapeamento químico, entre outras informações (Figura 15).

Figura 15 – Uma ilustração esquemática do processo de aquisição de dados por XRF



Por fim, é importante frisar que este método geralmente é aplicado para determinação de elementos com número atômico ≥ 11 (Na) e que a penetração dos raios X de fluorescência na matéria é baixa, devido ao elemento fluorescente e da matriz serem da ordem de μm . Por isso, as informações que nos são passadas provêm das camadas mais superficiais do material estudado.

3.8.1. O Instrumento de μXRF

As análises da composição química elementar presente nos meteoritos foram realizadas utilizando um sistema comercial μXRF (M4 Tornado by Bruker-Nano). Este sistema possui um tubo de raios X de ânodo Rh, foco de óptica de raios X policapilar (com tamanho focal $< 25 \mu\text{m}$ para Mo- $K\alpha$) e detector de raios X XFlash de silício (resolução de energia FWHM $< 135 \text{ eV}$ a 250 000 cps para Mn-K α e área ativa do detector de 30 mm^2). A varredura automatizada realizada em ambas as amostras proporcionou a detecção segura elementos químicos presentes nos meteoritos, sem a necessidade de qualquer adequação ou preparação da amostra analisada, ou seja, as análises foram totalmente não destrutivas. No desenvolvimento da análise das amostras, verificou-se empiricamente que os parâmetros que melhor se adequavam eram $600 \mu\text{A}$ de corrente, 40 kV de tensão.

3.9. Método experimental para análise química por técnica de Raman

A técnica μRaman é uma técnica de alta resolução espacial que proporciona de forma rápida e não invasiva a obtenção de informações sobre os modos vibracionais moleculares de quaisquer materiais orgânicos ou inorgânicos, contanto que as moléculas sejam polarizáveis (DOUGLAS; HOLLER; NIEMAN, 2002; NASDALA, 2004; SALA, 2008). Desse modo, ela é uma técnica analítica pela qual é possível averiguar moléculas formadas pelos átomos fundamentais usados do sistema tais como na composição estrutural da vida como Carbono (C), Hidrogênio (H), Oxigênio (O), Fósforo (P), enxofre (S), também conhecidas como “CHONPS” e outras moléculas, a partir dos grupos moleculares presentes na amostra a ser analisada. Além disso, é possível inferir e identificar a composição estrutural mineralógica presente na amostra.

Os grupos moleculares possuem vários modos de vibração que correspondem aos estados de energia específicos da molécula. Dessa maneira, através do μRaman é possível medir a essas energias de transição entre dois níveis moleculares de uma molécula, identificando assim os modos vibracionais de forma quase inequívoca.

O espectro de espalhamento Raman é obtido irradiando-se a amostra com um laser monocromático, na faixa do ultravioleta, visível ou infravermelho. Durante a irradiação, o espectro da radiação espalhada é medido pelo espectrômetro; isto é, mede-se a intensidade da radiação espalhada em função da frequência do número de onda cm^{-1} (NASDALA, 2004; RODRIGUES; GALZERANI, 2012).

Os picos obtidos no espectro Raman correspondem a energias dos modos vibracionais das diferentes espécies presentes na amostra, sendo a sua intensidade proporcional ao número de moléculas de volume excitado, dentre outros fatores. Dessa maneira, com os padrões adequados, é possível, além de identificar, também é possível quantificar as espécies moleculares presentes no objeto analisado.

Basicamente, para se realizar medidas através da técnica de μ Raman são necessários três componentes: uma fonte de luz de excitação, um sistema dispersivo capaz de decompor a radiação espalhada pela amostra e um fotodetector. Há também equipamentos não dispersivos, baseados em interferometria, como os FT-Raman no infravermelho.

Essa técnica possui certas características extremamente interessantes para o estudo de materiais, tais como:

- ✓ Grande eficiência na identificação da presença de carbono nas amostras ou materiais
- ✓ Permite a análise de níveis vibracionais cuja excitação é proibida em 1ª ordem e que são invisíveis por FTIR

Para o desenvolvimento de análises e estudos de meteoritos através da técnica de Raman é possível realizar medidas a partir de dois tipos metodologias:

- ✓ A primeira é através da comparação dos espectros obtidos das amostras de meteoritos com espectros adquiridos a partir de amostras de minerais puros, verificando se há variações na posição e na forma dos picos.
- ✓ A segunda abordagem concentra-se nas bandas atribuídas a presença de carbono (Bandas G e D), uma vez que elas quantificam o estado de grafitação e fornece informações a respeito do grau de metamorfismo experimentado pelo meteorito (QUIRICO, 2003).

Por fim, as limitações a esta análise residem na interferência da fluorescência e dispersão Raman do objeto em análise que estão a ser analisadas e que podem provocar um grande ruído no espectro, na inexistência de picos Raman ou picos de fraca intensidade para alguns constituintes.

3.9.1. O Instrumento de μ Raman

As medidas de Raman foram realizadas com um μ Raman Renishaw inVia acoplado a um microscópio confocal Leica (objetivos 5X, 20X e 50X), disponível no Laboratório Brasileiro de Luz Síncrotron (LNLS / CNPEM). O sistema está equipado

com lasers de excitação de 532, 633 e 785 nm, gratins de difracção de 1200 l / mm e detector CCD e ótica e software especiais para sistema de mapeamento rápido (Renishaw Streamline®). A resolução espectral é de 4 cm. As medições foram realizadas com objetivo 20X e excitação a 785 nm, o que garantiu um menor fluxo de fluorescência da amostra. O tratamento de dados foi feito com o software Renishaw WiRE® 4.1.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1. Composição química por XRF

A determinação qualitativa da química que se encontra presente nos meteoritos e a análise da detecção desses elementos químicos foi feita de maneira não destrutiva, ou seja, não resultou em dano, descaracterização das amostras ou na destruição de alguma informação futura, caso essas amostras venham ser analisadas novamente por outra técnica. A análise foi baseada em princípios físicos bem conhecidos e simples, de que os elementos químicos emitem radiações características quando submetidos a uma excitação adequada, característica de modo a ser específica para cada átomo da tabela periódica, não havendo assim a possibilidade de termos dois átomos com as mesmas características.

Os picos observados a seguir estão relacionados às linhas de energia K_{α} detectadas dos elementos e suas respectivas faixas de energias: **Mg (1,25 keV)**, **Al (1,49 keV)**, **Si (1,74 keV)**, **P (2,02 keV)**, **S (2,31 keV)**, **Cl (2,62keV)**, **K (3,31 keV)**, **Ca (3,69 keV)**, **Ti (4,51 keV)**, **V (4,95 keV)**, **Cr (5,41 keV)**, **Mn (5,90 keV)**, **Fe (6,40 keV)**, **Ni (7,48 keV)**, **Cu (8,05 keV)**, **Zn (8,64 keV)**, **Ga (9,25 keV)**, **Rb (13,39 keV)**, **Sr (14,16 keV)**, **Y (14,96 keV)**, **Zr (15,77 keV)** e linha L_{α} do **Pb (10,55 keV)**. É necessário ressaltar que cada um desses elementos poderá estar ou não presente nos resultados a seguir, pois a presença e detecção de cada um desses dependem obviamente da composição química e mineralógica de cada um dos meteoritos.

Todas as medidas de μ XRF foram realizadas no vácuo de 20mbar, de maneira que os espectros foram obtidos a partir de parâmetros ajustados para que as medidas fossem tomadas de forma padronizada. Os parâmetros utilizados foram a corrente em 600 μ A, voltagem de 40 kV, com 2 ciclos e tempo de duração média de aproximadamente 2h 30 min para obtenção de cada um dos espectros de μ XRF.

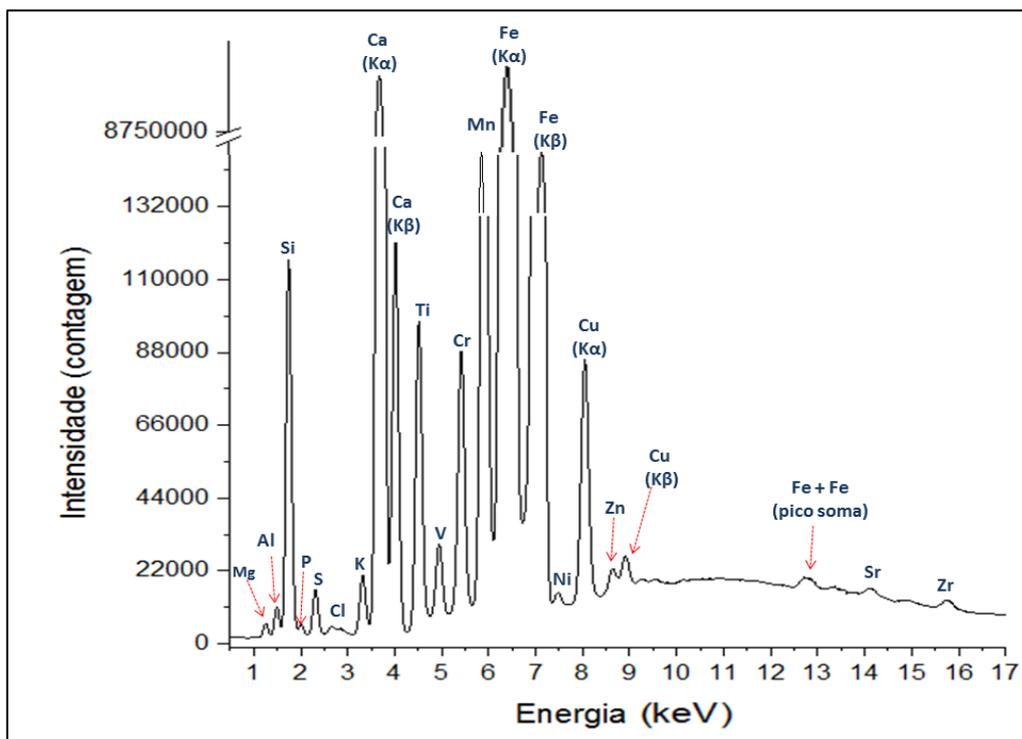
Além disso, foram utilizados dois filtros diferentes para obtenção dos resultados. O intuito desses filtros é gerar dados complementares em que elementos de número atômico abaixo do Ferro (Fe), os quais foram denominados como sendo de baixo Z e os elementos de número atômico acima do Ferro (Fe) denominados como alto Z, pudessem aparecer nas medidas com uma melhor resolução nos respectivos espectros. Desse modo, foi utilizado um filtro de alumínio de 12.5 μ m para obter os espectros totais de μ XRF de

baixo Z e outro filtro de alumínio de 630 μm para gerar os espectros totais de μXRF de alto Z.

4.1.1. Meteorito marciano Zagami

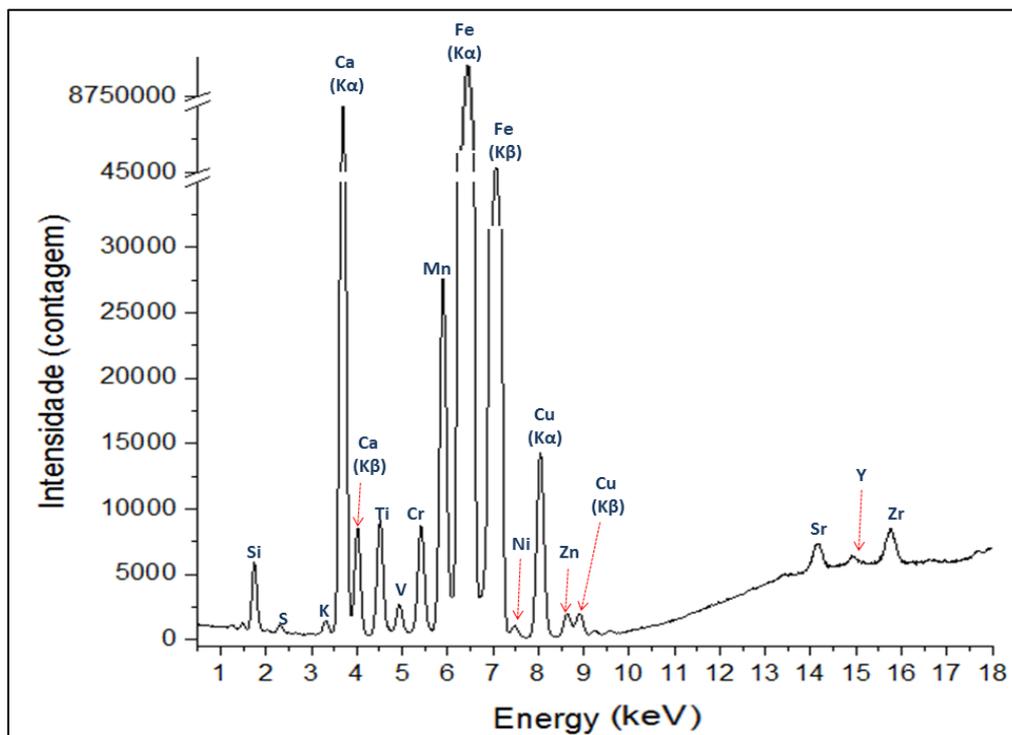
Nas figuras 16 e 17 são apresentados os espectros de fluorescência de raios X do meteorito Zagami. Além disso, na Tabela 4 são apresentados os resultados comparativos da composição elementar de baixo e alto Z obtidos do Zagami.

Figura 16 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de baixo Z do meteorito Zagami



Fonte: O Autor, 2018.

Figura 17 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de alto Z do meteorito Zagami.



Fonte: O Autor, 2018.

Tabela 4 – Tabela comparativa entre os resultados de XRF obtidos do Zagami.

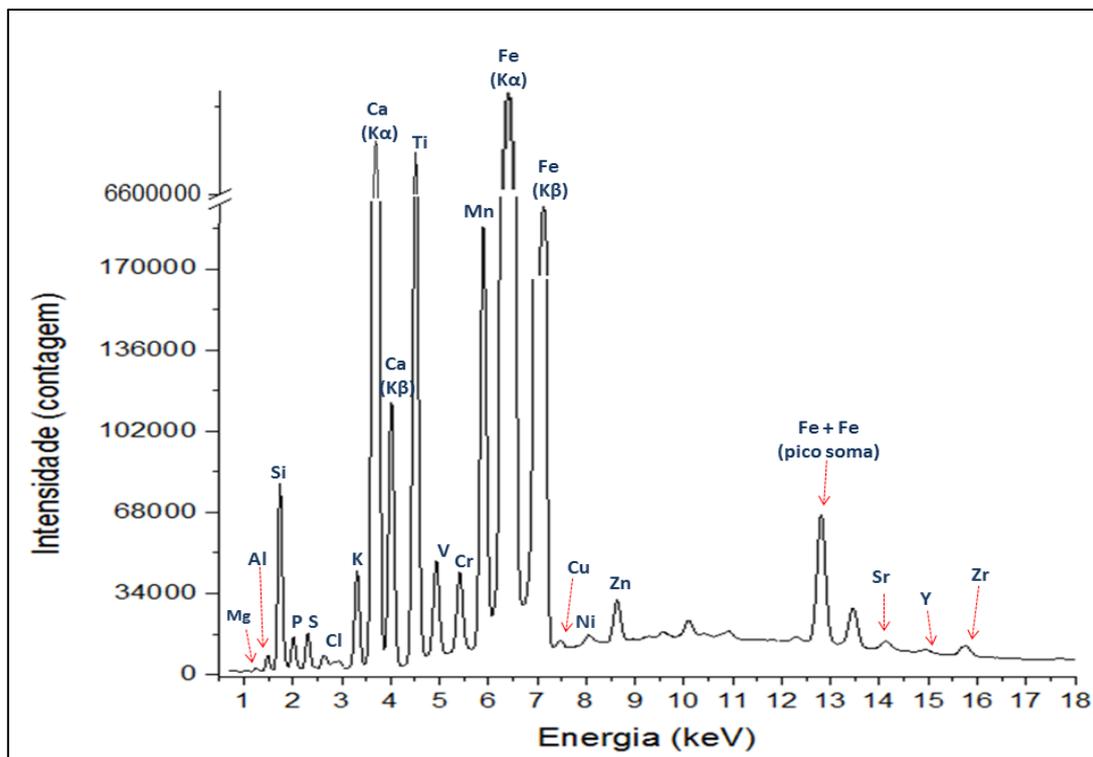
Zagami (Total)	Zagami (Baixo Z)	Zagami (Alto Z)
Mg	Mg	-----
Al	Al	-----
Si	Si	Si
P	P	-----
S	S	S
Cl	Cl	-----
K	K	K
Ca	Ca	Ca
Ti	Ti	Ti
V	V	V
Cr	Cr	Cr
Mn	Mn	Mn
Fe	Fe	Fe
Ni	Ni	Ni
Cu	Cu	Cu
Zn	Zn	Zn
Sr	Sr	Sr
Y	-----	Y
Zr	Zr	Zr

Fonte: O Autor, 2018.

4.1.2. Meteorito marciano NWA 6963

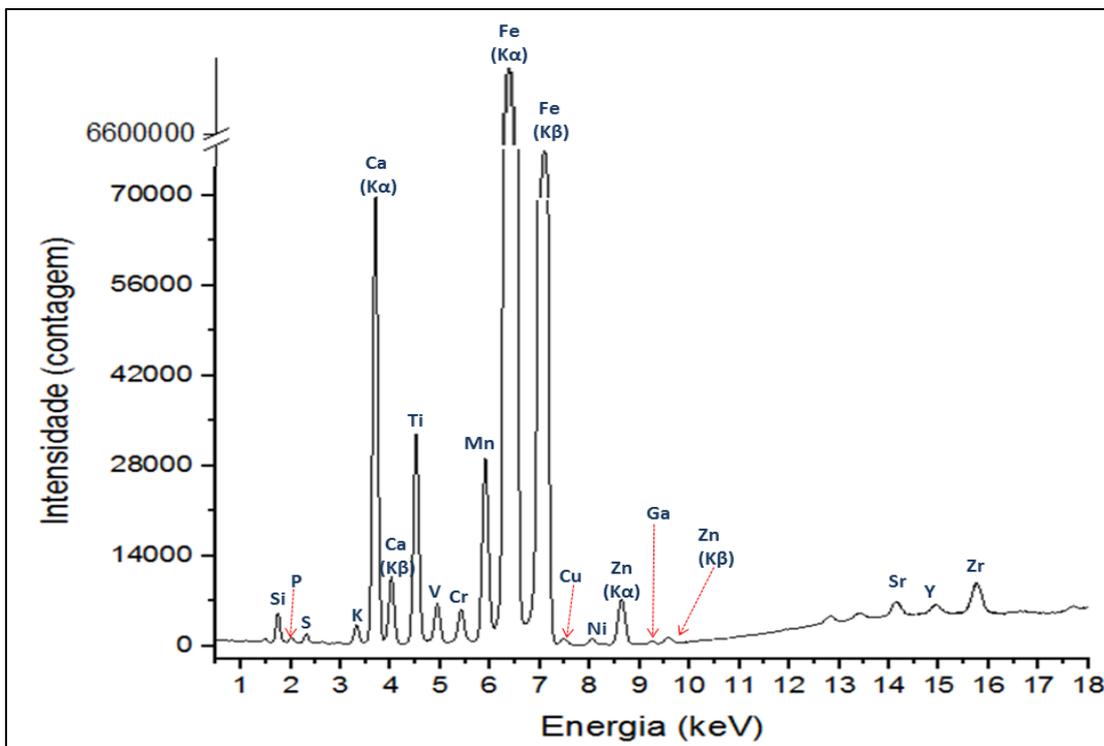
Nas figuras 18 e 19 são apresentados os espectros de fluorescência de raios X do meteorito NWA 6963. Além disso, na Tabela 5 são apresentados os resultados comparativos da composição elementar de baixo e alto Z obtidos do NWA 6963.

Figura 18 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de baixo Z do meteorito NWA 6963.



Fonte: O Autor, 2018.

Figura 19 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de alto Z do meteorito NWA 6963.



Fonte: O Autor, 2018.

Tabela 5 – Tabela comparativa entre os resultados de XRF obtidos do NWA 6963.

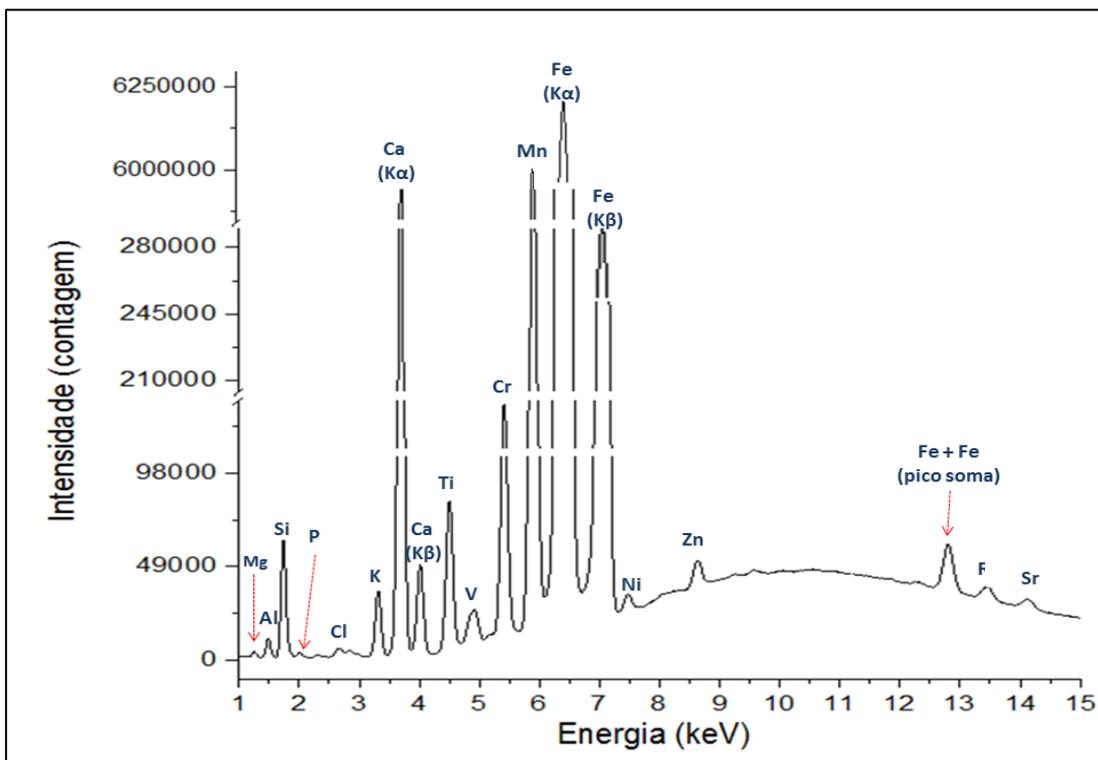
NWA 6963 (Total)	NWA 6963 (Baixo Z)	NWA 6963 (Alto Z)
Mg	Mg	-----
Al	Al	-----
Si	Si	Si
P	P	P
S	S	S
Cl	Cl	-----
K	K	K
Ca	Ca	Ca
Ti	Ti	Ti
V	V	V
Cr	Cr	Cr
Mn	Mn	Mn
Fe	Fe	Fe
Ni	Ni	Ni
Cu	Cu	Cu
Zn	Zn	Zn
Ga	-----	Ga
Sr	Sr	Sr
Y	Y	Y
Zr	Zr	Zr

Fonte: O Autor, 2018.

4.1.3. Meteorito marciano NWA 7397

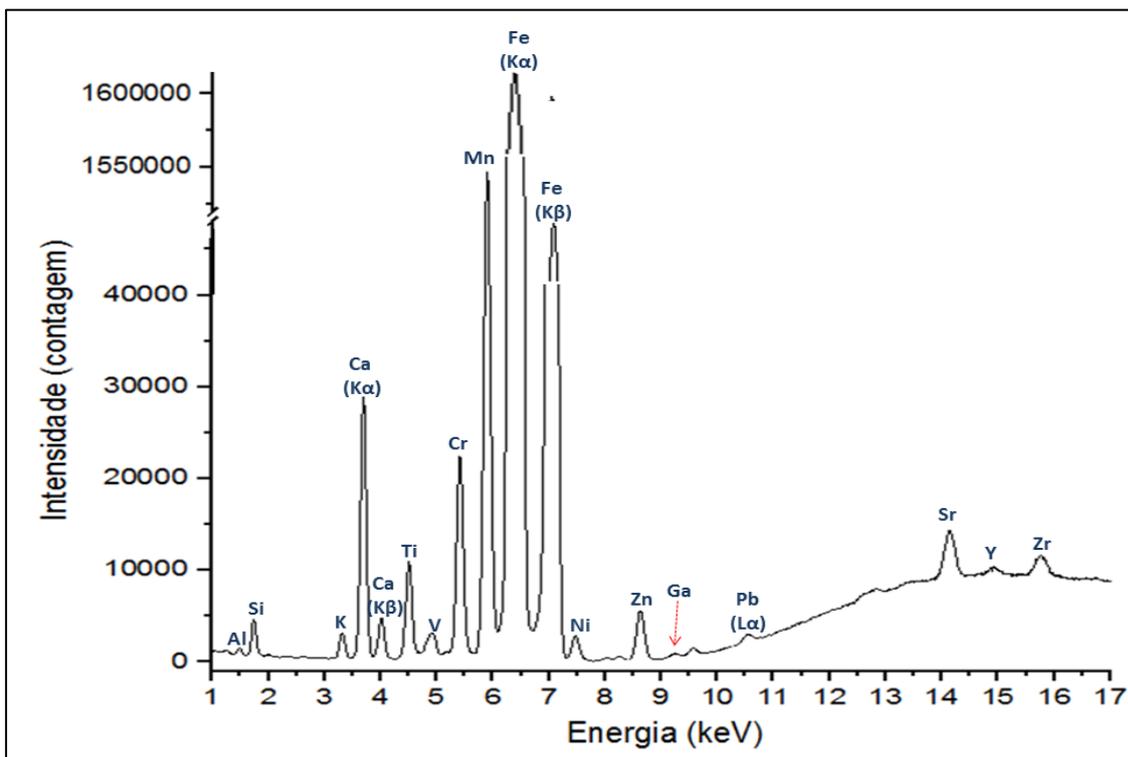
Nas figuras 20 e 21 são apresentados os espectros de fluorescência de raios X do meteorito NWA 7397. Além disso, na Tabela 6 são apresentados os resultados comparativos da composição elementar de baixo e alto Z obtidos do NWA 7397.

Figura 20 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de baixo Z do meteorito NWA 7397



Fonte: O Autor, 2018.

Figura 21 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de alto Z do meteorito NWA 7397



Fonte: O Autor, 2018.

Tabela 6 – Tabela comparativa entre os resultados de XRF obtidos do NWA 7397.

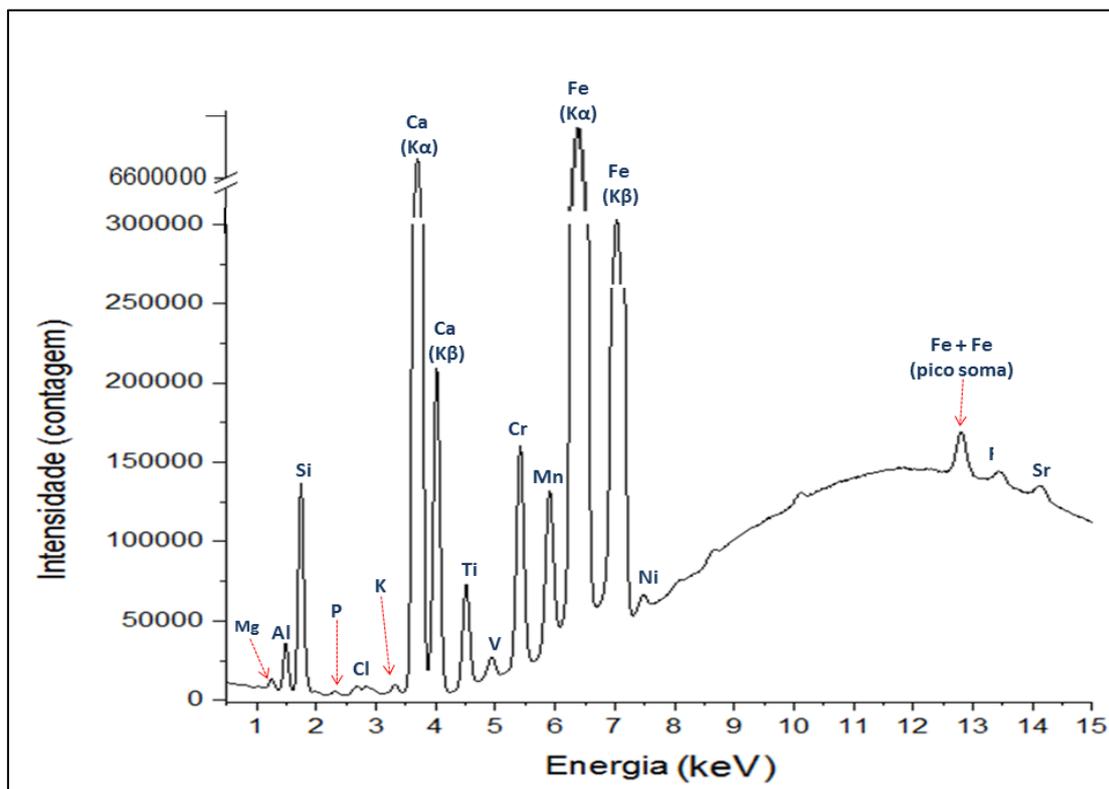
NWA 7397 (Total)	NWA 7397 (Baixo Z)	NWA 7397 (Alto Z)
Mg	Mg	-----
Al	Al	Al
Si	Si	Si
P	P	-----
S	S	-----
Cl	Cl	-----
K	K	K
Ca	Ca	Ca
Ti	Ti	Ti
V	V	V
Cr	Cr	Cr
Mn	Mn	Mn
Fe	Fe	Fe
Ni	Ni	Ni
Zn	Zn	Zn
Ga	-----	Ga
Sr	Sr	Sr
Y	-----	Y
Pb	-----	Pb

Fonte: O Autor, 2018.

4.1.4. Meteorito lunar NWA 8277

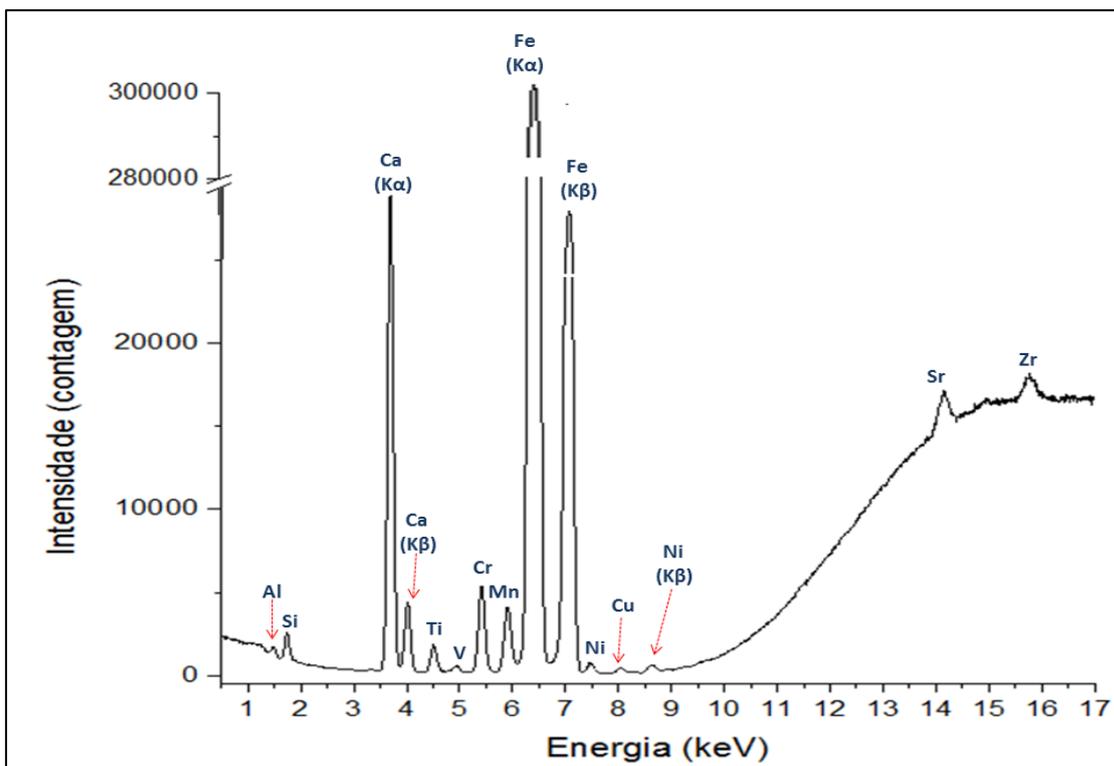
Nas figuras 22 e 23 são apresentados os espectros de fluorescência de raios X do meteorito NWA 8277. Além disso, na Tabela 7 são apresentados os resultados comparativos da composição elementar de baixo e alto Z obtidos do NWA 8277.

Figura 22 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de baixo Z do meteorito NWA 8277



Fonte: O Autor, 2018.

Figura 23 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de alto Z do meteorito NWA 8277



Fonte: O Autor, 2018.

