



Observatório
Nacional

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

A MISSÃO ESPACIAL HAYABUSA I E USO DE MODELOS FOTOMÉTRICOS
PARA INTERPRETAÇÃO DE OBSERVAÇÕES DE PEQUENOS CORPOS DO
SISTEMA SOLAR

RODOLPHO GOMES DEGEN

RIO DE JANEIRO

2023

*À minha avó que precisou
suportar a saudade.*

Agradecimentos

Já passou dois anos desde que ingressei no Observatório Nacional. Hoje chega ao fim meu mestrado e eu jamais conseguiria chegar onde cheguei sem apoio e colaboração. Apresento aqui meus agradecimentos.

À minha querida avó **Hildete**, minha mãe **Micheline**, meu pai **Elden**, minha tia **Jacqueline**, minha irmã **Mariana** e todos os meus outros familiares que contribuíram para minha formação como cidadão;

Ao **Dr. Jorge Marcio Ferreira Carvano** por toda sua paciência, dedicação e incentivo nesse período em que me orientou;

Ao **Observatório Nacional** por toda a estrutura e conforto para minha formação e realização da minha pesquisa;

Aos **meus colegas do Observatório Nacional** por todos os bons momentos, pelos momentos de apoio mútuo e pelos momentos de fuga;

À **CAPES** por financiar minha pesquisa;

Ao **GACS** por me apresentar um caminho a ser trilhado.

A autossatisfação é inimiga do estudo. Se queremos realmente aprender alguma coisa, devemos começar por libertar-nos disso. Em relação a nós próprios devemos ser insaciáveis na aprendizagem e, em relação aos outros, insaciáveis no ensino.

- Mao Zedong

Rodolpho Gomes Degen

A MISSÃO ESPACIAL HAYABUSA I E USO DE MODELOS FOTOMÉTRICOS
PARA INTERPRETAÇÃO DE OBSERVAÇÕES DE PEQUENOS CORPOS DO
SISTEMA SOLAR

RESUMO

O estudo de asteroides e, em particular, asteroides próximos da Terra (NEA, da sigla em inglês Near Earth Asteroids) é fundamental para a compreensão da formação e evolução do Sistema Solar. A caracterização superficial desses corpos celestes é realizada principalmente a partir de técnicas de fotometria e espectroscopia, que permitem obter informações sobre sua mineralogia e estrutura física. Essas técnicas podem ser empregadas através de dados de telescópios terrestres, plataformas orbitais e sondas espaciais. Uma das missões espaciais mais notáveis foi a missão Hayabusa I da Agência Espacial Japonesa (JAXA), que estudou o asteroide (25143) Itokawa e proporcionou informações valiosas sobre as características físicas e composicionais desse asteroide.

As superfícies de corpos planetários possuem uma estrutura complicada, pois possuem diferentes minerais em sua composição, diferentes texturas e relevos. Há um conjunto de modelos matemáticos que se propõe a descrever a interação da luz com superfícies de materiais granulares e porosos como é o caso do regolito de asteroides. O modelo mais utilizado para interpretar dados fotométricos e espectroscópicos de asteroides e corpos do sistema solar sem atmosfera é o modelo de Hapke.

Neste trabalho, apresentamos uma revisão bibliográfica sobre a missão Hayabusa I e sobre as observações do asteroide (25143) Itokawa obtidas por telescópios terrestres e pela própria sonda espacial. Além disso, utilizamos dados de arquivo obtidos pela sonda para um estudo preliminar da aplicabilidade de modelos fotométricos para recuperar propriedades físicas do asteroide. O modelo que nós utilizamos foi o modelo de Hapke que leva em consideração o efeito de oposição por ocultamento de sombras, considerando o fator de porosidade e os efeitos da rugosidade macroscópica.

Palavras-chave: Ciências Planetárias, Revisão Bibliográfica, Modelo de Hapke.

Rodolpho Gomes Degen

THE HAYABUSA I SPACE MISSION AND THE USE OF PHOTOMETRIC
MODELS FOR INTERPRETING OBSERVATIONS OF SMALL BODIES IN THE
SOLAR SYSTEM.

ABSTRACT

The study of asteroids and, in particular, Near Earth Asteroids (NEA, the acronym in English Near Earth Asteroids) is fundamental for understanding the formation and evolution of the Solar System. The surface characterization of these celestial bodies is carried out mainly from photometry and spectroscopy techniques, which allow obtaining information about their mineralogy and physical structure. These techniques can be employed through data from terrestrial telescopes, orbital platforms and space probes. One of the most notable space missions was the Hayabusa I mission of the Japanese Space Agency (JAXA), which studied the asteroid (25143) Itokawa and provided valuable information about the physical and compositional characteristics of this asteroid.

The surfaces of planetary bodies have a complicated structure, as they have different minerals in their composition, different textures and reliefs. There is a set of mathematical models that propose to describe the interaction of light with surfaces of granular and porous materials such as the regolith of asteroids. The most widely used model for interpreting photometric and spectroscopic data from asteroids and bodies in the solar system without an atmosphere is the Hapke model.

In this work, we present a bibliographic review on the Hayabusa I mission and on the observations of the asteroid (25143) Itokawa obtained by terrestrial telescopes and by the space probe itself. In addition, we used archival data obtained by the spacecraft for a preliminary study of the applicability of photometric models to recover physical properties of the asteroid. The model we used was the Hapke model that takes into account the effect of shadow occultation, considering the porosity factor and the effects of macroscopic roughness.

Keyword: Planetary Sciences, Literature Review, Hapke Model.

Lista de Figuras

1.1	Histograma do número de asteroides pela distribuição do semi-eixo maior evidenciando as lacunas de Kirkwood. Cada um dos indicativos 'gap' representam falhas na distribuição dos asteroides devido a ressonâncias. (FERRAZ-MELLO, 1994)	25
1.2	Distribuição dos grupos de NEOs em função do semi-eixo maior e da excentricidade, bem como as ressonâncias ν_6 e 3:1 e outros objetos do sistema solar. (GREENSTREET <i>et al.</i> , 2012)	26
1.3	Localização das 7 sub-classes de GAFFEY <i>et al.</i> (1993). Gráfico do centro da Banda I ($1\mu\text{m}$) em relação a razão entre as áreas da Banda II($2\mu\text{m}$) e Banda I ($1\mu\text{m}$). (GAFFEY <i>et al.</i> , 1993)	29
1.4	Diagrama da classificação de meteoritos. (WEISBERG <i>et al.</i> , 2006)	30
2.1	Imagens em escala de diversos pequenos corpos (asteroides e cometas) visitados por missões espaciais até o ano de 2015 e em escala aproximada de tamanho. Se observa uma grande diversidade de tamanho, forma e características de superfície. O maior corpo na imagem é o asteroide Lutetia de 100 km observado pela missão Rosetta da ESA. O menor objeto, dificilmente visível na imagem, é o Itokawa de 320 m de diâmetro visitado pela missão Hayabusa I da JAXA. (NESVORNÝ <i>et al.</i> , 2015)	42
2.2	A disposição dos instrumentos na sonda Hayabusa I. (LONGOBARDO, 2021)	45
2.3	Foto do proto-modelo do AMICA. (Imagem publicada no site da JAXA)	46
2.4	Transmitância dos sete filtros do AMICA. As sete bandas observadas e evidenciadas são quase equivalentes as bandas ECAS. É possível observar também uma outra banda em comprimentos de onda acima de 1150 nm, porém o CCD do AMICA não tem sensibilidade para comprimentos de onda tão grandes. (NAKAMURA <i>et al.</i> , 2001)	47
2.5	Eficiência quântica do CCD do AMICA em função do comprimento de onda. Há três diferentes curvas correspondentes a três lotes diferentes de CCDs, a utilizada no AMICA é a curva pontilhada. (NAKAMURA <i>et al.</i> , 2001)	48

2.6	Fotografia do NIRS. (Imagem publicada no site da JAXA)	49
2.7	Fotografia do LIDAR. (BARNOUIN-JHA <i>et al.</i> , 2008)	49
2.8	Modelo protótipo do tubo coletor presente na Hayabusa I. (Imagem publicada no site da JAXA)	50
2.9	Fotografia do aterrissador MINERVA. (YOSHIMITSU <i>et al.</i> , 2006)	51
2.10	Capsula de reentrada da sonda espacial Hayabusa no deserto de Woomera, Austrália. (Imagem publicada no site da JAXA)	53
3.1	Lista detalhada das observações fotométricas durante a campanha observacional do asteroide (25143) Itokawa. (KAASALAINEN <i>et al.</i> , 2003)	57
3.2	A posição do asteroide (25143) Itokawa referente a eclíptica durante as observações fotométricas da campanha observacional de 2001. (ISHIGURO <i>et al.</i> , 2003)	57
3.3	(Gráfico de cima) Uma combinação dos espectros do asteroide (25143) Itokawa a partir de observações no visível (quadrados fechados), entre 0,5 e 0,9 μm e no infravermelho próximo (círculos abertos). A linha tracejada representa a possível contribuição de nanofases de ferro (npFe ⁰) para uma crescente discrepância para maiores comprimentos de onda entre os espectros de asteroides e meteoritos sugerido por PIETERS <i>et al.</i> (2000). e a linha lisa representa a média dos espectros dos condritos ordinários (GAFFEY, 1976). (Gráfico de baixo) O espectro desavermelhado do asteroide (25143) Itokawa após a subtração da suposta contribuição da curva de npFe ⁰ e os espectros da média dos condritos ordinários H, L e LL (GAFFEY, 1976). Todos os espectros foram normalizados em 0,55 μm .(BINZEL <i>et al.</i> , 2001)	59
3.4	Gráfico da razão entre a área das bandas e a razão $ol/(ol+pyx)$ normalizado para os meteoritos estudados. Há duas linhas, a mais extensa representa a equação de CLOUTIS <i>et al.</i> (1986) e a segunda a equação de BURBINE <i>et al.</i> (2003). (BURBINE <i>et al.</i> , 2003)	60
3.5	Diagrama cor-cor para o (25143) Itokawa a partir das observações fotométricas e a comparação com os asteroides que foram observados durante o <i>survey</i> 2MASS. (ISHIGURO <i>et al.</i> , 2003)	61

3.6	Resultado do espalhamento simples a partir do modelo de Hapke para diferentes filtros. Em todos os filtros é possível observar que há um espalhamento para frente. (A) Os resultados do filtro U são apresentados por uma linha sólida; o B são em uma linha tracejada curta; os resultados do filtro V em uma linha sólida mais grossa; os resultados do filtro R são apresentados por uma linha tracejada mais longa. (B) Os resultados do filtro I são apresentados por uma linha sólida; os resultados do filtro H por uma linha tracejada curta; os resultados do filtro J por uma linha sólida mais grossa e os resultados do filtro K são apresentados por uma linha tracejada longa. (LEDERER <i>et al.</i> , 2008)	65
3.7	Representação da porosidade estimada a partir do modelo de Hapke para os filtros B (linha com círculos abertos), V (linha com diamantes), R (linha com quadrados) e I (linhas com 'x'). Os autores também apresentam as porosidades de outros asteroides: Eros (linha tracejada), Gaspra (linha alternada entre traço e ponto), Ida e a média dos tipo-S (linha alternada entre um traço e dois pontos). Além de dois resultados distintos para amostras da Lua, as linhas com diamantes sólidos e a linha com círculos sólidos. (LEDERER <i>et al.</i> , 2008)	66
3.8	Curva de luz composta do Asteroide (25143) Itokawa. O período estimado foi de 12,13 horas. A linha sólida é o ajuste da análise de Fourier. (DERMAWAN <i>et al.</i> , 2002)	67
3.9	A curva de fase solar do asteroide (25143) Itokawa. Os losangos são as magnitudes da curva de fase no filtro R e os asteriscos são no filtro V. (KAASALAINEN <i>et al.</i> , 2003)	68
3.10	Modelos de forma do asteroide (25143) Itokawa. a) <i>rough model</i> e b) <i>smooth model</i> de OSTRO <i>et al.</i> (2005).	69
3.11	Fotografia captura pelo instrumento AMICA enviada pela sonda espacial Hayabusa quando se aproximava do asteroide (25143) Itokawa em 2005. Divulgação feita pela JAXA.	71
3.12	Modelo de forma do asteroide (25143) Itokawa desenvolvido por Gaskell.	72
3.13	(A) Reflectância no comprimento de onda de $0,952 \mu\text{m}$ do asteroide (25143) Itokawa em função do ângulo de fase solar. As caixas representam os <i>top envelope</i> para cada intervalo de $0,2^\circ$ de ângulo de fase. Os <i>top envelope</i> são os dados que possuem maior razão sinal ruído e foram utilizados para gerar o modelo fotométrico. (B) Razão da reflectância em $1,565 \mu\text{m}$ em relação a $0,952 \mu\text{m}$ em função do ângulo de fase. Tanto em (A) quanto em (B), há uma comparação com o asteroide (433) Eros. (ABE <i>et al.</i> , 2006)	74

3.14	Espectros de reflectância observados pelos NIRS em 21 de setembro de 2005 (círculos sólidos) e 8 de outubro de 2005 (triângulos sólidos). O contínuo de fundo (curvas pontilhadas) é subtraído das curvas de reflectância e são gerados novamente (círculos abertos e triângulos abertos) com o espectro do meteorito condrito ordinário LL5 Alta'ameen (linha sólida). (ABE <i>et al.</i> , 2006)	75
3.15	Comparação das forças de absorção em 1,25 μm e 1,05 μm de espectros médios do asteroide (25143) Itokawa obtidos pelo NIRS em 21 de setembro e 8 de outubro de 2005 em comparação com o asteroide (433) Eros, amostras de condritos ordinários, amostras de acondritos primitivos e amostras de misturas de minerais contendo ortopiroxênio, olivina e plagioclásio. (ABE <i>et al.</i> , 2006)	76
3.16	Parâmetros livres de Hapke em função do comprimento de onda. Acima, os parâmetros são (da esquerda para a direita): albedo de espalhamento simples e o parâmetro de assimetria. Abaixo, os parâmetros são (da esquerda para a direita): a amplitude do efeito de oposição e a largura do efeito de oposição. Todos os gráficos possuem uma comparação direta com os resultados para o asteroide (443) Eros apresentados em CLARK <i>et al.</i> (2002). (KITAZATO <i>et al.</i> , 2008)	78
3.17	O albedo teórico de espalhamento simples para os condritos H, L e LL em função do tamanho médio dos grãos no comprimento de onda de 1,40 μm . As linhas tracejadas são os valores ajustados de albedo de espalhamento simples para o asteroide (25143) Itokawa, 0,37 em 1,30 μm e 0,42 em 1,58 μm . (KITAZATO <i>et al.</i> , 2008)	79
3.18	(A) a média de 'Fa' e 'Fs' em todas as 38 partículas oriundas do segundo método de remoção. (B) A distribuição de 'Fa' nos cristais de olivina nas 29 partículas que continham olivina em sua composição. (NAKAMURA <i>et al.</i> , 2011)	81
3.19	Imagens a partir das técnicas BF-STEAM e HAADF-STEM, respectivamente, da borda de uma amostra de: A e B - amostra de olivina; C e D - amostra de um piroxênio E e F - amostra de um plagioclásio. As bordas desses minerais são divididas em três zonas com base em sua textura: zona I, camada superficial amorfa contendo npFe; zona II, área parcialmente amorfizada; zona III, minerais de substrato cristalino. A zona II de olivina e piroxênio apresentam também nano partículas de ferro abundante. Os limites entre as zonas são indicados por curvas pontilhadas. (NOGUCHI <i>et al.</i> , 2011)	82

4.1	Espectros sintéticos não normalizados modelados a partir do modelo de Hapke. Na primeira coluna: a figura apresenta espectros modelados a partir de diferentes valores do maior tamanho das partículas (aL). Na segunda coluna: a figura de cima são espectros modelados a partir de diferentes valores do menor tamanho das partículas (aS) e abaixo para diferentes valores de volume de ferro (volFe). Na terceira coluna: a figura de cima são espectros modelados a partir de diferentes valores do fator de preenchimento (ϕ) e abaixo são espectros para valores diferentes do parâmetro de rugosidade macroscópica ($\bar{\theta}$).	92
4.2	Espectros sintéticos normalizados modelados a partir do modelo de Hapke. Na primeira coluna: a figura apresenta espectros modelados a partir de diferentes valores do maior tamanho das partículas (aL). Na segunda coluna: a figura de cima são espectros modelados a partir de diferentes valores do menor tamanho das partículas (aS) e abaixo para diferentes valores de volume de ferro (volFe). Na terceira coluna: a figura de cima são espectros modelados a partir de diferentes valores do fator de preenchimento (ϕ) e abaixo são espectros para valores diferentes do parâmetro de rugosidade macroscópica ($\bar{\theta}$).	94
4.3	Curvas de fase sintéticas normalizadas na oposição modeladas a partir do modelo de Hapke. Na primeira coluna: a figura apresenta curvas de fase modeladas a partir de diferentes valores do maior tamanho das partículas (aL). Na segunda coluna: a figura de cima são curvas de fase modeladas a partir de diferentes valores do menor tamanho das partículas (aS) e abaixo para diferentes valores de volume de ferro (volFe). Na terceira coluna: a figura de cima são curvas de fase modeladas a partir de diferentes valores do fator de preenchimento (ϕ) e abaixo são curvas de fase para valores diferentes do parâmetro de rugosidade macroscópica ($\bar{\theta}$).	95
4.4	Diâmetro efetivo das partículas em função de diferentes valores do fator de preenchimento (ϕ). O valor do diâmetro efetivo das partículas é a média entre todos os espectros para cada um dos valores do fator de preenchimento, é possível observar uma clara dependência linear entre esses dois parâmetros.	98
4.5	Distribuição do diâmetro efetivo das partículas das amostras do espectro do asteroide (25143) Itokawa para seis valores diferentes do fator de preenchimento (ϕ). Há uma descentralização da moda do diâmetro efetivo e um aumento do diâmetro efetivo de modo geral com o aumento do valor de ϕ	99

4.6	Volume de ferro em função de diferentes valores do fator de preenchimento (ϕ). O valor do volume de ferro das partículas é a média entre todos os espectros para cada um dos valores do fator de preenchimento, é possível observar que não parece existir qualquer dependência entre esses dois parâmetros.	100
4.7	Mapa de cor da superfície do asteroide (25143) Itokawa referente ao volume de ferro das partículas de todos os espectros ajustados da amostra para o intervalo de distância de 17 km e 18 km entre a sonda espacial Hayabusa e o asteroide (25143) Itokawa.	101
A.1	Hideo Itokawa montando o <i>Pencil Rocket</i> . (MATOGAWA, 2015)	104

Lista de Tabelas

2.1	Missões Espaciais para Pequenos Corpos do Sistema Solar	44
3.1	Resumo dos valores dos parâmetros de Hapke para os filtros U, B, V e R. (LEDERER <i>et al.</i> , 2008)	63
3.2	Resumo dos valores dos parâmetros de Hapke para os filtros I, H, J e K. (LEDERER <i>et al.</i> , 2008)	64

Sumário

Lista de Figuras	13
Lista de Tabelas	19
1 Introdução	23
1.1 Asteroides	24
1.1.1 NEAs	25
1.2 Caracterização Superficial de Asteroides	27
1.2.1 Fotometria, Espectrofotometria e Espectroscopia	27
1.2.2 Taxonomia de asteroides	28
1.2.3 Meteoritos e a busca por análogos	29
1.3 Modelos fotométricos	32
1.3.1 Modelo de Hapke	32
1.3.2 Algumas correções do modelo	34
1.3.3 Problemas com o modelo de Hapke	39
2 Sonda espacial Hayabusa	41
2.1 Missões Espaciais para pequenos corpos	41
2.2 Histórico e planejamento da missão Hayabusa	42
2.3 Instrumentos	44
2.3.1 AMICA	45
2.3.2 NIRS	46
2.3.3 LIDAR	47
2.3.4 XRS	47
2.3.5 Mecanismo de coleta de amostra	48
2.3.6 MINERVA	49
2.4 A missão espacial Hayabusa	50
3 O asteroide (25143) Itokawa	55
3.1 Campanha Observacional de 2001	56
3.1.1 Classe espectral e mineralogia	56
3.1.2 Período de rotação e Modelo de forma	66

3.1.3	Resumo dos resultados oriundos das observações terrestres	68
3.2	Resultados da missão Hayabusa	70
3.2.1	Massa, tamanho e superfície de Itokawa	70
3.2.2	A Mineralogia do asteroide (25143) Itokawa	73
3.2.3	Resumo dos resultados oriundos da missão Hayabusa	83
3.3	Comparações entre os resultados das observações terrestres em relação aos dados da missão Hayabusa I	84
4	Aplicação do modelo de Hapke aos dados da Hayabusa/NIRS	87
4.1	Modelo utilizado	88
4.1.1	Limitações do modelo	91
4.2	Testes do Modelo	91
4.3	Seleção das amostras	97
4.4	Resultados e Discussão	97
	O resolutivo programa espacial japonês	102
	A O resolutivo programa espacial japonês	103
	Referências Bibliográficas	107

Capítulo 1

Introdução

O trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre os resultados obtidos acerca do asteroide (25143) Itokawa utilizando observatórios terrestres e a partir dos instrumentos da sonda espacial Hayabusa I. Apresentamos também a utilização de dados de arquivo do instrumento NIRS para um estudo preliminar aplicando o modelo fotométrico de Hapke utilizando como parâmetros apenas propriedades físicas. A presente dissertação de mestrado foi organizada da seguinte forma: o primeiro capítulo é dividido em três seções: a primeira versa sobre os conhecimentos basilares sobre asteroides, adicionando um foco nos NEAs (Near Earth Asteroids - asteroides próximos da Terra); a segunda apresenta como é feita a caracterização superficial desses corpos, quais as técnicas utilizadas e como os dividimos em grupos taxonômicos, bem como uma pequena introdução da busca por análogos meteoríticos. Além disso, na última seção do primeiro capítulo há também uma breve introdução aos modelos fotométricos de Hapke. O segundo capítulo descreve a missão espacial Hayabusa, seus objetivos, uma descrição dos instrumentos científicos utilizados e um balanço sobre o sucesso e a importância da missão para o desenvolvimento científico e tecnológico da exploração espacial de pequenos corpos do sistema solar. O terceiro capítulo é dividido em três seções: a primeira é uma revisão bibliográfica que abrange os resultados das observações terrestres acerca da classe espectral e mineralogia, o período de rotação e o modelo de forma do asteroide Itokawa; a segunda descreve os resultados da missão Hayabusa em relação ao asteroide (25143) Itokawa, apresentando informações sobre a massa, tamanho e superfície do asteroide, bem como sua mineralogia; na última seção nós realizamos uma breve comparação entre os resultados oriundos das observações terrestres e os resultados utilizando os dados da missão Hayabusa. Por fim, no último capítulo é apresentado um estudo sobre as possibilidades de utilizar uma versão do modelo de Hapke baseada apenas em parâmetros físicos utilizando os dados do instrumento NIRS (Near-infrared spectrophotometry - espectrômetro de infravermelho próximo) da Hayabusa. Apresentamos as tentativas iniciais e algumas conclusões que podemos obter, bem como as perspectivas futuras do trabalho.

1.1 Asteroides

Os Asteroides são corpos remanescentes da formação do Sistema Solar, que são classificados dentro de uma categoria específica denominada "Pequenos Corpos do Sistema Solar". De acordo com a IAU, os pequenos corpos são objetos do Sistema Solar que não são categorizados como planetas ou planetas-anões. Planetas são aqueles objetos em equilíbrio hidrostático, que orbitam o Sol e são o objeto dominante na vizinhança de sua órbita. Planetas-anões, aqueles que orbitam o Sol, estão em equilíbrio hidrostático, contudo não são dominantes em sua vizinhança orbital assim como os planetas. A pesquisa sobre asteroides, bem como uma melhor compreensão da sua distribuição, evolução e dos processos que eles sofrem, fornece vínculos importantes para os modelos de formação e evolução do Sistema Solar.

Há mais de 1 milhão e 200 mil pequenos corpos descobertos, sendo a maior parte asteroides. A grande maioria desses pequenos corpos se concentra entre as órbitas de Marte e Júpiter. Essa região é conhecida como Cinturão Principal de Asteroides (Cinturão Principal ou Cinturão de Asteroides também são nomes comuns) cujos limites são adotados como aproximadamente 2,0 e 3,5 UA (UA é uma sigla para Unidade Astronômica e é aproximadamente a média da distância entre a Terra e o Sol, cerca de 150 bilhões de metros). Os asteroides podem ser subdivididos de acordo com suas características orbitais, e em particular com respeito ao semi-eixo maior de suas órbitas. Os Asteroides do cinturão principal são chamados de MBA (Main Belt Asteroids ou asteroides do cinturão principal em português) podendo ser divididos ainda por zonas internas do cinturão: asteroides do cinturão principal interno ou *inner main-belt* ($a < 2,5$ UA); asteroides do cinturão principal intermediário ou *middle main-belt* ($2,5 \text{ AU} < a < 2,82$ UA); asteroides do cinturão principal externo ou *outer main-belt* ($a > 2,82$ UA). Essas zonas não são escolhidas arbitrariamente, mas sim definidas a partir das falhas de Kirkwood que estão relacionadas com às ressonâncias de movimento médio com Júpiter. A distribuição dos asteroides pode ser observadas na figura 1.1.

O Cinturão Principal de Asteroides não é o único repositório de pequenos corpos do Sistema Solar, há os Troianos de Júpiter, o Cinturão transneptuniano, a Nuvem de Oort, bem como os Centauros e as famílias dinâmicas de cometas. Por fim, há uma população de pequenos corpos em órbitas instáveis que cruzam as órbitas dos planetas internos, denominados NEOs (Near Earth Asteroids). Estes serão discutidos em mais detalhes na próxima seção.

Esta seção introdutória foi dividida em três partes. A primeira parte é uma apresentação sobre nossos conhecimentos acerca dos NEAs, os asteroides próximos da Terra. A segunda parte é uma introdução sobre a caracterização da superfície de asteroides, quais são as técnicas empregadas e os métodos adotados para estudar mineralógica e estatisticamente esses pequenos corpos. Por fim, na terceira e última parte há uma

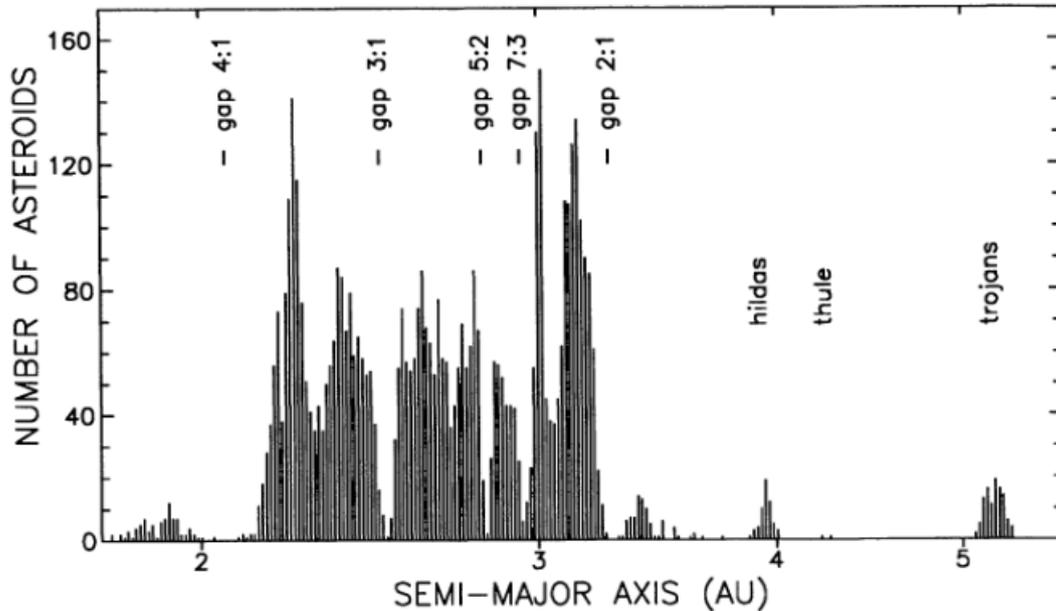


Figura 1.1: Histograma do número de asteroides pela distribuição do semi-eixo maior evidenciando as lacunas de Kirkwood. Cada um dos indicativos 'gap' representam falhas na distribuição dos asteroides devido a ressonâncias. (FERRAZ-MELLO, 1994)

introdução ao modelo fotométrico de Hapke.

1.1.1 NEAs

Os Near Earth Objects ou só NEOs (na tradução do inglês, objetos próximos à Terra) incluem qualquer corpo celeste cuja distância periélica seja menor ou igual a 1,3 UA ($q \leq 1.3\text{UA}$). Isso inclui os cometas próximos à Terra, chamamos-os de Near Earth Comets (NECs) e os diferentes grupos de asteroides, Near Earth Asteroids (NEAs). Esse último sendo especialmente importante para a presente dissertação de mestrado.

Os NEAs são subdivididos conforme os elementos orbitais, semi-eixo maior (a), distância do periélio (q) e distância do afélio (Q), em quatro grupos: Amors ($1,0167 < q \leq 1,3 \text{ UA}$), Apollos ($a \geq 1,0 \text{ UA}$; $q \leq 1,0167 \text{ UA}$), Atens ($a < 1,0 \text{ UA}$, $Q > 0,983 \text{ UA}$) (MORBIDELLI *et al.*, 2002). Mais recentemente foram criados mais grupos para integrar os objetos cujas órbitas são interiores a órbita terrestre e, por conta disso, mais difíceis de serem descobertos e observados. São eles: os Atiras ($0,718 < Q < 0,983 \text{ UA}$), os Vatiras ($0,307 < Q < 0,718 \text{ UA}$) e os Vulcanoids ($Q < 0,307 \text{ UA}$). Esses objetos são chamados genericamente de Interior-Earth Objects (IEOs) (GREENSTREET *et al.*, 2012). Para uma melhor visualização dos subgrupos dos NEAs veja a figura 1.2

As órbitas dos NEOs são instáveis em escalas de tempo muito menores que a idade do Sistema Solar, portanto é virtualmente impossível que eles tenham se formados nessas regiões. Os NEOs são objetos migrantes da região do cinturão principal dos asteroides, inseridas nas regiões internas do Sistema solar por mecanismos dinâmicos

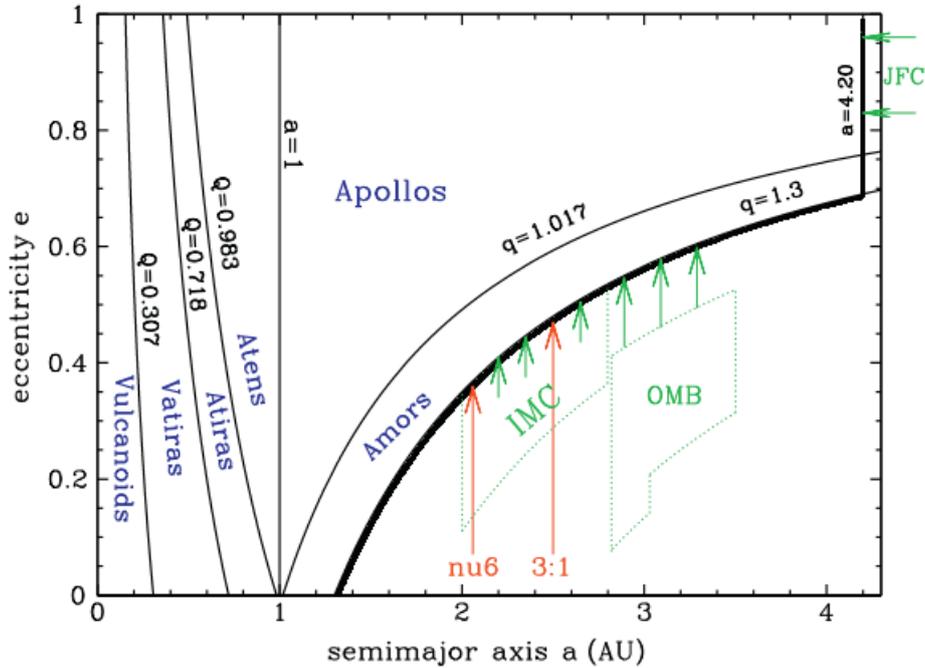


Figura 1.2: Distribuição dos grupos de NEOs em função do semi-eixo maior e da excentricidade, bem como as ressonâncias ν_6 e 3:1 e outros objetos do sistema solar. (GREENSTREET *et al.*, 2012)

(MORBIDELLI *et al.*, 2002).

Os NEOs são os objetos mais acessíveis para o desenvolvimento da caracterização das propriedades físicas de corpos do Sistema Solar. Tanto pela própria proximidade com os telescópios terrestres, facilitando as observações, como sendo os maiores responsáveis pela queda de meteoritos na Terra, possibilitando o estudo dos meteoritos em laboratórios (BARUCCI *et al.*, 2011). Além disso, esses objetos são muito acessíveis também para missões espaciais focadas em pequenos corpos, podendo ser até, inclusive, mais acessíveis que a Lua (PEROZZI *et al.*, 2001).

Ademais de todos os benefícios para o desenvolvimento científico da nossa astronomia, os pequenos corpos nas cercanias da Terra também podem apresentar um potencial perigo para a humanidade. Os Objetos Potencialmente Perigosos, os PHOs (Potentially Hazardous Objects do inglês), são aqueles objetos que podem fazer aproximações suficientemente próximas à Terra e são grandes o suficiente para causar danos significativos caso eventualmente colidam com nosso planeta. Esses objetos são definidos como tendo uma distância mínima de interseção entre sua órbita e a da Terra como de menos de 0,05 UA e uma magnitude absoluta de pelo menos 22. A maior parte desses objetos são asteroides, chamados de Asteroides Potencialmente Perigosos, PHAs (Potentially Hazardous Asteroides do inglês). São conhecidos, até a escrita da presente dissertação, mais de 2300 desses objetos.

1.2 Caracterização Superficial de Asteroides

A investigação acerca dos asteroides é fundamental para compreender a evolução química e física do Sistema Solar. Os asteroides não possuem luz própria no visível e, portanto, toda a luz que podemos medir é originada no sol e apenas refletida na superfície desses corpos. Essa intensidade da luz refletida de sua superfície é medida a partir de detectores de fótons. Atualmente o tipo mais comum desses detectores são os CCDs. Há duas técnicas fundamentais para o estudo e a análise das propriedades dos asteroides e da análise da composição superficial, essas técnicas são a fotometria e a espectroscopia.

Neste capítulo veremos um pouco sobre as técnicas para a análise das características físicas dos asteroides, a fotometria e a espectroscopia. A seguir, iremos apresentar uma das principais tentativas de agrupar asteroides que possuem uma mesma mineralogia provável e histórias térmicas comuns, a classificação taxonômica de asteroides. Por fim, abordaremos sobre a classificação de meteoritos, bem como a tentativa da busca por análogos entre asteroides e meteoritos.

1.2.1 Fotometria, Espectrofotometria e Espectroscopia

A fotometria e espectroscopia são duas das técnicas mais utilizadas e mais relevante para o estudo dos corpos celestes atualmente. Para o caso da investigação dos asteroides, a fotometria mede a intensidade da luz refletida em uma banda de observação. A fotometria é uma ferramenta que pode servir para, a partir de diferentes configurações da geometria da observação, ser usada para calcular o período de rotação, a curva de fase solar e até a forma dos asteroides. Medidas fotométricas também são necessárias como dados auxiliares na determinação de diâmetros e albedos.

A melhor forma atualmente de inferir sobre a composição superficial de asteroides é através da obtenção do espectro de reflexão em um intervalo de comprimentos de onda. Há duas técnicas principais para a obtenção desses espectros de reflexão: a espectrofotometria e a espectroscopia.

A espectrofotometria aplicada para asteroides é a utilização de fotometria de banda estreita em diversos filtros, gerando medidas discretas da intensidade da radiação nos intervalo de comprimentos de onda cobertos pelo filtro. Por sua vez, a espectroscopia utiliza instrumentos chamados espectrógrafos que utilizam algum elemento dispersor para espalhar radiação de um fonte em comprimentos de onda sobre um detector, gerando uma distribuição espectral de energia dentro de um intervalo de comprimentos de onda.

A espectrofotometria e a espectroscopia são muito utilizadas na investigação da composição superfície de um asteroide. Uma maneira de se tentar determinar a composição de asteroides é a obtenção de seu espectro e a comparação direta com os espectros de reflexão de meteoritos e minerais medidos em laboratório. Muito dos minerais encontrados em meteoritos possuem bandas de absorção características na região do infra-vermelho

próximo, são exemplos a banda centrada em $1\mu\text{m}$ (comumente chamada de Banda I) devido à presença de olivina e piroxênio e a banda centrada em $2\mu\text{m}$ (comumente chamada de Banda II) devido à presença de piroxênio.

1.2.2 Taxonomia de asteroides

As taxonomias de asteroides são tentativas puramente empíricas de agrupar objetos que compartilham das mesmas propriedades observacionais. Essas taxonomias independem de interpretações mineralógicas específicas.

Diversos trabalhos foram desenvolvidos para elaborar taxonomias de asteroides. São exemplos as taxonomias de CMZ (CHAPMAN *et al.*, 1975), de Bowell (BOWELL *et al.*, 1978), de Tholen (THOLEN, 1984), de Barucci (BARUCCI *et al.*, 1987), de Tedesco (TEDESCO *et al.*, 1989), de Howell (HOWELL *et al.*, 1994) e de Bus (BUS, 1999). Apesar de existirem diversas taxonomias distintas, incluindo até números diferentes na quantidade de classes de asteroides, as designações das classes costumam manter uma continuidade. É importante ressaltar que não há uma equivalência perfeita entre classes de asteroides e não é incomum encontrar asteroides com classificações diferentes entre as taxonomias.

Os asteroides ditos como tipo-S são preponderantes na parte interna do cinturão principal. A letra "S" foi adotada como sendo oriunda de "silicato", já que uma das características observadas no espectro desse tipo de asteroide é a dominância das assinaturas dos silicatos piroxênio e olivina. Inicialmente, essa classe foi descrita por CHAPMAN *et al.* (1975) como aqueles asteroides cujos albedos eram maiores que 9%, apresentavam bandas de absorção em $2\mu\text{m}$, devido à presença de olivinas e piroxênios, e possuíam cores avermelhadas no visível. Porém, como o conjunto de asteroides de classe espectral S é grande e apresentam uma variação considerável em seus parâmetros, muitos trabalhos posteriores propuseram uma subdivisão dessa classe taxonômica.

Há também algumas taxonomias que buscam agrupar os asteroides a partir de parâmetros mais diretamente relacionados com a mineralogia, como no caso da taxonomia de GAFFEY *et al.* (1993). Os autores utilizaram a intensidade da Banda I ($1\mu\text{m}$) e a razão entre as áreas da Banda II ($2\mu\text{m}$) e Banda I ($1\mu\text{m}$) para subdividir a classe taxonômica S. Sendo assim, os autores criaram sete sub-classes, indo de S(I) até S(VII), cuja distribuição no espaço de parâmetros é mostrada na figura 1.3. A posição dessas classes no espaço de fase foi então comparada com medidas análogas de espectros de laboratório de minerais presentes em meteoritos.

O que se observa é que dentre dessas subclasses, os asteroides mais abundantes são os do tipo S(IV) de Gaffey, que coincide com os parâmetros de meteoritos condritos ordinários.

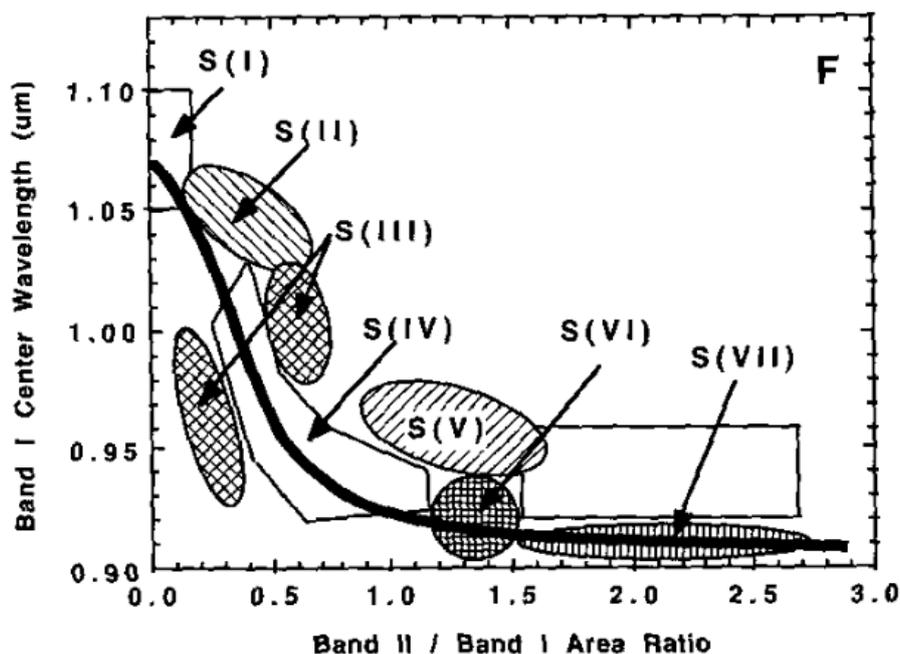


Figura 1.3: Localização das 7 sub-classes de GAFFEY *et al.* (1993). Gráfico do centro da Banda I ($1\mu\text{m}$) em relação a razão entre as áreas da Banda II ($2\mu\text{m}$) e Banda I ($1\mu\text{m}$). (GAFFEY *et al.*, 1993)

1.2.3 Meteoritos e a busca por análogos

Desde de muito antes de sermos capazes de observar os pequenos corpos do Sistema Solar utilizando espelhos e lentes, houve diversos relatos históricos sobre rochas caindo do céu. Até o século XIX, dentro da academia científica, a queda dessas rochas não era associada a uma origem extraterrestre. Porém, isso mudou com alguns trabalhos relevantes no final do século XVIII e começo do XIX. Em 1794, Ernst Florenz Friedrich Chladni (1756-1827) publica um livro propondo uma origem extraterrestre para essas rochas. Em 1804, Edward Charles Howard (1774-1816) e Jacques de Bournon (1751-1825) analisaram um objeto metálico caído em 1795 na Inglaterra e alegaram possuir uma composição distinta das rochas terrestres e semelhante a outros objetos caídos do céu na Itália. No ano anterior, Jean Baptiste Biot (1774-1862) investigava um evento de queda de aproximadamente 3000 fragmentos rochosos em L'Aigle, Normandia. Baseado na semelhança com outros objetos caídos do céu e nos relatos de testemunhas, concluiu ser de origem extraterrestre.