Tabela 7 – Tabela comparativa entre os resultados de XRF obtidos do NWA 8277

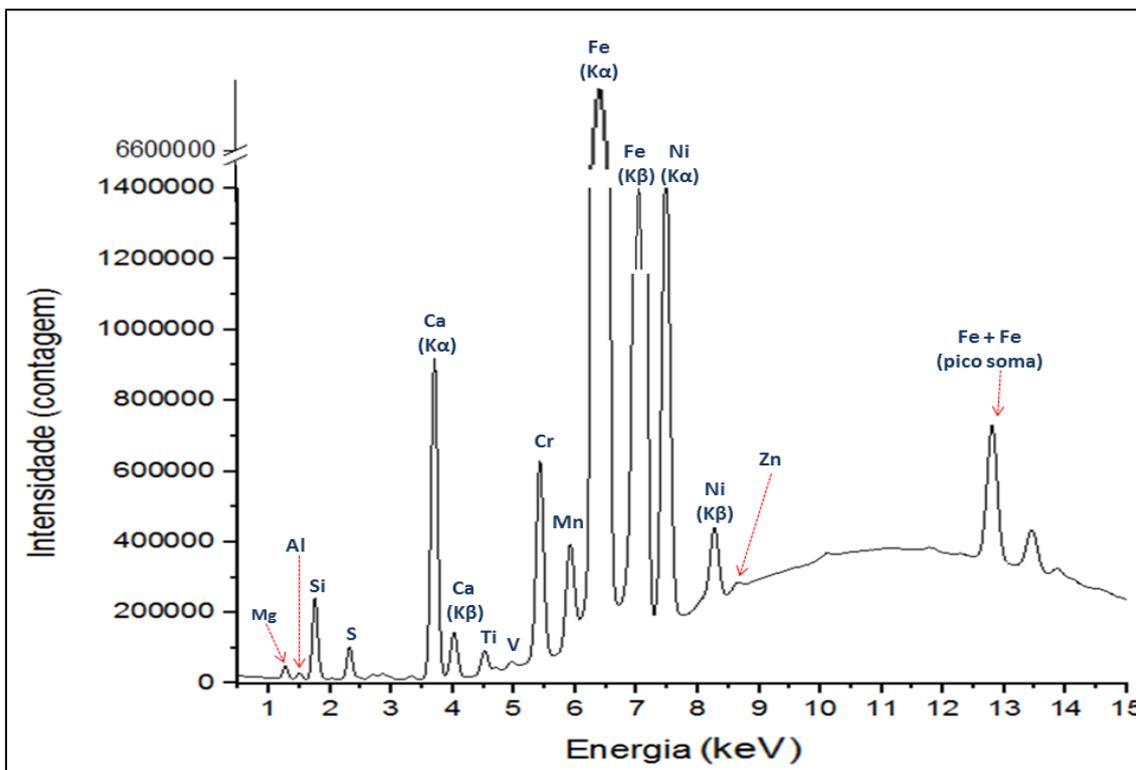
NWA 8277 (Total)	NWA 8277 (Baixo Z)	NWA 8277 (Alto Z)
Mg	Mg	-----
Al	Al	Al
Si	Si	Si
P	P	-----
Cl	Cl	-----
K	K	-----
Ca	Ca	Ca
Ti	Ti	Ti
V	V	V
Cr	Cr	Cr
Mn	Mn	Mn
Fe	Fe	Fe
Ni	Ni	Ni
Cu	-----	Cu
Sr	Sr	Sr
Zr	-----	Zr

Fonte: O Autor, 2018.

4.1.5. Meteorito Allende

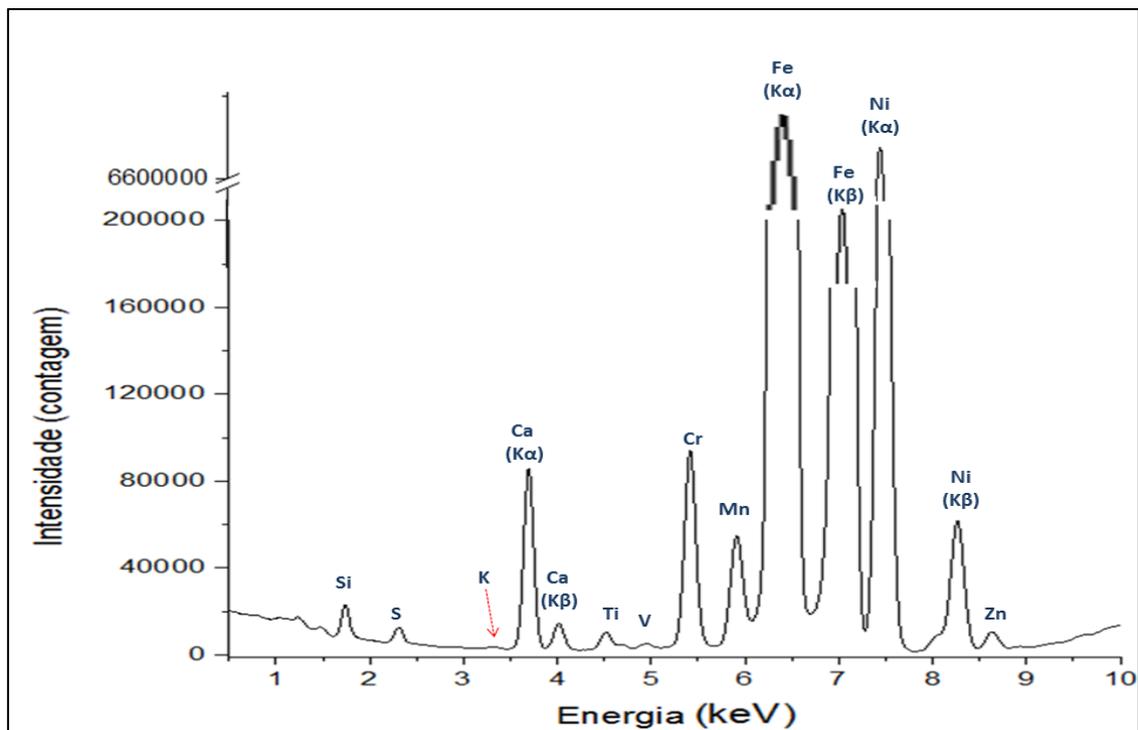
Nas figuras 24 e 25 são apresentados os espectros de fluorescência de raios X do meteorito Allende. Além disso, na Tabela 8 são apresentados os resultados comparativos da composição elementar de baixo e alto Z obtidos do Allende.

Figura 24 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de baixo Z do meteorito Allende



Fonte: O Autor, 2018.

Figura 25 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de alto Z do meteorito Allende



Fonte: O Autor, 2018.

Tabela 8 – Tabela comparativa entre os resultados de XRF obtidos do Allende

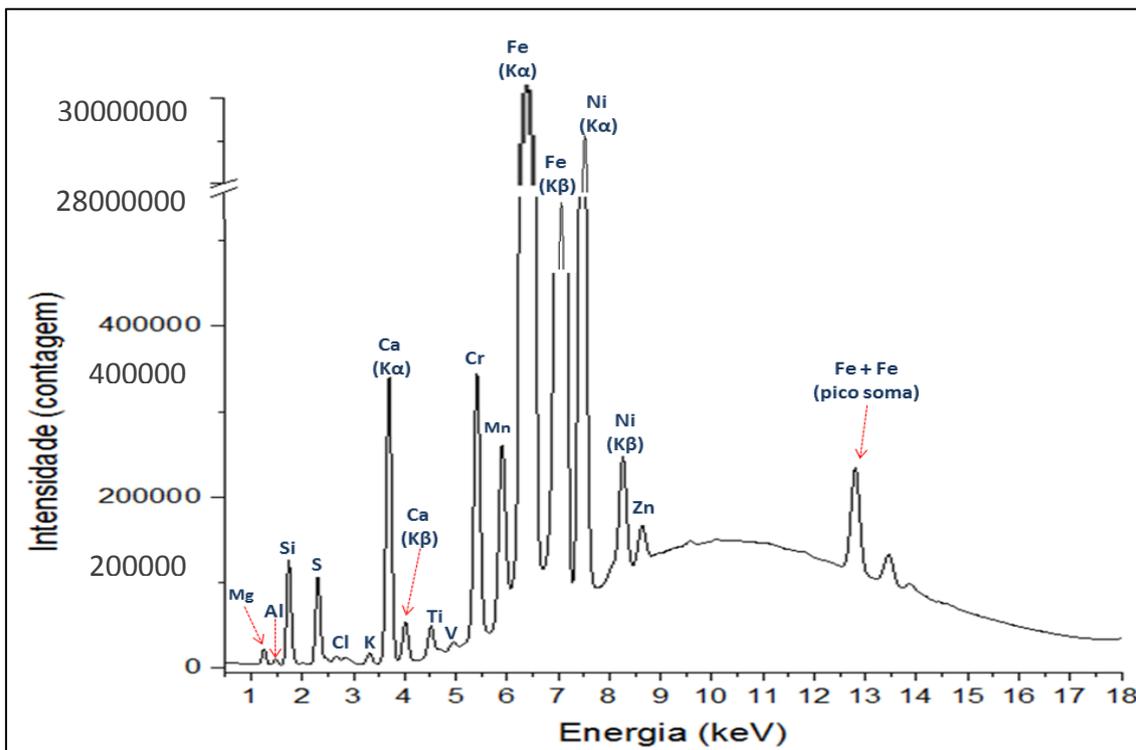
Allende (Total)	Allende (Baixo Z)	Allende (Alto Z)
Mg	Mg	-----
Al	Al	-----
Si	Si	Si
S	S	S
K	K	-----
Ca	Ca	Ca
Ti	Ti	Ti
V	V	V
Cr	Cr	Cr
Mn	Mn	Mn
Fe	Fe	Fe
Ni	Ni	Ni
Zn	Zn	Zn

Fonte: O Autor, 2018.

4.1.6. Meteorito Murchison

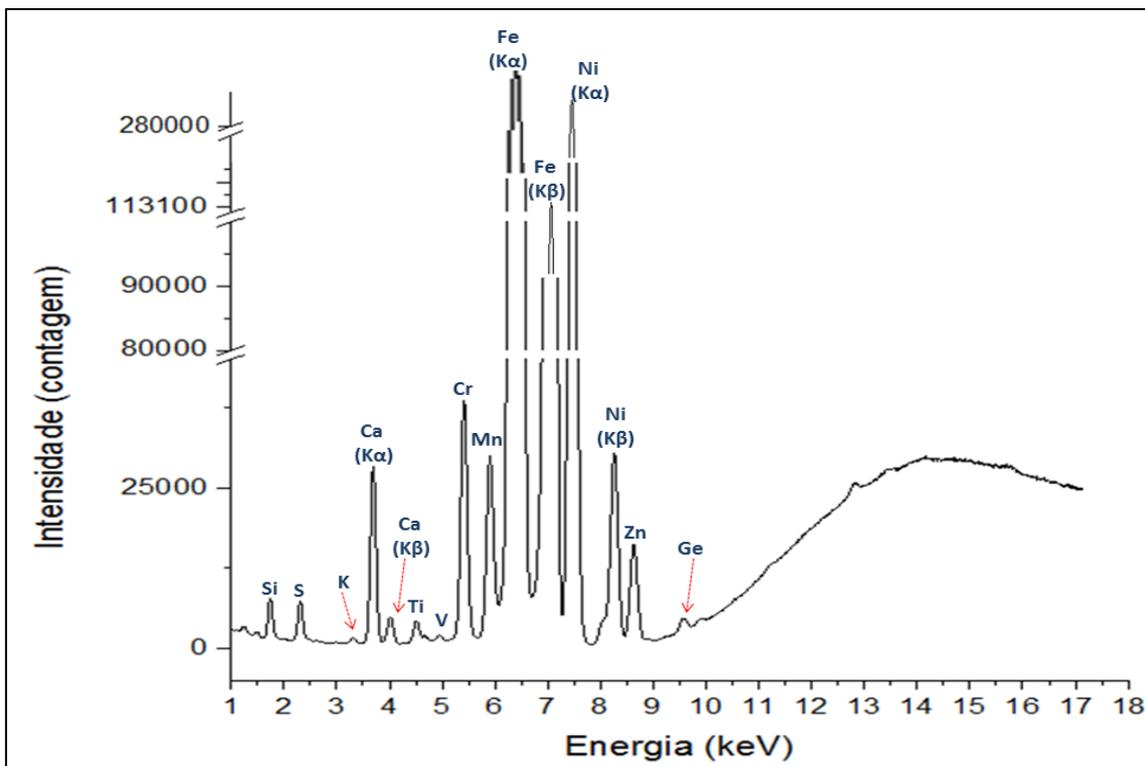
Nas figuras 26 e 27 são apresentados os espectros de fluorescência de raios X do meteorito Murchison. Além disso, na Tabela 9 são apresentados os resultados comparativos da composição elementar de baixo e alto Z obtidos do Zagami.

Figura 26 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de baixo Z do meteorito Murchison



Fonte: O Autor, 2018.

Figura 27 – Espectro Total de XRF obtido através da medida de alto Z do meteorito Murchison.



Fonte: O Autor, 2018.

Tabela 9 – Tabela comparativa entre os resultados de XRF obtidos do Murchison.

Murchison (Total)	Murchison (Baixo Z)	Murchison (Alto Z)
Mg	Mg	-----
Al	Al	-----
Si	Si	Si
S	S	S
Cl	Cl	-----
K	K	K
Ca	Ca	Ca
Ti	Ti	Ti
V	V	V
Cr	Cr	Cr
Mn	Mn	Mn
Fe	Fe	Fe
Ni	Ni	Ni
Zn	Zn	Zn
Ge	-----	Ge

Fonte: O Autor, 2018.

4.2. Composição química por μ Raman

Uma das informações relevantes que é possível obter através da técnica de micro Raman é a composição estrutural cristalográfica interna da matéria analisada, de forma, a saber, se a mesma se encontra cristalina ou amorfa. Essa informação é retirada a partir da análise das bandas D (Desordem) e G (Grafite), as quais são observáveis, respectivamente nas frequências de 1360 e 1600 cm^{-1} e que nos fornecem o grau de evolução estrutural e grafitização do material carbonáceo. Desse modo, é também possível investigar a presença de material orgânico na composição da amostra analisada (QUIRICO *et al.* 2005).

Basicamente, o desenvolvimento da técnica de micro Raman desenvolvida no projeto está alinhado em analisar os espectros obtidos de nossos meteoritos com databases de espectros de minerais puros certificados. Assim, o resultado e os estudos de meteoritos foram realizados:

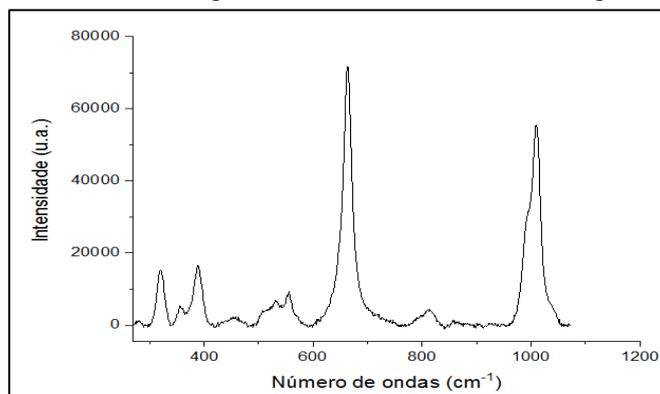
- ✓ Verificando se há variações na posição e na forma dos picos ou se os mesmos condizem com os espectros certificados ou com a frequência dos modos de oscilação dos minerais já reconhecidos em databases e em artigos publicados.
- ✓ Averiguando a presença de material orgânico através das bandas G e D, além de possíveis informações a respeito do grau de metamorfismo que o meteorito pode ter passado (QUIRICO; RAYNAL; BOUROT-DENISE, 2003).

4.2.1. Meteorito marciano Zagami

A análise do meteorito marciano Zagami, foi realizada através da variação da posição pontual do feixe monocromático por regiões de interesse da amostra. Nas figuras 43, 44 e 46 são apresentados os espectros de Raman obtidos no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) do meteorito Zagami.

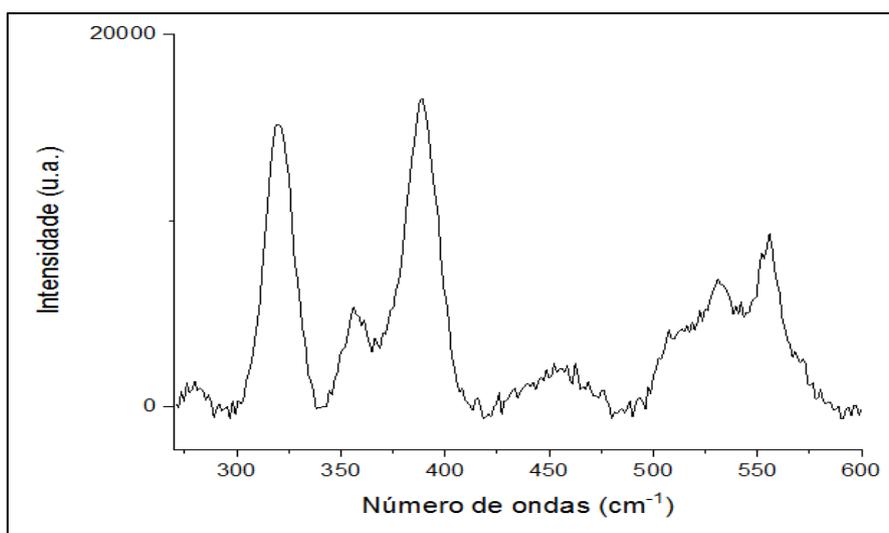
Na figura 28 é apresentado o espectro de Raman obtido do Zagami, em que é possível observar os picos detectados nas faixas de 326 cm^{-1} , 395 cm^{-1} , 535 cm^{-1} , 666 cm^{-1} , 1014 cm^{-1} .

Figura 28 – Espectro Raman da região 1 obtido do meteorito Zagami no LNLS



Posteriormente, é mostrado na figura 29 o espectro de Raman da mesma região do Zagami. Porém, foi feito um “truncamento” ou ampliação apenas na faixa que compreende as frequências 200 cm^{-1} até 600 cm^{-1} . Essa medida foi tomada com a finalidade de melhorar a observação da região da primeira curva (300 cm^{-1} até 400 cm^{-1}) e averiguar se a mesma poderia estar sendo mal observada devido à escala. Basicamente, nessa nova escala é possível constatar que a primeira curva, na verdade, é composta por 3 picos (326 cm^{-1} , 375 cm^{-1} e 395 cm^{-1}) e não apenas 2 picos como inicialmente foi observado.

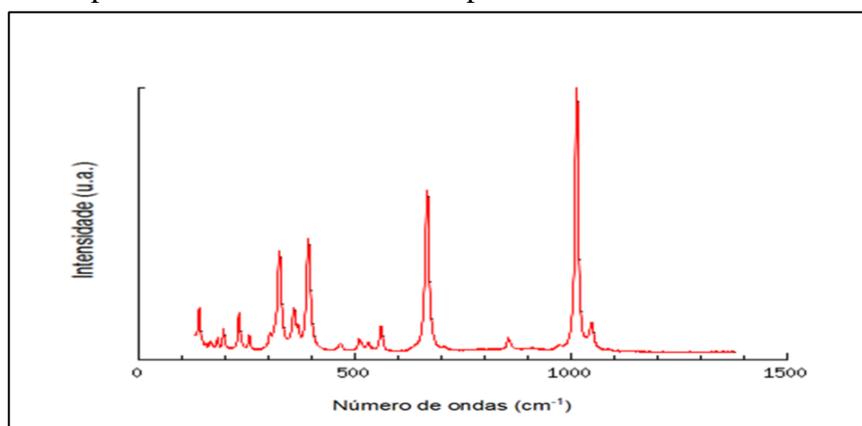
Figura 29 – Espectro Raman 1 truncado (entre 200 cm^{-1} até 600 cm^{-1}) do meteorito Zagami no LNLS.



Fonte: O Autor, 2018.

Assim, é possível notar que o espectro do meteorito Zagami é composto, na verdade, pelas frequências 326 cm^{-1} , 375 cm^{-1} e 395 cm^{-1} , 535 cm^{-1} , 666 cm^{-1} , 1014 cm^{-1} . Na figura 30 temos a representação gráfica do espectro de um mineral puro denominado diopsídio [$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$] e seus picos se encontram nas faixas de 326 cm^{-1} , 360 cm^{-1} e 390 cm^{-1} , 531 cm^{-1} , 665 cm^{-1} , 1013 cm^{-1} .

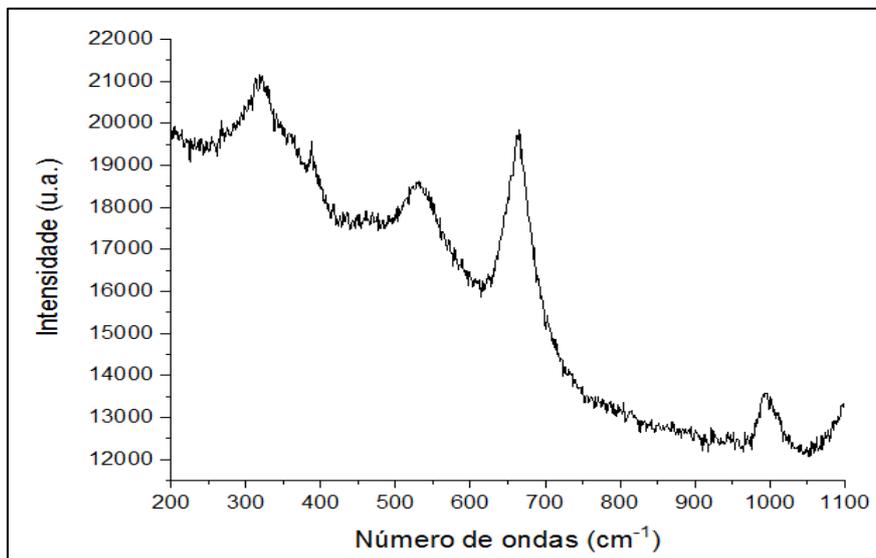
Figura 30– Espectro Raman do mineral diopsídio



Fonte: Laboratoire de géologie de Lyon, 2018.

Na figura 31 é apresentado outro espectro do Zagami obtido pela técnica de Raman, em que é possível observar os picos nas faixas de 330 cm^{-1} , 395 cm^{-1} , 550 cm^{-1} , 667 cm^{-1} , 1004 cm^{-1} .

Figura 31 – Espectro Raman da região 2 obtido do meteorito Zagami no LNLS.



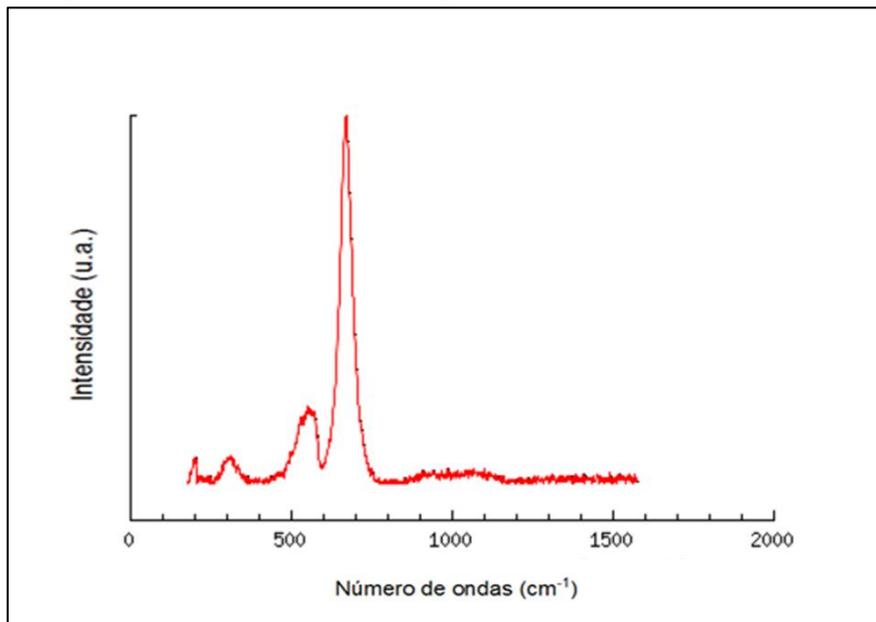
Fonte: O Autor, 2018.

A análise das gaussianas nas faixas de 330 cm^{-1} e 550 cm^{-1} , apresentam uma leve assimetria e deslocamento para a esquerda. Dessa forma, é possível que tenham duas curvas em 330 cm^{-1} e outras duas curvas 550 cm^{-1} e que durante o processo de aquisição foram somados os seus picos pelo software de forma a apresentar como apenas 1 curva em 330 cm^{-1} e outra curva em 550 cm^{-1} .

Na faixa de 330 cm^{-1} é possível que tenhamos a soma das frequências 310 cm^{-1} e 325 cm^{-1} e na curva 550 cm^{-1} existe a possibilidade de ter contribuições das frequências 555 cm^{-1} e 536 cm^{-1} . Desse modo, estaríamos vendo na verdade 2 tipos de minerais ao invés de apenas 1 como o espectro inicialmente nos mostra.

Assim, teríamos um mineral formado pelas faixas (325 cm^{-1} , 387 cm^{-1} , 536 cm^{-1} e 1010 cm^{-1}) podendo ser caracterizado como Augita $[(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6]$ e outro na faixa (310 cm^{-1} , 555 cm^{-1} , 667 cm^{-1}) que estaria de acordo com o espectro da Figura 32, do mineral denominado magnetita. É importante ressaltar que a magnetita pode se apresentar com sua estrutura química $[\text{Fe}_3\text{O}_4]$ com um íon de Ferro (Fe^{+2}) ou $[\text{Fe}_2\text{O}_4]$ com um íon de Ferro (Fe^{+3}).

Figura 32 – Espectro Raman do mineral magnetita

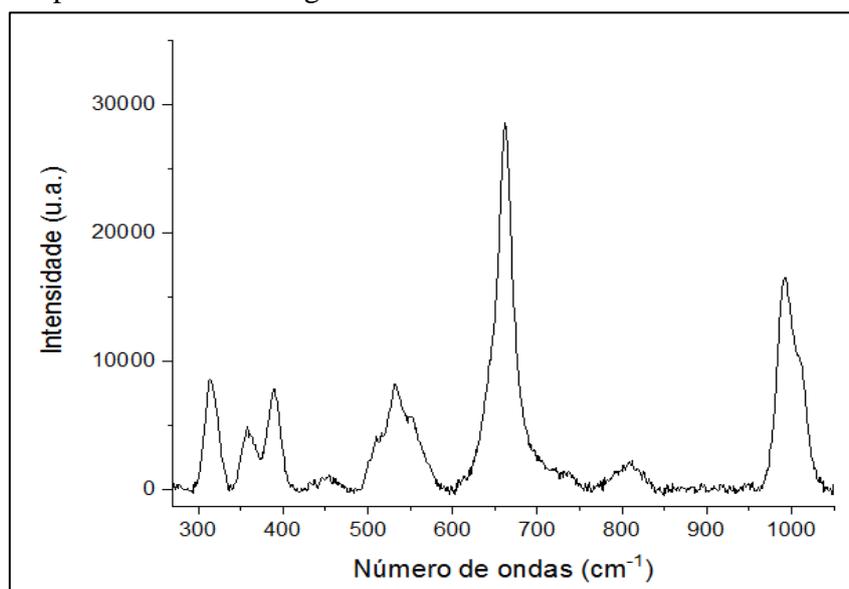


Fonte: Laboratoire de géologie de Lyon, 2018.

4.2.2. Meteorito marciano NWA 6963

A análise do meteorito marciano NWA 6963, obtida no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) é apresentada através das Figuras 33, 35, 38, 42 e 43. A seguir é apresentado através da Figura 33 o espectro de micro Raman obtido do NWA 6963, em que é possível observar os picos detectados nas faixas de 318 cm^{-1} , 363 cm^{-1} , 393 cm^{-1} , 536 cm^{-1} , 664 cm^{-1} , 821 cm^{-1} e 1013 cm^{-1} .

Figura 33 – Espectro Raman da região 1 obtido do meteorito NWA 6963 no LNLS



Fonte: O Autor, 2018.

É possível notar através do espectro do meteorito marciano NWA 6963, que a composição de suas frequências 318 cm^{-1} , 363 cm^{-1} , 393 cm^{-1} , 536 cm^{-1} , 664 cm^{-1} , 821 cm^{-1} , 1013 cm^{-1} , descreve bem o espectro do mineral diopsídio $[\text{CaMgSi}_2\text{O}_6]$. Esse mineral em sua forma pura possui picos semelhantes que podem ser observados na Tabela 10.

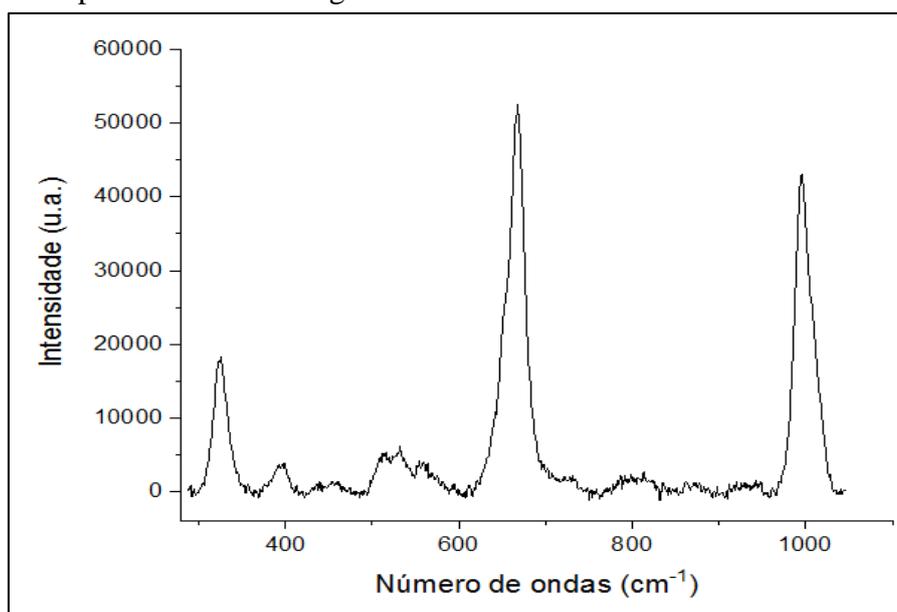
Tabela 10 –Tabela dos modos vibracionais do Diopsídio

MODO VIBRACIONAL ESPERADO	
Desvio Raman (Deste trabalho)	Desvio Raman (Diopsidio)
318 cm^{-1}	325 cm^{-1}
363 cm^{-1}	357 cm^{-1}
393 cm^{-1}	392 cm^{-1}
536 cm^{-1}	531 cm^{-1}
664 cm^{-1}	667 cm^{-1}
821 cm^{-1}	855 cm^{-1}
1013 cm^{-1}	1013 cm^{-1}

Fonte: Laboratoire de géologie de Lyon, 2018.

Na figura 34 é apresentado outro espectro Raman do meteorito marciano NWA 6963, em que foram detectados picos nas faixas de 328 cm^{-1} , 401 cm^{-1} , 520 cm^{-1} , 667 cm^{-1} , 996 cm^{-1} . No entanto, com o tratamento das curvas 1, 2 e 4, foi observado que o primeiro pico era composto por duas curvas de frequência 324 cm^{-1} e 328 cm^{-1} , segundo pico era composto por também por duas curvas com frequências 393 cm^{-1} e 400 cm^{-1} , assim como o terceiro e o quarto pico eram compostos por duas curvas cada, sendo respectivamente de 510 cm^{-1} , 535 cm^{-1} , e 640 cm^{-1} , 667 cm^{-1} .

Figura 34 – Espectro Raman da região 2 obtido do meteorito NWA 6963 no LNLS



Fonte: O Autor, 2018.

Assim, teríamos a contribuição de dois minerais ao invés de apenas um, em que um deles seria o diopsídio (324 cm^{-1} , 393 cm^{-1} , 535 cm^{-1} e 667 cm^{-1}) e o outro seria a geikielita [MgTiO_3] (328 cm^{-1} , 400 cm^{-1} , 510 cm^{-1} , 640 cm^{-1}) que é apresentada a sua tabela com os seus respectivos modos vibracionais na Tabela 11.

Tabela 11 – Tabela dos modos vibracionais do Diopsídio e da Geikielita.

MODO VIBACIONAL ESPERADO		
Desvio Raman (Deste trabalho)	Desvio Raman (Diopsídio)	Desvio Raman (Geikielita)
324 cm^{-1}	325 cm^{-1}	-----
328 cm^{-1}	-----	328 cm^{-1}
393 cm^{-1}	392 cm^{-1}	-----
400 cm^{-1}	-----	398 cm^{-1}
510 cm^{-1}	-----	501 cm^{-1}
535 cm^{-1}	531 cm^{-1}	855 cm^{-1}
640 cm^{-1}	-----	641 cm^{-1}
667 cm^{-1}	667 cm^{-1}	-----
996 cm^{-1}	-----	-----

Fonte: Laboratoire de géologie de Lyon, 2018.

Por fim, a última frequência encontrada em 996 cm^{-1} pode estar relacionada com a apatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$] que é o único a possuir um pico característico nessa faixa e que é demonstrado na Tabela 12.