Essas rochas encontradas são chamados de meteoritos. Os meteoritos são remanescentes de objetos que sobreviveram à sua passagem pela atmosfera como um meteoro e chegou ao solo, podendo, assim, ser encontrados na superfície do planeta. Os meteoroides são corpos extraterrestres em rota de colisão com um planeta antes de atingir a atmosfera. Um meteoro é um meteoróide ao atravessar a atmosfera. Esses objetos podem ser originários de asteroides, cometas ou até mesmo de Marte, ou da nossa Lua.

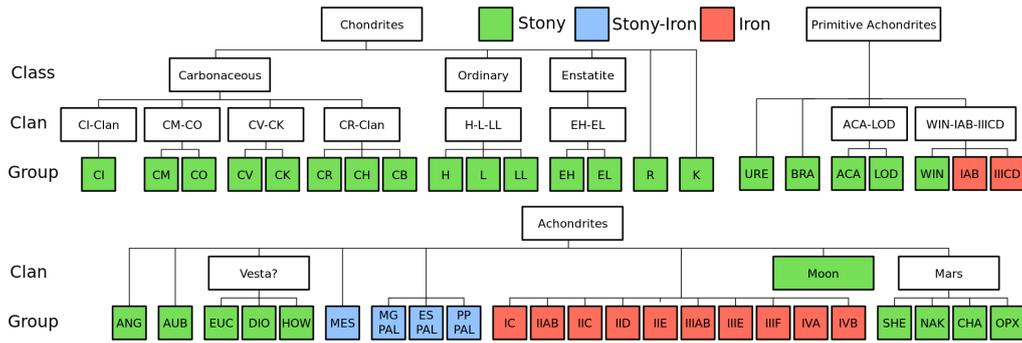


Figura 1.4: Diagrama da classificação de meteoritos. (WEISBERG *et al.*, 2006)

Os meteoritos não são exclusivos do nosso planeta, podendo ser encontrado por missões espaciais que exploram o solo marciano ou a Lua.

Muitos cenários foram desenvolvidos para catalogar e classificar os meteoritos descobertos. A classificação dos meteoritos utilizada até meados do século XX era a de George T. Prior (1862-1936). Essa classificação dividia os meteoritos em três grupos: os rochosos, os ferrosos e os rochoso-ferrosos. De acordo com o *Meteoritical Bulletin Database* os meteoritos rochosos são os mais comuns dentro os descobertos na Terra, representando 94,6% de todos os descobertos, enquanto os meteoritos metálico representam 4,4% e os rochoso-ferrosos 1,0%.

O cenário de classificação mais atual para os meteoritos os categorizam baseado na textura e na mineralogia. São divididos entre rochosos (Stony, no inglês), os ferrosos (Iron) e os rochoso-ferrosos (Stony-Iron). Os condritos são aqueles que apresentam cóndrulos. Cóndrulos são pequenos grãos esféricos, normalmente compostos por ferro, alumínio ou silicatos de magnésio.

A classe dos condritos está dividida em 15 grupos, 8 grupos de condritos carbonáceos (CI, CM, CO, CV, CK, CR, CH, CB), 3 de condritos ordinários (H, L, LL), 2 condritos enstatite (EH, EL) e um grupo chamada de condrito R e outro de condrito K. As letras que designam os grupos de carbonáceos refletem a um condrito típico do grupo: CI (semelhante ao Ivuna), CM (semelhante ao Mighei), CO (semelhante ao Ornans), CR (semelhante ao Renazzo), CH (semelhante ao ALH85085), CB (semelhante ao Bencubbin), CV (semelhante ao Vigarano) e CK (semelhante ao Karoonda). Os grupos dos condritos ordinários se referem a quantidade de ferro: H (alta quantidade de ferro), L (baixa quantidade de ferro) e LL (baixa quantidade de ferro metálico em relação à quantidade total de ferro, assim como uma baixa quantidade de ferro). Os condritos enstatites são divididos em relação à quantidade de ferro e cóndrulos: EH (alta quantidade de Fe e cóndrulos) e EL (baixa quantidade de Fe e cóndrulos). Os grupo R (Semelhante ao Rumuruti) e K (semelhante ao Kakangari) não se encaixaram nos outros grupos de condritos. Esses grupos podem ser observadas na figura 1.4.

Dentro dessa classificação, os meteoritos acondritos incluem meteoritos que

são ferrosos, rochoso-ferrosos e rochosos, além de meteoritos de origem marciana ou lunar. Dentre desses acondritos, há três grupos que durante muito tempo se acreditava serem originários de um mesmo corpo. Esses grupos de meteoritos são chamados de Howarditos, Eucritos e Diogenitos, conhecidos conjuntamente pela sigla HED. O corpo originário proposto foi o asteroide (4) Vesta, a princípio devido à similaridade do espectro (BINZEL e XU, 1993). Trabalhos dinâmicos, bem como uma análise de crateras na superfície do asteroide (4) Vesta corroboraram com essa teoria. Apesar de hoje existir um consenso na ligação genética entre a maioria dos meteoritos HED e o asteroide (4) Vesta, não é possível excluir a possibilidade de outros corpos precursores para estes tipos de meteorito. Por outro lado, ligações diretas entre outros tipos de meteoritos e asteroides específicos são menos frequentes e mais controversas.

Mesmo que ainda correlações entre asteroides e meteoritos sejam nebulosas, há diversos trabalhos que buscam identificar similaridades nos espectros de asteroides e meteoritos. DEMEO *et al.* (2022) selecionaram 500 espectros no visível e no infravermelho, sendo a maioria disponíveis nos surveys SMASS e MITHNEOS e 1000 amostras de espectros de meteoritos do RELAB com o objetivo de correlacionar os espectros de ambos. No que diz respeito às relações entre asteroides do tipo S e condritos ordinários, os autores identificaram uma tendência de meteoritos condritos ordinários serem semelhantes com os asteroides do complexo S, eles identificaram também uma tendência de asteroides dos tipos Q, Sq, S, Sr a Sv da taxonomia de Bus-DeMeo (DEMEO *et al.*, 2009) de se correlacionarem com meteoritos LL, L e H, sendo que os asteroides do tipo-Q predominantemente parecem combinar com os condritos ordinários L e LL. Eles também encontraram amostras de condritos ordinários que parecem melhor correlacionada com os asteroides do complexo X.

É evidente que há ainda muitas questões a serem debatidas acerca das correlações asteroides e meteoritos. Os autores afirmam que o resultado de seu trabalho enfatiza a diversidade de composições de asteroides e meteoritos e que há uma degeneração da classificação apenas levando em consideração o espectro.

Os pequenos corpos do sistema solar possuem em sua superfície diferentes tipos de minerais e gelos em proporções individualmente diferentes. O que se mede efetivamente desses corpos são: seus espectros, a partir de fotometria ou espectroscopia; suas curvas de fase, a partir da fotometria em diferentes configurações geométricas da reflexão; e observações no térmico. Há alguns métodos utilizados para caracterizar esses pequenos corpos a partir dessas medições, um desses métodos é a comparação direta com espectros de laboratório, como minerais e meteoritos. Porém, há um complicador nessa comparação direta. O espectro observado de um asteroide depende das características da superfície dele, como a compactação e a porosidade de seu regolito, além de depender também da geometria da observação e da temperatura da superfície que está sendo observada. Esses fatores influenciam o comportamento da luz na interação com a superfície do aste-

roide. Além disso, os asteroides sofrem com o que chamamos de intemperismo espacial, ou *space weathering*. O intemperismo espacial é um processo que ocorre devido à exposição da superfície do asteroide à radiação cósmica, ventos solares e bombardeamento por micrometeoritos. Isso altera a composição superficial do asteroide e conseqüentemente as propriedades óticas da sua superfície (HAPKE, 2001), dificultando uma comparação direta.

Uma maneira de tentar resolver esses problemas na comparação direta entre os espectros de meteoritos e asteroides é compreendermos melhor os mecanismos da interação da radiação com a superfície de asteroides a partir de modelos fotométricos.

1.3 Modelos fotométricos

O estudo dos mecanismos de absorção e espalhamento da radiação pela superfície de um corpo iluminado é fundamental para o aprimoramento dos modelos e das interpretações das características físicas desses corpos. Os asteroides, como objetos sem luz própria e sem atmosfera, são observados por nossos equipamentos fotométricos unicamente devido a essa interação entre radiação e superfície. As superfícies de corpos planetários possuem uma estrutura complicada, pois possuem diferentes minerais em sua composição, diferentes texturas e geometrias. Há também conjuntos de modelos matemáticos para descrever a interação da luz com superfícies de materiais granulares e porosos. O modelo mais usado para interpretar dados fotométricos e espectroscópicos de asteroides e corpos do sistema solar sem atmosfera é o modelo de Hapke. Esse modelo foi desenvolvido e aperfeiçoado ao longo de várias décadas. A versão mais utilizada se refere ao que é chamado de reflectância bidirecional, a versão IMSA (*Isotropic Multi-Scattering Approximation*) que é descrita a seguir.

1.3.1 Modelo de Hapke

O modelo de Hapke é um modelo matemático semi-empírico capaz de descrever a interação da luz com superfícies planetárias e é comumente utilizado para descrever as propriedades físicas do regolito de corpos do sistema solar a partir da reflectância em sua superfície. O modelo aparece como uma solução para a reflectância bidirecional, onde você tem uma fonte com uma direção bem definida e você está observando em uma direção bem definida. O modelo então depende da geometria do problema, do ângulo de incidência (i), do ângulo de emissão (e) e do ângulo de fase solar (g). Além disso, também depende das propriedades da superfície, como porosidade, rugosidade e composição mineralógica.

O modelo de Hapke é uma ferramenta muito relevante nas ciências planetárias, apesar disso não é um modelo fechado. O modelo continua a ser aprimorada a medida que novos dados e tecnologias são obtidas e desenvolvidas. Além disso, há algumas versões

diferentes ou mesmo modificações que possam ser adotadas dependendo dos parâmetros físicos envolvidos na análise. Apresentarei abaixo a versão mais utilizada do modelo, a versão IMSA (HAPKE, 2002):

$$r(i, e, g) = \frac{\omega}{4\pi} \frac{\mu_0}{\mu + \mu_0} \left[p(g) + H(\mu_0)H(\mu) - 1 \right] \quad (1.1)$$

Esse modelo é construído como uma solução exata da equação de transporte radiativo em uma aproximação isotrópica, ou seja, assumindo que o espalhamento da radiação incidente no meio é uniforme em todas as direções. O modelo supõe um meio formado por partículas próximas o suficiente para se tocar e descrito por propriedades óticas médias. Os elementos do modelo, suas dependências e as funções que o compõem serão descritas a seguir:

A reflectância é fundamentalmente dependente da geometria ótica da observação, essa dependência aparece na expressão do modelo como μ_0 e μ , que são os cossenos do ângulo de incidência e de emissão, respectivamente. Na solução aparece uma função chama de função H de Ambartsumian - Chandrasekher representada por $H(\mu_0)$ e $H(\mu)$. A função H tem essa expressão:

$$H(x) = 1 + \frac{\omega}{2} x H(x) \int_0^1 \frac{H(x')}{x + x'} dx' \quad (1.2)$$

Sendo x o cosseno do ângulo de incidência ou emissão. Essa equação possui diversas aproximações algébricas na literatura.

As propriedades do elemento de volume tem suas propriedades óticas descritas pelo albedo de espalhamento simples (ω), que depende das propriedades médias do meio e do tamanho das partículas. Esse parâmetro é definido como a fração da luz incidente espalhada em uma única direção com um meio dispersivo. Sua expressão matemática é:

$$\omega = \frac{\sigma_s}{\sigma_s + \sigma_a} \quad (1.3)$$

σ_s é a seção transversal de espalhamento, esse fator mede a probabilidade de uma partícula espalhar a luz; e σ_a é a seção transversal de absorção, esse fator mede a probabilidade de uma partícula absorver a luz. O albedo de espalhamento simples é uma medida da eficiência de espalhamento da luz pelo meio, valores mais altos indicam que uma maior fração da luz incidente é espalhada em vez de absorvida.

A partir da solução isotrópica, correções para os efeitos de espalhamento não-isotrópico são introduzidos na expressão mediante funções de fase. As funções de fase

são, em geral, empíricas. Há diferentes tipos de funções utilizadas na literatura propostas de modo a abranger espalhamentos não-isotrópicos. As funções mais utilizadas são as funções de Henyey-Greenstein que podem ser descritas a partir de um ou mais parâmetros (HAPKE, 2012). As funções de Henyey-Greenstein podem ser utilizadas a partir de apenas um lóbulo ou dois lóbulos. Para um lóbulo só:

$$p(g) = \frac{1 - b^2}{(1 + 2b\cos(g) + b^2)^{3/2}} \quad (1.4)$$

Para o caso de um só lóbulo, o que se obtém é apenas uma direção preferencial de espalhamento. O parâmetro dessa função é cosseno assimétrico:

$$\begin{aligned} \xi = \langle \cos g \rangle &= \frac{1}{2} \int_0^\pi p(g) \sin(g) dg \\ \xi &= b \end{aligned} \quad (1.5)$$

Mas para o caso da função de Henyey-Greenstein de dois lóbulos há duas componentes que apontam a direção do espalhamento. Essa é a função de Henyey-Greenstein de dois lóbulos:

$$\begin{aligned} p(g) &= \frac{1 + c}{2} \frac{1 - b^2}{(1 + 2b\cos(g) + b^2)^{3/2}} + \frac{1 - c}{2} \frac{1 - b^2}{(1 + 2b\cos(g) + b^2)^{3/2}} \\ \xi &= -bc \end{aligned} \quad (1.6)$$

O b e c são parâmetros que representam a direção do espalhamento, indicando se o espalhamento é para frente ou para trás. Nesse caso o cosseno assimétrico é proporcional ao produto dos parâmetros. Os parâmetros das funções de fase, de maneira geral, são dependentes das propriedades óticas do meio.

Essa solução de Hapke descreve o meio a partir das propriedades médias e não leva em consideração os efeitos físicos que aparecem por existir uma distribuição de partículas do meio ou devido à rugosidade da superfície. Portanto, algumas correções foram desenvolvidas a partir disso.

1.3.2 Algumas correções do modelo

A solução de Hapke desconsidera o fato da existência de espaços vazios no meio. Isso gera efeitos não modelados quando você resolve a equação de transferência radiativa. Portanto, Hapke adicionou uma correção que depende basicamente do que é chamado de fator de preenchimento. O fator de preenchimento é a fração do volume do meio ocupado por partículas. Os **efeitos da porosidade** também contribuem para a reflectância do

objeto observado e esses efeitos podem ser corrigidos pelo fator de porosidade (K):

$$K = -\frac{\ln(1 - EL)}{EL} \quad (1.7)$$

$$EL = 1.209 \times \phi^{2/3}$$

Onde EL é calculado utilizando o fator de preenchimento (ϕ).

Além do efeito de porosidade, o fato de existir uma distribuição de partículas no meio gera outros efeitos, como é o exemplo do efeito de oposição. O **efeito de oposição** é um fenômeno ótico que ocorre quando se observa um objeto em um ângulo de fase solar próximo de 0° , isso causa um aumento súbito no brilho do objeto. Há dois parâmetros fenomenológicos a serem observados nesse efeito: a intensidade do efeito de oposição (B_0) e a largura do pico do efeito de oposição (h). Além disso, é possível observar que esse efeito é devido a duas causas: o efeito devido a **ocultação de sombras** também chamado apenas de SHOE¹; e o efeito devido ao **retroespalhamento coerente** também chamado apenas de CBOE².

O **efeito de oposição devido à ocultação de sombras** ocorre porque sombras nos espaços entre as partículas tendem a desaparecer quando a observação é feita em ângulos de fase próximos de zero. Os espaços entre as partículas formam buracos que projetam sombras, quando o ângulo entre os raios solares e o detector for próximo de zero as sombras são mínimas, resultando assim em um aumento de brilho. Este efeito é basicamente geométrico e pode ser modelado ele utilizando apenas óptica geométrica.

Foi possível estabelecer uma boa correlação entre esse efeito e parâmetros físicos. A largura do efeito (h) no SHOE depende da porosidade do meio e da distribuição do tamanho das partículas, enquanto a intensidade do efeito (B_{0S}) depende das propriedades óticas das partículas. A contribuição da ocultação de sombras no efeito de oposição é calculada a partir da seguinte expressão:

$$B_s(g, B_{0s}, h_s) \approx 1 + \frac{B_{0s}}{1 + \frac{1}{h_s} \tan\left(\frac{g}{2}\right)} \quad (1.8)$$

Onde a intensidade do efeito, B_{0S} , é calculado por:

$$B_{0S} = \frac{R_0(n, k)}{wp(0, b, c)} \quad (1.9)$$

¹Sigla para *Shadow Hiding Opposition Effect*

²Sigla para *Coherent Backscattering Opposition Effect*

Onde R_0 é:

$$R_0 = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (1.10)$$

Onde n e k são as partes real e imaginária do índice de refração do material. h_s é a largura do efeito de oposição por SHOE para o caso de um meio formado por partículas de mesmo diâmetro:

$$h_s = \frac{1}{2}KN\sigma_E a_E \quad (1.11)$$

a_E é o raio de uma esfera equivalente com a área da seção transversal.

Uma distribuição de tamanhos das partículas pode ser modelada de diversas maneiras, uma forma é utilizar uma lei de potências como a dessa forma:

$$N(\alpha) \propto \alpha^{-4} \quad (1.12)$$

Onde $N(\alpha)$ é a função de distribuição e α é o parâmetro de escala. Esse tipo de distribuição é interessante, pois o regolito lunar se aproxima dessa distribuição de tamanho (MCKAY *et al.*, 1974) e também tem sido sugerida pelo Hapke.

Supondo esse tipo de distribuição especial, a largura angular do efeito de oposição vai possuir uma dependência também no maior e no menor tamanho das partículas:

$$h_s = \frac{3}{8}K\phi \frac{\sqrt{3}}{\ln(aL/aS)} \quad (1.13)$$

Essas relações entre a amplitude e a largura do efeito de oposição por ocultação de sombras dependem das propriedades óticas das partículas, das propriedades do meio e possuem comprovação em laboratório.

Por outro lado, **o efeito de oposição por retroespalhamento coerente** não parece depender da distribuição de tamanho das partículas e sim como a luz é espalhada coerentemente. Esse efeito ocorre devido à natureza ondulatória da luz, em ângulos de fase muito pequenos a luz espalhada por pontos diferentes da superfície podem sofrer interferência construtiva causando também um aumento do brilho. Isso não acontece em ângulos de fase maiores. Esse efeito também é descrito por um parâmetro que descreve a largura angular desse efeito e outro que descreve sua intensidade. Há algumas predições teóricas que correlacionam a largura do efeito com a porosidade do meio, de suas propriedades óticas e do comprimento de onda da radiação incidente, contudo sem embasamento experimental.

Há evidência experimental e observacional que o CBDO é o mecanismo mais

dominante no efeito de oposição observado em corpos do sistema solar, apesar de não possuímos uma clareza acerca de que ou quais parâmetros são responsáveis pelo efeito. A contribuição do retroespalhamento coerente no efeito de oposição pode ser calculada a partir da seguinte expressão:

$$B_c(g) = \frac{1}{(1 + 1.41K)(1 + \frac{1}{h_C} \tan(g/2))^2} \left[1 + \frac{1 - \exp(1 + 1.41K \frac{1}{h_C} \tan(g/2))}{\frac{1}{h_C \tan(g/2)}} \right] \quad (1.14)$$

Onde K é o fator de porosidade e a largura do efeito é descrita como sendo dependente do comprimento de onda (λ):

$$h_C = \frac{\lambda}{4\pi\Lambda_T} \quad (1.15)$$

Sendo Λ_T é o caminho livre médio de transporte:

O modelo que tenta explicar o retroespalhamento coerente tem problemas. Sua expressão pode ser usada para modelar o efeito da reflectância, mas não conseguimos relacionar esses parâmetros com parâmetros físicos da superfície. E esse efeito, em teoria, tem uma dependência explícita com o comprimento de onda, que não é observado no efeito de oposição por ocultação de sombras.

Os efeitos de SHOE e CBOE contribuem de formas diferentes nas observações, enquanto o SHOE contribui com picos mais largos para valores altos do fator de preenchimento (ϕ) ou distribuição estreita de partículas com um espalhamento simples, o segundo contribui com picos mais estreitos no geral com um espalhamento múltiplo.

Na solução que foi derivada pelo Hapke o que foi suposto é que o elemento de volume modelado possui um limite superficial plano com uma normal bem definida. Porém, isso não acontece na realidade. Os elementos de volume possui, em geral, uma certa rugosidade. Portanto, se introduz uma outra correção devido aos **efeitos da rugosidade macroscópica**. A rugosidade macroscópica é uma medida da superfície de um objeto ou material que se refere às irregularidades que são muito maiores do que os tamanhos das partícula no meio. A rugosidade macroscópica produz regiões com a presença de múltiplas reflexões na superfície ao mesmo tempo que esconde outras regiões do detector ou causa sombras. Esses depende apenas da geometria da face observada e do parâmetro de rugosidade. A função da rugosidade macroscópica, $S(i, e, g, \bar{\theta})$, é puramente geométrica e depende dos ângulos de incidência, emissão e fase e do parâmetro de rugosidade macroscópica ($\bar{\theta}$). Esse parâmetro mede a inclinação média de facetas introduzidas no elemento de volume para modelar a rugosidade em escalas muito maiores que o tamanho das partículas. A expressão para essa correção da rugosidade macroscópica é excessivamente comprida e complicada, portanto não apresentarei ela aqui.

Essas correções apresentadas podem ser incorporadas na expressão matemática

do modelo, que é escrita como segue:

$$r(i, e, g) = K \frac{\omega}{4\pi} \frac{\mu_0}{\mu + \mu_0} \left[p(g) [1 + B_{0s} B_s(g)] \right. \\ \left. + [H(\mu_0/K) H(\mu/K) - 1] \right] [1 + B_{0C} B_s(g)] S(i, e, g, \bar{\theta}) \quad (1.16)$$

Portanto, o que se observa na expressão completa dessa versão do modelo de Hapke é um grande número de parâmetros. São eles: **o albedo de espalhamento simples**, que vai depender das propriedades óticas do meio e da distribuição do tamanho das partículas; **um ou mais parâmetros da função de fase**, que vão depender também das propriedades óticas do meio e da distribuição do tamanho das partículas; **a largura e a amplitude do efeito de oposição por ocultação de sombras**, que vão ter a mesma dependência dos dois itens anteriores; **a largura e a amplitude do efeito de oposição por retroespalhamento coerente**, que não possuem uma correlação com propriedades físicas comprovadas, mas que em teoria vão depender do comprimento de onda das partículas e do fator de preenchimento; **o fator de preenchimento**; e **o parâmetro de rugosidade**, que vai depender da geometria da observação. Esses parâmetros são necessários para modelar a reflectância direcional de superfícies planetárias sob diferentes condições de iluminação e observação.

A derivação da solução do modelo é feita em termos da reflectância bidirecional, mas nem sempre é essa a grandeza que estaremos observando. Quando uma sonda espacial é utilizada para medir a radiação eletromagnética refletida por um asteroide, a quantidade observada por essa sonda é o fator de radiância (I/F). O fator de radiância é definido como o produto da reflectância bidirecional por π . O fator de radiância é dado por:

$$\frac{I}{F} = \pi r(i, e, g) \quad (1.17)$$

Além disso, quando essas observações não possuem resolução angular, ou seja, quando se observa toda a luz refletida pela superfície do corpo na direção da observação, o que se observa é a integral da reflectância sobre a superfície do corpo. A expressão algébrica derivada para a reflectância integrada supondo um corpo esférico é dada por:

$$r_s = \frac{1}{\pi} \int_{2\pi} \int_{2\pi} r(i, e, g) \mu d\Omega_e d\Omega_i \quad (1.18)$$

Sendo Ω_e e Ω_i são elementos de ângulos sólidos de emissão e incidência.

Resumidamente, o modelo de Hapke é uma ferramenta poderosa para a análise de imagens planetárias. Ele é capaz de modelar a reflectância direcional de superfícies

planetárias sob diferentes condições de iluminação e observação. O modelo é amplamente utilizado na comunidade científica devido a suas expressões algébricas simples e validação em laboratório. Apesar disso, existem algumas limitações e condições onde o modelo possui confiabilidade e funcionalidade.

1.3.3 Problemas com o modelo de Hapke

O modelo de Hapke possui algumas limitações importantes a serem consideradas. Por exemplo, a correção de porosidade só é válida para valores do fator de preenchimento menores que 0,52. Para valores maiores, os efeitos de espalhamento coerente se tornam mais importantes e isso impossibilita reproduções experimentais em laboratório, produzindo resultados não confiáveis. Isso significa que a utilização do modelo de Hapke deve ser cuidadosa e considerar a porosidade adequada da superfície para se obter resultados precisos.

Uma segunda limitação é que a relação teórica entre os parâmetros do retro-espalhamento coerente e as grandezas físicas não são reproduzidas em laboratório. A aplicação do modelo considerando esse efeito pode levar a algumas imprecisões nos resultados obtidos. Isso é um problema grande pois, como dito anteriormente, essa correção parece ser a mais importante no efeito de oposição.

Além disso, existe um grande número de parâmetros cujos efeitos sobre a reflectância podem se confundir. Isso é um problema porque pode levar a uma solução degenerada, onde a mesma reflectância pode ser gerada por relações diferentes dos parâmetros. Essa ambiguidade pode dificultar a interpretação dos resultados e requer cuidados adicionais no processo de análise.

Capítulo 2

Sonda espacial Hayabusa

Desde que a União Soviética foi capaz, com o programa Sputnik, de lançar um objeto para estudar a capacidade de lançamento de cargas úteis para o espaço com o satélite artificial Sputnik 1 em 1957, a capacidade da espécie humana para estudar os corpos do Sistema Solar foi catapultada para um novo nível de entendimento. Não foi de imediato que tivemos as primeiras missões espaciais focadas para pequenos corpos, durante essa revolução científica o grande foco das missões foi principalmente a Lua.

A missão espacial Hayabusa só seria planejada 40 anos depois que o céu deixou de ser o limite para as maiores invenções de nossa espécie. A missão só foi possível após grandes esforços de outras missões espaciais dos mais diversos programas ao redor do mundo, isso pode ser observado na figura 2.2 onde mostra todos os pequenos objetos já visitados por missões espaciais até 2015. A missão Hayabusa só foi possível graças ao grande investimento no desenvolvimento científico e tecnológico do Japão pós Segunda Guerra Mundial¹.

Este capítulo foi dividido em quatro partes. A primeira parte será a apresentação de um pequeno apanhado de missões espaciais para pequenos corpos. A segunda parte será apresentando um histórico e o planejamento da missão Hayabusa. A terceira, um detalhamento dos instrumentos presentes na nave espacial Hayabusa. Por fim, a última parte será um balanço sobre o sucesso e a importância da missão para o desenvolvimento científico e tecnológico da exploração espacial de pequenos corpos do sistema solar.

2.1 Missões Espaciais para pequenos corpos

Missões espaciais se mostram muito importantes para a caracterização completa da ampla diversidade de populações de pequenos corpos, já que apenas as observações através de telescópios terrestres não são suficientes, enquanto observações in-situ fornecem informações críticas mais adequadas (BARUCCI *et al.*, 2011). As missões *fly-by*

¹Para saber mais sobre a história do programa espacial japonês, leia o apêndice [A](#)

aprofundaram nossos conhecimentos acerca das propriedades físicas e químicas desses objetos, mesmo assim as missões espaciais de *sample return* para os NEOs são importantes, pois fornecem alvos acessíveis e amostras não contaminadas para análise em laboratórios contribuindo para o avanço de algumas questões fundamentais sobre a origem e a evolução do Sistema Solar.

Diversos asteroides já foram estudados por sondas espaciais, a maior parte deles utilizando uma técnica chamada fly-by. Um fly-by é quando a sonda espacial passa próximo de outro corpo celeste obtendo informações do mesmo, é uma maneira mais comum de estudar os pequenos corpos com as missões espaciais, pois não necessariamente o objeto observado é o alvo principal da missão (BARUCCI *et al.*, 2011) e (NESVORNÝ *et al.*, 2015). Alguns dos objetos visitados por missões espaciais podem ser observados na figura 2.1.

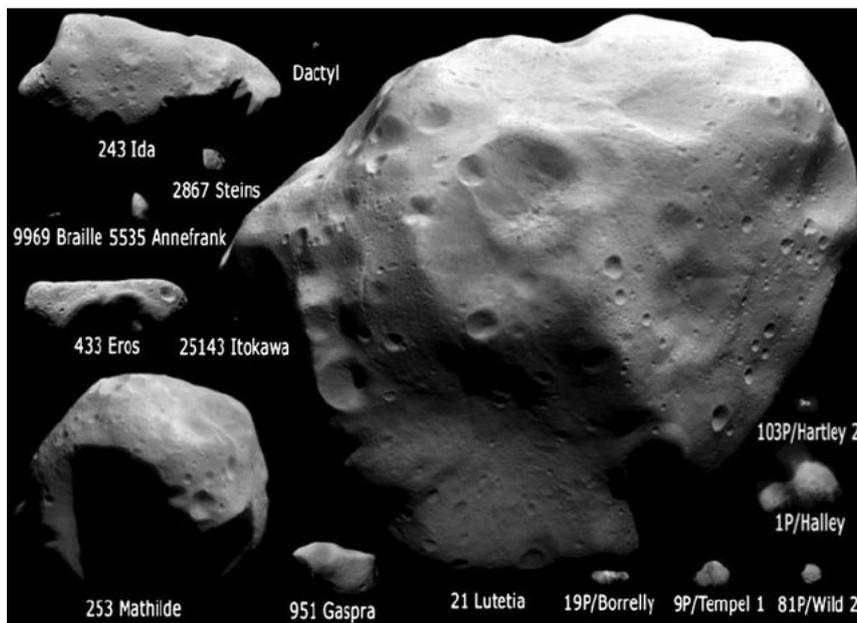


Figura 2.1: Imagens em escala de diversos pequenos corpos (asteroides e cometas) visitados por missões espaciais até o ano de 2015 e em escala aproximada de tamanho. Se observa uma grande diversidade de tamanho, forma e características de superfície. O maior corpo na imagem é o asteroide Lutetia de 100 km observado pela missão Rosetta da ESA. O menor objeto, dificilmente visível na imagem, é o Itokawa de 320 m de diâmetro visitado pela missão Hayabusa I da JAXA. (NESVORNÝ *et al.*, 2015)

2.2 Histórico e planejamento da missão Hayabusa

O projeto da missão Hayabusa se iniciou em abril de 1996, quando a instituição japonesa ISAS (*Institute of Space and Astronautical Science*), hoje parte da JAXA², fabricou o protótipo para a missão, que a princípio foi chamada de Muses-C.

²Para saber mais sobre a história do programa espacial japonês, veja o apêndice A

A missão focou na demonstração tecnológica para missões espaciais chamadas de *sample return*, isto é, um teste para ver a capacidade técnica de se coletar amostras da superfície de asteroides, bem como: utilizar energia solar como propulsão primária; orientação e navegação autônoma, incluindo o movimento vertical próximo ao corpo para a coleta de amostras através de um *touchdown*³ na superfície; coleta de amostra sob um campo gravitacional ultra baixo utilizando um coletor; e, por fim, cápsula de reentrada com a amostra em alta velocidade. Inicialmente, pela previsão das operações feita pela ISAS, o lançamento ocorreria em janeiro de 2002 e encontraria o asteroide (4660) Nereus em abril de 2003, retornando assim para a Terra em 2006, tendo a cápsula recuperada na área do lago seco de Utah. Devido à mudança do cronograma por atraso no desenvolvimento da sonda, foi necessário mudar o objeto de pesquisa. O lançamento ocorreu em 9 de abril de 2003 no Cuchinara Space Center, no Japão, com o objetivo de estudar o asteroide (25143) Itokawa, até então conhecido como 1998 SF36.

A missão Hayabusa inaugurou uma maneira nova de estudar os asteroides, pois nenhuma outra missão capturou amostras da superfície de asteroides anteriormente. Porém, ela não foi a primeira missão espacial a estudar pequenos corpos. A tabela 2.1 mostra todos os objetos que foram estudados as missões espaciais que tiveram asteroides ou cometas entre seus alvos. Os tipos de missão que aparecem são: fly-by, já citado anteriormente; orbiter, quando a sonda é projetada para orbitar um corpo celeste específico; landing, uma missão de pouso em um corpo; sample-return, uma missão projetada para coletar amostras do corpo e trazer para a terra; impact, uma missão projetada com o objeto de impactar intencionalmente um corpo celeste.

³*Touchdown* neste contexto se refere a realizar apenas um toque na superfície e imediatamente acelerar na direção oposta a superfície, sem realiza um pouso para a coleta de amostras.

Tabela 2.1: Missões Espaciais para Pequenos Corpos do Sistema Solar

Nome do Objeto	Tipo de Missão	Missão	Lançamento	Status
21P/Giacobini-Zinner	fly-by	ISEE 3/ICE	12/09/1978	concluída
1P/Halley	fly-by	Vega 1	15/12/1984	concluída
1P/Halley	fly-by	Vega 2	21/12/1984	concluída
1P/Halley	fly-by	Sakigake	07/01/1985	concluída
26P/Grigg-Skjellerup	fly-by	Giotto	02/07/1985	concluída
1P/Halley	fly-by	Giotto	02/07/1975	concluída
1P/Halley	fly-by	Suisei	18/08/1985	concluída
243 Ida	fly-by	Galileo	18/10/1989	concluída
951 Gaspra	fly-by	Galileo	18/10/1989	concluída
433 Eros	orbiter/landing	NEAR	17/02/1996	concluída
253 Mathilde	fly-by	NEAR	17/02/1996	concluída
19P/Borrelly	fly-by	Deep Space 1	24/10/1998	concluída
9969 Braille	fly-by	Deep Space 1	24/10/1998	concluída
9P/Tempel 1	fly-by	Stardust-NEXT	06/02/1999	concluída
81P/Wild 2	sample-return	Stardust	06/02/1999	concluída
5535 Annefrank	fly-by	Stardust	06/02/1999	concluída
25143 Itokawa	sample-return	Hayabusa	09/05/2003	concluída
67P/Churyumov-Gerasimenko	orbiter/landing	Rosetta	02/03/2004	concluída
21 Lutetia	fly-by	Rosetta	02/03/2004	concluída
2867 Steins	fly-by	Rosetta	02/03/2004	concluída
103P/Hartley 2	fly-by	EPOXI	12/01/2005	concluída
9P/Tempel 1	impact/fly-by	Deep Impact	12/01/2005	concluída
486958 Arrokoth	fly-by	New Horizons	19/01/2006	concluída
1 Ceres	orbiter	Dawn	27/09/2007	concluída
4 Vesta	orbiter	Dawn	27/09/2007	concluída
4179 Toutatis	fly-by	Chang'e 2	01/10/2010	concluída
1998 KY26	fly-by	Hayabusa2	03/12/2014	ativa
2001 CC21	fly-by	Hayabusa2	03/12/2014	ativa
162173 Ryugu	sample-return	Hayabusa2	03/12/2014	concluída
99942 Apophis	orbiter	OSIRIS-APEX	08/09/2016	ativa
101955 Bennu	sample-return	OSIRIS-REx	08/09/2016	ativa
152830 Dinkinesh	fly-by	Lucy	16/10/2021	ativa
52246 Donaldjohanson	fly-by	Lucy	16/10/2021	ativa
21900 Orus	fly-by	Lucy	16/10/2021	ativa
15094 Polymele	fly-by	Lucy	16/10/2021	ativa
11351 Leucus	fly-by	Lucy	16/10/2021	ativa
3548 Eurybates	fly-by	Lucy	16/10/2021	ativa
617 Patroclus	fly-by	Lucy	16/10/2021	ativa
65803 Didymos	impact	DART	24/11/2021	concluída

JPL/NASA

2.3 Instrumentos

A Hayabusa I foi uma sonda de formato paralelepípedo de dimensões 1,0 m \times 1,6 m \times 1,1 m e massa de 510 kg. A sonda possuía uma antena fixa de alto ganho, painéis solares para geração de energia e motor iônico. A maior parte dos instrumentos de missão estavam alinhados em um mesmo eixo alocados na mesma superfície da nave. Os instrumentos de missão eram:

- Asteroid Multi-band Visual Camera - AMICA (2.3.1)
- Near Infrared Spectrometer - NIRS (2.3.2)
- Laser Altimeter with Albedo measurement - LIDAR (2.3.3)
- X-ray Fluorescence Spectrometer - XRS (2.3.4)
- Mecanismo de coleta de amostra (2.3.5)
- MIcro/Nano Experimental Robot Vehicle for Asteroid - MINERVA (2.3.6)

A disposição dos Instrumentos bem como seus alinhamentos entre si podem ser observados na figura 2.2. Nas seções seguintes há uma descrição dos instrumentos que estavam presentes na nave espacial Hayabusa.

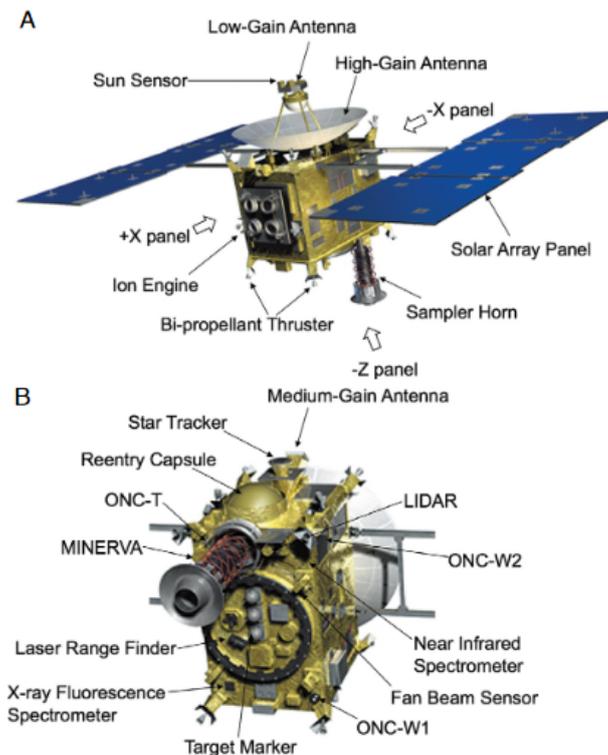


Figura 2.2: A disposição dos instrumentos na sonda Hayabusa I. (LONGOBARDO, 2021)

2.3.1 AMICA

O Asteroid Multi-band Imaging CAmera, ou apenas AMICA, é uma câmera para imageamento utilizado tanto para ciência quanto para navegação ótica, figura 2.3.