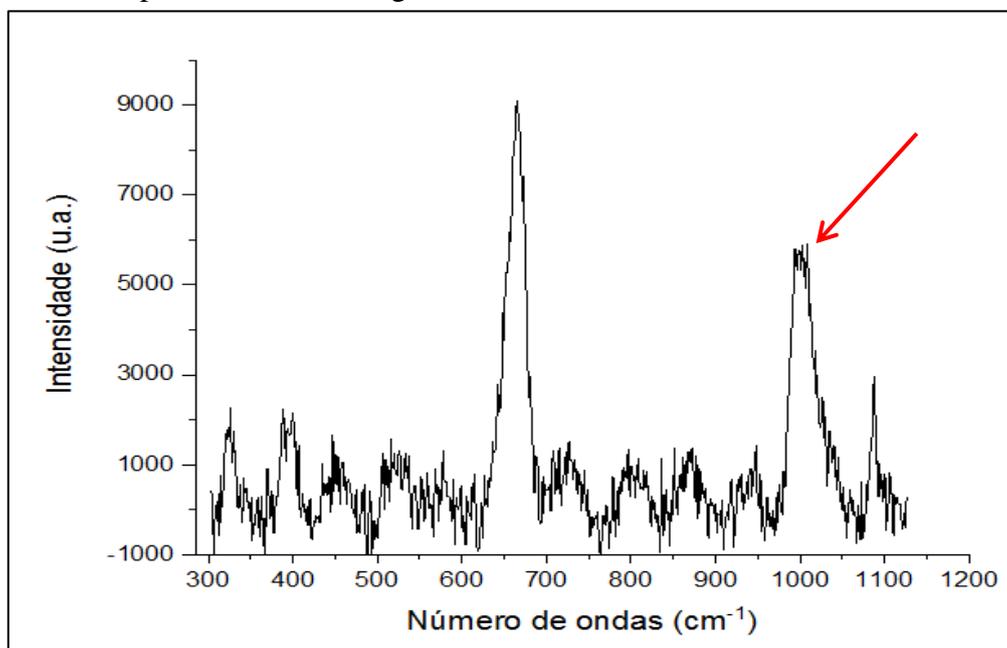
Tabela 12 – Tabela dos modos vibracionais do Apatita.

MODO VIBACIONAL ESPERADO	
Desvio Raman (Deste trabalho)	Desvio Raman (Apatita)
324 cm^{-1}	-----
328 cm^{-1}	-----
393 cm^{-1}	-----
400 cm^{-1}	-----
510 cm^{-1}	-----
535 cm^{-1}	-----
640 cm^{-1}	-----
667 cm^{-1}	-----
996 cm^{-1}	996 cm^{-1}

Fonte: Laboratoire de géologie de Lyon, 2018.

Outro espectro Raman obtido do meteorito marciano NWA 6963, é apresentado na Figura 35. Neste outro gráfico podemos observar picos nas faixas de 327 cm^{-1} , 396 cm^{-1} , 468 cm^{-1} , 533 cm^{-1} , 667 cm^{-1} , 673 cm^{-1} , 743 cm^{-1} , 886 cm^{-1} , 995 cm^{-1} , 1008 cm^{-1} e 1086 cm^{-1} .

Figura 35 – Espectro Raman da região 3 obtido do meteorito NWA 6963 no LNLS



Fonte: O Autor, 2018.

Desse modo, analisando as frequências obtidas e comparando com as faixas certificadas de minerais puros, é possível inferir a composição de minerais presentes nesse espectro. É possível observar com certa clareza através das faixas de 327 cm^{-1} , 396 cm^{-1} , 468 cm^{-1} , 533 cm^{-1} , 667 cm^{-1} e 1008 cm^{-1} , que novamente existe a presença da augita $[\text{Mg}(\text{Ca},\text{Fe},\text{Al},\text{Ti})\text{Si}_2\text{O}_6]$ e a sua parcela de contribuição neste espectro.

No entanto, as frequências 673 cm^{-1} , 743 cm^{-1} , 995 cm^{-1} e 1086 cm^{-1} caracterizam a possibilidade de outros minerais estarem encrustados ou juntos a augita nesta região em que foi recolhido este espectro. Dessa forma, relacionando de maneira comparativa cada faixa encontrada, com frequências de minerais já conhecidos e certificados em uma base de dados do Laboratoire de géologie de Lyon, foi possível encontrar que minerais poderiam estar contribuindo no gráfico deste espectro.

Basicamente, a faixa 995 cm^{-1} é um pico característico da apatita e que já mencionado anteriormente de forma a nos arremeter a possibilidade da contribuição deste material em nosso espectro. A frequência detectada na faixa de 1086 cm^{-1} também é bem característica do material denominado como Calcita $[\text{CaCO}_3]$ e seu modo vibracional pode ser visto na Tabela 13.

Tabela 13 – Tabela dos modos vibracionais do Diopsídio e da Calcita

MODO VIBACIONAL ESPERADO		
Desvio Raman (Deste trabalho)	Desvio Raman (Diopsídio)	Desvio Raman (Calcita)
327 cm ⁻¹	325 cm ⁻¹	-----
396 cm ⁻¹	392 cm ⁻¹	-----
468 cm ⁻¹	468 cm ⁻¹	-----
533 cm ⁻¹	533 cm ⁻¹	-----
667 cm ⁻¹	667 cm ⁻¹	-----
673 cm ⁻¹	-----	-----
743 cm ⁻¹	-----	-----
886 cm ⁻¹	886 cm ⁻¹	-----
995 cm ⁻¹	-----	-----
1008 cm ⁻¹	1008 cm ⁻¹	-----
1086 cm ⁻¹	-----	1086 cm ⁻¹

Fonte: Laboratoire de géologie de Lyon, 2018.

Dessa maneira, a estrutura química da Calcita na faixa de 1086 cm⁻¹ deve estar contribuindo no espectro obtido. Além disso, existe a possibilidade de parte da frequência em 713 cm⁻¹ não ter sido detectada e discriminada no espectro gerado, devido talvez, a ter baixa contribuição ao espectro e assim ter sido afetada com uma sobreposição de “ruído de fundo” ou com outras faixas de maior intensidade de outros minerais que estão na proximidade.

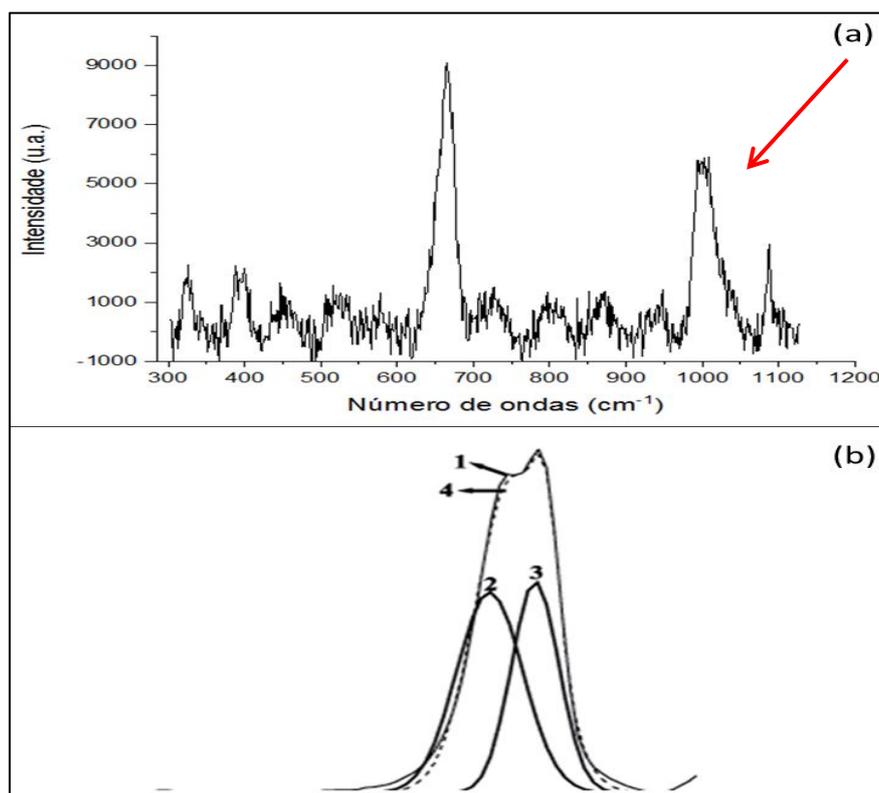
As últimas frequências analisadas foram 673 cm⁻¹ e 743 cm⁻¹, as quais foram mais complicadas de buscar uma comparação analítica que pudesse sugerir uma tendência mineralógica para um determinado material. Contudo, foi observado um pequeno vale, em destaque com seta vermelha no pico 10 na Figura 53, que corresponderia à frequência de duas curvas ao invés de apenas uma e com isso este pico passou a ter frequências em 1008 cm⁻¹ e 1028 cm⁻¹. Dessa forma, como a faixa de 1008 cm⁻¹ já estava caracterizada, passamos a ter então mais uma frequência de 1028 cm⁻¹, a qual passamos a compará-la com as outras faixas do nosso espectro obtido. Basicamente, a faixa de 1028 cm⁻¹ pode estar relacionada com as faixas 396 cm⁻¹, 673 cm⁻¹ e 743 cm⁻¹, tal como podemos ver na Tabela 14 que caracterizaria a presença de actinolita ou tremolita [Ca₂(Mg,Fe²⁺)₅Si₈O₂₂(OH,F)₂].

Tabela 14 – Tabela dos modos vibracionais da Actinolita

MODO VIBRACIONAL ESPERADO	
Desvio Raman (Deste trabalho)	Desvio Raman (Actinolita)
327 cm^{-1}	-----
396 cm^{-1}	396 cm^{-1}
468 cm^{-1}	-----
533 cm^{-1}	-----
667 cm^{-1}	-----
673 cm^{-1}	673 cm^{-1}
743 cm^{-1}	743 cm^{-1}
886 cm^{-1}	-----
995 cm^{-1}	-----
1008 cm^{-1}	-----
1028 cm^{-1}	1030 cm^{-1}
1086 cm^{-1}	-----

Fonte: Laboratoire de géologie de Lyon, 2018.

Figura 36 – Representação ilustrativa da sobreposição de curvas da Apatita e da Actinolita.

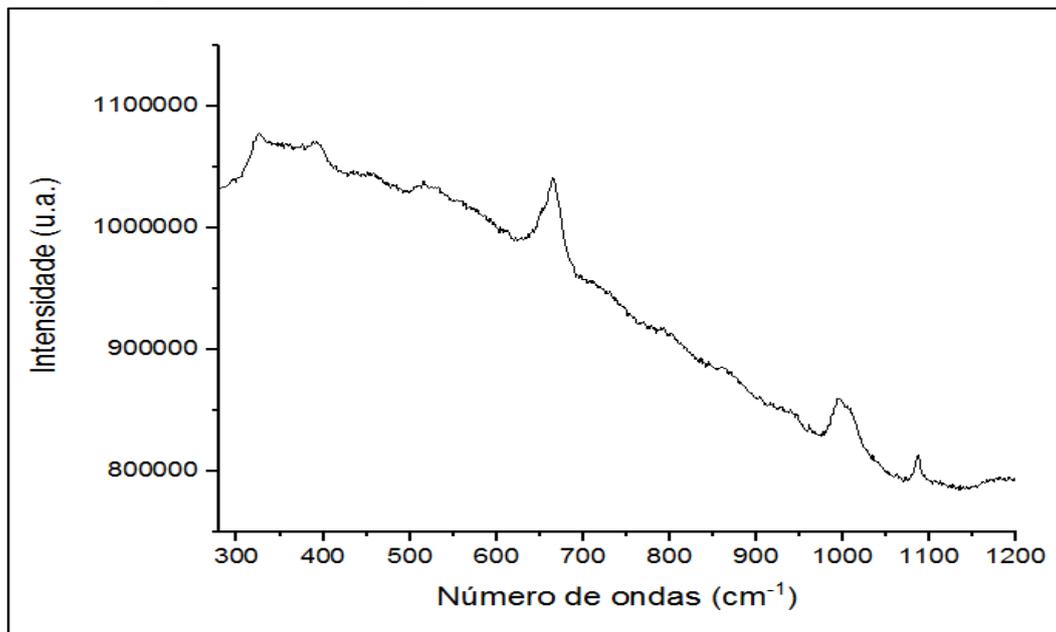


Legenda: Na imagem (a) é apresentado o espectro da região averiguada e a seta vermelha destaca o pico com sobreposição, na imagem (b) é ilustrado como as curvas pertencentes a faixas de 1026 cm^{-1} e 1030 cm^{-1} , poderiam estar sendo representadas de forma equivocada como um pico único em 1028 cm^{-1} . Os números 1 e 4 representam a falta de resolução que une as curvas 1 e 2 como se fossem apenas um pico.

Fonte: O Autor, 2018

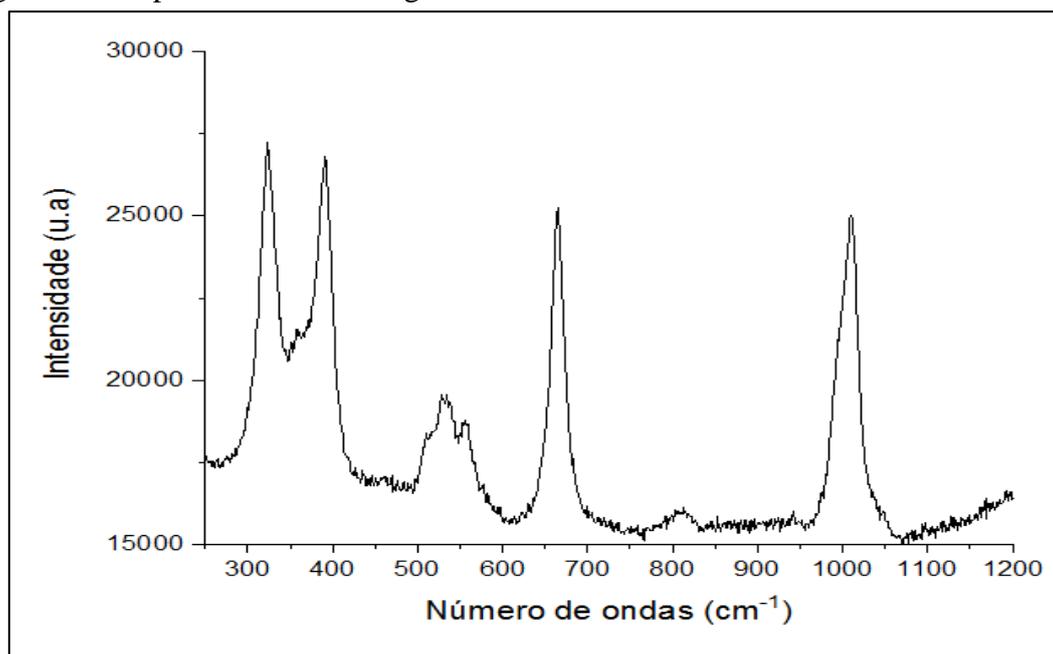
Por fim, são apresentados os dois últimos espectros de Raman nas Figuras 37 e 38 que foram obtidos do meteorito marciano NWA 6963. Basicamente, a Figura 35 exibe picos nas frequências de 330 cm^{-1} , 398 cm^{-1} , 533 cm^{-1} , 667 cm^{-1} , 1009 cm^{-1} , e 1087 cm^{-1} . Na Figura 36, são observados picos nas frequências de 323 cm^{-1} , 398 cm^{-1} , 542 cm^{-1} , 665 cm^{-1} e 995 cm^{-1} .

Figura 37 – Espectro Raman da região 4 obtido do meteorito NWA 6963 no LNLS



Fonte: O Autor, 2018.

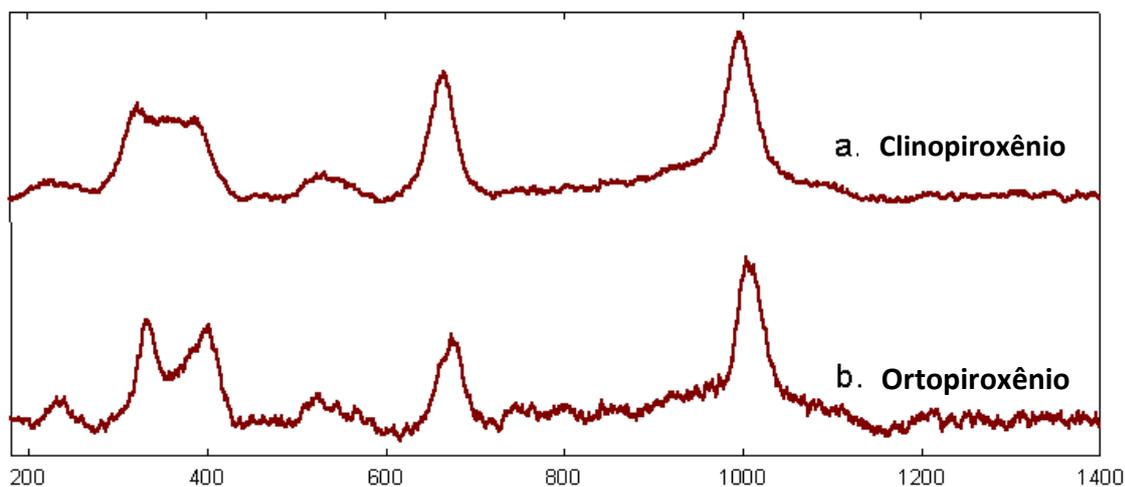
Figura 38 – Espectro Raman da região 5 obtido do meteorito NWA 6963 no LNLS



Fonte: O Autor, 2018.

É possível realizar uma análise comparada entre dos espectros das Figuras 37 e 38 com os espectros apresentados na Figura 39 (a) e (b).

Figura 39 – Espectro Raman da literatura dos minerais Clinopiroxênio e Ortopiroxênio



Fonte: Wang A. et. al.,1999.

Fundamentalmente, as faixas de 330 cm^{-1} , 398 cm^{-1} , 533 cm^{-1} , 667 cm^{-1} , 1008 cm^{-1} já foram observadas e descritas neste trabalho como componentes do espectro representativo do mineral augita, que pertence ao grupo do clinopiroxênio. É possível notar que realmente as características descritas conferem com a Figura 39 (a) de um clinopiroxênio detectado no meteorito marciano Zagami por A. Wang, B. L. Jolliff e L. A. Haskin do Departamento da Terra e Ciências Planetárias da Universidade de Washington (EUA). Todavia, em nosso espectro existe um pico adicional na região em que se encontra a faixa de 1087 cm^{-1} , e que também já foi descrito como uma frequência característica da calcita, a qual pode estar encrustada ou exsolvida no clinopiroxênio de modo a dar a contribuição observada nessa região do espectro analisado.

Finalmente, temos a Figura 38 que ao ser comparada com a Figura 39 (b) aparenta ter grandes semelhanças entre a posição da faixa de seus picos. Dessa forma, o espectro observado se caracterizaria como sendo uma representação de um ortopiroxênio presente no meteorito marciano NWA 6963.

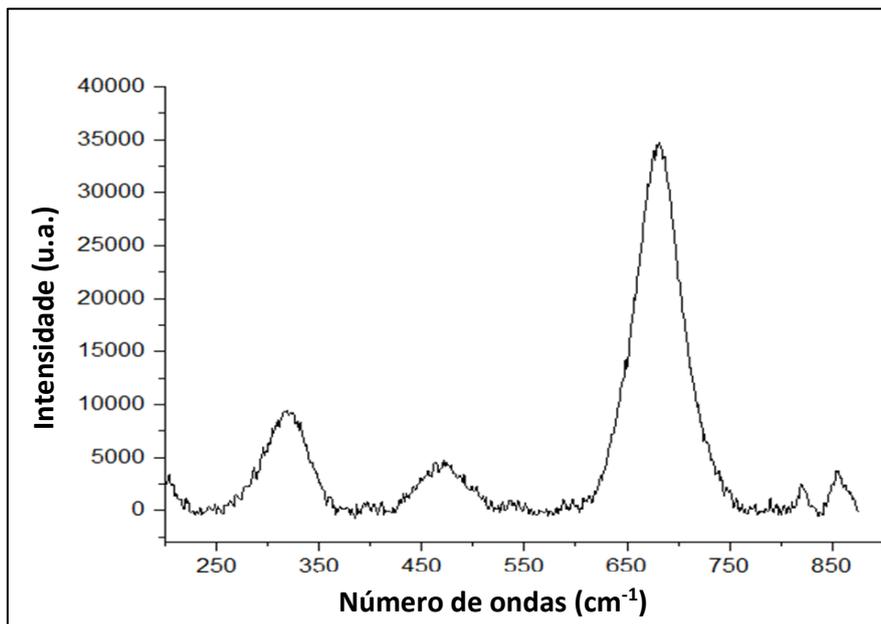
4.2.3. Meteorito marciano NWA 7397

O meteorito marciano NWA 7397 foi analisado no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) pela técnica de micro Raman, através da variação da posição pontual do feixe monocromático por regiões que demonstraram oferecer possibilidade de realizar medidas. Nas figuras 40, 43, 44, 45, 46 e 47 são apresentados os espectros obtidos dessas áreas e suas respectivas faixas de frequência.

Os picos detectados observados na Figura 40 aparecem nas faixas de 325 cm^{-1} , 478 cm^{-1} , 683 cm^{-1} e 863 cm^{-1} . Desse modo, esse espectro demonstra ser bem representado aos modos vibracionais da cromita [FeCr_2O_4], da ilmenita [$\text{Fe}^{+2}\text{Ti}^{+4}\text{O}_3$] e da

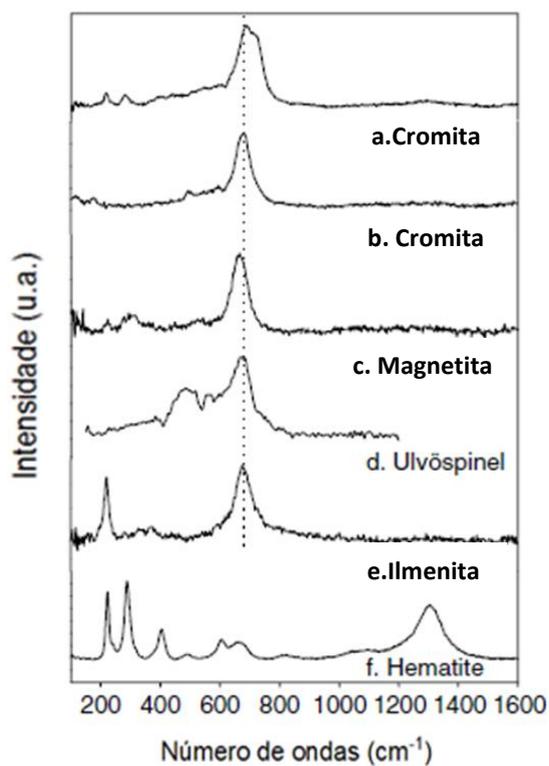
magnetita [Fe_3O_4 (Fe^{2+} Fe_2^{3+} O_4)] Figura 40 em que modos vibracionais e os picos aparentam ser semelhantes aos da Figura 41.

Figura 40 – Espectro Raman da região 1 obtido do meteorito NWA 7397.



Fonte: O Autor, 2018.

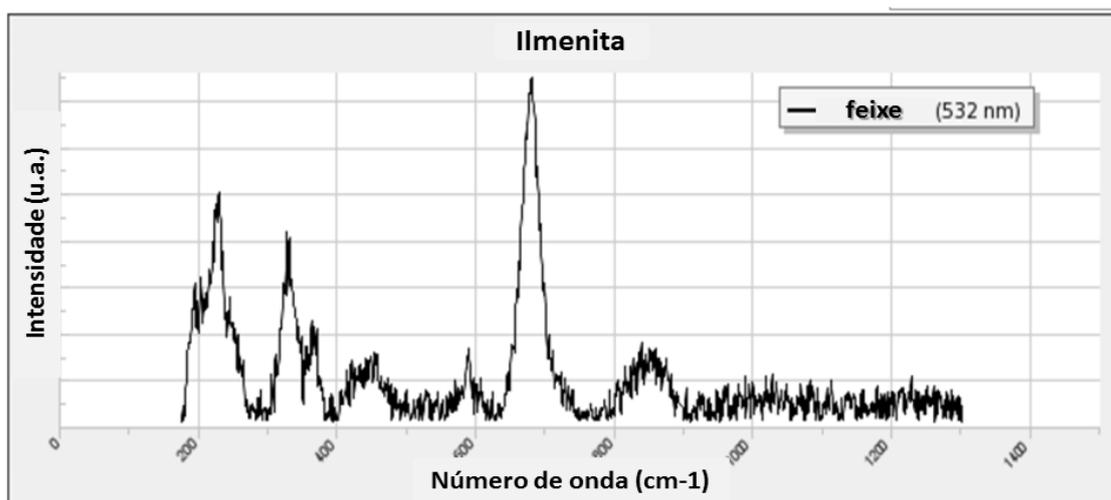
Figura 41 – Imagens dos espectros dos modos vibracionais de minerais na faixa ~ 680 cm⁻¹



Fonte: WANG A. et. al., 2004.

Aparentemente, a faixa de 680 cm^{-1} possui uma correspondência com o agrupamento dos três minerais, a cromita, a ilmenita e a magnetita. Basicamente, segundo Wang (2004), tanto a cromita, quanto a ilmenita e a magnetita seriam oriundos de uma fase final da cristalização do meteorito a partir da massa fundente do corpo parental e que a partir do momento que a composição da massa fundida residual se tornou rica em Fe, elas tendem a ocorrer juntas. Espectro da Ilmenita na Figura 42 e seus modos vibracionais na Tabela 15.

Figura 42 – Imagem do espectro da Ilmenita



Fonte: ILMENITE R060149, 2018.

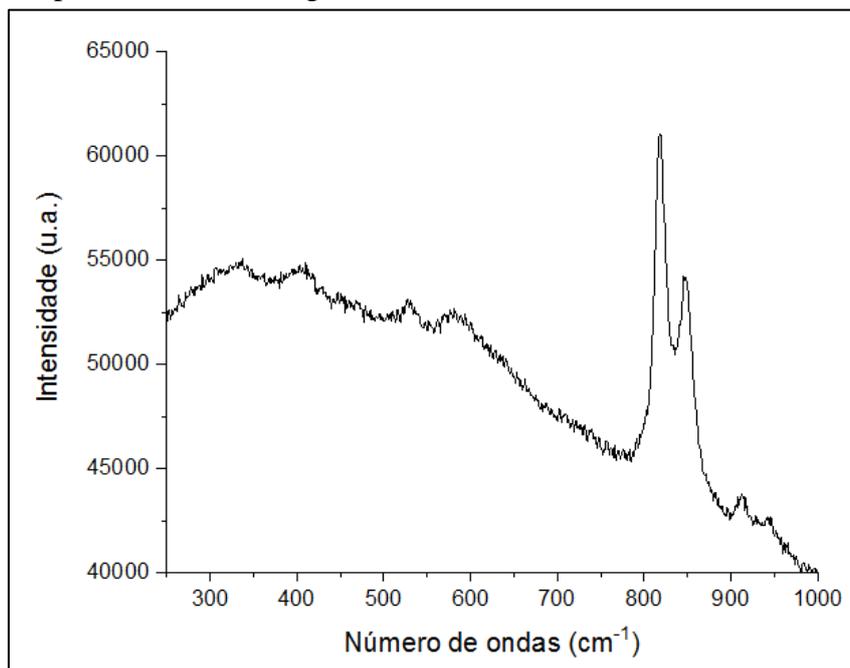
Tabela 15 – Tabela dos modos vibracionais da Ilmenita

MODO VIBRACIONAL ESPERADO	
Desvio Raman (Deste trabalho)	Desvio Raman (Ilmenita)
325 cm^{-1}	345 cm^{-1}
478 cm^{-1}	478 cm^{-1}
683 cm^{-1}	683 cm^{-1}
863 cm^{-1}	800 cm^{-1}

Fonte: Laboratoire de géologie de Lyon, 2018.

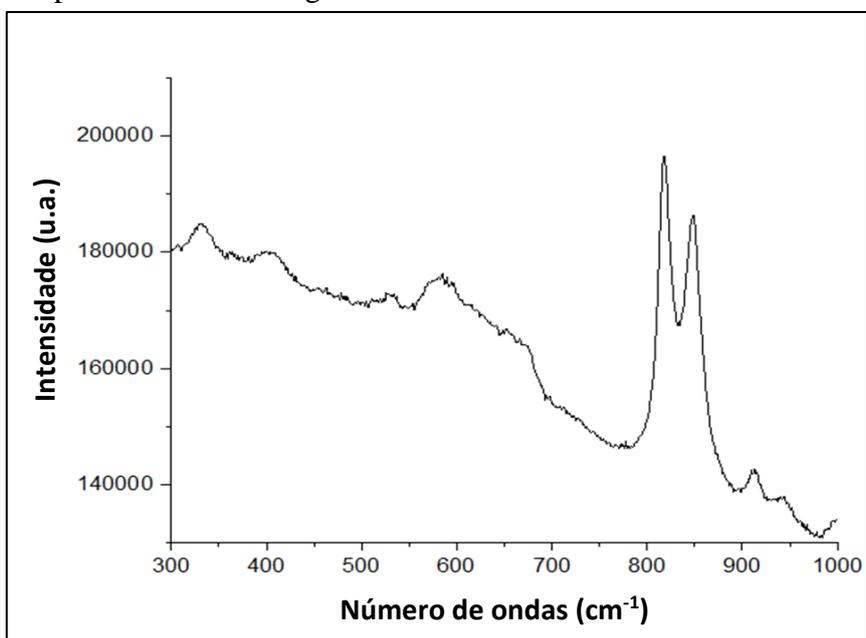
Os outros espectros de Raman obtidos de diferentes regiões do meteorito marciano NWA 7397, são apresentados através das Figuras 43, 44, 45, 46 e 47. Basicamente, em todos esses espectros são observados picos na mesma faixa de frequência de 820 cm^{-1} e 850 cm^{-1} . Dessa forma, esse espectro pode ser caracterizado pela presença de forsterita [Mg_2SiO_4], que é um mineral da classe dos nesossilicatos pertencente ao grupo da olivina. Posteriormente, no capítulo seguinte será abordada a discussão e a análise em relação entre as diferenças de proporção observadas entre os picos de uma figura para a outra.

Figura 43 – Espectro Raman da região 2 obtido do meteorito marciano NWA 7397.



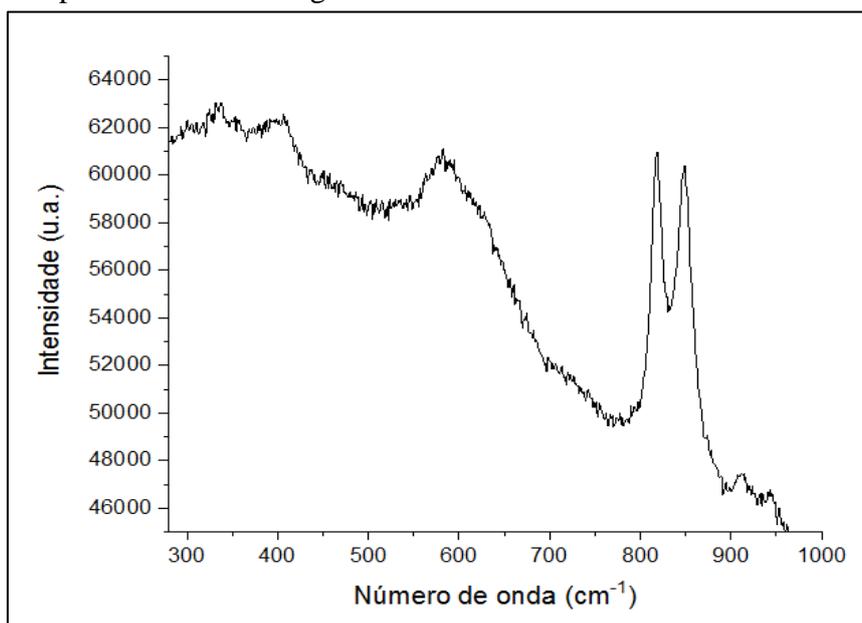
Fonte: O Autor, 2018.

Figura 44 – Espectro Raman da região 3 obtido do meteorito marciano NWA 7397.



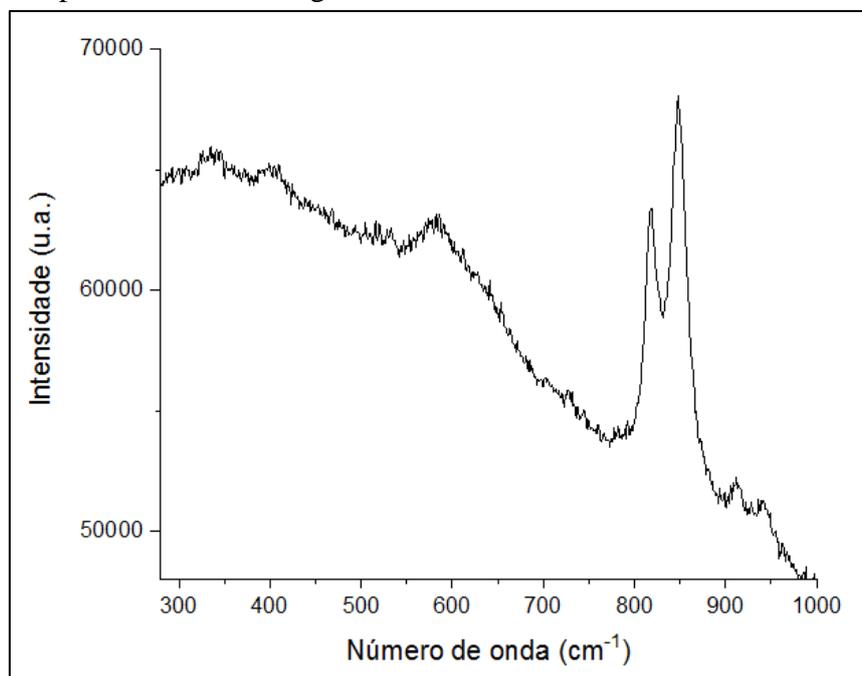
Fonte: O Autor, 2018.

Figura 45 – Espectro Raman da região 4 obtido do meteorito marciano NWA 7397.



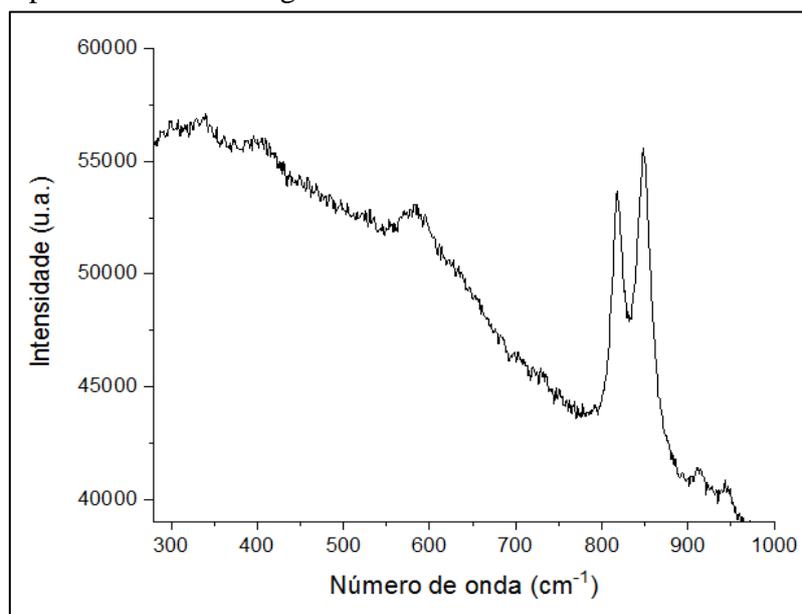
Fonte: O Autor, 2018.

Figura 46 – Espectro Raman da região 5 obtido do meteorito marciano NWA 7397.



Fonte: O Autor, 2018.

Figura 47 – Espectro Raman da região 6 obtido do meteorito marciano NWA 7397

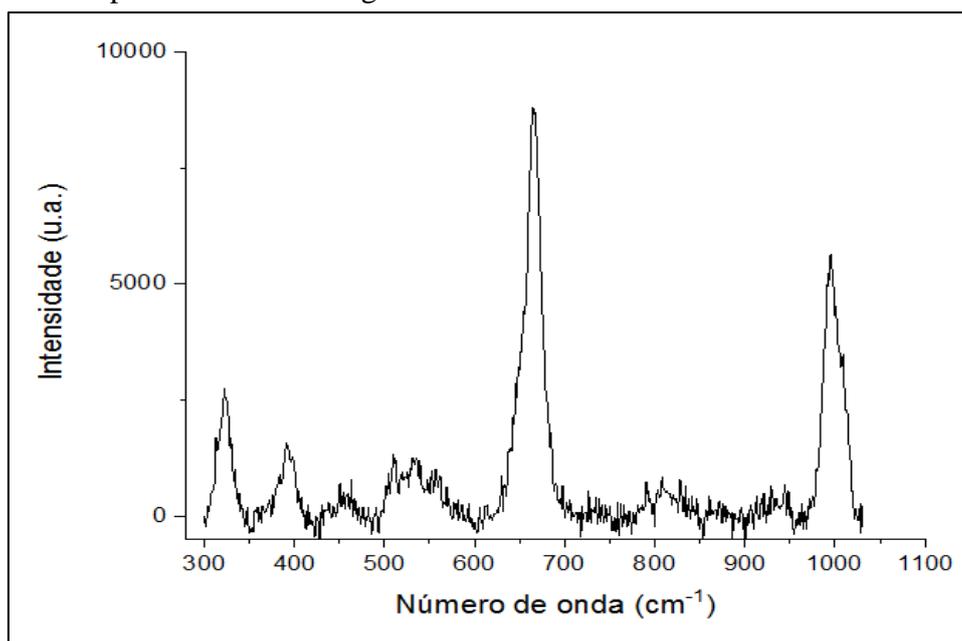


Fonte: O Autor, 2018.

4.2.4. Meteorito lunar NWA 8277

A análise feita no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) do meteorito Lunar NWA 8277 é apresentada através das Figuras 48 e 49. Na figura 48 é possível observar os picos detectados nas faixas de 324 cm^{-1} , 398 cm^{-1} , 667 cm^{-1} e 996 cm^{-1} .

Figura 48 – Espectro Raman da região 1 obtido do meteorito Lunar



Fonte: O Autor, 2018.

Basicamente, todos esses picos encontrados no espectro podem ser caracterizados pela frequência do diopsídio [$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$] devido a similaridade com as faixas desse mineral na Tabela 16.

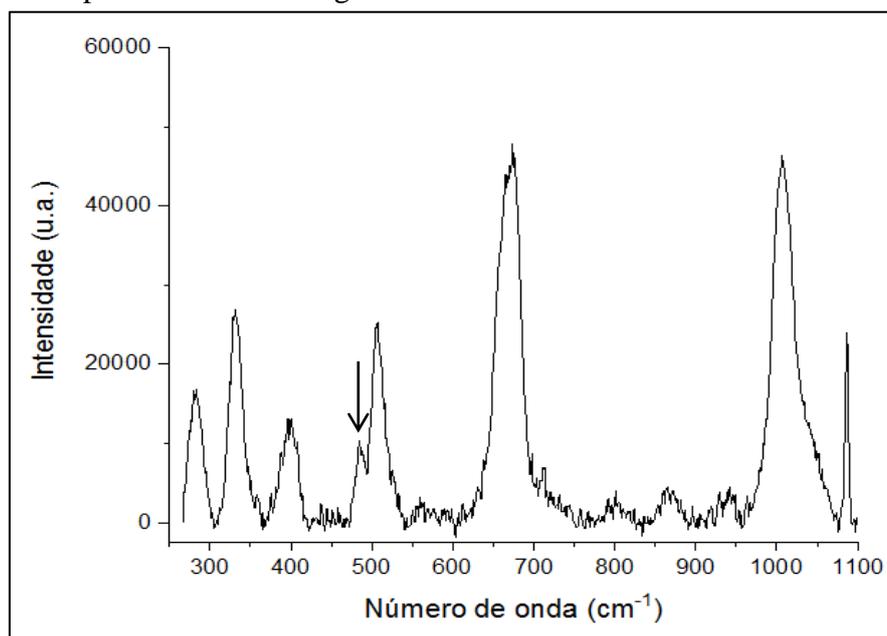
Tabela 16 – Tabela dos modos vibracionais do Diopsídio

MODO VIBRACIONAL ESPERADO	
Desvio Raman (Deste trabalho)	Desvio Raman (Diopsídio)
327 cm^{-1}	325 cm^{-1}
398 cm^{-1}	392 cm^{-1}
667 cm^{-1}	667 cm^{-1}
995 cm^{-1}	-----

Fonte: Laboratoire de géologie de Lyon, 2018.

O outro espectro de Raman obtido do meteorito Lunar é apresentado através da Figura 49. Os picos presentes nesse espectro se encontram nas faixas de 285 cm^{-1} , 330 cm^{-1} , 401 cm^{-1} , 490 cm^{-1} , 510 cm^{-1} , 675 cm^{-1} , 1009 cm^{-1} e 1086 cm^{-1} e diferentemente do anterior é uma composição de três minerais distintos.

Figura 49 – Espectro Raman da região 2 obtido do meteorito Lunar.



Fonte: O Autor, 2018.

Primeiramente, dentre os diversos picos os de 285 cm^{-1} , 1086 cm^{-1} , em setas vermelhas, chamam a atenção devido a possuírem uma característica muito distinta em que ambos são pertencentes ao modo vibracional do grupo da calcita e caracterizados pelo carbonato de ferro denominado siderita ou calibita [FeMnMgCaCO_3]. Posteriormente, os picos das faixas 401 cm^{-1} , 490 cm^{-1} , 675 cm^{-1} e 1009 cm^{-1} , em setas pretas, apresentam semelhanças representativas com as frequências vibracionais de outro mineral

denominado gipsita $[\text{Ca}(\text{SO}_4)\cdot 2(\text{H}_2\text{O})]$, que é um sulfato de cálcio hidratado com seu modos de vibração exibidos na Tabela 17.

Tabela 17 – imagem comparativa dos modos vibracionais da siderita e da gipsita.

MODO VIBACIONAL ESPERADO		
Desvio Raman (Deste trabalho)	Desvio Raman (Gipsita)	Desvio Raman (Siderita)
285 cm^{-1}	-----	285 cm^{-1}
330 cm^{-1}	-----	-----
401 cm^{-1}	401 cm^{-1}	-----
490 cm^{-1}	490 cm^{-1}	-----
510 cm^{-1}	-----	-----
675 cm^{-1}	675 cm^{-1}	-----
1009 cm^{-1}	1009 cm^{-1}	-----
1086 cm^{-1}	-----	1086 cm^{-1}

Fonte: Laboratoire de géologie de Lyon, 2018.

Por fim, os picos que restaram nas faixas de 330 cm^{-1} e 510 cm^{-1} , podem está associados ao mineral diopsídio $[\text{CaMgSi}_2\text{O}_6]$ que possui modos vibracionais já apresentados nas faixas de 330 cm^{-1} , 401 cm^{-1} , 510 cm^{-1} , 1013 cm^{-1} . Embora tenham sobrado apenas em setas verdes as frequências 330 cm^{-1} e 510 cm^{-1} , foram detectados picos nas faixas de 401 cm^{-1} e 1009 cm^{-1} e que talvez tenham alguma contribuição dos modos vibracionais 401 cm^{-1} e 1013 cm^{-1} do diopsídio, pois nessa faixa os picos apresentam uma leve assimetria, o que poderia justificar a presença desse terceiro mineral (Tabela 18).

Tabela 18 – Tabela dos modos vibracionais da siderita e da gipsita.

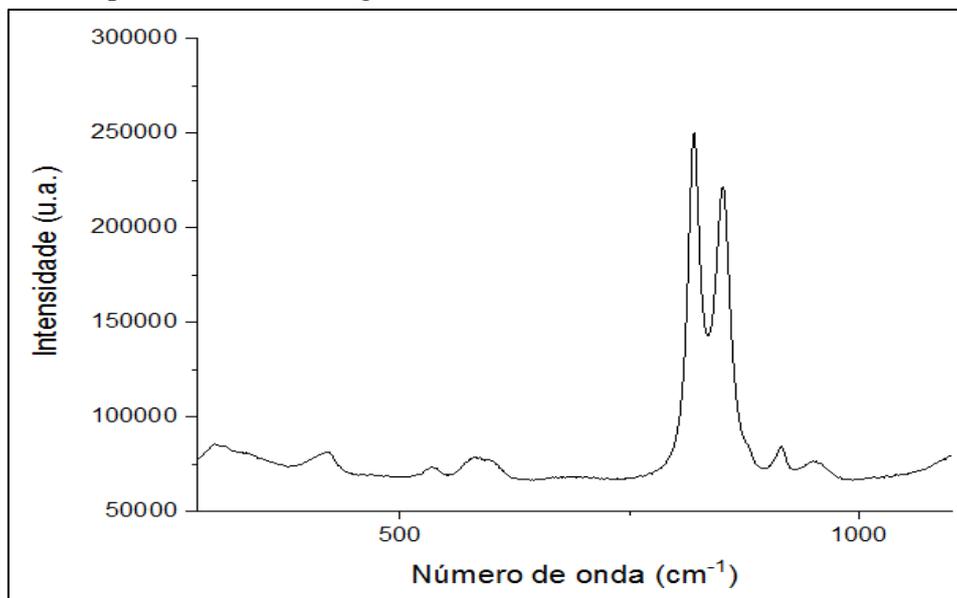
MODO VIBACIONAL ESPERADO	
Desvio Raman (Deste trabalho)	Desvio Raman (Diopsídio)
285 cm^{-1}	-----
330 cm^{-1}	330 cm^{-1}
401 cm^{-1}	-----
490 cm^{-1}	-----
510 cm^{-1}	510 cm^{-1}
675 cm^{-1}	675 cm^{-1}
1009 cm^{-1}	1009 cm^{-1}
1086 cm^{-1}	-----

Fonte: Laboratoire de géologie de Lyon, 2018.

4.2.5. Meteorito Allende

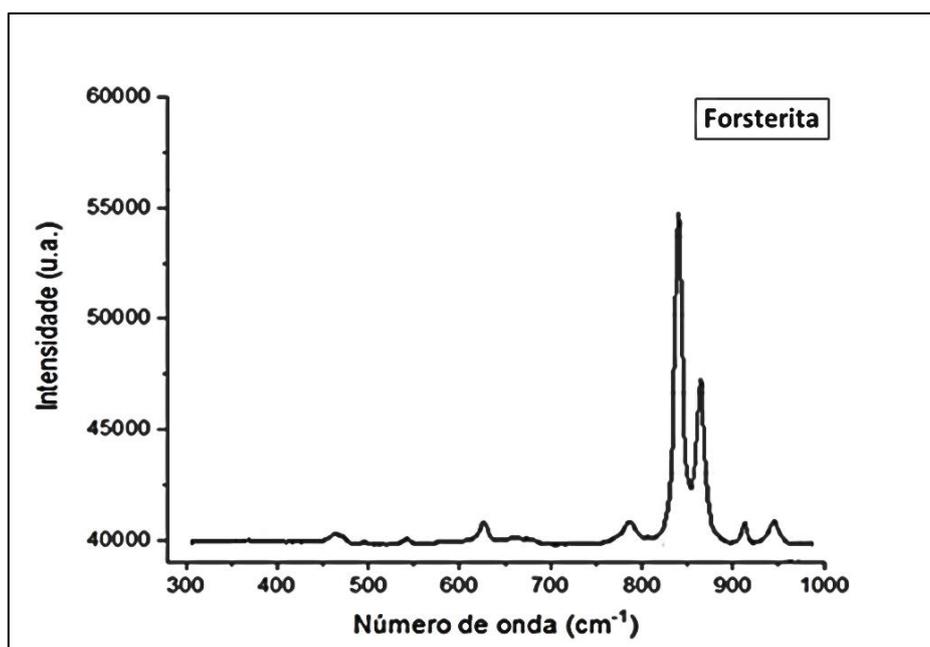
Os espectros gerados pelo micro Raman das Figuras 50 é possível observar as faixas 820 cm^{-1} e 850 cm^{-1} , exibidas no gráfico coincidem com as frequências já caracterizadas da forsterita [Mg_2SiO_4] da Figura 51 e se assemelham com os modos vibracionais da forsterita pura da Tabela 19.

Figura 50 – Espectro Raman da região 1 obtido do meteorito Allende



Fonte: O Autor, 2018.

Figura 51– Espectro Raman do mineral forsterite obtido pela Caltech



Fonte: FORSTERITE X050090, 2018.

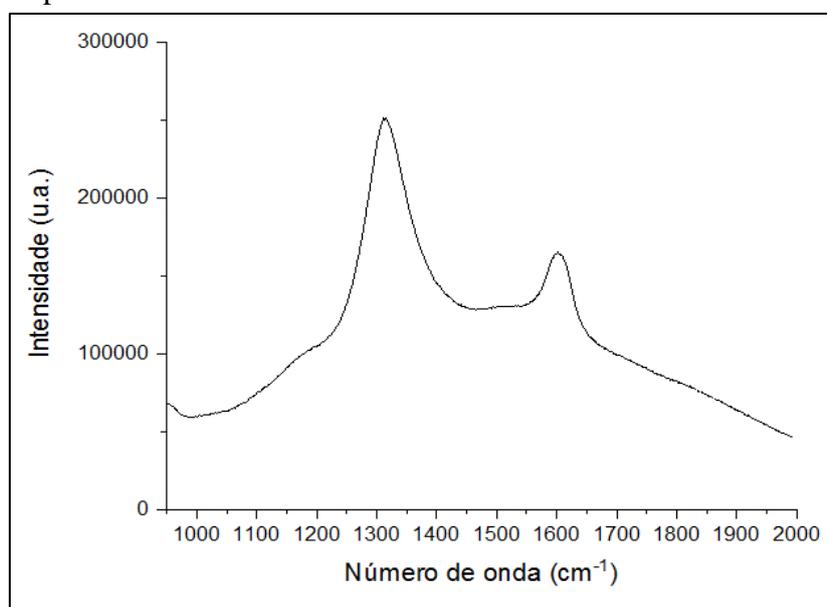
Tabela 19 – Tabela dos modos vibracionais da forsterite

MODO VIBACIONAL ESPERADO	
Desvio Raman (Deste trabalho)	Desvio Raman (Forsterita)
820 cm^{-1}	825 cm^{-1}
850 cm^{-1}	852 cm^{-1}

Fonte: Laboratoire de géologie de Lyon, 2018.

Além disso, outra área do espectro de Raman obtido do condrito carbonáceo Allende na Figura 52 foi analisada, sendo averiguada a região que compreende as frequências 1300 cm^{-1} e 1600 cm^{-1} . Essa região em especial, fornece o grau de evolução estrutural e grafitação através das chamadas bandas D (Desordem) e G (Grafite).

Figura 52 – Espectro das Bandas D e G do meteorito Allende obtido LNLS



Fonte: O Autor, 2018.

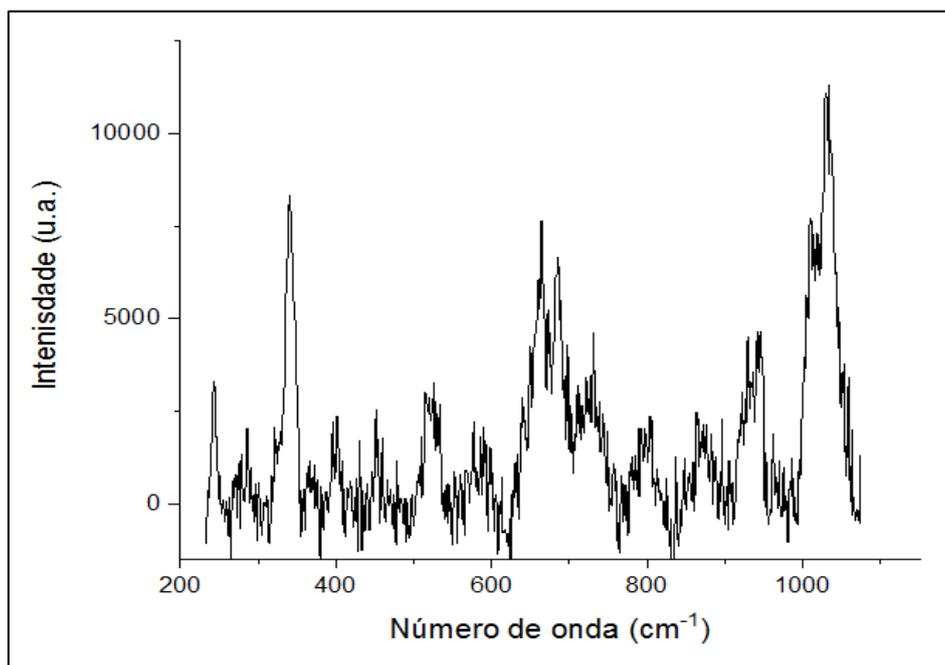
Fundamentalmente, a primeira banda de 1300 cm^{-1} nos dá a informação relacionada à desorganização do sistema cristalino de maneira que essa desordem é induzida em particular por defeitos no material. De forma geral, essa banda não se faz presente em espectros que o grafite esteja perfeitamente ordenado.

No segundo caso, a banda G é atribuída às informações sobre os modos vibracionais de planos aromáticos, que podem ser compostos por ligações covalentes de átomos de carbono em forma de anéis de grafeno, grafite, benzeno ou dependendo podem até incluir átomos de oxigênio e/ou nitrogênio. Basicamente, essa faixa é encontrada quando se analisa matéria orgânica, pois é possível detectá-la independente do grau de ordem estrutural da matéria.

4.2.6. Meteorito Murchison

O outro condrito carbonáceo analisado foi o meteorito Murchison. No Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) foi obtido espectros de Raman através da variação da posição pontual do feixe monocromático por regiões de interesse da amostra. Dessa forma, são apresentadas as frequências adquiridas de uma dezena de picos na Figura 53. Porém, apenas serão analisadas e comentadas as faixas que tiverem uma intensidade acima de 2000, indicada pelo eixo vertical ao lado, pois abaixo desse valor é possível que haja frequências que poderiam existir, mas sua contribuição é considerada tão baixa que poderíamos está contabilizando também contribuições de ruídos de fundo, inclusive em regiões em que talvez não exista material mineralógico. Desse modo, temos as faixas de 244 cm^{-1} , 341 cm^{-1} , 535 cm^{-1} , 665 cm^{-1} , 684 cm^{-1} , 731 cm^{-1} , 946 cm^{-1} , 1012 cm^{-1} e 1028 cm^{-1} analisadas como contribuintes para a formação do espectro.

Figura 53 – Espectro Raman da região 1 do meteorito Murchison obtido no LNLS



Fonte: O Autor, 2018.

Dessa forma, podemos averiguar através da metodologia de análise comparada entre as frequências dos picos detectados com modos vibracionais do banco de dados do Laboratoire de géologie de Lyon, foi possível notar semelhanças com dois minerais.

Primeiramente, destacamos com setas pretas no gráfico e agrupamos os picos nas faixas de frequências 244 cm^{-1} , 341 cm^{-1} , 535 cm^{-1} , 665 cm^{-1} , 684 cm^{-1} e 1012 cm^{-1} , as quais aparentam ter semelhanças com os modos vibracionais da ortoestatita [MgSiO_3]. Posteriormente, destacamos com setas vermelhas no gráfico e agrupamos os restantes das faixas de picos com as frequências de 731 cm^{-1} , 946 cm^{-1} , e 1028 cm^{-1} . Essas frequências

foram caracterizadas por apresentarem similaridades com os modos vibracionais da actinolita $[\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH,F})_2]$ na Tabela 20.

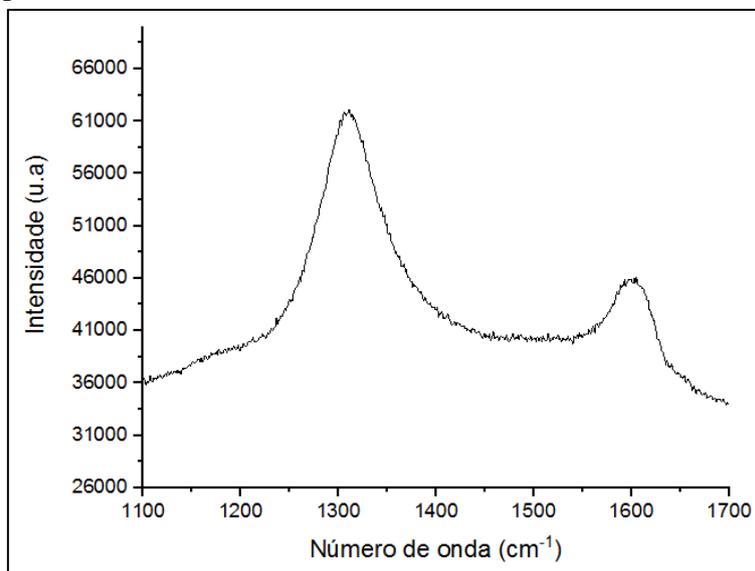
Tabela 20 – Imagem dos modos vibracionais da ortoestatita

MODO VIBACIONAL ESPERADO		
Desvio Raman (Deste trabalho)	Desvio Raman (Ortoestatita)	Desvio Raman (Actinolita)
244 cm^{-1}	239 cm^{-1}	-----
341 cm^{-1}	344 cm^{-1}	-----
535 cm^{-1}	542 cm^{-1}	-----
665 cm^{-1}	665 cm^{-1}	-----
684 cm^{-1}	687 cm^{-1}	-----
731 cm^{-1}	-----	731 cm^{-1}
946 cm^{-1}	940 cm^{-1}	946 cm^{-1}
1012 cm^{-1}	1012 cm^{-1}	-----
1028 cm^{-1}	-----	1028 cm^{-1}

Fonte: Laboratoire de géologie de Lyon, 2018.

Por fim, outra área do espectro de Raman no condrito carbonáceo Murchison analisada foi à região que compreende as frequências 1300 cm^{-1} e 1600 cm^{-1} . Fundamentalmente, tal como no outro condrito carbonáceo Allende, esta área foi averiguada para verificar o grau de evolução estrutural e grafitação através das chamadas bandas D (Desordem) e G (Grafite) que aparecem nessas faixas (Figura 54).

Figura 54 – Espectro das Bandas D e G do meteorito Murchison obtido no LNLS.



Fonte: O Autor, 2018.

Assim, a banda D de 1300 cm^{-1} nos gera informações sobre o comportamento do sistema cristalino e a sua organização entre as distâncias interplanares da matéria. Enquanto a banda G na faixa de 1600 cm^{-1} é atribuída aos modos vibracionais de anéis

aromáticos de grafeno, grafite e de benzeno que também podem incluir átomos de oxigênio e/ou nitrogênio.

4.3. Análise de meteoritos por μ CT

O ensaio por μ CT de raios X é completamente não destrutivo e não requer preparação de amostras. Fundamentalmente, o desenvolvimento dessa técnica neste trabalho possibilitou a averiguação de características mineralógicas da estrutura interna, porosidade e densidade dos materiais geológicos que, de outra forma, só poderiam ser determinadas através de técnicas destrutivas como a microscopia óptica e/ou eletrônica, as quais exigem a preparação de amostra a partir de uma secção ou bloco polido.

Assim, o resultado e os estudos de meteoritos foram realizados:

- ✓ Verificando a estrutura organizacional interna dos meteoritos, de forma a analisar materiais como côndrulos, brechas e/ou incrustações,
- ✓ Analisando a densidade dos constituintes que compõem os meteoritos e essas diferenças que existem de densidade entre esses constituintes presentes na amostra meteorítica,

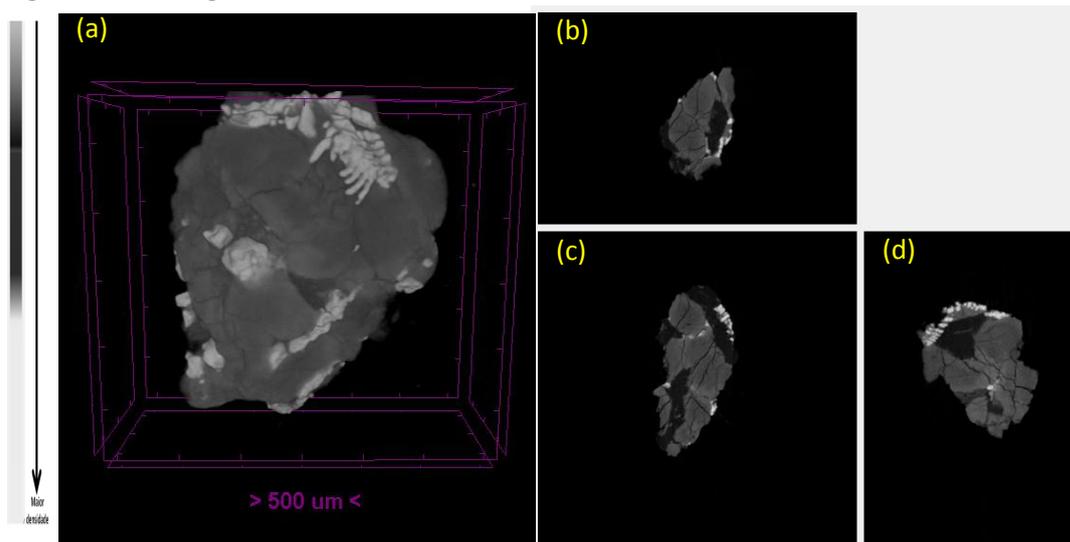
4.3.1. Meteorito marciano NWA 6963

Os resultados de μ CT obtidos do meteorito marciano NWA 6963 foram surpreendentemente favoráveis por se tratar de um acondrito e de extrema importância no desenvolvimento dessa pesquisa. Basicamente, foram geradas imagens de inclusões no meteorito de maneira bem detalhada, de maneira não destrutiva através do recurso de reconstrução de imagem.

A aquisição das imagens do shergottito foi obtida através dos seguintes parâmetros; 50 kV de tensão, 160 μ A, tamanho do pixel isotrópico de 5,70 μ m, passo angular de 0,4 graus, 1000 ms de tempo de exposição, utilizando um filtro de Alumínio (Al) de 1,0 mm de espessura e com um tempo de aquisição de 1h 35min.

As imagens geradas pela μ CT, nos possibilita realizar análises de cortes internos do material que são feitas através de centenas de seções transversais microtomográficas. Esse material não apenas nos permite visualizar na Figura 55 o material interno em 2D, como também tridimensional.

Figura 55 – Imagens das inclusões no meteorito marciano NWA 6963.

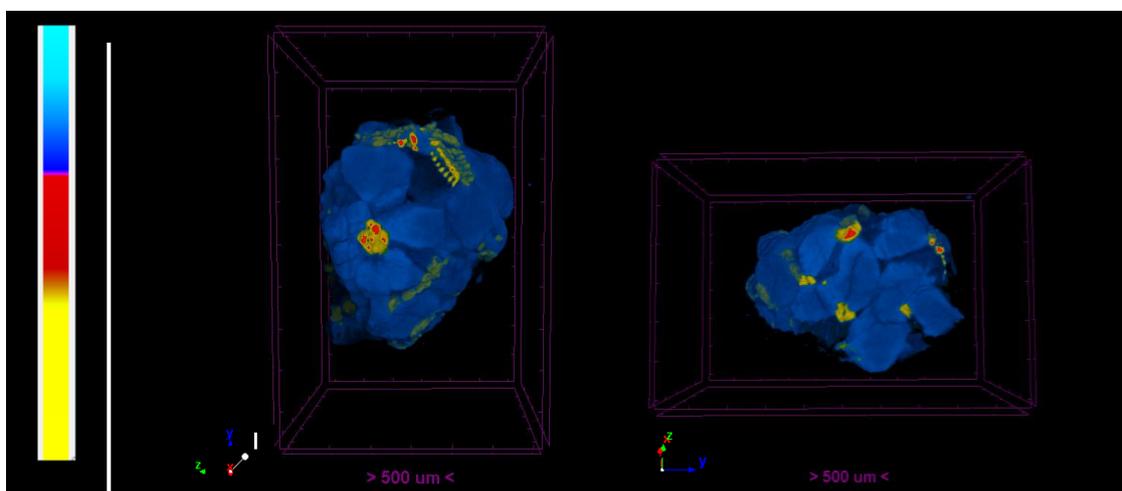


Legenda: (a) Imagem tridimensional reconstruída através do empilhamento de diversas imagens bidimensionais semelhantes as (b), (c) e (d) que foram geradas durante o processo.

Fonte: O Autor, 2018.

Além disso, a partir da μ CT foram desenvolvidas imagens adicionais relacionadas à densidade das inclusões e dos materiais que constituem a matriz do meteorito, de forma a auxiliar no esclarecimento de como esses elementos na Figura 56 estão incrustadas e como se relacionam com a estrutura do NWA 6963.

Figura 56 – Imagem de densidade obtida por μ CT.



Legenda: A imagem é um modelo em 3D gerado pelo método de reconstrução que ilustra a densidade dos materiais, em que a escala é crescente do azul para o amarelo.

Fonte: O Autor, 2018.

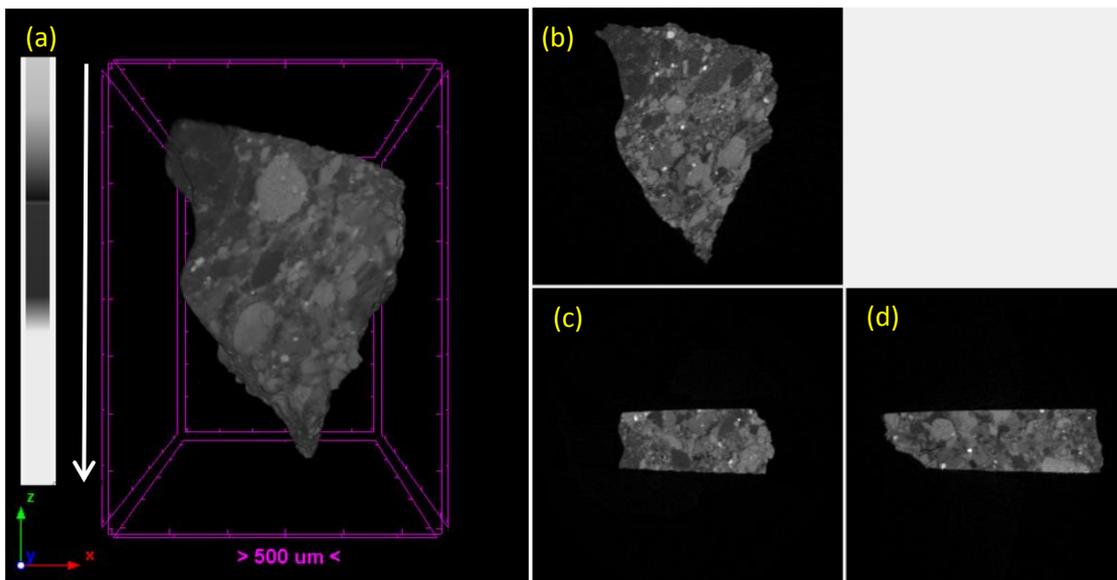
4.3.2. Meteorito lunar NWA 8277

Os resultados de μ CT gerados do meteorito Lunar NWA 8277 foram favoráveis e de extrema importância no desenvolvimento dessa pesquisa, pois forneceu imagens bem detalhada através do recurso de reconstrução de imagem.

A aquisição das imagens do meteorito lunar NWA 8277 foram obtidas através dos seguintes parâmetros; 50 kV de tensão, 160 μ A, tamanho do pixel isotrópico de 5,34 μ m, passo angular de 0,4 graus, 1000 ms de tempo de exposição, utilizando um filtro de Alumínio (Al) de 1,0 mm de espessura e com um tempo de aquisição de 57 min.

As imagens geradas pela μ CT, possibilita realizar análises de cortes internos do material que são feitas através de centenas de seções transversais microtomográficas. Esse material não apenas nos permite visualizar na Figura 57 o material interno em 2D, como também tridimensional.