O sistema AMICA consiste em um telescópio refrator de 5 lentes razoavelmente resistentes à radiação cósmica e revestimento anti-reflexo e uma primeira lente óptica paralela de quartzo colocada para impedir que o detector seja danificado devido

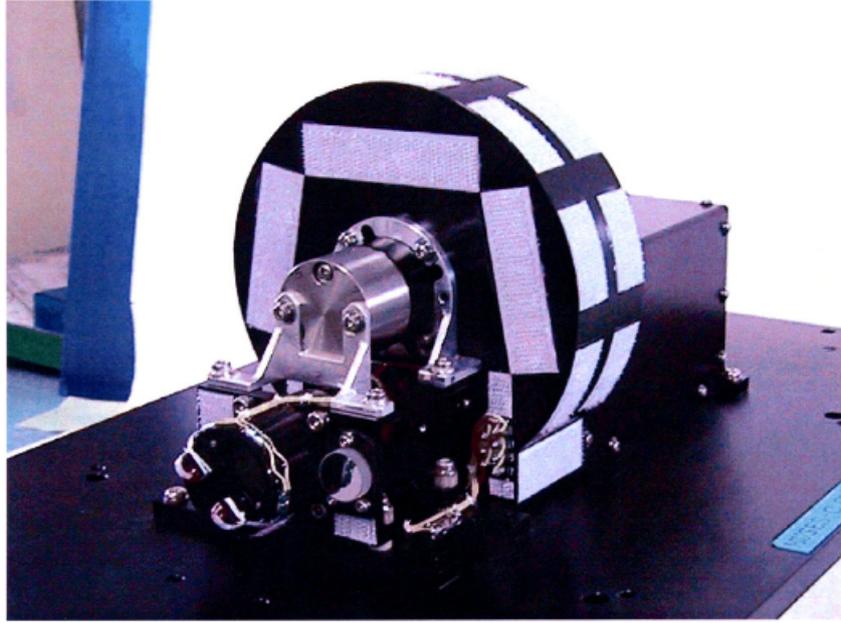


Figura 2.3: Foto do proto-modelo do AMICA. (Imagem publicada no site da JAXA)

a exposição direta à radiação. Porta uma roda de filtro de 8 posições e 7 filtros quase equivalentes as bandas dos filtros ECAS (as bandas de passagens podem ser observadas na figura 2.4) acoplado a um CCD de resolução é 1024 x 1000 pixels, um campo de visão de $5,83^\circ \times 5,69^\circ$, um *footprint* de um único píxel de 20 segundos de arco, algo correspondente a aproximadamente 70 cm da superfície do asteroide Itokawa na configuração de *home position*⁴. A eficiência quântica do CCD pode ser vista na figura 2.5. As dimensões do equipamento são: 120 mm × 135 mm × 180 mm com um diâmetro efetivo da lente de 15 mm.

Todas essas informações podem ser encontradas em NAKAMURA *et al.* (2001) com mais detalhes.

2.3.2 NIRS

O Near Infrared Spectrometer, ou NIRS, é um espectrômetro de infravermelho próximo com um detector de fotodiodos de InGaAs (Arsenieto de índio e gálio) de 64 canais e uma grade de difração combinada com um prisma com um campo de visão de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$. O detector cobre comprimentos de onda entre 850 nm até 2100 nm com uma dispersão por píxel de 23,6 nm. As dimensões do equipamento são: 336 mm × 165 mm × 100 mm com uma abertura de 27,2 mm.

⁴A fase de *home position* corresponde a uma distância de aproximadamente 7 km entre a sonda espacial Hayabusa e o asteroide (25143) Itokawa. As fases da missão serão detalhadas na seção seguinte.

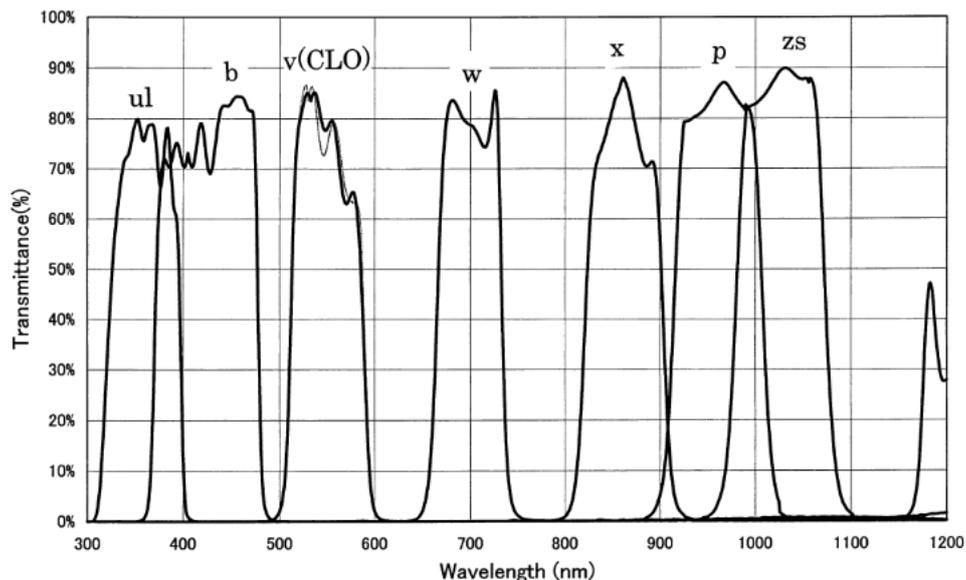


Figura 2.4: Transmittância dos sete filtros do AMICA. As sete bandas observadas e evidenciadas são quase equivalentes as bandas ECAS. É possível observar também uma outra banda em comprimentos de onda acima de 1150 nm, porém o CCD do AMICA não tem sensibilidade para comprimentos de onda tão grandes. (NAKAMURA *et al.*, 2001)

2.3.3 LIDAR

O Light Detection And Ranging instrument, ou apenas LIDAR, é um altímetro a laser com um comprimento de onda de 1.064 μm e energia de 10 mJ possuindo um receptor como um telescópio Cassegrain com espelho de SiC com diâmetro de 126mm. O objetivo principal do LIDAR é estabelecer a distância entre a espaçonave Hayabusa e o asteroide Itokawa para fins de navegação e para a garantia da coleta das amostras de forma segura. Esse instrumento é capaz de detectar a intensidade do pulso refletido e assim possibilitando o estudo da morfologia de crateras, o mapeamento das faces com escalas de metros, contribuindo para a informação da distribuição superficial do albedo bem como a estrutura do limbo (estimativa de forma/volume). O LIDAR, por fim, foi fundamental para obter um modelo de forma confiável da superfície de Itokawa.

O LIDAR realizou observações cooperativas com o AMICA e o NIRS para examinar a superfície do asteroide Itokawa e possui uma precisão de 10 metros a uma distância de 50 km.

Para maiores informações sobre o instrumento LIDAR, ver MUKAI *et al.* (2006) MUKAI *et al.* (2007) e BARNOUIN-JHA *et al.* (2008).

2.3.4 XRS

O X-ray Spectrometry, ou apenas, XRS, é um espectrômetro de espectroscopia de fluorescência de raios-X a partir da excitação por exposição solar acoplado a um chip

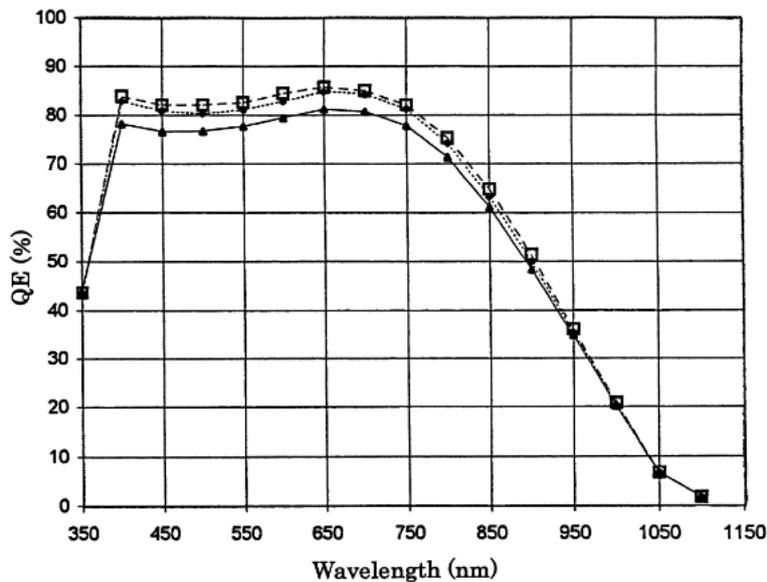


Figura 2.5: Eficiência quântica do CCD do AMICA em função do comprimento de onda. Há três diferentes curvas correspondentes a três lotes diferentes de CCDs, a utilizada no AMICA é a curva pontilhada. (NAKAMURA *et al.*, 2001)

CCD cuja resolução de energia vai de 160 eV a 5,6 keV quando resfriado. Esse equipamento é importante para a análise elementar da superfície do asteroide, a fim de classificar o tipo de rocha que o constitui e identifica elementos, isótopos e eventualmente moléculas.

Para a calibração do equipamento, o XRS possui uma placa vítrea cuja composição é intermediária entre as de condritos e basaltos, para calibrar simultaneamente o espectrômetro quando ele é excitado pelo Sol (OKADA *et al.*, 2006).

2.3.5 Mecanismo de coleta de amostra

Como parte da missão científica e tecnológica, a nave espacial Hayabusa foi planejada e lançada com um tubo coletor de amostras na parte de baixo de sua estrutura. A captura das amostras acontece com um *touchdown*, um dispositivo atira um projétil de 10 gramas a 300 m/s para a superfície do asteroide, o que gera uma fragmentação, os fragmentos sobem por dentro do tubo até chegar no coletor de amostras, e são posteriormente empurrados para a cápsula de reentrada. A vedação é feita por anéis duplos.

O intuito era coletar mais de uma amostra de regiões diferentes, uma em uma região mais lisa e outra numa região mais pedregosa. Isso não foi possível, toda a amostra foi coletada apenas da região de Muses Sea, uma região lisa na face sul de (25143) Itokawa (KAWAGUCHI *et al.*, 1999).

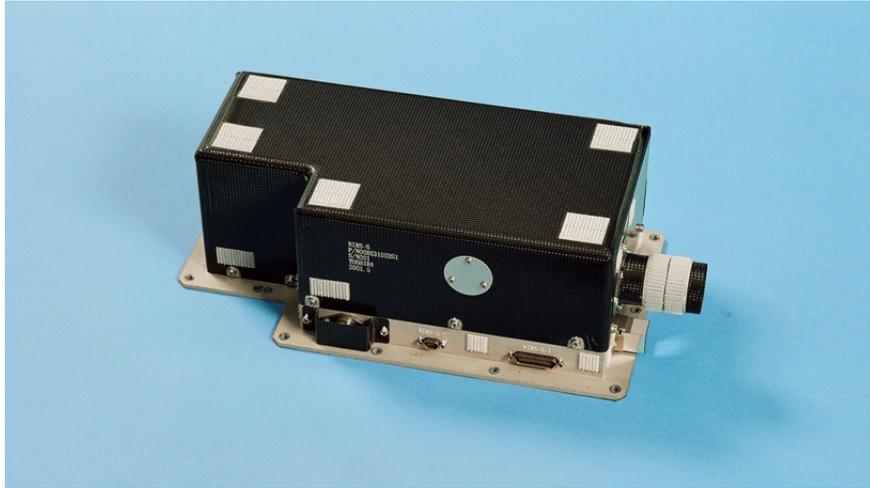


Figura 2.6: Fotografia do NIRS. (Imagem publicada no site da JAXA)

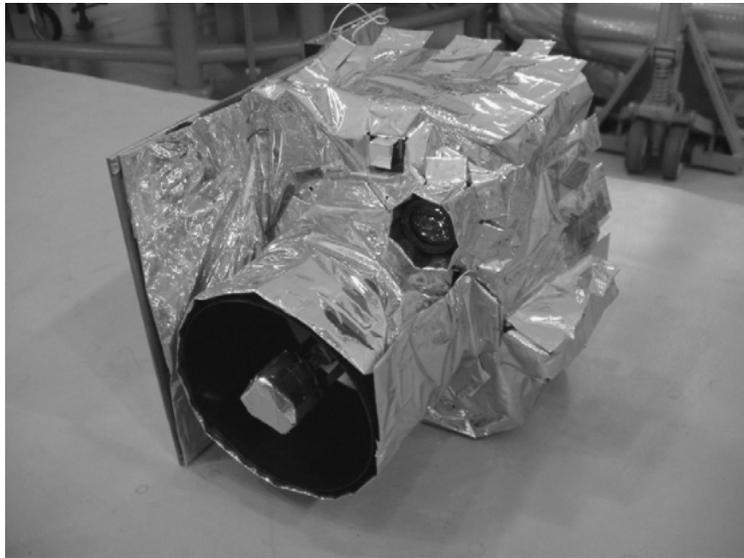


Figura 2.7: Fotografia do LIDAR. (BARNOUIN-JHA *et al.*, 2008)

2.3.6 MINERVA

O Micro/Nano Experimental Robot Vehicle for Asteroid, MINERVA, era uma sonda de aproximadamente 10 cm de altura e 12 cm de diâmetro que foi acoplada à nave espacial Hayabusa I. Esta sonda era dotada de capacidade de movimentação autônoma em microgravidade e equipamentos científicos para caracterizar a superfície. O intuito de levar o MINERVA era testar a implementação de um sistema móvel em pequenos corpos e a demonstração da exploração autônoma, além de poder se mover sobre a superfície de Itokawa e obter dados de diferentes lugares do asteroide.

Segundo o planejamento, a MINERVA foi liberada manualmente da Hayabusa em 12 de novembro de 2005 a uma distância de 70 metros e velocidade relativa de 5cm/s, porém houve um engano. O aterrissador foi liberado em um momento errado quando estava a 200 metros de Itokawa e com uma velocidade relativa três vezes maior do que a



Figura 2.8: Modelo protótipo do tubo coletor presente na Hayabusa I. (Imagem publicada no site da JAXA)

planejada. A colisão com a superfície o propeliu e a gravidade do asteroide não foi capaz de puxar novamente para a superfície. Seu tempo de vida foi mais curto que o planejado, mas continuou enviando dados para a Hayabusa por 18 horas enquanto sobrevoava o asteroide.

Para ter maiores informações sobre o funcionamento técnico planejado para o MINERVA, ver YOSHIMITSU *et al.* (2006).

2.4 A missão espacial Hayabusa

O desenvolvimento da missão Hayabusa se inicia em 1995 quando a ISAS propõe para o governo japonês uma primeira missão para executar um *sample return* em um asteroide. O projeto se iniciou em 1996 onde a própria ISAS construiu a sonda Hayabusa e a lançou no dia 9 maio de 2003 através do foguete M-V no Uchinoura Space Center. O asteroide então escolhido para a missão foi o asteroide (4660) Nereus, com o (10302) 1989 ML sendo um possível substituto caso fosse necessário. O asteroide (25143) Itokawa, anteriormente chamado de 1998 SF36, se tornou o objeto escolhido da missão devido a dois reveses: a equipe técnica estava tendo problemas com relação à capacidade de massa da sonda e no ano de 2000 ocorreu um acidente no lançamento do satélite ASTRO-E, missão elaborada pela ISAS utilizando a mesma classe de foguetes M-V.

Enquanto a sonda espacial Hayabusa estava a caminho do asteroide Itokawa foi registrada uma erupção solar forte o suficiente para danificar as células solares a bordo da sonda, reduzindo assim a energia elétrica e a eficiência dos motores. O planejamento

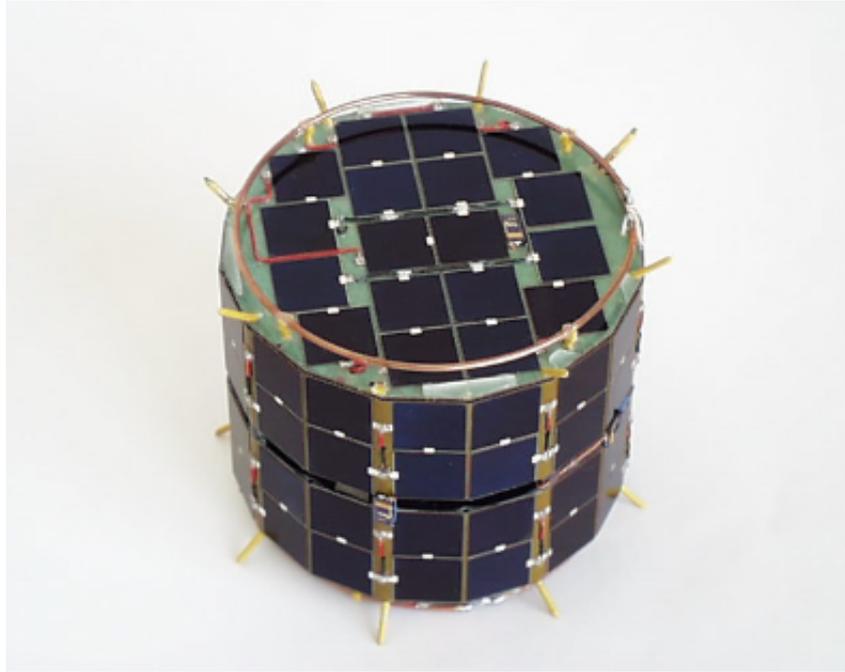


Figura 2.9: Fotografia do aterrissador MINERVA. (YOSHIMITSU *et al.*, 2006)

era alcançar o asteroide em junho de 2005, porém esse fenômeno resultou em um atraso e apenas em setembro que a nave espacial alcançou o objeto de pesquisa.

Ainda antes de alcançar o asteroide, no dia 31 de julho a roda de reação do eixo X parou de funcionar. Em 12 de setembro, os cientistas da JAXA anunciam que a Hayabusa estava a apenas 20 km e havia chegado ao asteroide Itokawa. No primeiro momento se iniciou a operação de mapeamento e imageamento do objeto e isso durou mais de um mês. Em 2 de outubro a roda de reação do eixo Y parou de funcionar. Posteriormente a nave realizou manobras de descida para confirmar o cenário de pouso, foi nesse período que foi liberado o aterrissador MINERVA. Sua liberação falhou de modo que escapou da fraca atração gravitacional de Itokawa.

Em 20 de novembro de 2005 marcou a primeira tentativa de *touchdown*, porém um sensor de detecção instalado a bordo disparou e impediu a liberação do projétil em direção à superfície. A nave, então, colidiu e quicou algumas vezes até pousar na superfície, e se manteve por lá por 30 minutos até o comando manual para decolar ser acionado na Terra. A segunda tentativa de *touchdown* ocorreu em 25 de novembro de 2005. A espaçonave tocou a superfície como planejado, no entanto, foi revelado que o circuito de controle do disparo do projétil não liberou o projétil. Neste momento a expectativa era que apesar da falha na liberação do projétil e coleta de amostras do solo do modo planejado, tanto a eletricidade estática quanto a colisão do tubo coletor em contato com a superfície do asteroide tenha coletado partículas.

A espaçonave então decolou e quando disparou os propulsores para desacelerar a velocidade de subida, um dos propulsores começou a vaziar combustível e inutilizar o

sistema de controle de reação (RCS) pelo restante da missão. No início de dezembro de 2005 a comunicação por rádio foi perdida e só foi restaurada no final de janeiro de 2006. Quando o contato foi reestabelecido, a espaçonave estava girando em uma taxa alta e o sinal de rádio estava inconstante. Cinco meses foram necessários para desacelerar com segurança o movimento de rotação da sonda espacial Hayabusa e corrigir a distância da nave em relação ao asteroide. Esses problemas impossibilitaram seu retorno no tempo planejado, adiando seu retorno de 2007 para o ano de 2010.

O acionamento do motor iônico da sonda funcionou entre 2007 e 2009, porém todos os quatro motores ficaram inoperantes em novembro de 2009.

Em 13 de junho de 2010, a cápsula de reentrada contendo as amostras do asteroide (25143) Itokawa foi separada do restante da nave espacial Hayabusa e ambas adentraram a atmosfera terrestre. A cápsula foi encontrada 30 minutos após a reentrada no deserto de Woomera na Austrália, cerca de 500 metros do local planejado.

Podemos resumir toda a missão em seis etapas: o **lançamento**; a aproximação (ou *approaching* como eles denominam essa fase); a fase de *gate position*; a fase de *home position*; o *touchdown*; e o **retorno das amostras para a Terra**. O **lançamento** da missão, como já citado, ocorreu no dia 09 de maio de 2003 em Kagoshima no Japão às 13 horas e 29 minutos do horário local. A etapa *approaching* é o período entre o lançamento e a aproximação da nave em relação ao asteroide Itokawa. Essa fase foi determinada como sendo entre os dias 10 de maio de 2003 e 11 de setembro de 2005, esse período incluí um *fly-by* pela terra no dia 19 de maio de 2004. A etapa *gate position* é o período onde a espaçonave Hayabusa está a 20 km de Itokawa com uma velocidade de aproximação de 0,2 m/s, isso ocorre entre os dias 12 de setembro de 2005 e o dia 29 de setembro de 2005. A etapa de *home position* ocorre entre os dias 30 de setembro de 2005 e o dia 07 de dezembro de 2005, e a Hayabusa está a uma distância de aproximadamente 6,8 km da superfície de Itokawa. É nessa etapa que ocorre a liberação do aterrissador MINERVA, dia 12 de novembro de 2005, e as duas tentativas de coleta de amostras, dia 19 de novembro de 2005 e 25 de novembro de 2005, respectivamente. Entre os dias 08 de dezembro de 2005 e 24 de abril de 2007 há inúmeros problemas na Hayabusa deixando-a inoperante. A etapa do **retorno das amostras** começa no dia 25 de abril de 2007 e é finalizada no dia 13 de junho de 2010 quando a cápsula de reentrada adentra a atmosfera terrestre e é encontrada no deserto de Woomera na Austrália.