Figura 57 – Geração de imagens por μ CT de material brechado no meteorito lunar NWA 8277.

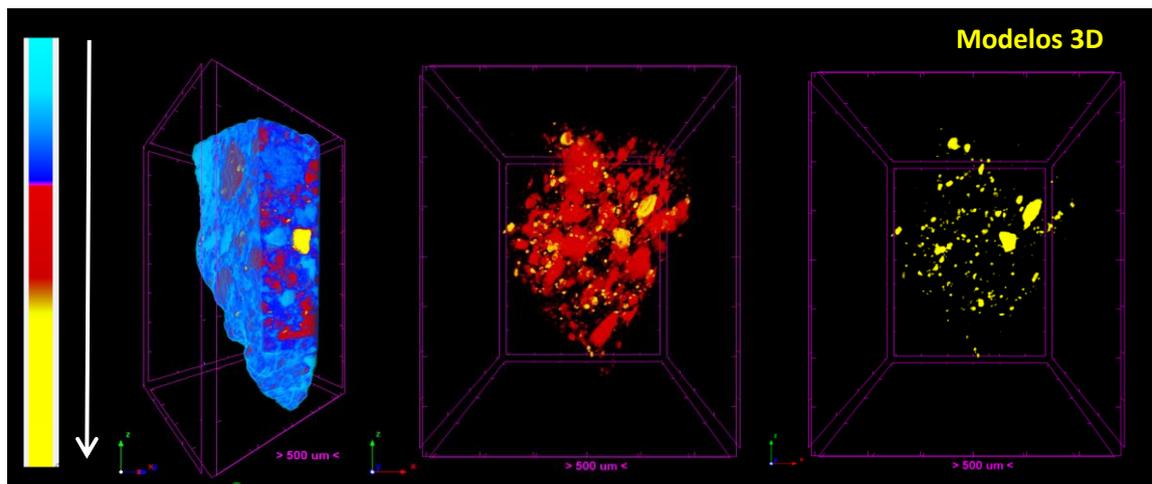


Legenda: (a) Imagem tridimensional reconstruída através do empilhamento de diversas imagens bidimensionais semelhantes as (b), (c) e (d) que foram geradas durante o processo.

Fonte: O Autor, 2018.

Além disso, a partir da μ CT foram desenvolvidas imagens adicionais relacionadas à densidade das inclusões e dos materiais que constituem a matriz do meteorito, de forma a auxiliar no esclarecimento de como esses elementos na Figura 58 estão amalgamados e como se relacionam com a estrutura do NWA 8277.

Figura 58 – Composição de imagens de densidade feita por μ CT do meteorito lunar NWA 8277.



Legenda: A imagem é um modelo em 3D gerado pelo método de reconstrução que ilustra a densidade dos materiais, em que a escala é crescente do azul para o amarelo.

Fonte: O Autor, 2018.

5. DISCUSSÃO

As análises dos resultados foram baseadas em espectros de minerais puros disponibilizados em banco de dados nos sites de universidades, laboratórios e também de publicações de artigos científicos relacionados à análise, caracterização de meteoritos e catalogações de minerais. Basicamente, o norteamento desta nossa metodologia feita a partir da comparação de resultados com os existentes na literatura está relacionado a uma estratégia de tentar entender como esses minerais podem gerar informações importantes para a Astrobiologia, inclusive por meio do conhecimento já existente acerca dos minerais que formam e preservam a vida aqui em nosso planeta.

Assim, em nossa discussão, nos aprofundaremos nas implicações que esses resultados obtidos podem ter para o estudo da vida no sistema solar e a relevância que essas análises podem ter para a Astrobiologia.

5.1 Meteoritos Marcianos

Marte é um planeta rochoso muito parecido com a Terra. Desta forma, se pudermos entender como sua evolução planetária ocorreu, através de análises comparativas, podemos realizar generalizações de processos físicos na formação entre os planetas e também obter possíveis pistas de como poderia ser a história inicial do nosso planeta e também a do planeta vermelho.

Embora a maioria dos registros geológicos tenham sido destruídos, assim como aconteceu na Terra, a evolução geológica da superfície marciana, suas informações físicas e características químicas ainda podem ser estudadas através dos meteoritos marcianos (NIMMO; TANAKA, 2004). Atualmente, reconhecemos mais de 100 meteoritos marcianos e estão relacionados na forma de basaltos, rochas máficas e ígneas intrusivas ultramáficas (MCCUBBIN; JONES, 2015). Desse modo, podemos ver os meteoritos marcianos como excelentes artefatos astrofísicos de estudo que nos ajudam a desvendar a história geológica de Marte, de maneira a entender o presente e o passado do planeta vermelho.

Fundamentalmente, a partir desses materiais ejetados da superfície marciana, é possível, através de técnicas analíticas, investigar informações químicas, físicas e geológicas, que podem ajudar, por exemplo, a definir requisitos para missões em Marte (GLADMAN, 1997; 1996) em busca de se entender a origem e idade da crosta marciana (HUMAYUN, 2013; SOLOMON *et al*, 2005; NYQUIST *et al*, 2001) e também de estudos relacionados ao interior do planeta (FEY & BERTKA 2005). Além disso, os meteoritos marcianos podem nos fornecer informações sobre a possibilidade de saber se no presente ou no passado recente de Marte existiram condições de habitabilidade, em que a vida poderia ter se estabelecido. É possível, através das análises da composição de elementos químicos voláteis em meteoritos marcianos, averiguar se já houve presença de água em Marte, e também pesquisas relacionadas à busca de fósseis, bactérias ou traços de compostos orgânicos em meteoritos marcianos (MCKAY *et al*, 1996; GIBSON *et al*, 2001; HORNECK *et al*, 2002; MILEIKOWSKY 2000)

Marte tem sido o ponto focal para a busca pela vida extraterrestre da humanidade e é o lugar mais próximo em nosso Sistema Solar em que podemos averiguar essa possibilidade. Encontrar ambientes habitáveis que possam ter abrigado vida em Marte em algum momento, seja no presente ou passado, tornou-se um importante objetivo científico (MCCUBBIN; JONES, 2015). Desse modo, procurar esses tipos de informações nos meteoritos marcianos trazem grandes implicações para o estudo da vida no sistema solar e para desenvolvimento de estudos na Astrobiologia. Assim, é de extrema relevância buscar maneiras de se obter esses resultados de forma que essas informações não sejam destruídas ou comprometidas durante as análises desses materiais extraterrestres raros. Por fim, destaca-se a forma que foi desenvolvida a busca por resultados neste trabalho, baseado em técnicas analíticas não destrutivas tais como XRF, Raman, Micro-CT e que, norteadas com esses objetivos, possuem a finalidade de contribuir no entendimento e compreensão da geologia marciana.

5.1.1 Meteorito Zagami

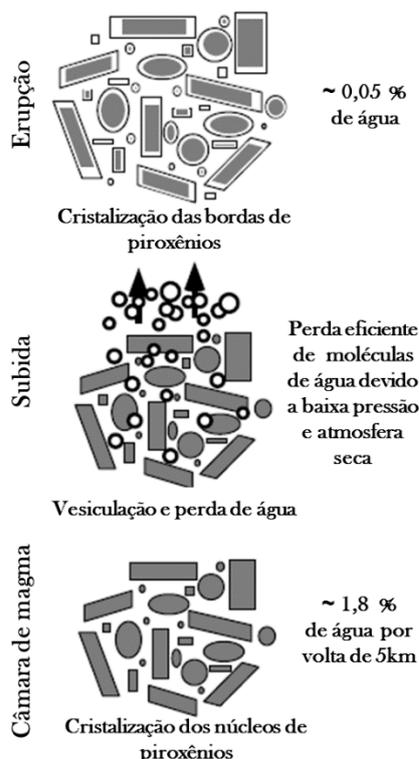
Através da varredura automatizada feita por meio da técnica de XRF, foi possível observar a composição química elementar do meteorito Zagami de forma a serem detectados os seguintes elementos: Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Fósforo (P), Enxofre (S), Cloro (Cl), Potássio (K), Cálcio (Ca), Titânio (Ti), Vanádio (V), Cromo (Cr), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Estrôncio (Sr), Ítrio (Y) e Zircônio (Zr). A análise e averiguação mineralógica foi realizada pela micro Raman, que detectou os minerais de diopsídio [$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$], de augita [$\text{Mg}(\text{Ca,Fe,Al,Ti})\text{Si}_2\text{O}_6$] e a magnetita [Fe_3O_4] ou [Fe_2O_4].

A detecção de diopsídio, de augita e da magnetita, nos mostra que existe um bom grau de concordância com os dados obtidos entre a técnica de micro Raman e a μXRF . Os elementos Mg, Al, Si, Ca, Ti, e Fe detectados por meio da fluorescência de raios X também foram observados em minerais detectados pela técnica de Raman.

Entre os estudos e interesses relacionados às pesquisas com o planeta vermelho, a possibilidade de existência de água no presente ou no passado de Marte pode estar ou ter alguma relação com os minerais detectados no meteorito marciano Zagami, de forma a auxiliar a Astrobiologia nesse entendimento. Basicamente, a busca por possíveis evidências de água em fluxos hidrotermais poderia se dar a partir de estudos geoquímicos em piroxênios nos meteoritos marcianos.

Segundo McSween Jr (2001), a augita teria sido um dos primeiros minerais cristalizados formados. Basicamente, os núcleos de magnésio homogêneos desses grãos poderiam ter sido originados bem abaixo da superfície marciana em locais de grandes profundidades e teriam sido arrastados devido ao material intrusivo do magma ascendente ilustrado na Figura 59.

Figura 59 – Ilustração esquemática do processo de cristalização do piroxênio



Fonte: MCSWEEN JR, 2001. Modificada pelo autor.

Embora o teor de água magmática nas análises químicas em meteoritos marcianos ígneos seja relativamente baixo, é possível que quantidades significativas de água sejam fornecidas para a superfície marciana por vazamento vulcânico e intrusões (MCSWEEN JR, 2001). Desse modo, as observações da morfologia da superfície marciana têm sido usadas para argumentar que um antigo oceano já existiu em Marte e possíveis evidências geoquímicas de água no interior de Marte poderiam ser recolhidas a partir de análises de piroxênios, tais como a augita.

Ainda de acordo com McSween Jr (2001), os núcleos internos dos minerais de piroxênio pertencentes aos meteoritos shergottitos, que foram ejetados há cerca de 175 milhões de anos atrás de Marte, são mais enriquecidos em comparação às suas bordas exteriores de piroxênio cristalizado. Fundamentalmente, isso pode trazer implicações de extrema relevância para a Astrobiologia, pois a água estaria assim presente em piroxênios, tais como a augita alocada em regiões profundas abaixo da superfície marciana.

Outro tema de grande interesse vinculado às pesquisas com meteoritos marcianos é a possibilidade de eles poderem fornecer informações se no presente ou no passado existiram condições em que a vida poderia ter se estabelecido em Marte. Entre os estudos e pesquisas que busca auxiliar a Astrobiologia, destacam-se as áreas de mineralogia, em

que são analisados cristais de magnetita, dentre outros, de bioquímica e de microbiologia, relacionadas a averiguar traços de compostos orgânicos em meteoritos marcianos.

Em 1996, foi apresentada uma hipótese sinótica por Mckay *et al.* (1996), a qual relatava que certas características, como por exemplo, os nanocristais de magnetita (Fe_3O_4) observados no meteorito marciano ALH84001, seriam propriedades particulares de reações biogênicas marcianas consistentes com a "vida como a conhecemos". De acordo com Thomas-Keprta *et al.* (2009), o meteorito marciano ALH84001 preserva esses registros e informações de 3,9 bilhões de anos atrás e que coincidiria com o início da época do Nochiano, em Marte, quando teriam sido formadas algumas das mais antigas superfícies marcianas.

Em nossos resultados foi possível detectar a magnetita como um dos minerais presentes na estrutura do meteorito Zagami. Este tipo de mineral, desde a veiculação da hipótese apresentada por Mckay em 1996, é fonte de debates consideráveis, principalmente, ao que cerne os possíveis processos de origem e formação da magnetita marciana.

Thomas-Keprta *et al.* (2009) apresenta uma perspectiva de que a magnetita e os carbonatos podem não estarem relacionados necessariamente a uma origem em comum. Basicamente, as magnetitas poderiam estar presentes em fluidos aquosos e posteriormente teriam sido exsolvidas nos carbonatos que se encontravam nessas regiões aquosas. No entanto, também existe um processo em que podem estar relacionadas com os carbonatos, de forma a serem um produto da decomposição térmica parcial desse material.

Apesar de a magnetita ter sido detectada em nossas análises através da técnica de μRaman no LNLS, não houve a detecção de nenhum carbonato na estrutura composicional no meteorito Zagami durante nossa análise. Porém, os meteoritos SNC possuem inclusões de magnetita e uma boa parte deles pode ser associada com regiões que possuem piroxênio presente na matriz dos meteoritos marcianos (THOMAS-KEPRTA *et al.*, 2009; AGERKIVIST, 1994). Desse modo, a falta de carbonato em nossos resultados em regiões em que foi detectada a magnetita talvez não seja necessária, de maneira que a magnetita no Zagami poderia então ter relação com a augita [$\text{MgFeSi}_2\text{O}_6$], que é um piroxênio.

Assim, através dos nossos resultados, a magnetita parece poder não ter a necessidade de ser formada juntamente com carbonatos, tal como menciona Thomas-Keprta *et al.* (2009). Todavia, isso por si só não viabiliza a hipótese de origem biogênica, pois segundo Agerkivist (1994) a magnetita pode se formar em regiões que possuam piroxênio e no meteorito Zagami, a sua formação poderia estar ligada a presença da augita. Além disso, a magnetita pode ser formada de maneira inorgânica e abiótica a partir de piroxênios ricos em ferro através de metamorfismo térmico e em eventuais choques de impactos. Esses eventos aumentariam a temperatura quase instantaneamente para 500 – 700 K, de maneira a decompor e exsolver a magnetita em outros minerais (TREIMAN, 2003).

5.1.2 Meteorito NWA 6963

O desenvolvimento da análise dos elementos e compostos químicos do NWA 6963 foi realizada através das técnicas de μ XRF e μ -Raman, com o intuito de obter informações que pudessem se complementar e gerar dados sobre a formação estrutural química e mineralógica presente no meteorito lunar. Através da varredura automatizada feita por meio da técnica de XRF foram detectados os elementos Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Fósforo (P), Enxofre (S), Cloro (Cl), Potássio (K), Cálcio (Ca), Titânio (Ti), Vanádio (V), Cromo (Cr), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Gálio (Ga), Rubídio (Rb), Estrôncio (Sr), Ítrio (Y) e Zircônio (Zr). Por meio de análises pontuais de micro Raman foram detectados os minerais de diopsídio [$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$], augita [$\text{Mg}(\text{Ca,Fe,Al,Ti})\text{Si}_2\text{O}_6$], orthopyroxene $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$, clinopyroxene $(\text{Ca,Mg,Fe})\text{SiO}_3$, geikielita [MgTiO_3], tremolita $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$, calcita CaCO_3 e a apatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH,F,Cl})$].

Embora alguns elementos encontrados na μ XRF não tenham sido detectados em minerais pela técnica de Raman, não existe conflito entre seus resultados. Primeiramente, é possível observar uma relação entre os resultados obtidos pela técnica de μ XRF e a técnica de Raman, quando observamos que em ambas foram detectados os elementos Mg, Al, Si, P, Cl, Ca, Ti, e Fe. Possivelmente, as escolhas específicas das regiões para as tomadas de medidas pode ter ocasionado a detecção de apenas essas estruturas químicas.

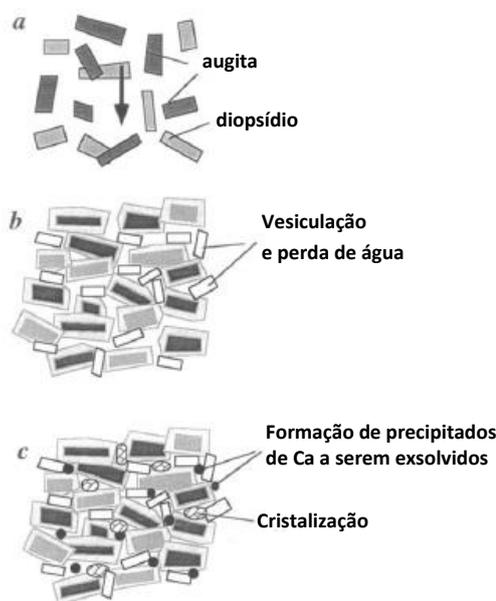
As informações obtidas através dos resultados do meteorito NWA 6963 foram bastante interessante e podem trazer implicações relevantes para o desenvolvimento de estudos relativos ao planeta vermelho. É possível, por exemplo, por meio dessas análises da composição dos elementos químicos obtidos e da mineralogia averiguar indícios de presença de água em Marte, de maneira a termos em vista condições de viabilidade de Marte ter possuído no passado condições de habitabilidade, em que a vida poderia ter se estabelecido e assim auxiliar a definir requisitos para missões ao planeta.

O clinopiroxênio [$(\text{Ca,Mg,Fe})\text{SiO}_3$] detectado pela técnica de Raman, de um modo geral, pode ser subdividido em dois grupos estruturais. Um grupo envolvendo diopsídio, hedenberguita e augitas, com teor de CaSiO_3 maior que 25% e que possui todos os componentes do grupo estruturalmente semelhantes ao diopsídio. As composições dos membros do outro grupo possuem um teor máximo de CaSiO_3 de 15% e mais de 30% da molécula FeSiO_3 .

Dentre os clinopiroxênios, foi possível observar em destaque o diopsídio [$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$] e a augita [$\text{Mg}(\text{Ca,Fe,Al,Ti})\text{Si}_2\text{O}_6$]. Basicamente, a augita pode estar vinculada a possíveis evidências de água em fluxos hidrotermais. Segundo McSween Jr (2001), a augita quando encontrado em rochas ígneas poderia ser um dos primeiros minerais cristalizados a se formar. Os núcleos de magnésio homogêneos desses grãos poderiam se originar, por exemplo, bem abaixo da superfície marciana em locais de grandes profundidades e seriam arrastados juntamente com ortopiroxênios ascendentemente devido à intrusão. Os ortopiroxênios [$(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$], também detectado

em nossas análises, podem conter pequenas quantidades de Ca, Al, Ti, Ni, Cr, Fe³⁺ e Mn, sendo que a presença do Ca leva a exsolução, especialmente nos cristais de origem magmática (Figura 60).

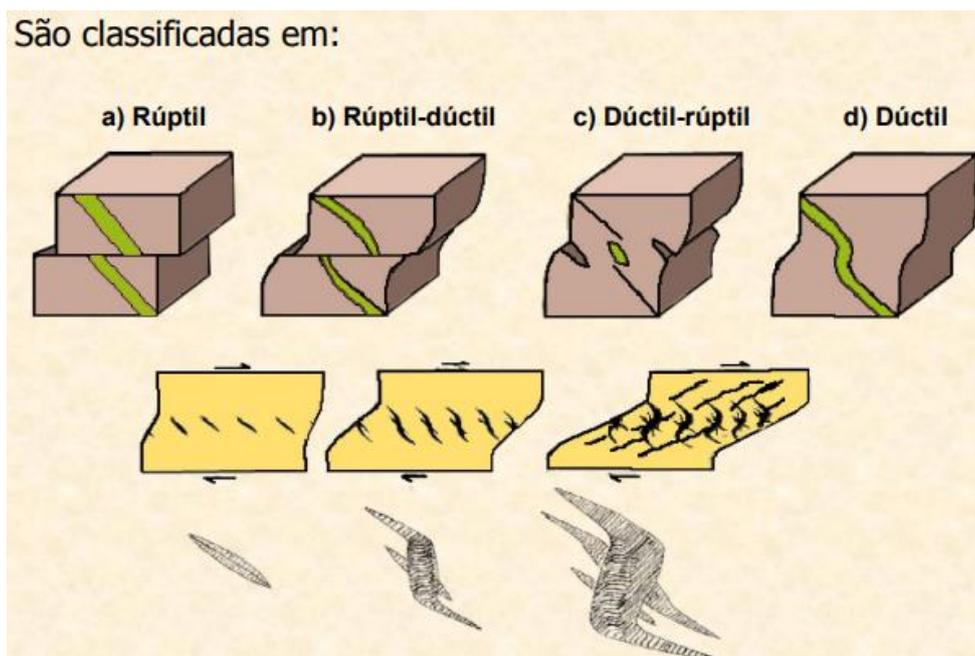
Figura 60 – Ilustração esquemática do processo de cristalização e formação de precipitados



Fonte: MCSWEEN JR, 2001. Modificada pelo autor.

Em relação aos diopsídios, por vezes, são encontrados em zonas de cisalhamento (DIMANOV; DRESEN, 2005). Segundo Ramsay e Huber (1987), as zonas de cisalhamento são definidas como zonas planares a curvilíneas que concentram elevada deformação ao longo de um grande transecto, com uma largura relativamente mais curta. De um modo geral, a deformação nas rochas não ocorre de maneira homogênea, e a concentração dessa deformação em zonas planas, as quais acomodam esses movimentos rígidos ilustrados na Figura 91, geralmente levam ao desenvolvimento e associações de minerais muito característicos, que refletem as condições Pressão-Temperatura, o tipo de fluxo, a direção de movimento e a história de deformação daquela zona (PASSCHIER; TROUW, 2005)

Figura 61 – Ilustração esquemática da diferentes falhas ou zonas de cisalhamento.



Fonte: RAMSAY; HUBER, 1987.

Desse modo, o processo de formação do diopsídio pode contribuir no entendimento histórico de diversos fenômenos no planeta vermelho. Basicamente, essas rochas de metamorfismo dinâmico apresentam a formação de cataclasito, comumente relacionado com uma menor ou maior pressão de H₂O e com as condições termodinâmicas no momento da tensão. Além disso, nessas regiões são desenvolvidos componentes minerais muito característicos como clorita e actinolita.

A actinolita ou tremolita [Ca₂Mg₅Si₈O₂₂(OH)₂] foi outro mineral detectado por meio da técnica de Raman no meteorito marciano NWA 6963 é composto por hidróxido de silicato de cálcio, magnésio e ferro, do grupo da anfíbola. Esse mineral pode contribuir astrobiologicamente em um dos problemas clássicos da ciência planetária, que está relacionado ao mecanismo de retenção de água durante a formação planetária (GREENBERG, 2012). Em 1952, Harold Clayton Urey (1893-1981) sugeriu que os silicatos hidratados poderiam ser os responsáveis pela retenção de água nos planetas terrestres.

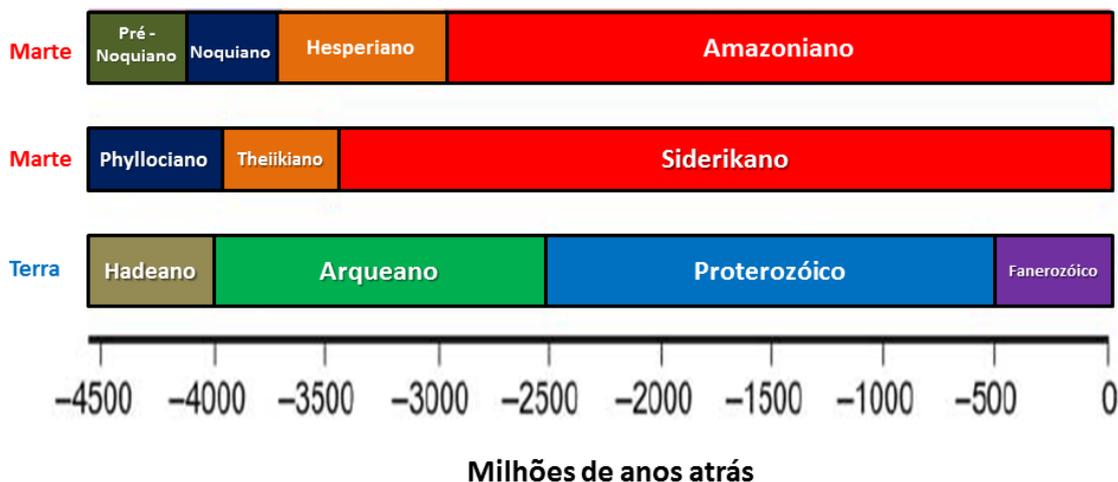
A presença de oceanos na Terra, mas não em Vênus, ilustra bem esse cenário emblemático. Desse modo, em 1953, apesar da falta de dados termodinâmicos precisos que o impediram de calcular os campos de estabilidade de silicatos hidratados em gás solar, Urey conseguiu calcular as condições em que a água poderia se manter de maneira estável (GREENBERG, 2012).

A formação da actinolita geralmente ocorre a temperaturas superiores a 300 K e sendo mais estáveis entre 460-500 K e à medida que a temperatura passa a diminuir, os primeiros minerais hidratados a serem formados são fases relativamente pobres em água, como actinolita e posteriormente a apatita (KELLER; BUSECK, 1991; GREENBERG,

2012). É relevante ressaltar que a apatita também foi detectada durante as nossas análises de micro Raman.

Dessa forma, a relação da origem da água em Marte, poderia ter vínculos com a Actinolita e com silicatos hidratados formados no início do período Noquiano da era geológica marciana Figura 62.

Figura 62 – Ilustração esquemática da Escala comparativa dos tempos geológicos Marte x Terra



Fonte: COCKELL, 2015. Modificada pelo autor.

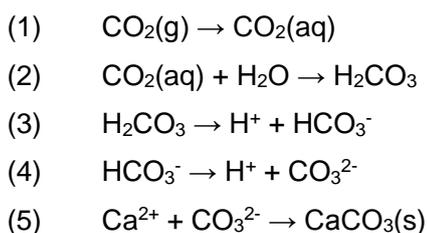
Dentro da escala de tempo geológico de Marte, o Pré-Noquiano (antes de 4.1Ga) é uma época em que há evidências associadas à formação de argilas em ambientes ricos em água líquida. Esses processos ambientais relacionados à formação e ao desenvolvimento das rochas de silicato deram origem a uma “segunda escala geológica”, a qual se baseia nas mudanças na geoquímica em escala planetária (COCKELL, 2015).

Basicamente, ela adota como divisor de linha temporal geológico para Marte a evolução geológica do planeta. Desse modo, o eon Phyllociano seria a época em que teriam se originado os primeiros solos argilosos (*phyllosilicate*) na superfície marciana. Posteriormente, rochas de silicato mais rígidas se consolidaram e ambientes com grande acidez, dominado por enxofre (S), passaram ser predominantes no planeta vermelho de forma a caracterizar esta época como eon Theiikiano. Por fim, o mundo moderno marciano e deserto em escala global, como nós vemos atualmente, é denominado como eon Siderikano (COCKELL, 2015).

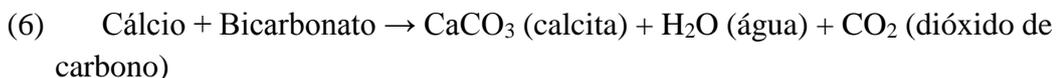
Neste panorama, a actinolita poderia ser oriunda de metamorfismo de sedimentos ricos em calcita, sobretudo em regiões que se encontram as auréolas de contato que cercam as rochas ígneas intrusivas. Além disso, esse mineral também ocorre como um

produto do metamorfismo de rochas calcárias ricas em magnésio tais como a dolomita e o quartzo.

A Calcita é um carbonato de cálcio, composto estruturalmente por CaCO_3 . Este mineral foi detectado em meio nossas análises no meteorito marciano NWA 6963, e em nosso planeta é comumente visto como o principal componente de rochas conhecidas como calcárias, carbonatadas ou carbonáticas. Basicamente, essas rochas carbonáticas são formadas pela diagênese de sedimentos ricos em carbonato de cálcio, sedimentos estes que foram depositados, essencialmente, através da precipitação química ou bioquímica em solução aquosa. Esse processo de reações químicas é ilustrado a seguir:

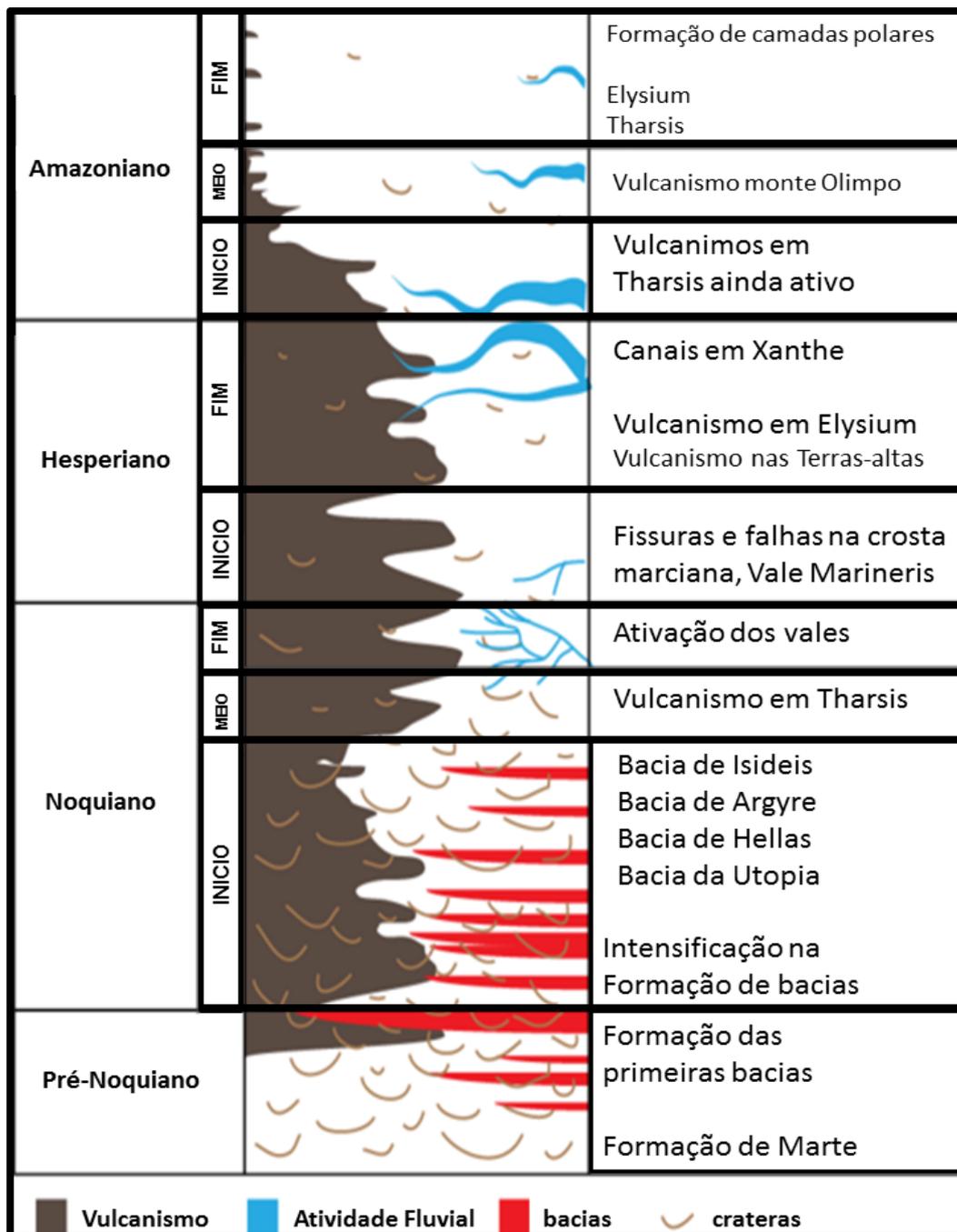


De modo geral, as rochas carbonatadas possui uma grande diversidade de bioclastos. No caso do calcário em ambientes marinhos, a calcita pode se formar através da deposição de material calcário com origem biológica como conchas, exoqueletos e por desintegração ou acumulação de organismos inferiores como algas, cianobactérias e foraminíferos. Além disso, é possível encontrar a calcita em rochas carbonatadas, principalmente em meio marinho e no subsolo (cavernas) de origem quimiogênica, a partir de sedimentos químicos através dos processos da seguinte reação:



É possível a partir desse panorama de formação da calcita, notar a relevância que a detecção deste mineral possui e as fortes implicações que os carbonatos podem ter em relação com a temática da Astrobiologia, pois além da necessidade de um lugar aquoso para a formação da calcita, ela pode ter sua composição estrutural baseada em bioclastos. Segundo, Thomas-Keprta *et al.* (2009) também foram encontrados glóbulos de minerais de carbonato no meteorito marciano ALH 84001, se inferiu terem sido formados em Marte na presença de fluídos aquosos a temperaturas consistentes com a "vida tal como a conhecemos". Fundamentalmente, esses discos de carbonato pertencentes ao ALH 84001 teriam sido precipitados a 3.9 Ga atrás, ou seja, no início da época de Nochiana, em Marte. Nessa época teriam sido formadas as mais antigas superfícies marcianas existentes. Basicamente, como na Terra, a história de Marte pode ser dividida em tempos geológicos distintos. Esses tempos ou eons refletem amplamente mudanças e eventos ambientais em grande escala que ocorreram em Marte e que são ilustradas a partir da Figura 63.

Figura 63 – Ilustração esquemática do tempo geológicos de Marte, contendo processos de vulcanismo, atividade fluvial, a formação de bacias e crateras.



Fonte: LAKDAWALLA, 2013. Modificada pelo autor.

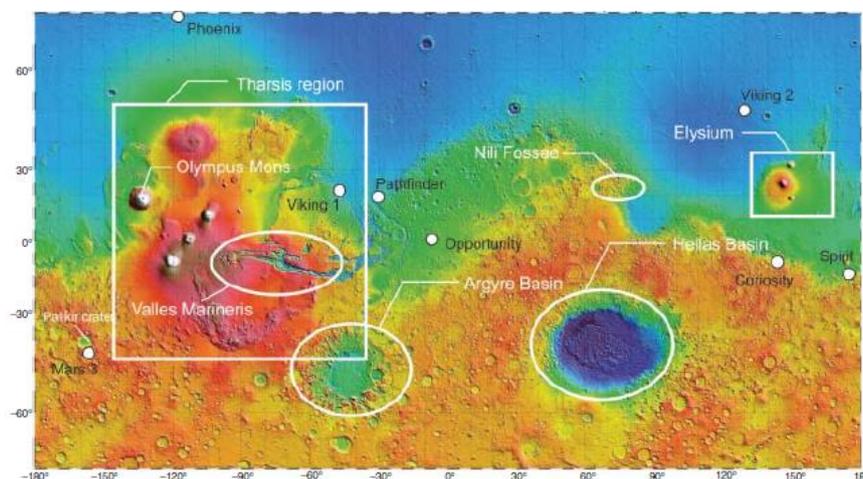
É possível abordar como o início dos eons marcianos a partir da época chamada de Pré-noquiana que teria ocorrido desde o período em que Marte se formou a 4.5 bilhões de anos até 4.1 bilhões de anos ou G.a. atrás. Esse momento, em Marte, é um tempo associado à formação de solos argilosos em ambientes ricos em água, com uma possível formação de calcita e rochas calcárias nessas regiões. Posteriormente, o eon Noquiano que decorreu durante o período de 4.1 – 3.7 G.a. atrás seria a época em que a água começaria a se dissipar e a congelar. Significativamente, o eon Noquiano de Marte se

sobrepõe historicamente com o Arqueano da Terra, que é a época em que aparecem os primeiros registros de organismos vivos em nosso planeta. Após esse eon marciano, a baixa abundância de água misturada com gases de enxofre levou o planeta vermelho a uma era denominada Heperiana (3,7-3,0 Ga) caracterizada por condições ambientais de grande acidez, a formação de sais de sulfato e sulfatos de ferro (FeS). Outros fenômenos ambientais importantes desta época foram as grandes quantidades de vulcanismo, com atividade em Tharsis e Elysium (COCKELL, 2015).

O último eon marciano, denominado Amazôniano (3.0 Ga até o presente), é marcado pela época em que Marte começa a se transformar em um mundo devastado e desolado, por conta de a água do planeta se encontrar congelada ou evaporada. Além disso, teria sido no início dessa época que o vulcanismo também teria declinado. Fundamentalmente, esta condição passou a dominar sua superfície marciana por três bilhões de anos, de forma a modelar o mundo desértico marciano com o qual todos nós estamos familiarizados (COCKELL, 2015).

Quando observamos Marte de uma maneira global e em grande escala, é possível constatar que é um planeta bastante diferente geologicamente. O hemisfério sul do planeta vermelho possui um terreno cheio de crateras antigas e o hemisfério norte é um terreno plano, aparentemente mais recente, devido a possuir menos crateras de impactados e por estar em menor elevação Figura 64. Esta geologia diferenciada é chamada de dicotomia crustal e as suas origens não são bem conhecidas.

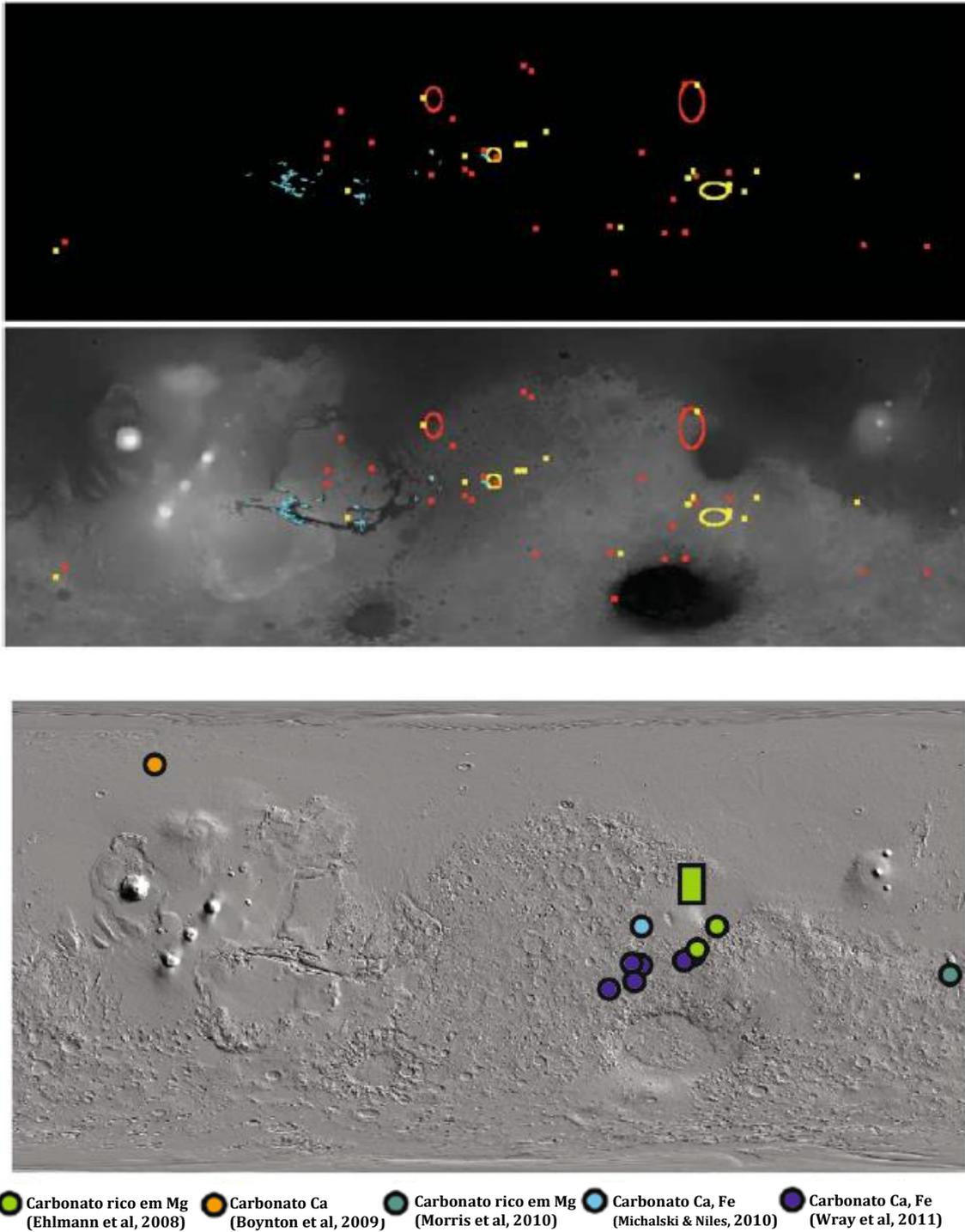
Figura 64 – Imagem da topografia obtida pela Mars orbiter Laser altimeter. Zonas azuis são lugares mais jovens e Zonas vermelhas as mais antigas.



Fonte: COCKELL, 2015.

De acordo com Gooding et al. (1988), a calcita e os primeiros carbonatos foram detectados em meteoritos SNC apenas no fim da década de 80. Todavia, essa descoberta serviu como base de motivacional para procurar e se identificar através da espectroscopia rochas calcárias ou carbonato de cálcio e calcita em Marte (Figura 65).

Figura 65 – Mapas de identificação das regiões em que foram detectados carbonatos em Marte.



Fonte: COCKELL, 2015.

Em nossos resultados, tal como já foi relatado anteriormente, a apatita $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})]$ foi um dos minerais detectados. A apatita é um mineral do grupo dos fosfatos, com as seguintes variantes: hidroxiapatita, fluorapatita, e clorapatita. Basicamente, essas nomenclaturas é devido as altas concentrações de íons Hidróxido (OH^-) relacionada a hidroxiapatita, ao Fluoreto (F^-) para a fluorapatita, e ao Cloreto (Cl^-) da cloroapatita. Na Terra a apatita ocorre em uma ampla gama de configurações geológicas como em rochas ígneas e metamórficas, ricas em carbonatos e em sistemas biológicos.

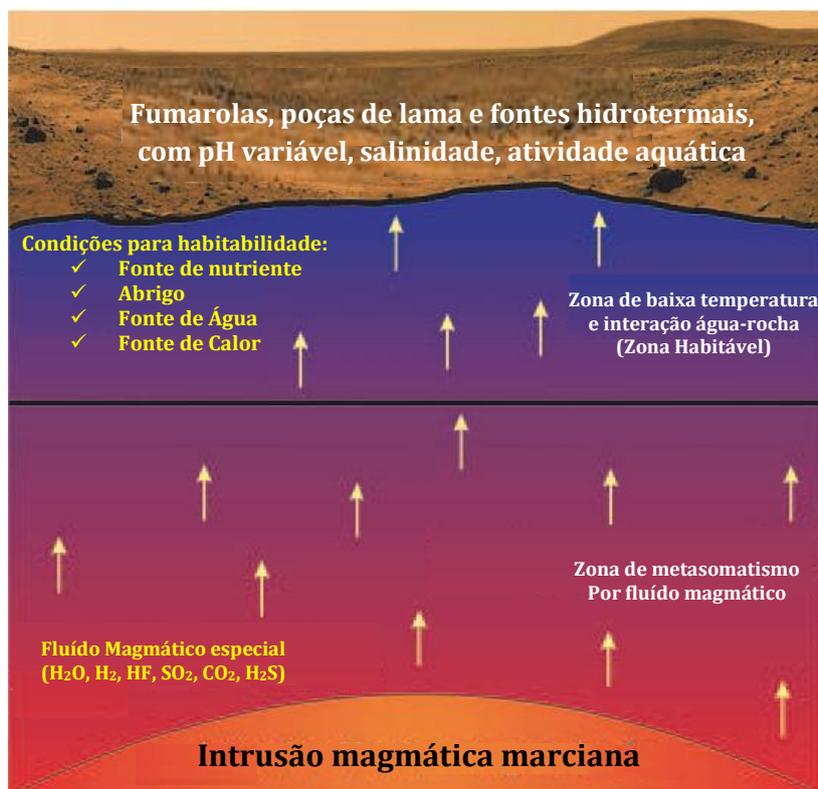
A apatita é visto como um dos parâmetros essenciais para a busca de H_2O em nosso Sistema Solar, devido a ser o único mineral volátil que consegue se difundir extensamente entre amostras de materiais extraterrestres, de maneira a conseguir reter voláteis durante eventos térmicos ou de choque de impacto. Além disso, devido à diversidade de composição da apatita, é possível monitorar conteúdos voláteis em derretimentos de silicatos e fluídos hidrotermais (MCCUBBIN; JONES, 2015).

Na astrobiologia, a composição química da apatita pode ser utilizada como uma ferramenta para explorar diversos tópicos, tais como as composições e os papéis dos primeiros fluidos do sistema solar nos asteroides e as abundâncias voláteis dos corpos planetários. Além disso, a apatita extraterrestre possui um papel fundamental na busca por possíveis vestígios de vida em outros lugares do nosso Sistema Solar, pois está profundamente entrelaçada com a possibilidade de se encontrar um dos ingredientes da vida, a água. Desse modo, a apatita extraterrestre já foi utilizada para tentar quantificar a quantidade de água (H_2O) em vários corpos celestes, como a Lua e o planeta Marte (GROSS *et al.*, 2013; TARTÈSE *et al.*, 2013).

Embora a vida em Marte ainda não tenha sido comprovada, os estudos da apatita em meteoritos marcianos sugerem a presença de ambientes habitáveis em Marte e, portanto, a necessidade contínua de explorar o planeta vermelho (MCCUBBIN & JONES, 2015). Dentro desse cenário, estudos recentes relacionados à apatita marciana, indicaram uma visão do interior marciano que poderia ter sido favorável à formação de ambientes habitáveis na superfície marciana e perto da sub-superfície. Basicamente, a atividade magmática em Marte poderia ter sido intimamente associada à atividade hidrotermal e à entrada de H_2O em uma possível biosfera (MCCUBBIN; JONES, 2015).

Segundo McCubbin e Jones (2015), vários tipos de meteoritos marcianos (nakhlites, chassignites e brecha basáltica) foram alterados através de processos secundários na crosta marciana, resultando em formação de fases secundárias, como carbonatos de cálcio, silicatos hidratados e minerais de argila. Os estudos de apatita desses meteoritos enfatizam a importância dos fluídos hidrotermais e aquosos na superfície e perto da sub-superfície de Marte. Na Figura 66 temos uma imagem tirada pelo Mars Exploration Rover Spirit da região de Home Plate, que é relatado como um sítio passado em que houve atividade fumarólica na superfície marciana.

Figura 66– Esquema um ambiente habitável que poderia se formar devido a processos hidrotermais associados à atividade magmática intrusiva.



Fonte: MCCUBBIN & JONES, 2015. Modificada pelo autor.

É possível observar a partir dessa ilustração esquemática, que as regiões adjacentes às intrusões magmáticas fornecem quatro dos principais requisitos para um ambiente habitável:

- (1) uma fonte de energia / nutriente através da química ativa Fe- e S-redox
- (2) Abrigo para frio e para dessecação com maior proteção em relação à superfície,
- (3) Uma fonte de água sob a forma de um fluido hidrotermal condensado,
- (4) Uma fonte de calor, fornecida pela intrusão e transferida para a “zona habitável”, que transfere essa energia de forma condutora através da rocha e pelo transporte de massa do fluido hidrotérmico.

Através de muitas observações de missões de órbita de telescópios, há evidências substanciais para argumentar que essa água no estado líquido em algum momento conseguiu atravessar a superfície marciana. Segundo McCubbin e Jones (2015), os processos hidrotermais na superfície marciana e perto da subsuperfície, como os descritos aqui, foram inferidos pelo contexto geológico, a partir da composição volátil das fases hidratadas, minerais de carbonatos e apatita.

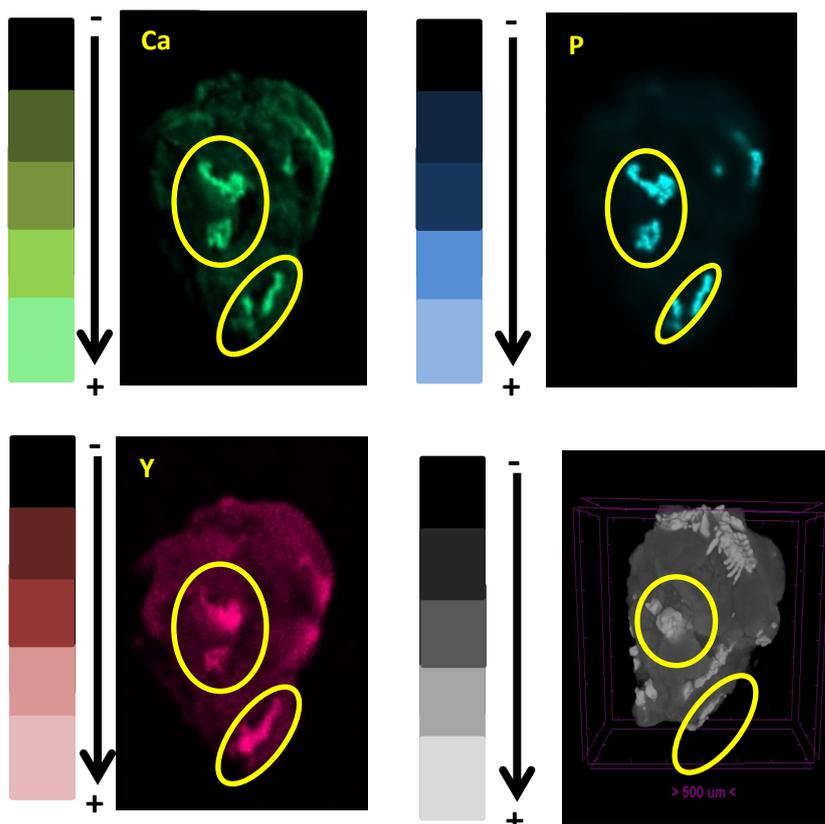
De acordo com McCubbin e Jones (2015), a natureza da apatita marciana suporta um aspecto adicional da habitabilidade marciana. Esse aspecto está relacionado com a

síntese de organofosfatos, que é um processo chave exigido na química pré-biótica e para a função metabólica bem sucedida.

Em meio a todo esse imenso panorama apresentado, é importante ressaltar e discutir ainda um de nossos resultados obtidos através da combinação das técnicas de μ XRF e μ CT. Basicamente, foi observada através da μ CT uma estrutura incrustada no meteorito marciano NWA 6963, possui características diferentes as quais são comumente observadas. Geralmente, é possível visualizar côndrulos, estruturas formadoras de brechas, porém o que foi detectado aparenta ter uma formação bem comportada de seus compostos estruturais e diferente das estruturas citadas anteriormente.

A partir da utilização da técnica de μ XRF foram obtidos resultados dos elementos químicos presentes na amostra, de forma que foi possível identificar a presença de alguns deles especificamente em certas regiões de nosso interesse. Foi possível detectar e caracterizar as áreas em que o Cálcio (Ca), Fósforo (P) e o Ítrio (Y) se encontram no meteorito marciano NWA 6963 (Figura 67).

Figura 67 – Imagens obtidas por μ XRF do meteorito NWA 6963



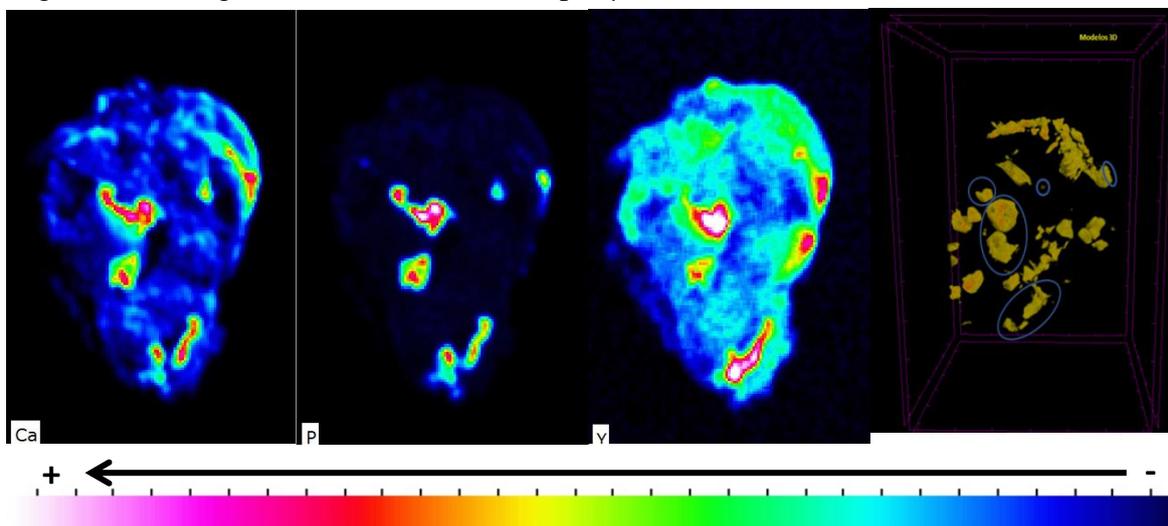
Legenda: São demonstradas através das imagens as áreas ou regiões em que foram detectados os elementos Cálcio (Ca), Fósforo (P), Ítrio (Y), de maneira a comparar com a região em que foi detectada a estrutura incrustada.

Fonte: O Autor, 2018.

Nota-se que esses elementos possuem certa correspondência por se encontrarem em uma mesma região. Eles poderiam ser um mineral composto por Ca, P e Y, como também pode ser que esses elementos estejam formando 2 ou até 3 minerais distintos de maneira a estarem agrupados na mesma região. Vale lembrar que o Cálcio (Ca) é um elemento integrante de compostos químicos com: Calcita (CaCO_3) e a também da Apatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$]. Desse modo, apesar de se apresentarem sobrepostos em uma mesma região, é possível que seja mais de um mineral.

As imagens foram construídas através da densidade de emissão fótons de cada elemento detectado, as quais são estruturadas pelos parâmetros dessas informações de forma normalizada Figura 68. É possível averiguar a distribuição desses elementos sobre o meteorito e notar que essa distribuição não é exatamente a mesma por toda a amostra, como já se suspeitava.

Figura 68 – Imagens de densidade obtidas por μXRF do meteorito NWA 6963



Legenda: São demonstradas as densidades obtidas em que foram detectados os elementos Cálcio (Ca), Fósforo (P), Ítrio (Y), de maneira a comparar com a região em que foi detectada a estrutura incrustada.

Fonte: O Autor, 2018.

Dentre os possíveis cenários mineralógicos que explicariam o resultado apresentado, a hipótese de serem 2 minerais ou até 3 minerais aparenta ter uma boa concordância. O mineral de apatita [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$] detectado em nossas análises por meio de micro Raman poderia ter relação com a xenotímio ou xenótimo (YPO_4), que é um mineral de Terra Rara (REE, sigla em inglês).

De acordo com Liu, Y. *et al.* (2016), existem evidências de inclusões de xenotímio, formadas em Marte por alteração hidrotérmica, em que a composição dessas inclusões é consistente, principalmente, com uma formação resultante da dissolução de apatita por fluido a temperaturas elevadas ou fontes hidrotermais ($> 100^\circ\text{C}$). Fundamentalmente, a dissolução de apatita e precipitação de xenotímio por um fluido hidrotérmico a temperaturas $> 100^\circ\text{C}$ foi proposto para ser o mecanismo de formação

para inclusões de xenotímio em apatita terrestre encontrada em uma ampla gama de materiais rochosos.

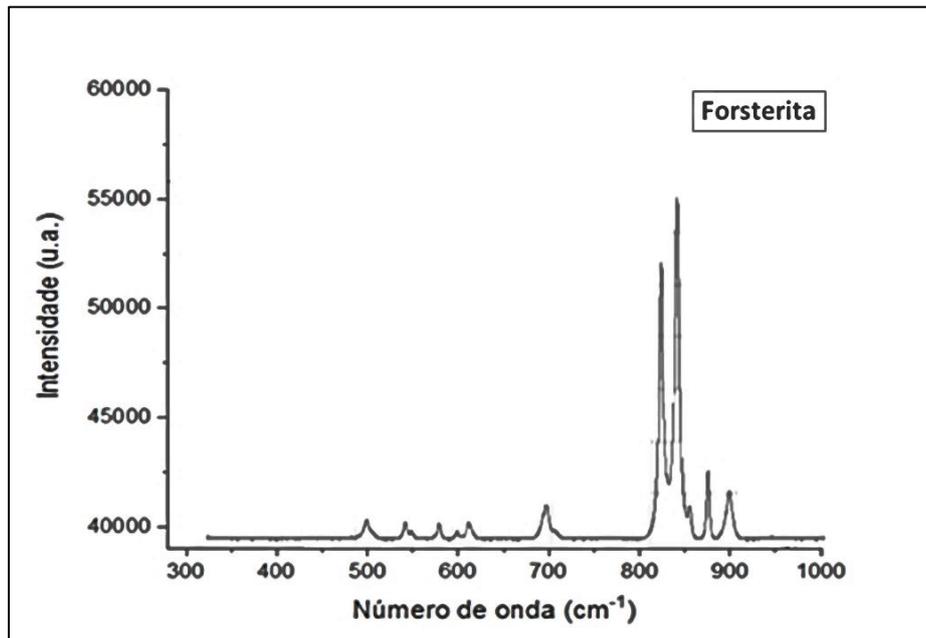
Desse modo, a formação de inclusões de xenotímio em apatita em amostra de meteoritos marcianos pode ser que ocorra através de um processo secundário envolvendo fluido hidrotérmico que interagiu com a apatita. Assim, teríamos uma boa inferência em relação à existência de água no passado recente de Marte e de talvez, ter mais detalhes sobre condições de habitabilidade, em que a vida poderia ter se estabelecido ou não, no planeta vermelho.

5.1.3 Meteorito NWA 7397

A análise da composição química elementar e mineralógica do meteorito NWA 7397 foi realizada através das técnicas de μ XRF e μ -Raman, com o intuito de obter informações de maneira não destrutivas dos componentes estruturais formadores de sua matriz. Desse modo, através da varredura automatizada feita por meio da técnica de XRF foram detectados os elementos Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Fósforo (P), Enxofre (S), Cloro (Cl), Potássio (K), Cálcio (Ca), Titânio (Ti), Vanádio (V), Cromo (Cr), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Níquel (Ni), Zinco (Zn), Gálio (Ga), Estrôncio (Sr), Ítrio (Y), Zircônio (Zr) e Chumbo (Pb). Através das medidas pontuais em regiões específicas escolhidas para análise por meio do micro Raman, foi possível detectar a forsterita (Mg_2SiO_4) e os modos vibracionais do FeO na faixa de 680 cm^{-1} , de forma a poderem ser representados como possíveis frequências representativas da cromita [FeCr_2O_4], da ilmenita [$\text{Fe}^{+2}\text{Ti}^{+4}\text{O}_3$] e da magnetita [$\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4)$] segundo Wang (2004).

A detecção dos elementos de Mg, Si, Ti, Cr e Fe pela μ XRF são coerentes com os minerais detectados pela Raman. No entanto, mesmo os outros elementos não aparecendo nesses ou através de outros minerais, não existe conflito entre os dados de μ XRF e Raman. Possivelmente, as escolhas específicas das regiões para as tomadas de medidas podem ter ocasionado a detecção de apenas esses minerais. Além disso, é importante lembrar que os dados foram comparados com os espectros de minerais puros, ou seja, existe também a possibilidade de alguns desses elementos estarem incrustados como pequenas “impurezas” ou como elementos dopantes. Esses elementos dopantes são átomos que se encontram em locais pontuais do plano da rede cristalográfica do mineral e podem alterar certas características do mineral, como por exemplo, a cor (Figura 69).

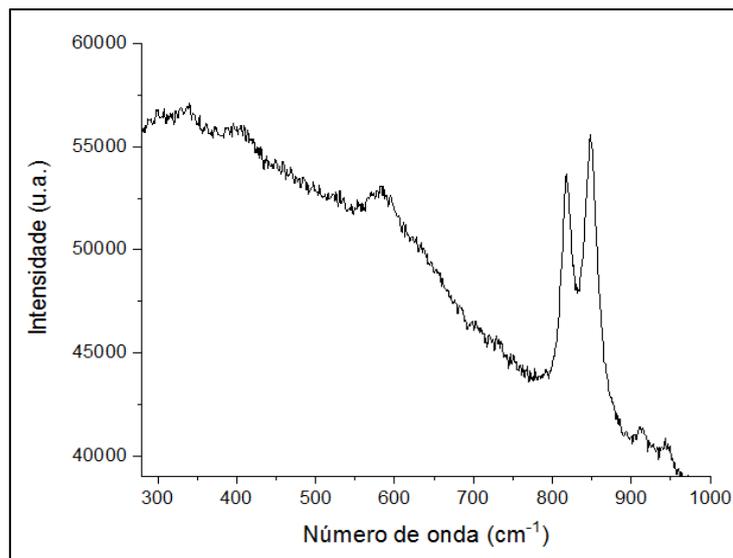
Figura 69 – Imagens da forsterita pura Mg_2SiO_4 e seu respectivo espectro



Fonte: FORSTERITE X050088, 2018.

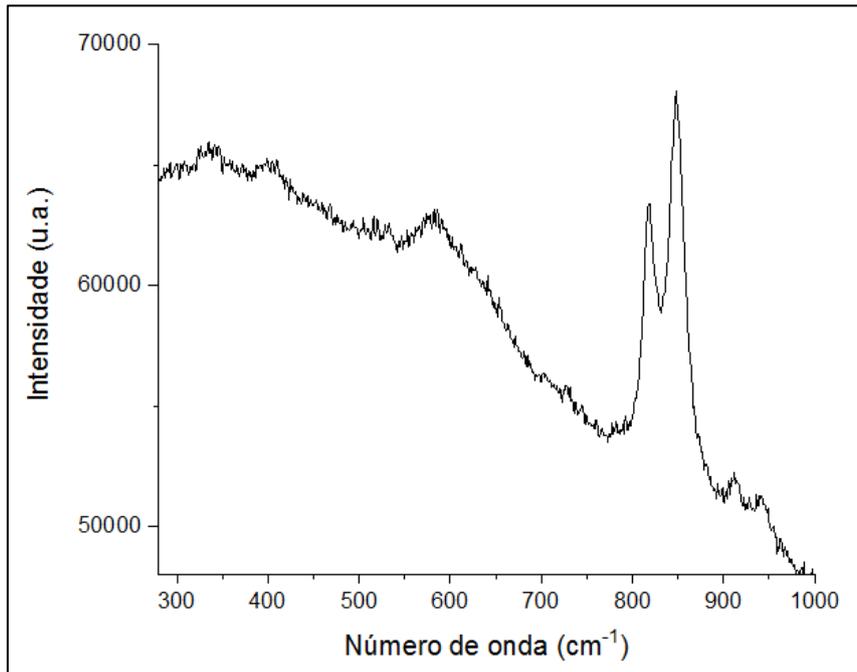
É possível notar que o espectro da figura anterior possui semelhanças com os nossos espectros obtidos a seguir na Figura 70 e 71. Essencialmente, temos que em ambos os espectros observa-se o primeiro pico com menor intensidade que o segundo e isso pode ter relações de além da cor do material, sugerir também a possibilidade de sua estrutura ser formada apenas por Mg_2SiO_4 .

Figura 70 – Espectro Raman da região 5 obtido do meteorito marciano NWA 7397.



Fonte: O Autor, 2018.

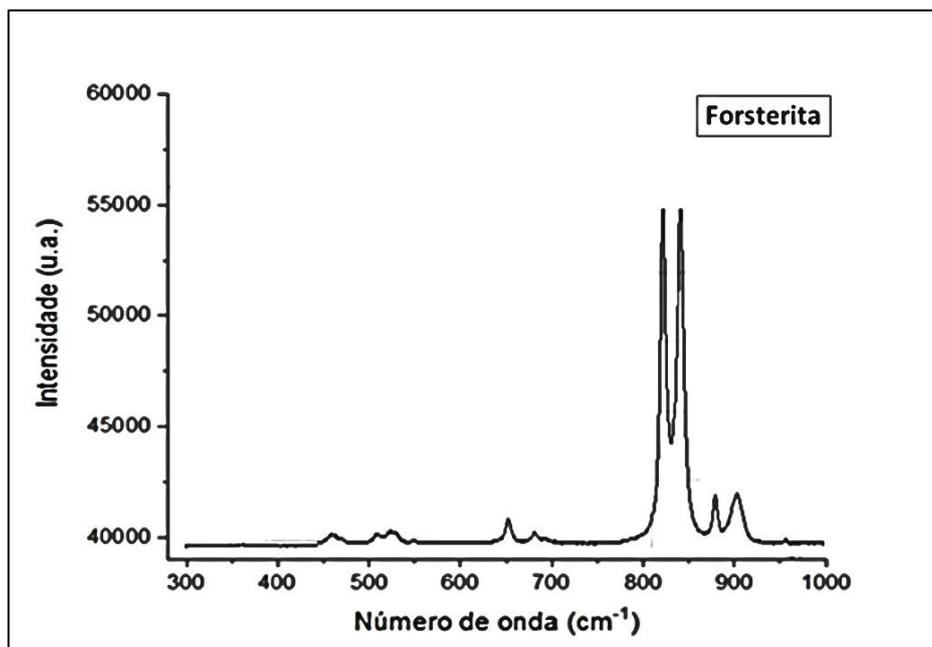
Figura 71 – Espectro Raman da região 6 obtido do meteorito marciano NWA 7397.



Fonte: O Autor, 2018.

Esse fator observado é algo possivelmente interessante, pois na Figura 72 podemos observar que quando ambos os picos se encontram alinhados com a mesma intensidade, outros elementos químicos começam a aparecer como dopantes na forsterita deixando-a com uma aparência de cor verde escurecida.

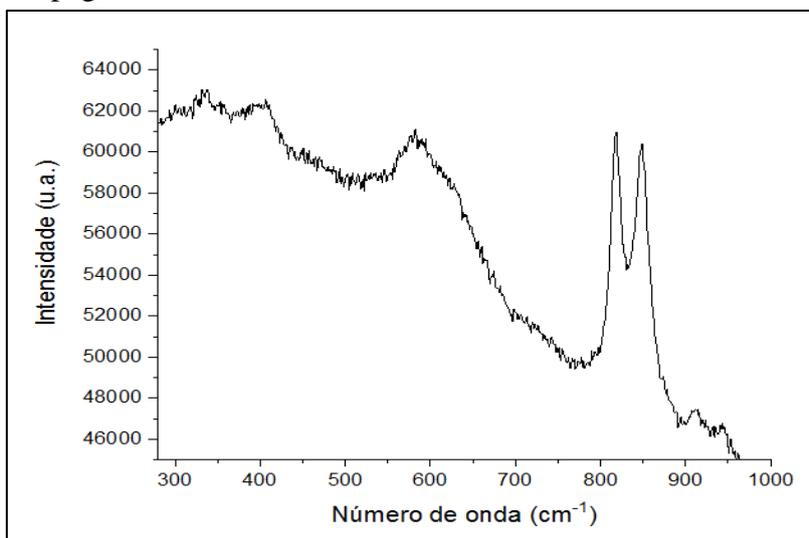
Figura 72 – Imagens da forsterita Mg_2SiO_4 dopada por Ferro e seu respectivo espectro



Fonte: FORSTERITE X050088, 2018.

Em nosso gráfico em uma determinada região em que foi detectada a forsterita também apareceram picos com intensidades semelhantes. Isso talvez possa ser um indicativo de pequena dopagem de Ferro na forsterita presente em nossa amostra. Esse alinhamento pode ser observado a seguir na Figura 73, em que ambos os picos encontram-se praticamente alinhados.