Figura 2.10: Capsula de reentrada da sonda espacial Hayabusa no deserto de Woomera, Austrália. (Imagem publicada no site da JAXA)

Capítulo 3

O asteroide (25143) Itokawa

O asteroide (25143) Itokawa foi descoberto em 26 de setembro de 1998 pelo programa LINEAR (Lincoln Laboratory Near-Earth Asteroid Research)(MPEC 1998-S45) e foi denominado provisoriamente como 1998 SF36. 35 observações foram realizadas desde o dia de seu descobrimento até 30 de setembro do mesmo ano, elas foram divididas entre 5 observatórios diferentes sem filtro ou utilizando os filtros R e V do Johnson. Foi possível, assim, medir suas efemérides e chegar nas primeiras tentativas de encontrar os valores de seus elementos orbitais: o semi-eixo maior, $a = 1,32$, a excentricidade da órbita, $e = 0,26$, a inclinação da órbita, $i = 2^\circ$ e a distância periélica, $q = 0,9666$. No ano seguinte, em 13 de setembro, foi realizado mais observações para uma maior amostra dos dados com relação aos elementos orbitais. Observando sem filtro e utilizando apenas o filtro R de Johnson, os valores calculados foram muito semelhantes: $a = 1,33$, $e = 0,28$, $i = 2^\circ$ e $q = 0,9535$.

No dia 6 de agosto de 2003, depois mesmo do lançamento da sonda espacial Hayabusa, o asteroide 1998 SF36 foi nomeado como (25143) Itokawa como uma homenagem ao pioneiro da ciência espacial japonesa Hideo Itokawa. O asteroide Itokawa é um NEO do grupo Apollo, um PHO e o primeiro asteroide a ser alvo de uma missão de *sample return*.

O presente capítulo foi dividido em três partes. A primeira parte será uma apresentação das principais observações terrestres com o intuito de caracterizar o asteroide (25143) Itokawa, a campanha observacional de 2001. A segunda parte tratará dos avanços no entendimento das características físicas e topográficas do asteroide com a utilização dos dados da missão Hayabusa. A terceira seção traz uma pequena comparação entre os resultados obtidos a partir das observações terrestres e os resultados utilizando os dados da missão Hayabusa, assim como uma discussão sobre esses resultados.

3.1 Campanha Observacional de 2001

Em 2000 a então ISAS que planejava a missão de *sample return* MUSES-C mudou o objeto de estudo escolhido, o asteroide a ser visitado pela sonda não seria mais o (4660) Nereus e sim o 1998 SF36, que seria posteriormente nomeado como (25143) Itokawa. Essa mudança provocou um crescente interesse por parte da comunidade científica em caracterizar o asteroide e uma série de observações foram planejadas. Portanto, uma campanha observacional foi realizada para detalhar as características físicas de Itokawa. A lista detalhada das observações fotométricas pertencentes a campanha observacional pode ser visto na figura 3.1 e a posição do asteroide em relação à eclíptica durante as observações pode ser observada na figura 3.2. As observações aconteceram durante dois períodos distintos: entre 27 de dezembro de 2000 até dia 1 de abril de 2001 e de 22 de agosto até 25 de setembro de 2001, períodos onde o asteroide estava mais próximo da Terra, porém ainda externo a nossa órbita. Apesar da maior parte das observações serem fotometrias e espectroscopias, houve também observações de radar utilizando os rádio-observatórios de Arecibo e Goldstone, bem como observações polarimétricas pelo observatório de CASLEO. A partir dessas observações que a comunidade científica extraiu a maior parte dos resultados sobre Itokawa oriundos de observações terrestres.

Outras observações relevantes foram realizadas em 2004, quando o asteroide Itokawa fazia uma segunda aproximação de Itokawa em relação à Terra desde seu descobrimento. No final do ano seguinte, a sonda Hayabusa se aproxima de Itokawa e transmite dados de referência dos instrumentos da sonda espacial para a Terra.

3.1.1 Classe espectral e mineralogia

BINZEL *et al.* (2001) realizou uma revisão bibliográfica de resultados referentes às observações espectroscópicas no visível e no infravermelho próximo apresentados em alguns trabalhos durante a campanha observacional de 2001 (BINZEL e RIVKIN, 2001), (BINZEL e GEOPHYS, 2001), (HICKS *et al.*, 2001) e (SEKIGUCHI *et al.*, 2001). Essas observações utilizaram o observatório Kitty Peak National Observatory cuja faixa espectral é de 0,50 à 0,92 μm e o observatório NASA Infrared Telescope Facility (IRTF) utilizando o espectrógrafo SpeX na faixa espectral entre 0,8 e 2,5 μm . Os autores perceberam a presença de bandas de absorção em 1 μm e 2 μm . Os autores mediram o centro da Banda I e encontraram o valor de 0,99 μm e a razão encontrada entre a área da Banda II e da Banda I foi de 0.40 ± 0.02 . A banda de absorção em 1 μm é um indicativo da presença tanto de piroxênio como de olivina ou alguma combinação dos dois e a banda de absorção em 2 μm é um indicativo da presença de piroxênio. O espectro de reflexão de Itokawa é compatível com asteroides do tipo-S e, ainda, suas bandas de absorção indicam que seja compatível com um tipo S(IV) de GAFFEY *et al.* (1993). Segundo as primeiras interpretações dos autores, uma mistura de piroxênio e olivina sugere que o material que

Date (2000–2001)	Observatory	Telescope/CCD	Filters	Observers
Dec. 27, 28	Kitt Peak	2.3 m/Steward 21 CCD	<i>R</i>	R. J. Whiteley, S. M. Larson
Jan. 23	Mauna Kea	2.2 m/TEK 2k×2k	<i>R</i>	D. J. Tholen, R. J. Whiteley
Jan. 24, 26	McDonald	2.1 m/SITe 1k×1k	<i>V, R</i>	T. L. Farnham
Feb. 2–4	Steward	1.54 m/2k×2k CCD	<i>R</i>	S. Lowry, P. Weissman
Feb. 2, 14, 16–17	Bisei Spaceguard	0.25 m/Apogee AP10	<i>V</i>	Yoshikawa et al. (1)
Feb. 15, 18, 19, 22, 25–27	Mitaka	0.5 m/Astromed CCD	<i>B, V, R, I</i>	Nakamura et al. (2)
Feb. 20–22, 25, 26	Pic du Midi	1 m/Thomson 7863	<i>R</i>	T. Kwiatkowski, F. Colas
Feb. 27	Konkoly	1 m/Wright EEV	<i>V, R, I</i>	I. Toth
Mar. 2, 13, 15, 16, 19	Mitaka	0.5 m/Astromed CCD	<i>B, V, R, I</i>	Nakamura et al. (2)
Mar. 21–23	Table Mountain	0.6 m/SITe 1k×1k	<i>R</i>	S. Lowry, P. Weissman
Mar. 26, 29, 31	Kiso	1.05 m/SITe 2k×2k	<i>R</i>	Abe et al. (3)
Mar. 28, 29, 31	McDonald	2.1 m/SITe 1k×1k	<i>V, R</i>	T. L. Farnham
Mar. 31	Kharkiv	0.7 m/SBIG ST-6	<i>R</i>	F. P. Velichko
Apr. 1	McDonald	2.1 m/SITe 1k×1k	<i>V, R</i>	T. L. Farnham
Apr. 1	Kiso	1.05 m/SITe 2k×2k	<i>R</i>	Abe et al. (3)
Jun. 21, 22	McDonald	2.1 m/SITe 1k×1k	<i>V, R</i>	T. L. Farnham
Aug. 22–24	Palomar	1.5 m/2k×2k	<i>R</i>	S. Lowry, P. Weissman
Aug. 22–25	Kiso	1.05 m/SITe 2k×2k	<i>R</i>	M. Abe et al. (4)
Sep. 23–25	Palomar	1.5 m/2k×2k	<i>B, V, R, I</i>	S. Lowry, P. Weissman

(1) M. Yoshikawa, A. Asami, D. J. Asher, T. Fuse, N. Hashimoto, A. I. Ibrahim, S. Isobe, S. Nakano, K. Nishiyama, Y. Oshima, J. Terazono, H. Umehara, T. Urata.

(2) B. Dermawan, T. Nakamura, H. Fukushima, H. Sato, F. Yoshida, Y. Sato.

(3) M. Abe, Y. Ohba, S. Hasegawa, H. Fukai (4) M. Abe, Y. Ohba, M. Ishiguro, Y. Takagi.

Figura 3.1: Lista detalhada das observações fotométricas durante a campanha observacional do asteroide (25143) Itokawa. (KAASALAINEN *et al.*, 2003)

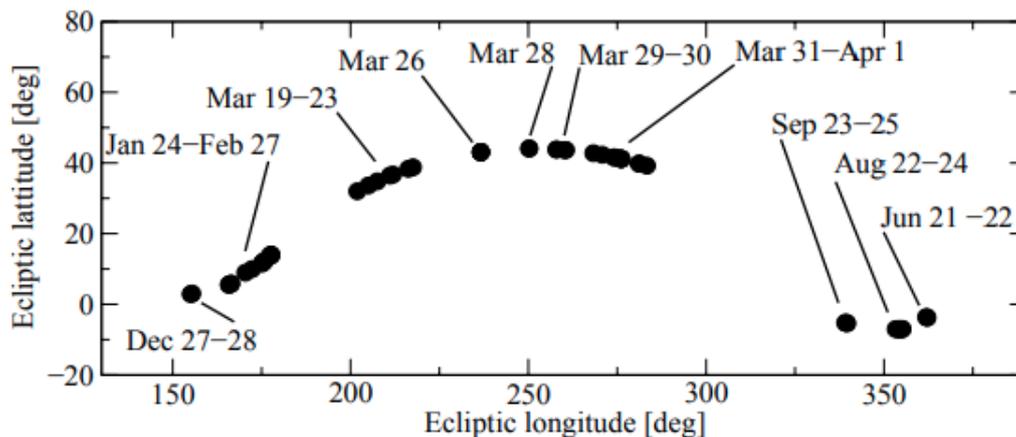


Figura 3.2: A posição do asteroide (25143) Itokawa referente a eclíptica durante as observações fotométricas da campanha observacional de 2001. (ISHIGURO *et al.*, 2003)

constitui o asteroide é semelhante à composição de meteoritos condritos ordinários. A presença da banda em $2\mu\text{m}$ também poderia sugerir que pode ser algum tipo de acondrito primitivo, porém a princípio nenhuma análise espectroscópica realizada em acondritos pareceram fornecer nenhum análogo ao mesmo.

BINZEL *et al.* (2001) também realizaram uma busca por análogos entre espectros de meteoritos, porém eles perceberam haver uma divergência na tendência avermelhada entre os espectros de asteroides e meteoritos condritos ordinários. Uma tentativa de encontrar razões pelas quais os espectros de asteroides tendem a ser mais avermelhados em relação ao de meteoritos foi testada no final do século passado por PIETERS *et al.* (2000), onde um modelo de misturas, sugerido anteriormente por Hapke, seria capaz de reproduzir qualitativamente os dados experimentais para suas amostras. Para o caso de PIETERS *et al.* (2000), suas amostras eram de regolitos lunares e um dos resultados encontrados é o avermelhamento no espectro de um material em função da quantidade de partículas de nano-ferro (nnFe^0) no material. A contribuição dessas nanopartículas de ferro é proporcional à quantidade delas no material do regolito do asteroide, quanto maior for a contribuição de nnFe^0 no regolito, mais avermelhado o espectro vai ser. Portanto, BINZEL *et al.* (2001) utilizaram um dos espectros do modelo apresentado em PIETERS *et al.* (2000) para desvermelhar o espectro e perceberam que o espectro do asteroide pareceu compatível com alguns subgrupos de condritos ordinários, os condritos ordinários H, L e LL (A comparação pode ser observada na figura 3.3). O centro e a largura da banda I($1\mu\text{m}$) se assemelha principalmente ao dos condritos LL e o centro e a largura da banda II($2\mu\text{m}$) não possuía nenhuma coincidência, porém a menor discrepância foi também para os condritos LL.

BURBINE *et al.* (2003) iniciaram um estudo espectral de amostras de condritos com composições conhecidas do *Smithsonian Institution's Analyzed Powder collection* e propuseram uma nova fórmula para determinar a mineralogia de asteroides a partir do espectro de reflexão:

$$ol/(ol + pyx) = -0.417 \times BAR + 0.948 \quad (3.1)$$

Onde $ol/(ol + pyx)$ é a razão de olivina por olivina mais piroxênio e BAR é a razão entre as áreas da Banda II e a banda I. Eles aplicaram essa nova fórmula também para o asteroide (25143) Itokawa utilizando os resultados de BINZEL *et al.* (2001). A partir desse resultado a mineralogia de Itokawa parece estar entre os condritos L e LL, como pode ser visto na figura 3.4. Os autores, porém, reforçaram que o espectro de Itokawa é visualmente muito semelhante com o de um condrito LL avermelhado, incluindo uma comparação direta com o meteorito Greenwell Springs, um condrito LL4.

Uma das primeiras tentativas de calcular o albedo do asteroide (25143) Itokawa vieram do trabalho de ISHIGURO *et al.* (2003). Os autores utilizaram dados das observações realizadas pelo telescópio SUBARU, as observações abrangeram fotometria nas bandas J ($1,25\mu\text{m}$), H ($1,63\mu\text{m}$), K ($2,12\mu\text{m}$), L' ($3,77\mu\text{m}$), M' ($4,68\mu\text{m}$) e espectroscopia na banda L. Os autores utilizaram modelo FBM (Free Beaming Parameter, Hasegawa

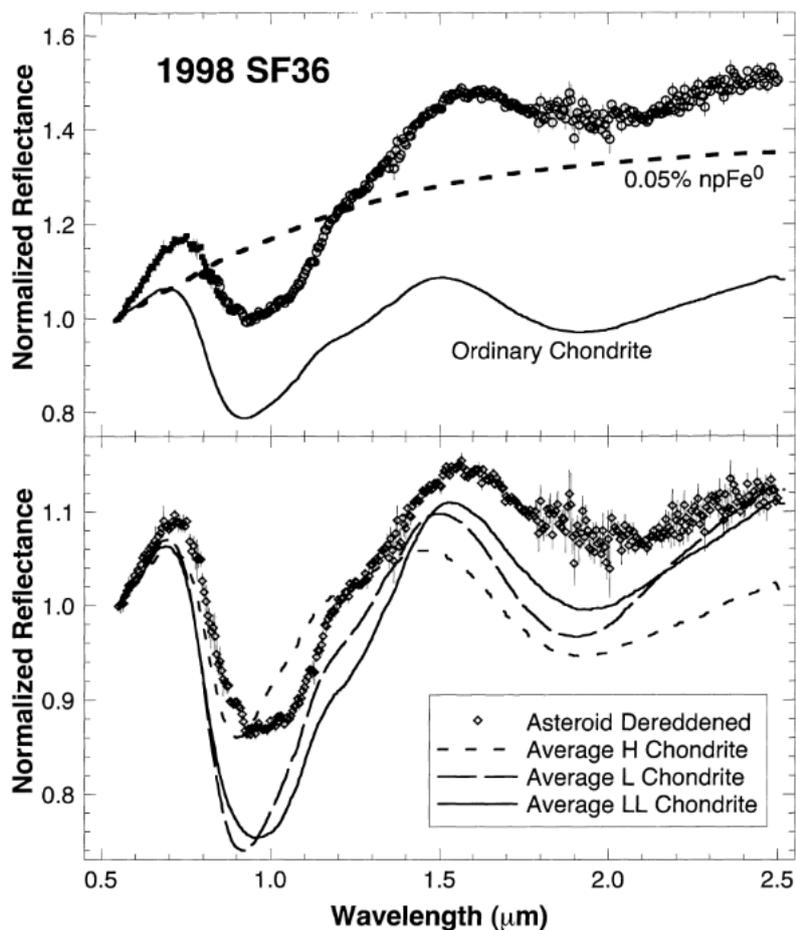


Figura 3.3: (Gráfico de cima) Uma combinação dos espectros do asteroide (25143) Itokawa a partir de observações no visível (quadrados fechados), entre 0,5 e 0,9 μm e no infravermelho próximo (círculos abertos). A linha tracejada representa a possível contribuição de nanofases de ferro (npFe^0) para uma crescente discrepância para maiores comprimentos de onda entre os espectros de asteroides e meteoritos sugerido por PIETERS *et al.* (2000). e a linha lisa representa a média dos espectros dos condritos ordinários (GAFFEY, 1976). (Gráfico de baixo) O espectro desavermelhado do asteroide (25143) Itokawa após a subtração da suposta contribuição da curva de npFe^0 e os espectros da média dos condritos ordinários H, L e LL (GAFFEY, 1976). Todos os espectros foram normalizados em 0,55 μm . (BINZEL *et al.*, 2001)

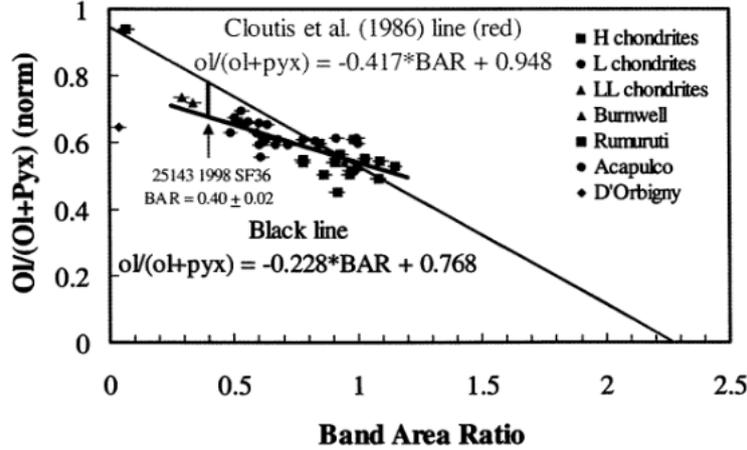


Figura 3.4: Gráfico da razão entre a área das bandas e a razão $ol/(ol + pyx)$ normalizado para os meteoritos estudados. Há duas linhas, a mais extensa representa a equação de CLOUTIS *et al.* (1986) e a segunda a equação de BURBINE *et al.* (2003). (BURBINE *et al.*, 2003)

& Abe, 2001) e encontraram um albedo geométrico de $p_V = 0,35 \pm 0,11$, um valor um pouco maior do que a média dos asteroides tipo-S de $p_V = 0,21 \pm 0,07$ (THOLEN, 1984), mas dentro da margem de incerteza. Além disso, a partir do mesmo modelo, os autores também estimaram o diâmetro efetivo na máxima fase rotacional do asteroide, $D = 320 \pm 30$ m. O valor encontrado para o parâmetro de *beaming* de Itokawa foi de $\eta = 1,1$. A partir desses resultados e do modelo elipsoidal de Itokawa (OHBA, 2002), os autores calcularam uma das primeiras estimativas acerca das dimensões do asteroide Itokawa. Os valores encontrados para o tamanho dos eixos do asteroide foram: 620 ± 140 m \times 280 ± 60 m \times 160 ± 30 m. Os autores argumentam que o valor de 1,1 para o parâmetro de *beaming* sugere que a superfície do asteroide ou é coberta por uma camada de regolitos muito fina, ou rochas nuas, pois o asteroide apesar de pequeno possui uma maior inércia térmica e albedo em comparação aos asteroides maiores. No mesmo trabalho os autores apresentaram um diagrama cor-cor, pode ser visto na figura 3.5, corroborando assim com a classificação do asteroide Itokawa como sendo um asteroide do tipo-S.

Os autores adicionaram também uma busca por alguma evidência relacionada à presença de uma banda característica de $3 \mu\text{m}$ de minerais hidratados e/ou hidroxilados. Apesar da banda de hidratação em $3 \mu\text{m}$ não ser detectada no espectro de Itokawa, os autores utilizaram a mesma técnica apresentada em SALISBURY *et al.* (1991) como uma estratégia de mensurar a porcentagem em massa de água de Itokawa a partir de uma correlação com a profundidade da banda de absorção O-H para meteoritos. A conclusão em ISHIGURO *et al.* (2003) foi que a superfície de Itokawa possui 1 % ou menos de água em massa.