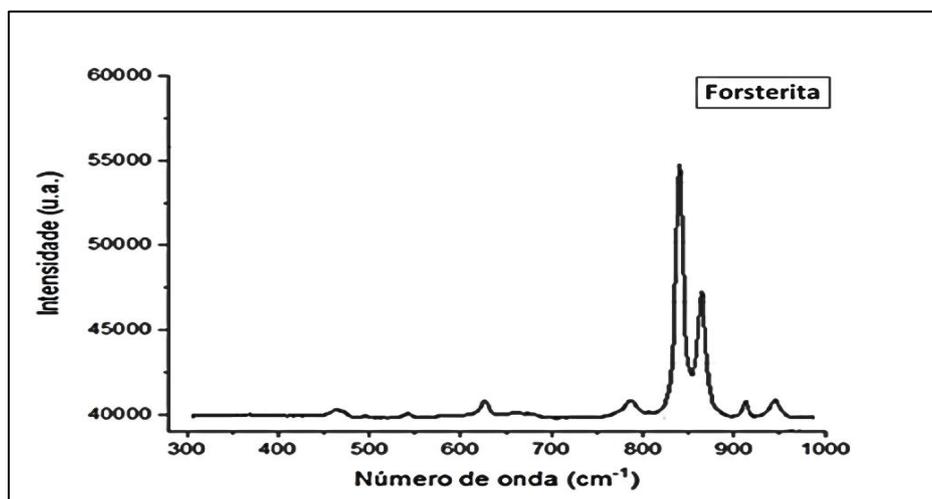
Figura 73 – Espectro Raman de forsterita obtido do meteorito marciano NWA 7397 com possível dopagem de Ferro.



Fonte: O Autor, 2018.

Finalmente, foi possível notar também um espectro em que o primeiro pico possuía uma intensidade maior que o segundo pico semelhante à Figura 74. Neste caso o mineral e forsterita apresenta uma cor escura amarronzada, sugerindo composição de Mg₂SiO₄ e átomos de Ferro e Níquel presente na amostra.

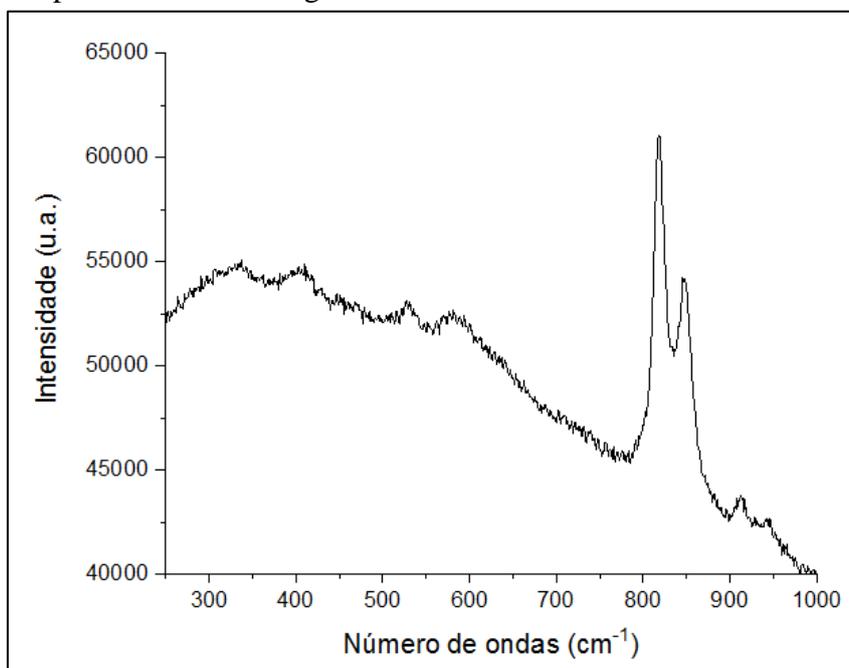
Figura 74 – Imagens da forsterita Mg₂SiO₄ dopada por Ferro, Níquel e seu respectivo espectro



Fonte: FORSTERITE X050088, 2018.

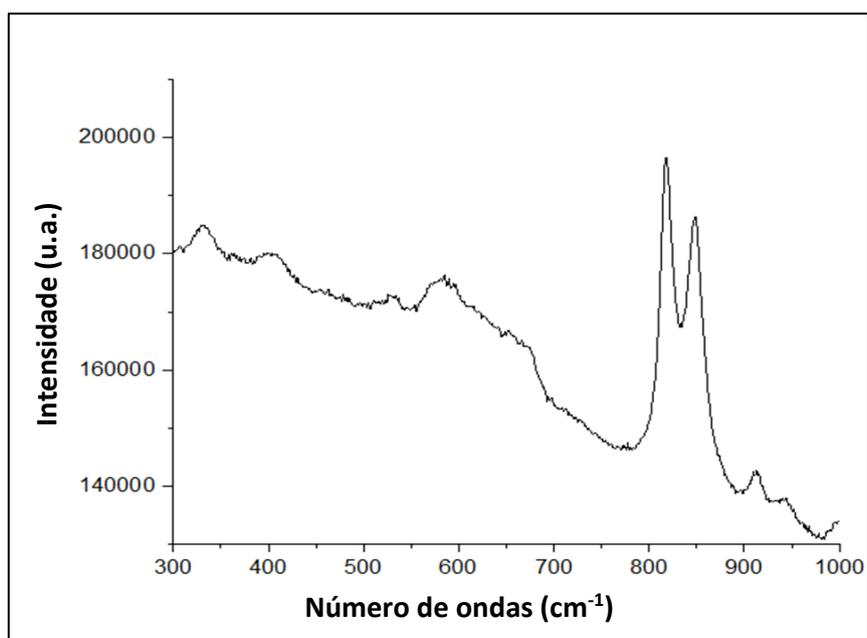
Em nosso gráfico foi detectada esse tipo de sinal de forsterita, tal como mostra a Figura 106, em que o segundo pico possui menos intensidade que o primeiro. Assim, teríamos, talvez um indicativo da existência de átomos de Ferro e Níquel presentes no plano da rede cristalográfica da forsterita em nossa amostra. Esses dados podem ser vistos e comparados pelas Figuras 75 e 76.

Figura 75 – Espectro Raman da região 2 obtido do meteorito marciano NWA 7397.



Fonte: O Autor, 2018.

Figura 76 – Espectro Raman da região 3 obtido do meteorito marciano NWA 7397.

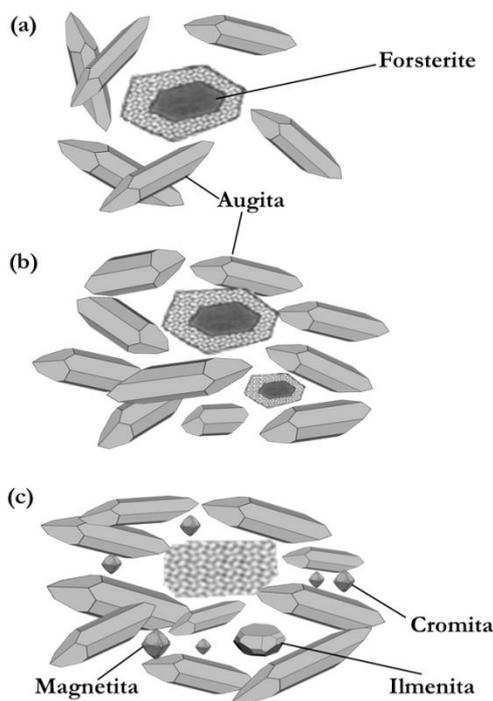


Fonte: O Autor, 2018.

Em relação à detecção de forsterita, um mineral da classe dos nesossilicatos pertencente ao grupo da olivina, no NWA 7397 com a astrobiologia poderia estar vinculado com a sua origem a partir de olivinas que passam por condições de metamorfismo de acordo com Bucher e Frey (1994). Fundamentalmente, esse metamorfismo ocorreria por meio de processos que envolveriam transformações sofridas pela olivinas, quando submetidas ao calor/temperatura, pressão e o tempo.

Apesar de esse mineral ser observado em certas rochas metamórficas do grupo dolomítico, ou seja, rochas de calcários, a maior frequência da forsterita na Terra aparece em rochas ígneas do tipo ultramáfica. Geralmente, esse mineral em nosso planeta ocorre associado com outros minerais como a magnetita, cromita, diópsido, augita e outros. Um ponto extremamente interessante e de relevância para estudos de evolução geológica da forsterita, está relacionado à transformação de parte do material desse mineral de forma a ser incorporado em magnetita metamórfica, em que isso ocorre quando a olivina ígnea é metamorfizada. Basicamente, todo esse processo produz uma olivina muito mais magnesiânica e escura já que parte de seu material, o ferro, passa a ser fixado na magnetita, não se dissolvendo nas fases produzidas pelo metamorfismo (Bucher; Frey, 1994) (Figura 77).

Figura 77 – Ilustração esquemática da história de cristalização de minerais da forsterita à magnetita



Fonte: O Autor, 2018.

Em relação às possíveis diferenças encontradas na detecção de forsterita no NWA 7397 em nossos resultados, podemos destacar alguns pontos interessantes para a temática astrobiológica. De acordo com Bucher e Frey (1994) a formação de forsterita magnesiânica sem a adição do ferro (Fe) ocorre geralmente em temperaturas relativamente baixas de

(~400°C) de formação de olivina no metamorfismo. Todavia, a adição de Fe levaria a um aumento considerável nas temperaturas de formação de olivina por metamorfismo, a qual segundo Spear (1995), só ocorreria a temperaturas >800°C. Desse modo, os diferentes espectros de forsterita encontrados em nossos resultados podem ter relações não apenas com dopantes de ferro presente na sua estrutura de rede cristalográfica, mas ser vistos como registros indiciais dos possíveis processos geológicos que ocorreram no passado com o meteorito NWA 7397. Além da relação da forsterita com a evolução geológica da olivina, ela também mostra ter, ao menos em nosso planeta, uma relação com outros minerais como magnetita e cromita, os quais foram detectados em nossas análises.

A cromita e da magnetita detectadas pela técnica de Raman podem ter relação com a forsterita, de forma a nos dar indícios da origem e formação desses minerais, em que talvez nós pudéssemos interpretar esses resultados como o meteorito marciano NWA 7397 sendo uma rocha ultramáfica, ou seja, rocha ígnea composta predominantemente por minerais ferromagnesianos e que possui um teor em sílica muito baixo.

Outra relação importante entre a cromita, a magnetita e a forsterita (olivina), é que quando as olivinas são submetidas a grandes pressões, elas se contraem para uma estrutura mais compacta correspondente a do espinélio ($MgAl_2O_4$). Segundo Deer et al. (1992), essa transformação olivina-espinélio no sistema $Mg_2SiO_4-Fe_2SiO_4$, ocorre entre 800°C e 1200°C, sendo estas pressões mais altas para as fases ricas em Mg e a pressões mais baixas quando as fases são ricas em Fe. Dessa forma, temos a cromita que é um mineral pertencente ao grupo do espinélio, geralmente presente na constituição de olivinas ricas em Mg, através do cromo na forma de minúsculas lamelas exsolvidas de cromita. A magnetita pode ser fazer presente por meio de pequenos grãos exsolvidos vias de regra, de maneira análoga quando há algum Fe^{3+} no material, ou, como é mais comum, ser produto de alteração por oxidação da olivina.

Desse modo, uma relação desses minerais encontrados no meteorito NWA 7397 com a astrobiologia, poderia ser e estar vinculada com o estudo da evolução do manto e da crosta marciana. Segundo Szabó *et al.* (2009), as rochas ígneas tiveram uma grande importância no passado arqueano da Terra. Nesta época, a temperatura mais elevada do manto permitia maiores taxas de fusão, magmas ricos em Mg eram gerados, de maneira a conseguirem alcançar a superfície da crosta primitiva e consolidar-se na forma de derrames de komatiitos, que são rochas peculiares de grande interesse para estudo da evolução do manto e da crosta arqueana terrestre. Assim, por meio de uma metodologia de estudo de mineralogia comparada entre o que conhecemos da Terra com o que obtivemos do meteorito marciano NWA 7397, talvez seja possível futuramente auxiliar a entender mais sobre questões relacionadas à evolução da geologia marciana (BUCHER; FREY, 1994; SPEAR, 1995; SZABÓ *et al.*, 2009).

5.2 Meteoritos Lunares

O desenvolvimento de pesquisas através dos dados e resultados obtidos nas análises de meteoritos lunares podem nos trazer informações importantes sobre o estudo da formação da Lua (O'NEILL, 1991); Além disso, a análise de abundância química através do Cr, V e Mn, podem ter implicações sobre as hipóteses de origem da Lua (RINGWOOD; KATO; HIBBERSON; WARE, 1990), nos fornecendo assim, informações extremamente relevantes sobre a possibilidade, por exemplo, de ter ocorrido um impacto gigante que teria gerado a Lua ou como alguns desses elementos em meteoritos lunares podem ter também relação com os estudos dos mesmos compostos na superfície de nosso planeta (CANUP; RIGHTER, 2000).

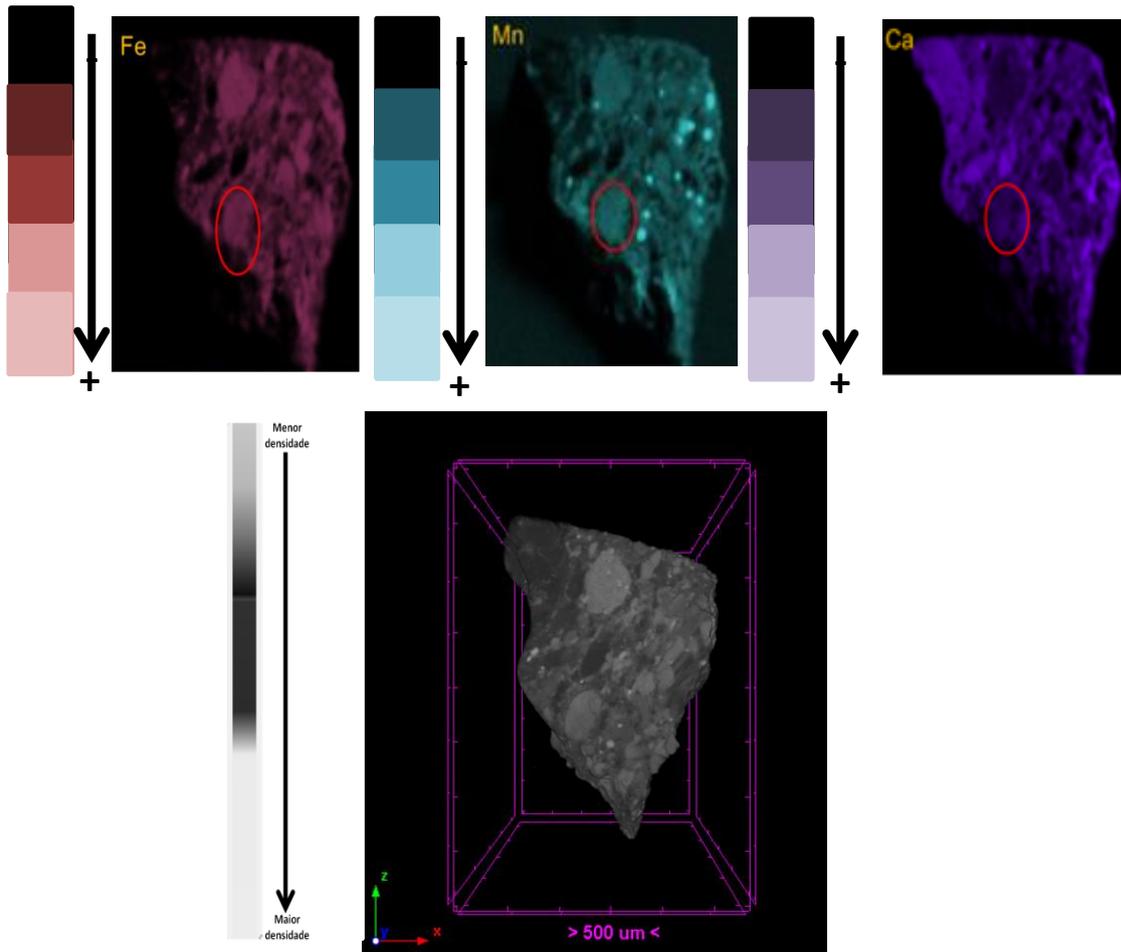
Embora a maioria dos registros geológicos tenha sido destruída, assim como aconteceu na Terra, a evolução geológica da superfície lunar, suas informações físicas e características químicas ainda podem ser estudadas através dos meteoritos lunares. Dessa forma, através dos objetos oriundos da superfície lunar, como o NWA 8277, é possível investigarmos informações químicas, físicas e geológicas por meio de técnicas analíticas não destrutivas, tais como a μ XRF, μ Raman e a μ CT, utilizadas no desenvolvimento deste trabalho de maneira a contribuir no entendimento e compreensão da geologia lunar.

5.2.1 Meteorito Lunar 8277

Através da varredura automatizada feita por meio da técnica de μ XRF foram detectados os elementos Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Fósforo (P), Enxofre (S), Cloro (Cl), Potássio (K), Cálcio (Ca), Titânio (Ti), Vanádio (V), Cromo (Cr), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Estrôncio (Sr), Ítrio (Y) e Zircônio (Zr). Por meio de análises pontuais de μ Raman foram detectados os minerais diopsídio [$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$], gipsita [$\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$] e siderita [$\text{Fe}(\text{Mn}, \text{Mg}, \text{Ca})\text{CO}_3$].

É possível observar uma relação entre os resultados obtidos pela técnica de μ XRF e a técnica de μ Raman. Dentre os minerais detectados através do μ Raman estão presentes os elementos Magnésio (Mg), Silício (Si), Enxofre (S), Cálcio (Ca), Manganês (Mn) e o Ferro (Fe), que também foram detectados através da μ XRF, de maneira a sugerir fortes evidências de que esses minerais, assim como esses elementos, se fazem realmente presentes na amostra lunar, sendo ilustrados os pontos averiguados nas Figuras 78 e 79.

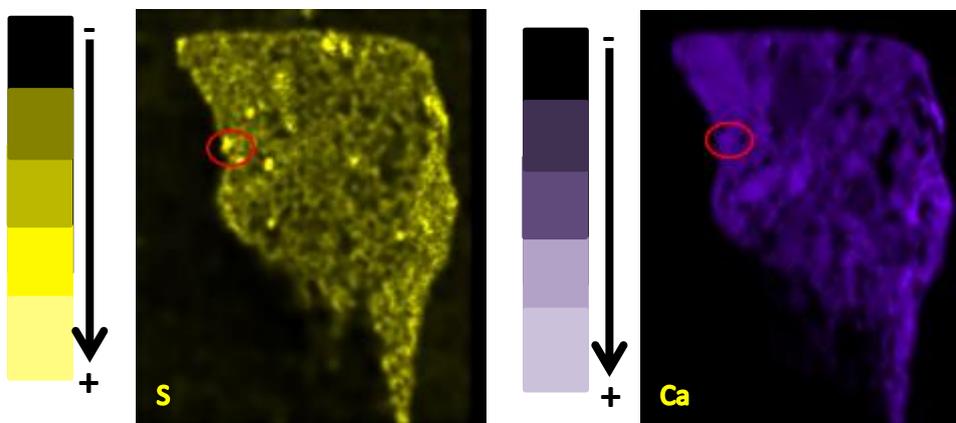
Figura 78 – Imagens construídas por μ XRF de Fe, Mn e Ca do local que a Siderita foi detectada.



Legenda: dos elementos de Fe, Mn, Ca e a imagem de μ CT do meteorito lunar NWA 8277. O ponto em destaque nas imagens é o local em que foi detectada a siderita através do μ Raman.

Fonte: O Autor, 2018.

Figura 79 – Imagens construídas por μ XRF de S e Ca do local que a gipsita foi detectada.



Legenda: Mosaico de imagens composto pela combinação de dados de imagem gerados pela μ XRF dos elementos de S e Ca do meteorito lunar NWA 8277. O ponto em destaque nas imagens é o local em que foi realizada a medida do μ Raman. Fonte: O Autor, 2018.

Apesar dos elementos Alumínio (Al), Fósforo (P), Cloro (Cl), Potássio (K), Titânio (Ti), Vanádio (V), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Estrôncio (Sr), Ítrio (Y) e Zircônio (Zr) não terem relação com os minerais detectados pela técnica de μ Raman ou os minerais que possuam esses elementos também não terem aparecido, não existe conflito entre os dados de μ XRF e μ Raman. Uma explicação para isso seria, talvez, a maneira escolhida de se utilizar o μ Raman, de forma a analisar pontualmente determinadas áreas e regiões. Outro ponto importante é que, apesar de não terem sido detectados pelo μ Raman, minerais relacionados com o Cr e V podem auxiliar no entendimento da origem da Lua (RINGWOOD *et al.*, 1990). É preciso frisar que não deve ser descartada a possibilidade de existir, por exemplo, cromita (FeCr_2O_4) no NWA 8277, pois a faixa de 680 cm^{-1} em que se encontra a gipsita é uma frequência que, de acordo com Wang (2004), possui também uma correspondência com a cromita. Assim, é possível que também exista algum mineral relacionado ao Vanádio e aos outros elementos detectados pela μ XRF e que não foram obtidos resultados com uma correspondência mineralógica desses elementos através da técnica de μ Raman.

No que cerne a relação dos minerais detectados e a relevância de cada um deles com a Astrobiologia, podemos destacar a gipsita e a siderita. A gipsita é conhecida também como pedra de gesso e seu nome vem da designação grega, *gypsos*. Esse mineral é um sulfato de cálcio hidratado e na Terra é um produto comum de alteração ou de evaporação de sulfato formado amplamente em diversos ambientes deposicionais, como por exemplo, na degradação de resíduos de minas devido à ações intempéries, em ambientes que possuam fluxos hidrotermais (FISHBAUGH *et al.*, 2007).

Em White Sands, New Mexico, EUA, existem depósitos de evaporitos próximos que se desenvolveram a partir de uma coleção de dunas brancas puras de gipsita e que não podem migrar para longe de sua fonte devido à fraqueza física do mineral. Em Marte, os depósitos de gipsita, seriam resultantes de uma combinação de alterações diretas e *in situ* de dunas portadoras de piroxênio com alto teor de cálcio e sulfeto e também da formação de cristais de gesso evaporítico nos espaços de poro dessas dunas. Dessa forma, existe a possibilidade da formação da gipsita ter alguma relação com o diopsídio detectado, por ele ser um mineral pertencente ao grupo do piroxênio. Então, mantendo-se nessas possíveis vertentes, a detecção de gipsita no meteorito lunar NWA 8277 pode trazer vários indícios do passado da formação da Lua que são de extrema relevância para a Astrobiologia (FISHBAUGH *et al.*, 2007).

Em relação ao outro mineral, a siderita, também conhecida como calibita, é composta de carbonato de ferro e pertence ao grupo da calcita. Devido a isso, a mesma já foi motivo de diversos estudos. Dentre eles, um que possui interesses astrobiológicos está relacionado à capacidade que esse mineral possuiria de gerar produtos orgânicos, como os compostos aromáticos alquilados e hidroxilados, a partir de sua decomposição e na presença de água em altíssimas temperaturas, tais como em fontes hidrotermais (MCCOLLOM, 2003).

5.3 Meteoritos condritos carbonáceos

Basicamente, podemos ver os meteoritos condritos carbonáceos como rochas de grande importância, devido à vasta quantidade de informações que eles podem nos fornecer sobre o material primordial que formou os planetas do nosso sistema solar (SAFRANOV; RUSKOL, 1994). Além disso, eles são, dessa maneira, materiais extremamente relevantes para a Astrobiologia e ciências planetárias por reterem informações exclusivas sobre os processos naturais que ocorreram no início do Sistema Solar em sua composição estrutural física e química.

Assim, buscou-se investigar as informações químicas, físicas e geológicas por meio de técnicas analíticas não destrutivas, tais como a μ XRF, μ Raman e a μ CT, de forma a averiguar a possibilidade de atingir os objetivos e contribuir no entendimento e compreensão da formação estrutural dos condritos carbonáceos.

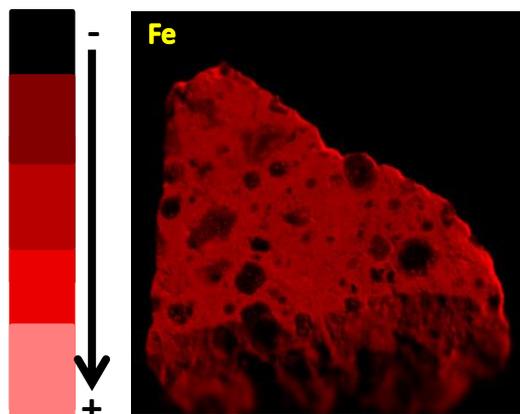
5.3.1 Meteorito Allende

A análise da composição química elementar e mineralógica do condrito carbonáceo Allende foi realizada através das técnicas de μ XRF e μ -Raman, com o intuito de obter informações que pudessem se complementar e gerar dados sobre os seus côndrulos e dos componentes estruturais formadores de sua matriz. Através da varredura automatizada feita por meio da técnica de XRF foram detectados os elementos Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Enxofre (S), Potássio (K), Cálcio (Ca), Titânio (Ti), Vanádio (V), Cromo (Cr), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Níquel (Ni) e o Zinco (Zn). Através das medidas pontuais em regiões específicas escolhidas para análise por meio do micro Raman, foi possível detectar a forsterita (Mg_2SiO_4).

Embora tenha sido detectado unicamente a forsterita, não existe conflito entre os dados de μ XRF e Raman. As escolhas específicas das regiões para as tomadas de medidas pode, eventualmente, ter ocasionado a detecção de apenas esse mineral. Além disso, a partir das análises dos resultados gerados pela μ XRF é possível sugerir como esta composição estrutural dos côndrulos podem ser representada e bem ilustrada por meio do mosaico de elementos.

Em geral, a imagem nos possibilita observar de maneira não destrutiva, como o Ferro (Fe) permeia bem toda a matriz do meteorito Allende, o que sugere que sua composição estrutural esteja de acordo com uma estrutura de matriz ferromagnésiana. No entanto, existem “buracos” nesta mesma imagem do Ferro que se encaixam bem exatamente onde se estão as estruturas condriticas e isso sugere que os côndrulos são formados por elementos mais leves que o Fe (Figura 80).

Figura 80– Composição de Fe presente no meteorito Allende



Fonte: O Autor, 2018.

Além disso, a forsterita por ser um ortossilicato pertencente ao grupo das olivinas, cristaliza com simetria ortorrômbica, com estruturas que consistem de tetraedros independentes de $(\text{SiO}_4)^{4-}$, que geralmente são ligados por átomos bivalentes (Mg, Fe, Ca) em coordenação octaédrica (DEER *et al.*, 1992). Essa distribuição de Mg^{+2} e Fe^{+2} na estrutura composicional das olivinas, ocorre com ordenamento variável, porque geralmente os cátions Fe^{+2} , de maior raio atômico, têm uma pequena tendência pelas posições de menores dimensões (DEER *et al.*, 1992). Desse modo, poderíamos ver a forsterita como um mineral que poderia, talvez, nos dar informações sobre possíveis condições de metamorfismo que o meteorito Allende passou, visto que isso ocorre devido a processos que envolvem a transformação sofrida pela olivina, quando a mesma é submetida ao calor/temperatura, pressão e o tempo (BUCHER; FREY, 1994). Na Tabela 21 mostra os diferentes graus de metamorfismos e o grau de forsterita presente na amostra em percentual.

Tabela 21 – Composição completa dos minerais em que a forsterita se faz presente com as fases composicionais da forsterita (Mg_2SiO_4) até faialita (Fe_2SiO_4).

Mineral	% Forsterita (Fo)
Forsterita	100 a 90% de Fo
Crisotila	90 a 70% de Fo
Hialossiderita	70 a 50% de Fo
Hortonolita	50 a 30% de Fo
Ferrortonolita	30 a 10% de Fo
Faialita	10 a 0% de Fo

Fonte: DEER, 2009. Modificada pelo autor.

Em relação aos resultados obtidos pela técnica de μXRF , Outro ponto importante que é preciso ser ressaltado, é a comparação dos resultados da composição da química elementar do meteorito Allende feita em nosso trabalho de maneira não destrutiva com

os resultados gerados por meio de técnicas analíticas destrutivas. É possível notar que os nossos resultados foram bastante satisfatórios em relação aos dados da literatura apresentados e comparados na Tabela 22.

Tabela 22 – Análise comparativa entre os resultados do meteorito Allende

Allende (Neste trabalho)	Allende Literatura ^a	Allende Literatura ^b
-----	Na	Na
Mg	Mg	Mg
Al	Al	Al
Si	-----	-----
P	P	P
S	S	S
K	K	K
Ca	Ca	Ca
Ti	-----	-----
V	-----	-----
Cr	Cr	Cr
Mn	Mn	Mn
Fe	Fe	Fe
Ni	Ni	Ni
Zn	-----	-----

^a JAROSEWICH, CLARKE JR. AND BARROWS, 1987.

^b WOLF, COMPTON AND GAGNON, 2012.

Segundo as literaturas disponíveis com valores publicados relacionados ao meteorito Allende, as análises químicas são feitas principalmente por ICPMS e INAA. Através da compilação composta de dados derivados nessas análises foi possível constatar também a detecção de 11 elementos (Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Cr, Mn, Fe e Ni) (JAROSEWICH, CLARKE, BARROWS, 1987; WOLF, COMPTON, GAGNON, 2012). Dentre os elementos encontrados na literatura, foram detectados 10 entre os 11 (Mg, Al, P, S, K, Ca, Cr, Mn, Fe e Ni), mas há um adicional de terem sido detectados outros 4 elementos (Si, Ti, V e Zn). Essencialmente, isso mostra uma boa eficiência da técnica de μ XRF e uma boa sensibilidade para análise de composição química elementar. Assim, com base nesses dados disponíveis na literatura e comparando com os dados que foram obtidos por μ XRF, é possível notar uma eficiência também bastante significativa da técnica de fluorescência na detecção de elementos químicos presentes na composição estrutural no meteorito Allende.

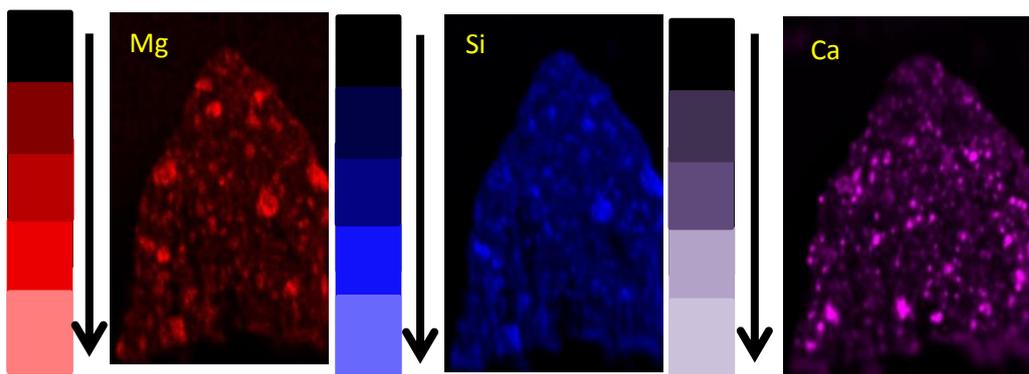
5.3.2 Meteorito Murchison

Através da varredura automatizada feita por meio da técnica de XRF foi possível observar a composição química elementar do meteorito Murchison, de forma a serem detectados os elementos Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Silício (Si), Enxofre (S), Potássio (K), Cálcio (Ca), Titânio (Ti), Vanádio (V), Cromo (Cr), Manganês (Mn), Ferro

(Fe), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinco (Zn) e Germânio (Ge). A análise e averiguação mineralógica foi realizada pela micro Raman que detectou os minerais ortoestatita $[\text{MgSiO}_3]$ e a tremolita $[\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH,F})_2]$

A detecção da ortoestatita e da tremolita, nos mostra que existe concordância com os dados obtidos entre a técnica de micro Raman e a μXRF . Os elementos Mg, Si e Ca detectados por meio da fluorescência de raios X, são observados nos minerais detectados pela técnica de Raman (Figura 81).