LEDERER *et al.* (2008) apresentaram uma análise utilizando um modelo fotométrico de Hapke a partir de observações terrestres para o asteroide Itokawa durante sua

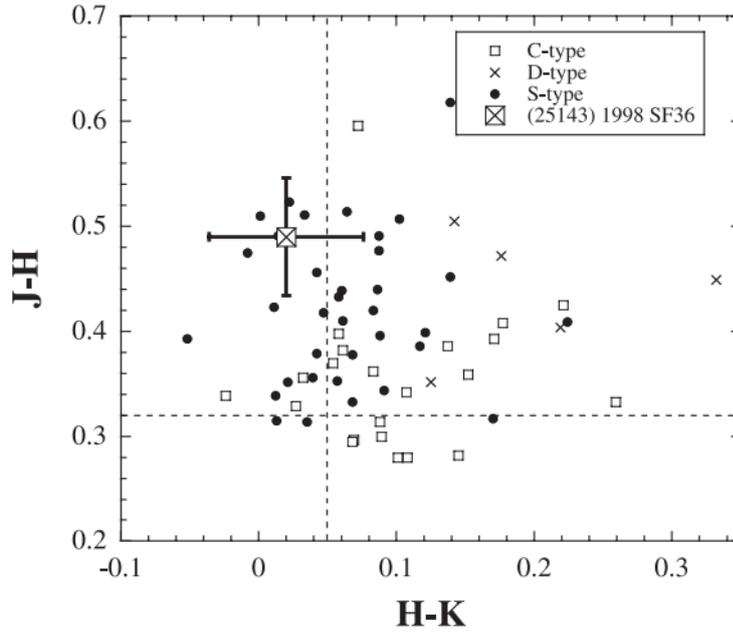


Figura 3.5: Diagrama cor-cor para o (25143) Itokawa a partir das observações fotométricas e a comparação com os asteroides que foram observados durante o *survey* 2MASS. (ISHIGURO *et al.*, 2003)

aproximação à Terra no ano de 2004. Os dados foram obtidos através de uma campanha observacional no visível e no infravermelho próximo nos observatórios Las Campanas e no Observatório Lowell com uma cobertura total do ângulo de fase solar de 4° até 129° . No Observatório Las Campanas, o principal telescópio utilizado foi o Swope de 1 metro, utilizando o conjunto de filtros UBVRI, BVR de Harris, T2 de Washington (Equivalente ao filtro I) e U de Johnson. Porém, os telescópios Baade e o telescópio Clay, ambos de 6,5 metros e utilizando os filtros BVRI, também foram utilizados nos filtros JHK. As observações no infravermelho próximo foram realizadas pelo telescópio duPont de 2,5 metros. No Observatório Lowell, o telescópio utilizado foi o Perkins de 1,8 metro nos filtros BVRI de Johnson. Esse trabalho foi dividido em dois artigos publicados separadamente, parte dos métodos que apresentarei a seguir podem ser encontrado na primeira parte do artigo em THOMAS-OSIP *et al.* (2008).

As observações, uma vez convertidas em magnitudes reduzidas foram ajustadas em função da curva de fase rotacional. Uma remoção de primeira ordem das variações de fase solar foi realizada utilizando a relação:

$$m_{solar} = m_r - 0.028g \quad (3.2)$$

Essa é uma relação empírica onde m_{solar} é a magnitude reduzida corrigida para variações do ângulo de fase solar, m_r é a magnitude reduzida e g é o ângulo de

fase solar. A função aplicada para modelar o comportamento da curva de luz rotacional usava uma combinação linear de uma função seno e uma função cosseno da forma $m_r = C + F(\omega)$, onde C é uma constante igual à média da magnitude reduzida sobre o ângulo de rotação e ω é o ângulo de fase rotacional em radianos. A magnitude reduzida corrigida rotacionalmente, m_{rr} , foi obtida usando a seguinte relação:

$$m_{rr} = m_r - F(\omega) \quad (3.3)$$

As magnitudes reduzidas corrigidas rotacionalmente foram convertidas em magnitudes absolutas, m_a , utilizando a relação:

$$m_a = m_{rr} - m_s - 2.5 \log\left(\frac{\pi}{A}\right) + \log(s) \quad (3.4)$$

Onde A é a área projetada do asteroide, s é a distância entre a Terra e o Sol no momento da observação e m_s é a magnitude do Sol visto da distância s . Os autores também calcularam qual seria o albedo geométrico para o Itokawa utilizando a relação (TOMASKO, 1976):

$$\log(p) = 0.4(M_{\odot} - H) - 2\log(r) + 16.35 \quad (3.5)$$

Onde M_{\odot} é a magnitude aparente do Sol, r é o raio do objeto. Para o raio do objeto, eles utilizaram o raio de uma esfera de igual área de superfície medida pela sonda Hayabusa (DEMURA *et al.*, 2006a), encontrando um valor de $0,23 \pm 0,02$. Tendo as grandezas de magnitudes calibradas, albedo, área iluminada e distância do Sol à Terra, a equação de Hapke utilizada foi a do fator de radiância integrado sobre uma esfera:

$$\begin{aligned} \frac{I}{F} = & \left[\left(\frac{\omega}{8} [(1 + B(g))p(g) - 1] + \frac{r_o}{2}(1 - r_o) \right) \right. \\ & \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{g}{2}\right) \tan\left(\frac{g}{2}\right) \ln\left[\cot\left(\frac{g}{4}\right)\right] \right) \\ & \left. + \frac{2}{3} r_o \left(\frac{\sin(g) + (\pi - g)\cos(g)}{\pi} \right) \right] S(g, \bar{\theta}) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Onde ω é o albedo de espalhamento simples, g é o ângulo de fase solar e $\bar{\theta}$ é o parâmetro de rugosidade e a função $S(g, \bar{\theta})$ é a correção para a rugosidade da superfície onde o parâmetro de rugosidade da superfície é definido como a inclinação média sobre o

elemento de resolução do detector (HAPKE, 1984). O termo r_o é dado por:

$$r_o = \frac{(1 - \sqrt{1 + \omega})}{(1 + \sqrt{1 - \omega})} \quad (3.7)$$

E o termo do efeito de oposição, $B(g)$ é dado por:

$$B(g) = \frac{B_o}{\left[1 + \frac{\tan(g/2)}{h}\right]} \quad (3.8)$$

Onde B_o descreve a amplitude do efeito de oposição e h a largura do efeito de oposição. A função de espalhamento simples, $p(g)$, usado na equação de Hapke era uma função de Henyey-Greenstein da forma:

$$p(g) = \frac{(1 - c)(1 - b^2)}{[1 - 2bcos(g) + b^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{c(1 - b^2)}{[1 + 2bcos(g) + b^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (3.9)$$

Onde o b descreve a amplitude dos lóbulos de espalhamento e c descreve o espalhamento relativo entre as direções de espalhamento, para frente (valores altos de c) ou para trás (valores baixos de c). A rotina adotada encontra o conjunto dos parâmetros de Hapke (ω , B_o , h , b e c) que minimiza χ e pode variar todos os parâmetros simultaneamente:

$$\chi = \frac{([I/F]_{observado}) - [I/F]_{medido})^2}{N} \quad (3.10)$$

Onde N é o número de dados. Os resultados para cada filtro podem ser observados nas tabelas 3.1 e 3.2. Os valores de incerteza ausentes em alguns dos parâmetros nas tabelas não foram apresentados pelos autores.

Tabela 3.1: Resumo dos valores dos parâmetros de Hapke para os filtros U, B, V e R. (LEDERER *et al.*, 2008)

Parametros	Filtro U	Filtro B	Filtro V	Filtro R
ω	0,53 ± 0,07	0,66 ± 0,04	0,7 ± 0,04	0,71 ± 0,04
B_o	1	0,04 ± 0,1	0,02 ± 0,1	0,05 ± 0,1
h	0,05	0,25 ± 0,1	0,141 ± 0,1	0,231 ± 0,1
b	0,53 ± 0,1	0,61 ± 0,04	0,59 ± 0,04	0,56 ± 0,04
c	0,89 ± 0,1	0,89 ± 0,04	0,87 ± 0,04	0,84 ± 0,04
g	40 ^o ± 10 ^o	40 ^o ± 5 ^o	40 ^o ± 5 ^o	40 ^o ± 5 ^o
χ	8,08E-06	7,04E-05	7,21E-05	9,17E-05

LEDERER *et al.* (2008) argumentam que os resultados da modelagem do asteroide (25143) Itokawa parece muito diferente de qualquer outro asteroide visitado por uma sonda espacial anteriormente, as propriedades físicas de sua superfície parecem diferenciar dos asteroides tipo-S. Tanto o albedo de Bond como as integrais de fase diferem dos asteroides tipo-S típicos. Apesar disso, os valores de cores são consistentes com os asteróides do tipo-S do cinturão principal bem como o albedo geométrico. Todos os ajustes

Tabela 3.2: Resumo dos valores dos parâmetros de Hapke para os filtros I, H, J e K. (LEDERER *et al.*, 2008)

Parametros	Filtro I	Filtro H	Filtro J	Filtro K
ω	$0,73 \pm 0,04$	$0,69 \pm 0,2$	$0,61 \pm 0,2$	$0,58 \pm 0,2$
B_o	$0,23 \pm 0,1$	0,90	0,95	0,97
h	$0,46 \pm 0,1$	0,12	0,42	0,111
b	$0,59 \pm 0,04$	$0,41 \pm 0,35$	$0,43 \pm 0,35$	$0,31 \pm 0,35$
c	$0,89 \pm 0,04$	$0,67 \pm 0,35$	$0,78 \pm 0,35$	$0,44 \pm 0,35$
g	$40^\circ \pm 5^\circ$	40°	40°	40°
χ	1,32E-04	5,62E-05	5,95E-06	9,02E-06

para o parâmetro de rugosidade da superfície produzem um valor alto, o que sugere uma superfície pedregosa. Uma das características observadas que destoa do esperado é que o Itokawa não apresenta um retroespalhamento e sim um espalhamento para frente, isso é o exato oposto do que foi observado em outros asteroides tipo-S estudados por sondas espaciais como Eros, Gaspra e Ida (DOMINGUE *et al.*, 2002). Essa característica pode ser observada para todos os filtros na figura 3.6.

Os autores também analisaram a porosidade e o tamanho dos grãos do regolito de Itokawa a partir do pico de oposição seguindo a seguinte expressão:

$$h = -\left(\frac{3}{8}\right)N \ln(\rho) \quad (3.11)$$

Onde ρ é a porosidade e N é a função de distribuição do tamanho das partículas (HAPKE, 1986). Empiricamente essa distribuição do tamanho das partículas foi calculada para os regolitos da Lua e aplicada para este trabalho:

$$N = \frac{\sqrt{3}}{\ln(r_l/r_s)} \quad (3.12)$$

Onde r_l e r_s são os raios correspondentes a maior e a menor partícula, respectivamente. Os autores, então, estimaram a porosidade do regolito de Itokawa e o compararam com as amostras da Lua apresentadas em HELFENSTEIN e VEVERKA (1987) e HARTMAN e DOMINGUE (1998) e com os resultados referentes a Eros, Gaspra, Ida e a média dos asteroides tipo-S (DOMINGUE *et al.*, 2002). Essa comparação pode ser observada na figura 3.7

É possível observar que para todos os filtros a porosidade estimada para o Itokawa é menor em comparação com os outros asteroides e a Lua, o que sugere que seu regolito é mais compacto do que nesses outros objetos. Apesar dessa conclusão, os autores argumentam que o resultado pode ter sido prejudicado pela falta de dados dentro do intervalo de oposição ($0 - 5^\circ$), haja visto que o menor ângulo de fase solar dentro das observações foi 4° .

Em resumo, podemos observar que o modelo foi capaz de obter um resultado

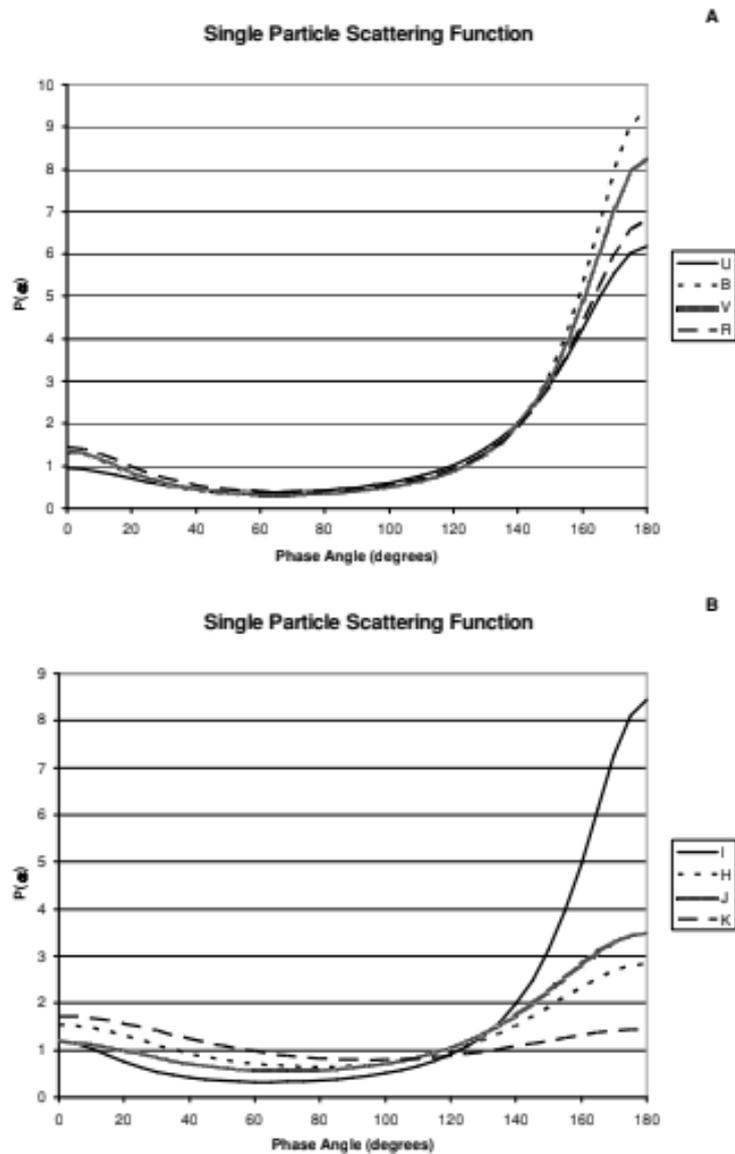


Figura 3.6: Resultado do espalhamento simples a partir do modelo de Hapke para diferentes filtros. Em todos os filtros é possível observar que há um espalhamento para frente. (A) Os resultados do filtro U são apresentados por uma linha sólida; o B são em uma linha tracejada curta; os resultados do filtro V em uma linha sólida mais grossa; os resultados do filtro R são apresentados por uma linha tracejada mais longa. (B) Os resultados do filtro I são apresentados por uma linha sólida; os resultados do filtro H por uma linha tracejada curta; os resultados do filtro J por uma linha sólida mais grossa e os resultados do filtro K são apresentados por uma linha tracejada longa. (LEDERER *et al.*, 2008)

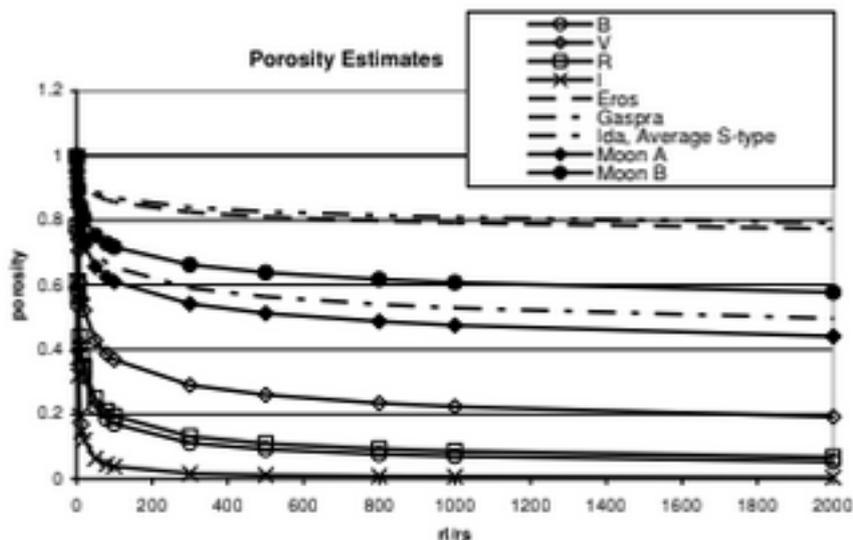


Figura 3.7: Representação da porosidade estimada a partir do modelo de Hapke para os filtros B (linha com círculos abertos), V (linha com diamantes), R (linha com quadrados) e I (linhas com 'x'). Os autores também apresentam as porosidades de outros asteroides: Eros (linha tracejada), Gaspra (linha alternada entre traço e ponto), Ida e a média dos tipo-S (linha alternada entre um traço e dois pontos). Além de dois resultados distintos para amostras da Lua, as linhas com diamantes sólidos e a linha com círculos sólidos. (LEDERER *et al.*, 2008)

confiável com relação à superfície do asteroide, as imagens da superfície de Itokawa (FUJIWARA *et al.*, 2006) confirmaram o caráter pedregoso indicada pelo modelo. Os autores argumentam que esse esse resultado é um indicativo que o modelo de Hapke consegue pre-dizer corretamente a rugosidade de um asteroide mesmo utilizando dados de observações terrestres.

3.1.2 Período de rotação e Modelo de forma

Em 2002, DERMAWAN *et al.* (2002) conduziram observações fotométricas no observatório NAO-Mitaka com a finalidade de estudar as propriedades físicas de Itokawa. A maior parte das observações foram realizadas na banda I, com a exceção de uma noite em específica que utilizaram os filtros B V R I para a obtenção das cores do asteroide, cores essas que possuem concordância com os trabalhos já citados. Os autores utilizaram a análise de Fourier para ajustar a curva de luz calcular o período do asteroide, o valor encontrado foi de $P = 12,13 \pm 0,02$ horas, a curva de fase rotacional pode ser observada na figura 3.8.

Como o asteroide Itokawa é um objeto pouco luminoso a maior parte do tempo, muitas das curvas de luz possuem bastante ruído e outras não possuem pontos o suficiente, KAASALAINEN *et al.* (2003) selecionaram 35 das curvas de luz que possuíam melhor qualidade e quantidade de dados da campanha observacional de 2001 para uma tentativa

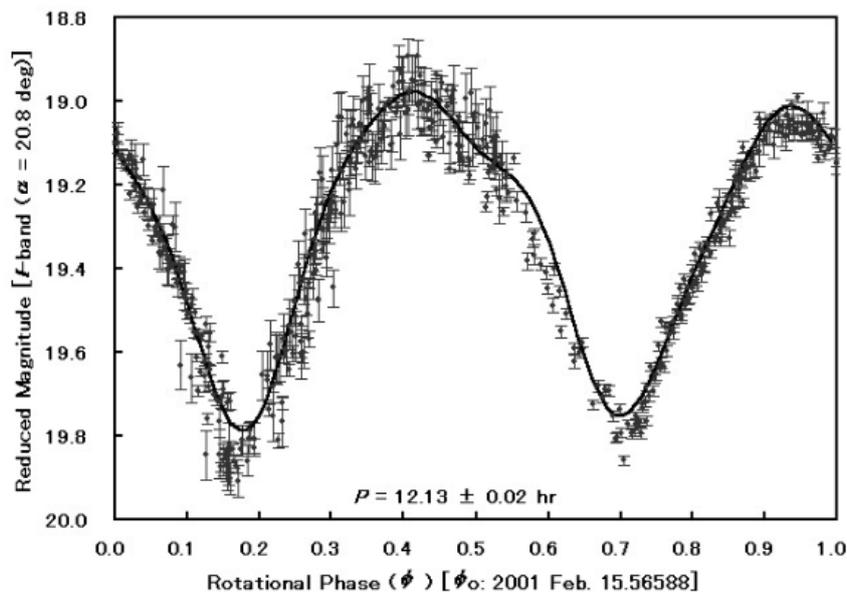


Figura 3.8: Curva de luz composta do Asteroide (25143) Itokawa. O período estimado foi de 12,13 horas. A linha sólida é o ajuste da análise de Fourier. (DERMAWAN *et al.*, 2002)

de montar um modelo de forma do asteroide (25143) Itokawa a partir da técnica de inversão da curva de luz. Os ângulos de fase solar variaram entre 15° e 87° e isso foi o suficiente para dar uma ideia aproximada da curva de fase do objeto (figura 3.9), porém os autores salientaram que a falta de pequenos ângulos de fase prejudique um estudo mais elaborado.

KAASALAINEN *et al.* (2003) afirmam que a maior parte da iluminação parece ter sido equatorial, o que foi uma grande vantagem para estipular um período de rotação de Itokawa. O período apresentado foi de $P = 12,132 \pm 0,0005$ horas. Esse resultado é consistente com o período encontrado por DERMAWAN *et al.* (2002). No mesmo trabalho eles apresentaram também uma determinação da direção dos polos do asteroide, $\lambda = 355^\circ \pm 5^\circ$ de longitude eclíptica e $\beta = 84^\circ \pm 5^\circ$ de latitude eclíptica. O modelo de forma de Itokawa apresentado no trabalho é um elipsoide com uma razão global entre os eixos de: $a/b = 2,0$; $b/c = 1,3$. Onde a superfície provavelmente não contém grandes concavidades e nenhuma variação significativa de albedo foi detectada. Essa razão entre os eixos parece estar próxima do tamanho estimado pelo trabalho de ISHIGURO *et al.* (2003) relatado anteriormente nesta dissertação.