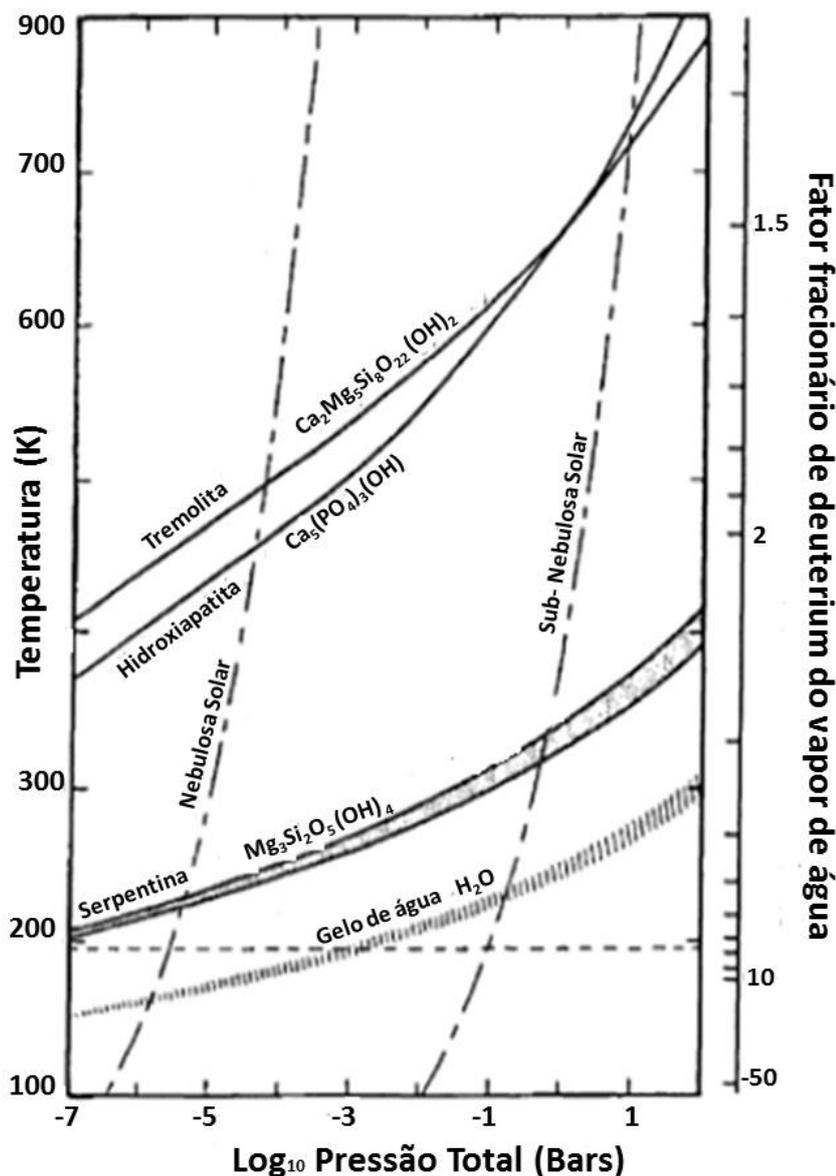
Figura 81– Mosaico dos componentes elementares detectados por μXRF e constituintes o mineral detectado por μRaman no meteorito Murchison



Fonte: O Autor, 2018.

Uma relação desses minerais encontrados no meteorito Murchison com a astrobiologia poderia estar vinculada o estudo da presença da água em nosso planeta, a partir da possível contribuição de meteoritos e a evolução da geologia terrestre. Fundamentalmente, a presença de oceanos na Terra, mas não em Venus, ilustra um dos problemas clássicos da ciência planetária relacionado ao mecanismo de retenção por grãos sólidos durante a formação planetária (GREENBERG; MENDOZA-GÓMEZ; PIRRONELLO, 2012) (Figura 82).

Figura 82 – Fases hidratadas e minerais que podem se formar na nebulosa



Fonte: GREENBERG; MENDOZA-GÓMEZ; PIRRONELLO, 2012. Modificada pelo autor.

Através do gráfico é possível notar que algumas fases hidratadas podem se formar na nebulosa, porém, geralmente para esses minerais ocorrem a temperaturas superiores a 300 K e sendo mais estáveis entre 460-500 K. Neste panorama, à medida que a temperatura passa a diminuir, os primeiros minerais hidratados a serem formados são fases relativamente pobres em água, como hidroxiapatita e tremolite (KELLER; BUSECK, 1991; GREENBERG; MENDOZA-GÓMEZ; PIRRONELLO, 2012).

Assim, a relação da origem da água em nosso planeta, tal como em outros planetas terrestróide, poderiam ter uma elucidação a partir do entendimento de como esse processo de água e amônia poderiam ter ocorrido por meio de meteoritos, a partir da tremolita e em silicatos hidratados que podem ter sido formados ainda durante a nebulosa solar.

Outro ponto importante que é preciso ser ressaltado em relação aos resultados obtidos pela técnica de μ XRF é a comparação dos resultados da composição da química elementar do meteorito Murchison feita em nosso trabalho de maneira não destrutiva com os resultados gerados por meio de técnicas analíticas destrutivas. É possível notar que a μ XRF foi bastante eficiente em relação aos dados da literatura apresentados e comparados na Tabela 23.

Tabela 23 – Análise comparativa entre os resultados do meteorito Murchison

Murchison (Neste trabalho)	Murchison Literatura ^a	Murchison Literatura ^b
-----	Na	Na
Mg	Mg	Mg
Al	Al	Al
Si	-----	-----
-----	P	P
S	S	S
K	K	K
Ca	Ca	Ca
Ti	-----	-----
V	-----	-----
Cr	Cr	Cr
Mn	Mn	Mn
Fe	Fe	Fe
Ni	Ni	Ni
Cu	-----	-----
Zn	-----	-----
Ge	-----	-----

^a KALLEMEYN; WASSON, 1981

^b WOLF, COMPTON; GAGNON, 2012.

De acordo com os valores publicados a partir das literaturas disponíveis, em relação ao meteorito Murchison, foi constatado a detecção de 11 elementos (Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Cr, Mn, Fe e Ni) (KALLEMEYN, WASSON, 1981; WOLF, COMPTON, GAGNON, 2012). Esta averiguação foi realizada a partir de uma compilação composta de dados derivados de análises químicas feitas principalmente por ICPMS e INAA. Considerado esses dados disponíveis na literatura e comparando com os dados que foram obtidos por μ XRF, é possível notar uma boa eficiência da técnica de fluorescência na detecção de composição química elementar. Dentre os elementos encontrados na literatura, foram detectados 10 entre os 11 (Mg, Al, P, S, K, Ca, Cr, Mn, Fe e Ni), com o adicional de terem sido detectados outros 6 elementos (Si, Ti, V, Zn e Ge.) e além de apresentar uma boa eficiência, também mostra ter uma boa sensibilidade para detecção de elementos químicos.

CONCLUSÃO

Foi desenvolvida neste trabalho uma metodologia capaz de caracterizar um modelo padrão de análises preliminares que pudesse fornecer informações estruturais e químicas das amostras analisadas. Os resultados indicam que a μ CT é capaz de produzir imagens e informações com um nível de detalhamento da formação estrutural dos meteoritos, tão boa quanto às técnicas de microscopia eletrônica, tendo ainda a vantagem adicional de gerar dados tridimensionais. Para todas as amostras é possível realizar “cortes” internos do material, por meio de imagens geradas em 2D, de modo que é possível determinar e delinear a partir dessas imagens de μ CT os diferentes componentes que formam a estrutura interna dos meteoritos de maneira eficiente e sem o requerimento de qualquer preparação ou dano às amostras. Essa natureza não destrutiva da microtomografia de raios X demonstra que ela poderia se tornar uma ferramenta extremamente poderosa durante as investigações iniciais, de caracterização mineralógica e textural preliminar desse tipo de material extraterrestre raro, principalmente, para amostras futuras retornadas de Marte. Esse tipo de procedimento daria uma maior proteção às informações que podem ser obtidas nessas missões espaciais e interplanetárias.

De forma geral, através da μ CT foi possível analisar em detalhes as estruturas plagioclásticas brechadas no meteorito lunar, os côndrulos dos meteoritos carbonáceos e também estruturas incrustadas no meteorito marciano. Além disso, a técnica de μ CT também nos forneceu informações relacionadas à textura, densidade e a porosidade dos meteoritos. Por meio do recurso de reconstrução em 3D, foram obtidas informações claras da composição geológica do material lunar, em que foi possível ver claramente de maneira não destrutiva que a estrutura do meteorito era composta de uma textura uniforme de material menos denso na matriz principal, sendo que os plagioclases e os clastos de minerais eram materiais não uniformes, irregulares, mais densos e que possuem uma ampla gama de tamanhos. Desse modo, concluímos que a μ CT tem um enorme potencial para ser considerado no futuro como uma das técnicas essenciais de análises preliminares de fragmentos em meteoritos, essencialmente, por ser capaz de fornecer inúmeras informações de extrema relevância, as quais sem ela não teríamos acessibilidade neste trabalho.

Os nossos resultados indicam que a μ XRF é capaz de produzir de maneira extremamente satisfatória e eficiente, informações importantes em relação às características multielementares dos meteoritos. Essencialmente, foi possível obter a identificação dos elementos presentes através de uma análise direta em cada amostra e ainda, com uma vantagem adicional de serem geradas imagens normalizadas vinculadas à contagem de fótons emitidos de cada elemento químico detectado. Também foram realizadas análises comparadas que demonstram que os resultados gerados a partir de nossa metodologia foi bastante satisfatória de modo conseguirmos obter uma eficiência > 80% em relação aos resultados gerados com as técnicas convencionais da literatura científica. Além disso, também foi possível notar uma sensibilidade maior da μ XRF na

análise de composição química elementar, a qual foi capaz de detectar elementos adicionais que não foram detectados nas literaturas de técnicas analíticas destrutivas. Por se tratar de uma técnica que nos possibilitou averiguar tão detalhadamente a composição química dos meteoritos estudados, detectando e identificando cada um dos elementos presentes nas amostras sem o requerimento de preparo das amostras, concluímos que a μ XRF é uma técnica não destrutiva que pode ser utilizada para análises preliminares e caracterização desses materiais extraterrestres que por vezes são poucos, raros e que podem ter informações de grande valor para a Astrobiologia.

Em relação à técnica de μ Raman foi possível obter eficientemente de maneira extremamente satisfatória informações relevantes sobre as faixas das frequências dos modos vibracionais presentes nas amostras meteoríticas. Com base, nos resultados espectrais obtidos pela μ Raman e comparando-os com as bases de dados do instituto de geologia de Lyon e com artigos de análises mineralógicas, foi possível inferir que minerais estão presentes em cada meteorito. Desse modo, nos possibilitou ter uma boa estimativa em relação aos constituintes mineralógicos presentes nas amostras sem que houvesse a necessidade de preparo das amostras. Dessa maneira, concluímos que a μ Raman é uma técnica não destrutiva que também pode ser utilizada para análises preliminares e caracterização desses meteoritos de maneira a auxiliar o desenvolvimento em pesquisas de ciências planetárias e gerar informações de grande valor para área da Astrobiologia.

No que concerne os dados e informações obtidas das análises que foram realizadas nos meteoritos estudados neste trabalho se mostraram bastante satisfatórios. Basicamente, as análises dos dados obtidos a partir dos meteoritos marcianos em nossa pesquisa mostram concordância com os dados existentes na literatura. Além disso, analisando os resultados gerados é possível notar vínculos de vital importância para a Astrobiologia, tais como a possibilidade de averiguar e compreender certos processos da evolução geológica marciana, investigar a presença de carbonato de cálcio em Marte que teriam sido formados em meio aquoso, de modo a trazer bons indícios e sugerir a possibilidade de água no planeta vermelho. Além disso, na Terra a calcita tem uma composição estrutural formada por bioclastos, em que sua proveniência em meios marinhos é biogênica. Foram detectados também outros minerais de igual relevância para o entendimento das possíveis e reais chances de no presente ou no passado de Marte, terem havido condições de habitabilidade, como a apatita e actinolita que são vistos pela literatura como possíveis traçadores de perfis de regiões que tiveram contato com água (H_2O). Dessa forma, concluímos que os meteoritos marcianos são ótimos artefatos que possuem um grande valor agregado para pesquisas de ciências planetárias e que podem auxiliar no desenvolvimento de pesquisas na área de astrobiologia a partir dos registros físicos, químicos e mineralógicos presentes nesses materiais oriundos do planeta vermelho.

Os resultados do meteorito lunar 8277 a partir das técnicas utilizadas foram bastante favoráveis. Essencialmente, foi possível averiguar e traçar um perfil da composição estrutural do material analisado, de modo a ser plausível inferir que o mesmo

é um objeto geológico plurimineralítico, devido a apresentar nas imagens de μ CT uma densidade diferenciada entre os seus materiais brechados e também por causa da química diversificada entre a matriz e as brechas observada por meio da μ XRF. Ainda em nossas análises, foram detectados pela μ Raman indícios de um sulfato de cálcio hidratado, a gipsita, que na Terra é encontrada frequentemente em ambientes que possuam fluxos hidrotermais. Também foi detectado a siderita que é um carbonato de ferro que possui a capacidade dar origem a produtos orgânicos como compostos aromáticos alquilados e hidroxilados na presença de água. Desse modo, concluímos que as análises dos resultados obtidos a partir do meteorito lunar também apontam fatores relevantes para a Astrobiologia.

Com relação as amostras de condritos carbonáceos analisadas, essencialmente, obtivemos resultados satisfatórios em relação ao esperado. Fundamentalmente, devido a análise ter sido baseada a partir de uma caracterização não destrutiva, foi possível perceber em detalhes como a composição estrutural dos condritos no meteorito Allende e Murchison são formados majoritariamente por elementos, aparentemente mais leves que o Fe, tais como o Mg, Al, Si, S, K e Ca. Todavia, a estrutura de matriz de ambos os meteoritos demonstraram ser caracterizada por uma composição ferromagnésiana. Esses fatores podem dar indícios de como se formaram os condritos e os processos astrofísicos que ocorreram durante a evolução cósmica desses materiais. Além disso, é possível sugerir a partir dos resultados, das análises realizadas e dos fatores que são mencionados pela literatura, que esses meteoritos podem auxiliar na busca por respostas vinculadas a presença da água em nosso planeta, a partir da possível contribuição de condritos, o qual é um dos problemas clássicos da ciência planetária. Desse modo, também concluímos que os resultados obtidos e as informações que esses meteoritos carbonáceos podem nos fornecer ajudam no desenvolvimento de pesquisas de Astrobiologia e possui implicações no estudo da vida no sistema solar.

Com base em todos os nossos resultados obtidos e a partir das análises que foram feitas, concluímos que as técnicas de micro fluorescência de raios x (μ XRF), microtomografia computadorizada (μ CT) e a técnica de micro Raman (μ Raman) são instrumentações científicas que podem ser vistas como técnicas não destrutivas e relevantes para obtenção de informações em meteoritos sem que causar danos as amostras.

Finalmente, é possível dizer que essa pesquisa possui um caráter importantíssimo para área de ciências planetárias de modo a contribuir na busca e no entendimento dos meteoritos e da evolução de nosso sistema solar. Todos os dados gerados relacionados à composição química multielementar detectada em cada meteorito analisado, possui extrema relevância para astrobiologia e para outras áreas na astronomia. Além disso, concluímos que as informações guardadas nos registros geológicos dos meteoritos podem fornecer o subsídio necessário para o desenvolvimento de pesquisas relacionadas às condições de habitabilidade em Marte e com uma perspectiva de talvez gerar respostas sobre as nossas origens, evolução e também de como a vida poderia estar distribuída pela vasta imensidão do cosmo.

REFERÊNCIAS

- AGERKVIST, D. P. et al. Magnetic properties of Zagami and Nakhla. In: LUNAR AND PLANETARY SCIENCE CONFERENCE, 25., 1994, HOUSTON. [*Proceedings...*]. Houston, 1994.
- ALEXANDRE, T. L.; BUENO, M. I. M. S. Classification of some species, genera and families of plants by x-ray spectrometry. *X-ray Spectrometry*, [s. l.], v. 35, n.4, p. 257-260, 2006.
- ANJOS, M. J. Quantitative Analysis of Metals in Soil Using X-ray Fluorescence. *Spectrochimica Acta. B*, [s. l.], v. 55, p. 1189-1194, 2000.
- ARNOLD, J. R.; TESTA, J. P. J.; FRIEDMAN, P. J.; MAMBIC, G. X. Computed tomographic analysis of meteoric inclusions. *Science*, [s. l.], v. 219, n. 4583, p. 383-384, 1982.
- BERTIN, E. P. *Principles and practice of X-ray spectrometric analysis*. [S. l.]: Springer, 2012.
- BLUMBERG, B. S. The Nasa astrobiology institute: early history and organization. *Astrobiology*, [s. l.], v.3, n.3, p.463-470, 2003.
- BRUKER. *M4 Tornado Bruker*. Disponível em: <<https://www.bruker.com/pt/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/micro-xrf-and-txrf/m4-tornado/technical-details.html>>. Acesso em: 18 set. 2017
- BUCHER, K.; FREY, M. *Petrogenesis of metamorphic rocks*. 6. ed. Berlim: Springer-Verlag, 1994.
- CANUP, R. M.; KEVIN R. (Eds). Origin of the earth and moon. [Tucson]: University of Arizona Press, 2000. V. 30.
- CALZA, C. et al. Fluorescência de raios X aplicada à arqueometria. *Revista Brasileira de Arqueometria, Restauração e Conservação*, Rio de Janeiro, v.1, n. 6, p. 338 - 342, 2007.
- CARVALHO, M. S. et al. Preconcentration method for the determination of thorium in natural water by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, [s. l.], v. 253, n. 2, p. 253-256, 2002.
- CLARKE JR., R. S. et al. The Allende, Mexico, meteorite shower. *Smithsonian Contributions to the Earth Sciences*, [s. l.], v. 5, p. 1-53, 1971.
- COCKELL, C. S. *Astrobiology: understanding life in the universe*. [S. l.]: Wiley, 2015.

DAVIAU, K. C.; EHLMANN, A. J; MAYNE, R. G. An XRF Study of Meteorites. In: LUNAR AND PLANETARY SCIENCE CONFERENCE, 43., 2012, THE WOODLANDS. [Proceedings...]. Woodlands, 2012.

DAMINELI, A.; DAMINELI, D. S. C. Origins of life. *Estudos Avançados*, [s. l.], v. 21, n. 59, p. 263-284, 2007.

DEER, W. A. et al. *An introduction to the rock-forming minerals*. Hong Kong: Longman Scientific & Technical, 1992.

DIMANOV, A.; DRESEN, G. Rheology of synthetic anorthite-diopside aggregates: implications for ductile shear zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, [S.l.], v. 110, n. B07203, 2005.

DUNN, T. L. Classification of chondritic meteorites using micro-XRF spectroscopy. In: ANNUAL MEETING OF THE METEORITICAL SOCIETY, 78., 2015. [Proceedings...]. V. 50, p. A4–A28, 2015.

EHMANN, W. D. et al. Showalter Chemical Analyses of the Murchison and Lost City Meteorites. *Meteoritics*, v. 5, n. 3, p. 131-136, 1970.

LAKDAWALLA, E. *The Planetary Society*. Editor do Bill Nye, 25 de Outubro de 2013. Disponível em: <<http://www.planetary.org/blogs/emily-lakdawalla/2013/10251246-noachian-hesperian-amazonian.html>>. Acesso em: 30 jan. 2018.

FARIA, D. L.; AFONSO, M. C.; EDWARDS, H. G. M. Espectroscopia Raman: uma nova luz no estudo de bens culturais. *Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia*, São Paulo, v. 12, n. 4, 2002.

FEI, Y.; BERTKA, C. M. The interior of Mars. *Science*, [s. l.], v. 308, n. 5725, p. 1120-1121, 2005. DOI: 10.1126/science.1110531 .

FERNANDES, J. S.; APPOLONI, C. R.; FERNANDES, C.P. Determination of the Representative Elementary Volume for the study of sandstones and siltstones by X-Ray microtomography. *Mat. Res.*, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 662-670, 2012.

FISHBAUGH, K. E., et al. On the origin of gypsum in the Mars north polar region. *Journal of Geophysical Research: Planets*, [s. l.], v. 112, n. E07002, 2007. doi:10.1029/2006JE002862.

FORSTERITE X050090. Disponível em: <<http://ruff.info/forsterite/display=default/X050090>> . Acesso em: 01 jan. 2018.

FORSTERITE X050088. Disponível em: <<http://ruff.info/forsterite/display=default/X050088>> . Acesso em: 01 jan. 2018.

FUCHS, L. H.; JENSEN, K. J.; OLSEN, E. Mineralogy and composition of the Murchison meteorite. *Meteoritics*, [s. l.], v. 5, p. 198, 1970.

FUCHS, L. H.; OLSEN, E.; JENSEN, K. J, Smithsonian Contrib. *Earth Sci.*, v. 10, p. 1-38, 1973.

GALANTE, D. et al.(Org). *Astrobiologia: uma ciência emergente*. São Paulo: Tiknet, 2016. Disponível em: <<http://www.tikinet.com.br/iag/astrobiologia.pdf>>. Acessado em: 08 abr. 2017.

GAMA FILHO, H. S. G. *Análise multielementar em peças de ouro antigo utilizando fluorescência de raios X por dispersão em energia*. 2015. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física Armando Dias Tavares, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

GESSMANN, C. K.; RUBIE, D. C. The origin of the depletions of V, Cr and Mn in the mantles of the Earth and Moon. *Earth and Planetary Science Letters*, [s. l.], v. 184, n. 1,p. 95-107, 2000.

GIBSON, E. K., et al. Life on Mars: evaluation of the evidence within Martian meteorites ALH84001, Nakhla, and Shergotty. *Precambrian Research*, [s. l.], v. 106, n. 1-2, p. 15–34, 2001.

GIGANTE, G. E.; CESAREO, R. Non-destructive analysis of ancient metal alloys by in situ EDXRF transportable equipment. *Radiation Physics and Chemistry*, [s. l.], v. 51, n. 4-6. p. 689-700, 1998.

GLADMAN, B. Destination: Earth. Martian meteorite delivery. *Icarus*, [s. l.], v. 130, n. 2, p. 228–246, 1997.

GLADMAN, B. J. et al. The exchange of impact ejecta between terrestrial planets. *Science*, [s. l.], v. 271, n. 5254, p. 1378–1392, 1996.

GOODING, J. L. et al. Calcium carbonate and sulfate of possible extraterrestrial origin in the EETA 79001 meteorite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, [s. l.] v. 52, n. 4, p. 909-915, 1988.

GRAHAM, A. L. et al. *Catalogue of meteorites*. [London]: British Museum, 1985.

GREENBERG, J. M.; MENDOZA-GÓMEZ, C. X.; PIRRONELLO, V. (Eds.). *The Chemistry of life's origins*. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2012. V. 416.

GROSS, J.; FILIBERTO, J.; BELL, A. S. Water in the Martian interior: evidence for terrestrial MORB mantle-like volatile contents from hydroxyl-rich apatite in olivine-

phyric shergottite NWA 6234. *Earth and Planetary Science Letters*, [s. l.], v. 369-370, p. 120-128, 2013.

HIDAKA, H. et al. Cosmic-ray exposure histories of Martian meteorites studied from neutron capture reactions of Sm and Gd isotopes. *Earth and Planetary Science Letters*, [s. l.], v. 288, n. 3-4, p. 564-571, 2009.

HORNECK, G. et. al. Viable transfer of microorganisms in the Solar System and beyond. In: HORNECK, G. & BAUMSTARK-KHAN, C. (Ed.). *Astrobiology: the quest for the conditions of life*. Berlin: Springer, 2002. P. 57-76.

HOWARTH, G. H., et al. Two-stage polybaric formation of the new enriched, pyroxene-oikocrytic, lherzolitic shergottite, NWA 7397. *Meteoritics & Planetary Science*, [s. l.], v. 49, n. 10, p. 1812-1830, 2014.

HUMAYUN, M. et. al. Origin and age of the earliest Martian crust from meteorite NWA 7533. *Nature*, [s. l.], n. 503, p. 513-516, 2013. doi:10.1038/nature12764

HUTCHISON, R. *Meteorites: a petrologic, chemical and isotopic synthesis*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. Cambridge Planetary Science Series.

HUTCHINSON, I. B.; PARNELL, P.; EDWARDS, H. G. M.; JEHLICKA, J.; MARSHALL, C. P.; HARRIS, L. V. ; INGLEBY, R. Potential for analysis of carbonaceous matter on Mars using Raman spectroscopy. *Planetary and Space Science*, [s. l.], v. 103, p. 184-190, 2014.

ILMENITE R060149. Disponível em: <<http://rruff.info/ilmenite/display=default/R060149>> . Acesso em: 01 jan. 2018.

JAROSEWICH, E. Chemical analysis of the Murchison meteorite. *Meteoritics & Planetary Science*, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 49-52, 1971.

JAROSEWICH, E.; CLARKE, R.S.; JR & BARROWS, J.N. (Eds). 1987. The Allende Meteorite Reference Sample. *Smithsonian Contributions to the Earth Sciences*, [s. l.], n. 27, p. 49, 1987.

KELLER, L. P.; BUSECK, P. R. Calcic micas in the Allende meteorite: evidence for hydration reactions in the early solar nebula. *Science*, [s. l.], v. 252, n. 5008, p. 946-950, 1991.

KROT, A. N., KEIL, K. GOODRICH, C. A., SCOTT, R. D., WEISSBERG, N. K. Classification of meteorites. In: DAVIS, A. M. (Ed.). *Meteorites, comets and planets, treatise on geochemistry*. [S. l.]: Elsevier, 2005. P. 83-128.

LACHANCE, G. R.; CLAISSE, F. *Quantitative X-ray fluorescence analysis: theory and application*. New York: Wiley, 1995.

LANGENHOORST, F.; POIRIES, J. P. Anatomy of black veins in Zagami: clues to the formation of high-pressure phases. *Earth and Planetary Science Letters*, [s. l.], v. 184, n. 1, p. 37-55, 2000.

LIU, Y. et al. Rare-earth-element minerals in martian breccia meteorites NWA 7034 and 7533: implications for fluid–rock interaction in the martian crust. *Earth and Planetary Science Letters*, [s. l.], v. 451, p. 251-262, 2016.

LOSANO, F. et al. Computed tomography in the automotive field. Development of a new engine head case study. In: *COMPUTERIZED TOMOGRAPHY FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS AND IMAGE PROCESSING IN RADIOLOGY*, Berlin, 1999. *DGZfP Proceedings*. Berlin, 1999. Proceedings BB67-CD paper 10, p. 65-73.

LOVERING, J. F. et al. Murchison C2 Carbonaceous Chondrite and its inorganic composition. *Nature*, [s. l.], v. 230, n. 9, p. 18-20, 1971.

MACKAY, D. S. et al. Search for past life on Mars: possible relic biogenic activity in the martian meteorite ALH84001. *Science*, [s. l.], v. 273, n. 5277, p. 924–930, 1996.

MARTI, K, et al. Signatures of the Martian atmosphere in glass of the Zagami meteorite. *Science*, [s. l.], v. 267, n. 5206, p. 1981-1984, 1995.

MAYNE, R. G.; EHLMANN, A. J.; DAVIAU, K. C. Exploring XRF as a new technique for basic meteorite classifications. In: *ANNUAL MEETING OF THE METEORITICAL SOCIETY, 74., 2011. [Proceedings...]*. V.46, p. A150, 2011.

MCCOLLOM, T. M. Formation of meteorite hydrocarbons from thermal decomposition of siderite (FeCO₃). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, [s. l.], v. 67, n. 2, p. 311-317, 2003.

MCCOY T. J. et al. Zagami: Product of a two-stage magmatic history. *Geochim. Cosmochim. Acta*, [s. l.], v. 56, n. 9, p. 3571-3582, 1992.

MCCUBBIN, F. M. ; JONES, R. H. Extraterrestrial apatite: planetary geochemistry to astrobiology. *Elements*, [s. l.], v. 11, p.183-188, 2015.

MCSWEEN Jr., H. Y. What we learned about Mars from SNC meteorites. *Meteoritics*, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 757-779, 1994.

MCSWEEN Jr., H. Y. et al. Geochemical evidence for magmatic water within Mars from pyroxenes in the Shergotty meteorite. *Nature*, [s. l.], v. 409, p. 487-490, 2001.

MEES F. et al. Applications of X-ray computed tomography in the geosciences. *Geological Society*, London, Special Publications, v. 215, n. 1, p. 1-6, 2003.

METEORITICAL Bulletin. Meteoritics & Planetary Science. 2017.

METEORITICAL Bulletin. Iniciativa: The Meteoritical Society. Disponível em <<http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>> . Acesso em: 05 mar. 2017.

MILEIKOWSKY, C. Natural Transfer of Viable Microbes in Space: 1. From Mars to Earth and Earth to Mars. *Icarus*, [s. l.], v. 145, p.391–427, 2000.

NASCIMENTO-DIAS, B. L.; OLIVEIRA, D. F.; ANJOS, M. J. The utilization and multidisciplinary relevance of X-ray spectroscopy. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 39, n. 4, 2017.

NASDALA, L. U. T. Z. et al. Raman spectroscopy: analytical perspectives in mineralogical research. *Spectroscopic Methods in Mineralogy*, [s. l.], v. 6, chap. 7, p. 281-343, 2004.

NIMMO, F.; TANAKA, K. Early crustal evolution of mars. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, [s. l.], v. 33, p. 133-161, 2004.

NYQUIST, L. E. et. al. O. Ages and geologic histories of martian meteorites. *Space Science Reviews*, [s. l.], v. 96, n. 1-4, p. 105–164, 2001.

O'NEIL; H. St. C. The origin of the moon and the early history of the Earth - A chemical model. Part 2: The Earth. *Geochim. Cosmochim. Acta*, [s. l.], v. 55, n. 4, p. 1159-1172, 1991.

PAPIKE, J. J. et al. Silicate mineralogy of martian meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, [s. l.] v. 73, n. 24, p. 7443-7485, 2009.

PASSCHIER, C. W.; TROUW, R. A. J. *Microtectonics*. 2nd. ed. Berlin, Springer, 2005.

PATACA, L. C. M.; BORTOLETO, G. G.; BUENO, M. I. M. S. Determinação de arsênio em águas contaminadas usando fluorescência de raios-x por Energia dispersiva. *Química Nova*, São Paulo, v. 28, n. 4, n. 579-582, 2005.

PAULINO-LIMA, I. G.; LAGE, C. D. A. S. Astrobiologia: definição, aplicações, perspectivas e panorama brasileiro. *Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira*, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 14-21, 2010.

QUIRICO, E.; RAYNAL, P.; BOUROT-DENISE, M. Metamorphic grade of organic matter in six unequilibrated ordinary chondrites. *Meteoritics And Planetary Science*, [s. l.], v. 38, n. 5, p.795-811, 2003.

QUIRICO, E. B. et. al. Micro-Raman survey of 10 IDPs and 6 carbonaceous chondrites. *Planetary and Space Science*, [s. l.], v. 53, n. 14-15, p.1443–1448, 2005.

RAMSAY, J. G.; HUBER, M. I. *The techniques of modern structural geology, vol. 2.* [S. l.]: Academic Press, 1987.

RINGWOD, A. E.; KATO, T.; HIBBERSON, W.; WARE, N. High pressure geochemistry of Cr, V and Mn and implications for the origin of the Moon. *Nature*, [s. l.], v. 347, p.174-176, 1990.

RINGWOD, A. E.; KATO, T.; HIBBERSON, W.; WARE, N. Partitioning of Cr, V and Mn between mantles and cores of differentiated planetesimals: implications for giant impact hypotheses of lunar origin. *Icarus*, [S.l.], v. 89, p. 122-128, 1991.

RIOS, F. J. et al. Estudos por μ XRF-Sincrotron de fluidos mineralizadores detectados em minérios uraníferos, ferríferos e depósitos epitermais. *REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, v. 59, n. 4, p. 373- 377, 2006.

RODRIGUES, A. G; GALZERANI, J. C. Espectroscopias de infravermelho, Raman e de fotoluminescência: potencialidades e complementaridades. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 34, n. 4, p. 4309, 2012.

SAFRANOV, V. S.; RUSKOL, E. L. Formation and evolution of planets. In: BURKE, B. F. ; J. H. RAHE, J. H.; ROETTGER, E. E. (Eds.). *Planetary systems : formation, evolution and detection.* Dordrecht: Kluwer, 1994. P. 13-22.

SAITOVITCH, H. Cem anos da descoberta dos raios-X: caracterização estrutural de sólidos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v.17, n. 3, p. 203-208, 1995.

SALA, O. *Fundamentos da espectroscopia Raman e no infravermelho.* 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

SELIN, R.; GROSS, J.; FILIBERT, J. Water fluorine and chlorine fugacity ratios of the martian interior derived from apatite in gabbroic shergottite NWA 6963. In: LUNAR AND PLANETARY SCIENCE CONFERENCE, 45., 2014, The Woodlands. [*Proceedings...*]. Woodlands, 2014.

SOLOMON, S. C.et. al. New perspectives on ancient mars. *Science*, [s. l.], v. 307, n. 5713, p. 1214-1220, 2005. DOI: 10.1126/science.1101812, 2005.

SPEAR, F. S. *Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths*. Washington: Mineralogical Society of America, 1995. 799p.

SZABÓ, G. A. J.; BABINSKI, M.; TEIXEIRA, W. Rochas ígneas. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Eds.). *Decifrando a Terra*. 2. ed. [S.l.]: IBEP, 2010. P. 327-346.

TABACNIKS, M. H. *Os elementos da matéria*. 2005. Tese (Livre Docência em Interações Nucleares) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

TARTÈSE, R.; ANAND, M. Late delivery of chondritic hydrogen into the lunar mantle; insights from mare basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, [s. l.], v. 361, p. 480-486, 2013.

THOMAS-KEPRTA, K. L. et al. Origins of magnetite nanocrystals in Martian meteorite ALH84001. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, [s. l.], v. 73, n. 21, p. 6631-6677, 2009.

TREIMAN, A. H. Submicron magnetite grains and carbon compounds in Martian meteorite ALH84001: inorganic, abiotic formation by shock and thermal metamorphism. *Astrobiology*, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 369-392, 2003.

WANG, A. et al. Raman spectroscopy of Fe-Ti-Cr-oxides, case study: Martian meteorite EETA79001. *American Mineralogist*, [s. l.], v. 89, n. 5-6, p. 665-680, 2004.

WILSON, N. et al. New Martian Shergottite NWA 6963. In: LUNAR AND 388 PLANETARY SCIENCE CONFERENCE, 43., 2012. [*Proceedings...*]. [S. l.], 2012. P. 1696.

WOLF, S. F.; COMPTON, J. R.; GAGNON, C. J. Determination of 11 major and minor elements in chondritic meteorites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, [s. l.], v. 100, p. 276-281, 2012.

YAMINI, Y.; AMIRI, N.; KARIMI, M. Determination of trace elements in natural water using X-ray fluorescence spectrometry after preconcentration with powdered silica gel. *Journal of X-Ray Spectrometry*, [s. l.], v. 38, n. 6, p. 474-478, 2009.