No ano de 2004, OSTRO *et al.* (2004) apresentou uma outra estimativa para o tamanho dos eixos de Itokawa a partir de observações de radar utilizando os rádio-observatórios Arecibo e o observatório Goldstone, as dimensões apresentados no trabalho foram: $548 \times 312 \times 276\text{m} \pm 10\%$. Em decorrência de uma nova aproximação do asteroide Itokawa à Terra em 2014, foram conduzidas novas observações utilizando os mesmos telescópios e uma nova tentativa de desenvolver um modelo de forma mais preciso foi re-

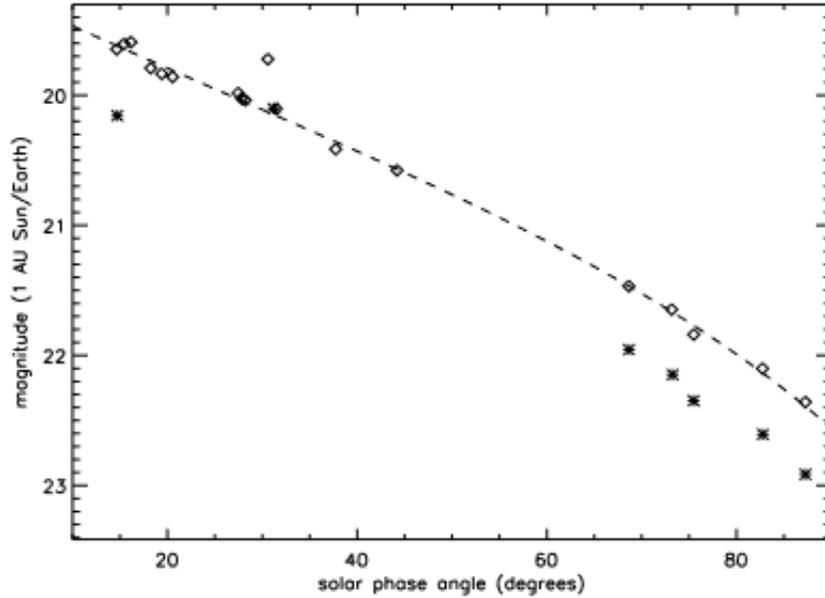


Figura 3.9: A curva de fase solar do asteroide (25143) Itokawa. Os losangos são as magnitudes da curva de fase no filtro R e os asteriscos são no filtro V. (KAASALAINEN *et al.*, 2003)

alizado. OSTRO *et al.* (2005) criaram dois modelos que foram denominados como *rough model* e *smooth model*, ambos podem ser vistos na figura 3.10. O *rough model* apresenta os eixos nas dimensões de $590 \times 323 \times 310 \pm 10\%$ enquanto o *smooth model* possui eixos de $598 \times 317 \times 276 \pm 10\%$.

3.1.3 Resumo dos resultados oriundos das observações terrestres

Podemos sintetizar os resultados dos trabalhos que utilizaram observações terrestres apresentados até agora acerca do asteroide (25143) Itokawa. O Itokawa apresenta bandas de absorção em 1 e 2 μm , evidenciando a presença de olivina e piroxênio em sua composição (BINZEL *et al.*, 2001). Suas bandas de absorção e suas cores indicam que seja compatível com um asteroide tipo-S, mais precisamente um asteroide S(IV) (BINZEL *et al.*, 2001) (ISHIGURO *et al.*, 2003) (LEDERER *et al.*, 2008). O albedo de Itokawa reforça essa afirmação, pois coincide dentro do limite superior à média dos asteroides de classe S sendo, $p_V = 0,35 \pm 0,11$ em ISHIGURO *et al.* (2003) e está bem alinhado com os tipo-S em LEDERER *et al.* (2008), sendo $p_V = 0,23 \pm 0,02$. Ainda assim, o asteroide Itokawa possui algumas características peculiares que o diferenciam dos tipo-S tradicionais. O albedo de Bond e as integrais de fase diferem dos asteroides tipo-S típicos, e uma das características que mais destoam do esperado é que o Itokawa não apresenta um retroespalhamento e sim um espalhamento para frente. (LEDERER *et al.*, 2008).

A mineralogia do asteroide parece ser compatível com o de meteoritos condritos ordinários H, L ou LL - principalmente com os L e LL - apesar de apresentar um espectro

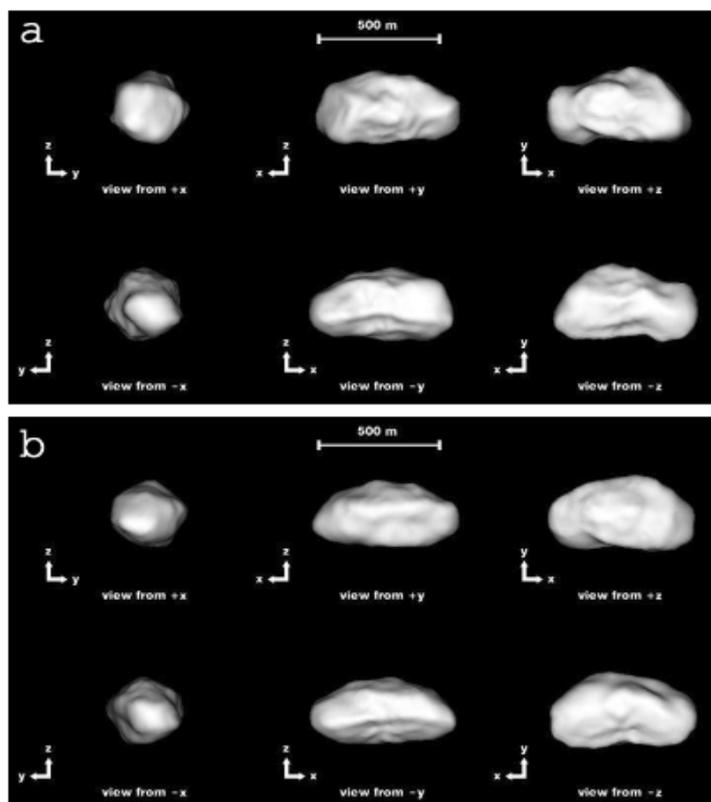


Figura 3.10: Modelos de forma do asteroide (25143) Itokawa. a) *rough model* e b) *smooth model* de OSTRO *et al.* (2005).

muito mais avermelhado (BINZEL *et al.*, 2001) (ISHIGURO *et al.*, 2003). Não apresenta evidências de hidratação (BINZEL *et al.*, 2001). O regolito de Itokawa parece ser mais compacto do que os regolitos da Lua e dos outros asteroides que já foram visitados por sondas espaciais (Eros, Gaspra e Ida) e possui um parâmetro de rugosidade médio de 40° (LEDERER *et al.*, 2008).

O Asteroide Itokawa é um corpo elipsoidal cujos eixos medem: $a/b = 2,0$; $b/c = 1,3$ de acordo com KAASALAINEN *et al.* (2003); $620 \pm 140 \text{ m} \times 280 \pm 60 \text{ m} \times 160 \pm 30 \text{ m}$ de acordo com ISHIGURO *et al.* (2003); $548 \times 312 \times 276 \text{ m} \pm 10 \%$ de acordo com OSTRO *et al.* (2004); $590 \times 323 \times 310 \pm 10\%$; $598 \times 317 \times 276 \times \pm 10 \%$ de acordo com OSTRO *et al.* (2005).

O período de rotação de Itokawa é de $P = 12,13 \pm 0,02$ horas de acordo com DERMAWAN *et al.* (2002), $P = 12,132 \pm 0,0005$ horas de acordo com KAASALAINEN *et al.* (2003) e possui $\lambda = 355^\circ \pm 5^\circ$ de longitude eclíptica e $\beta = 84^\circ \pm 5^\circ$ de latitude eclíptica (KAASALAINEN *et al.*, 2003).

3.2 Resultados da missão Hayabusa

Durante a aproximação da sonda espacial Hayabusa ao asteroide (25143) Itokawa no final do ano de 2005, uma variedade de dados foram obtidos sobre sua forma, massa e topografia de superfície, bem como suas abundâncias mineralógicas.

3.2.1 Massa, tamanho e superfície de Itokawa

As primeiras estimativas sobre o tamanho, a massa e a densidade do asteroide (25143) Itokawa utilizando os dados oriundos das observações utilizando os instrumentos da sonda espacial Hayabusa vieram de FUJIWARA *et al.* (2006). A massa de Itokawa foi estimada a partir da medida da perturbação na trajetória da sonda espacial enquanto se aproximava do asteroide, a distância entre o asteroide e a sonda foi medida a partir do instrumento LIDAR. A estimativa para a massa ocorreu quatro vezes em intervalos de distâncias diferentes em relação ao asteroide, a primeira tentativa ocorreu quando a sonda passou da fase de *gate position* para a fase de *home position*. O valor estimado foi de $3,51 \times 10^{10} \text{ kg} \pm 15 \% \text{ kg}$. Os autores esperavam aperfeiçoar essa estimativa assim que a Hayabusa estivesse se aproximando ainda mais de Itokawa, porém, como já citado anteriormente, houve problemas nas rodas de reação da sonda espacial, o que provocou a necessidade de utilizar os propulsores com frequência para controlar a altitude dificultando as tentativas seguintes de determinação de massa. A segunda estimativa ocorreu a uma distância de cerca de 3 km do asteroide, quando intencionalmente paralisaram as manobras de controle de altitude com esse intuito. A massa estimada foi de $3,43 \times 10^{10} \text{ kg} \pm 15 \% \text{ kg}$. A terceira tentativa aconteceu quando a sonda estava entre 1400 e 800 metros, o que resultou em uma massa de $3,58 \times 10^{10} \text{ kg} \pm 5 \% \text{ kg}$ e quarta tentativa quando a sonda se aproximava de Itokawa em um intervalo de distância de 800 metros até 100 metros, $3,54 \times 10^{10} \text{ kg} \pm 6 \% \text{ kg}$. Como uma tentativa de assegurar maior confiabilidade ao resultado, os autores decidiram tirar uma média das quatro estimativas: $3,51 \times 10^{10} \pm 0,105 \times 10^{10} \text{ kg}$.

O asteroide parece ser composto por duas partes unidas, um elipsoide menor e um maior, essa característica pode ser observada na figura 3.11, o que possibilitou alguns questionamentos dos autores sobre qual a razão para essa configuração. Uma possibilidade levantada é que a ruptura que deu origem ao asteroide Itokawa fragmentou dois grandes bólidos que se uniram, a outra possibilidade levantada é que esse formato possa ser oriundo de alguma grande colisão com outro bólido. Os cientistas que analisaram as imagens do AMICA observaram que o formato de Itokawa os lembrava uma lontra marinha, sendo assim apelidaram a parte maior de *otter's body* (o corpo da lontra marinha), e a parte menor de *otter's head* (a cabeça da lontra marinha). As estimativas para o tamanho dos eixos do asteroide Itokawa são de $535 \text{ m} \times 294 \text{ m} \times 203 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$. FUJIWARA *et al.* (2006) também apresentaram uma estimativa para a densidade de Itokawa. O volume

adotado pelos autores foi de $1,84 \pm 0,092 \times 10^7 \text{ m}^3$, portanto a densidade calculada para o asteroide foi de $1,9 \pm 0,13 \text{ g cm}^{-3}$.

Esse volume adotado por FUJIWARA *et al.* (2006) foi estimado por DEMURA *et al.* (2006a), onde os autores realizam uma das primeiras tentativas de criar um modelo de forma tridimensional para o Itokawa a partir dos dados do AMICA. Além disso, os autores apresentam também medidas da área da superfície, calculada em $0,393 \text{ km}^2$, e as medidas para o volume, utilizadas para o cálculo da densidade, $1,84 \pm 0,092 \times 10^7 \text{ m}^3$.

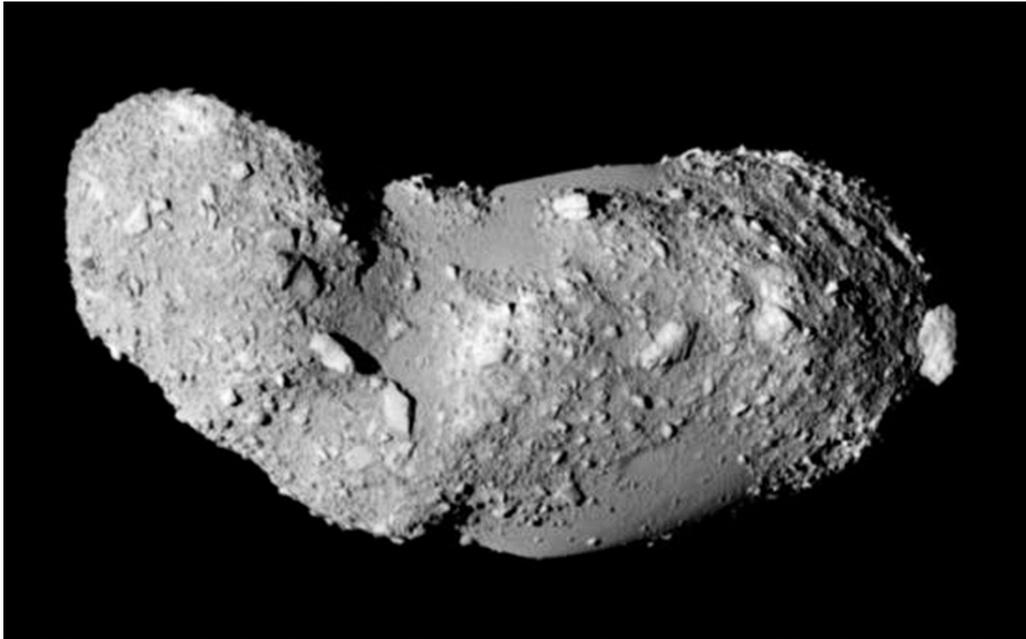


Figura 3.11: Fotografia captura pelo instrumento AMICA enviada pela sonda espacial Hayabusa quando se aproximava do asteroide (25143) Itokawa em 2005. Divulgação feita pela JAXA.

A partir das imagens do AMICA, SAITO *et al.* (2006) aponta que a superfície de Itokawa apresenta uma variedade de características que sugerem uma história evolutiva complexa. Eles afirmam que é possível observar dois tipos diferentes de terrenos em sua superfície, um terreno mais pedregoso e um terreno mais suave. Sendo o terreno mais pedregoso mais dominante sobre a superfície em cerca de 80%. Inúmeros pedregulhos podem ser observados na região pedregosa, alguns de dimensões de alguns metros até o maior de todos que é chamado de Yoshinodai com dimensões de $50 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 20 \text{ m}$. Os autores argumentaram que não seria possível explicar por simples processos de formação de crateras a quantidade e variedade de pedregulhos existentes na superfície do asteroide, isso porque o número total de crateras em Itokawa é pequeno. Mesmo incluindo todos os candidatos a crateras ainda indefinidas, esse número não passa de 100. Portanto, é provável que os pedregulhos podem ter sido produzidos durante a ruptura catastrófica que gerou o Itokawa, o que é consistente com a estrutura de *rubble-pile* de Itokawa (SAITO *et al.*, 2006) (FUJIWARA *et al.*, 2006). Há duas grandes regiões de terrenos mais suaves,



Figura 3.12: Modelo de forma do asteroide (25143) Itokawa desenvolvido por Gaskell.

a região de Muses Sea e a região de Sagamihara, essas regiões coincidem com os pontos onde o potencial gravitacional é mais baixo, o que pode levar a hipótese que a própria gravidade do asteroide é responsável por transportar materiais mais finos para essas regiões e por isso possuem essa característica.

Uma das regiões mais intrigantes e interessantes da superfície de Itokawa é a região que foi nomeada como *Little Woomera*, em homenagem ao deserto de Woomera (região selecionada para o pouso da capsula de reentrada). Esta é uma das maiores regiões de depressão de Itokawa e é relativamente mais escura do que toda a região ao redor dela. Mas de maneira geral, SAITO *et al.* (2006) afirmam que a superfície de Itokawa apresenta uma certa heterogeneidade em cor e albedo, o que é uma das características mais intrigantes do asteroide já que corpos de asteroides já observados anteriormente por sondas espaciais não mostravam grandes variações em ambas características, como (243) Ida e (433) Eros. Os autores encontraram uma variação de mais de 30% no albedo na banda V em comparação com apenas 15% de variação na cor da razão entre as bandas w e b. Em geral, as áreas mais brilhantes de Itokawa são mais azuladas e as áreas mais escuras são mais avermelhadas, parece existir uma correlação entre albedo e cor.

GASKELL *et al.* (2006) apresentaram um conjunto de mapas topográficos de alta resolução cobrindo a superfície do asteroide Itokawa a partir dos dados do instrumento AMICA. Cada mapa possuía 99×99 píxeis. Esses mapas podem ser utilizados para a construção de modelos topográficos globais. Utilizando o modelo topográfico de Itokawa, os autores estimaram seu volume como $0,0178 \pm 0,0001 \text{ km}^3$. Os autores também estimaram uma densidade média de $2,0 \text{ g cm}^{-3}$. Um modelo de forma foi desenvolvido e descrito em GASKELL *et al.* (2008). O modelo é baseado em 775 imagens do AMICA tiradas entre os dias 11 de setembro e 12 de novembro de 2005 e possui 4 resoluções diferentes.

3.2.2 A Mineralogia do asteroide (25143) Itokawa

A sonda especial Hayabusa levou consigo três instrumentos cuja principal função era o estudo das propriedades mineralógicas do asteroide (25143) Itokawa, são eles: O instrumento NIRS, o instrumento XRS e a sonda MINERVA. Além disso, o mecanismo de coleta de amostras trouxe para laboratórios terrestres amostras de sua superfície. Apesar de, como já citado, os objetivos da sonda MINERVA não terem sido finalizados com sucesso, os outros instrumentos obtiveram êxito.

Durante a missão, o instrumento NIRS obteve mais de 80.000 espectros do asteroide Itokawa durante o período de mapeamento, tentando cobrir toda a superfície do asteroide, os espectros do NIRS foram obtidos em ângulos de fase solar variando de 0° a 38° e o *footprint* de 6 a 90 metros. ABE *et al.* (2006) apresentaram a curva de fase solar do asteroide a partir do modelo de ocultação de sombras de cinco parâmetros de Hapke (HAPKE, 1986), a figura 3.13 apresenta a curva de fase solar do asteroide para o comprimento de onda de $0,952 \mu\text{m}$ na figura 3.13a e na figura 3.13b a razão entre as reflectâncias $1,565 \mu\text{m}$ e $0,952 \mu\text{m}$. Na figura 3.13a os autores utilizaram apenas os dados chamados de *top envelope*, aqueles que dentro de um intervalo de $0,2^\circ$ de ângulo de fase possuíam maior razão sinal ruído. Em ambos os gráficos, há também a curva do asteroide (433) Eros, asteroide observado pela sonda espacial NEAR Shoemaker.

Os autores observam que Itokawa se avermelha com o aumento do ângulo de fase. Esse efeito de avermelhamento já era previsto em estudos de laboratórios e é consistente com o avermelhamento de fase detectado pelo NEAR Shoemaker em Eros. A reflectância é até 9% maior no ângulo de 38° do que em 0° . Além disso, os autores apresentaram uma média do espectro de Itokawa em dois dias distintos, dia 21 de setembro de 2005 e dia 08 de outubro de 2005. Eles ajustaram o contínuo como o inverso do comprimento de onda. Após a remoção dessa contribuição, os autores puderam perceber que o espectro de Itokawa se assemelhava muito a de um meteorito condrito ordinário LL. Mais especificamente, as amostras do meteorito Alta'ameem que possuíam partículas menores que $<125 \text{ mm}$. O Alta'ameem é um meteorito condrito ordinário LL5. Essa comparação direta pode ser observada na figura 3.14. Os autores ressaltam que o espectro obtido pelo NIRS não abrange totalmente a Banda II, eles consideraram a contribuição do contínuo como uma reta.

Os espectros de Itokawa e do meteorito Alta'ameem parecem ter bastante consistência entre si dentro dos limites da Banda I. Há, porém, alguma discrepância observada para além desses limites. Os espectros não parecem combinar a partir do comprimento de onda de $1,5 \mu\text{m}$ e é possível que isso se deva a diferenças mineralógicas entre o regolito de Itokawa e o meteorito.

ABE *et al.* (2006) apresentaram também uma comparação direta entre o asteroide Itokawa, o asteroide Eros e amostras de condritos ordinários, acondritos primitivos

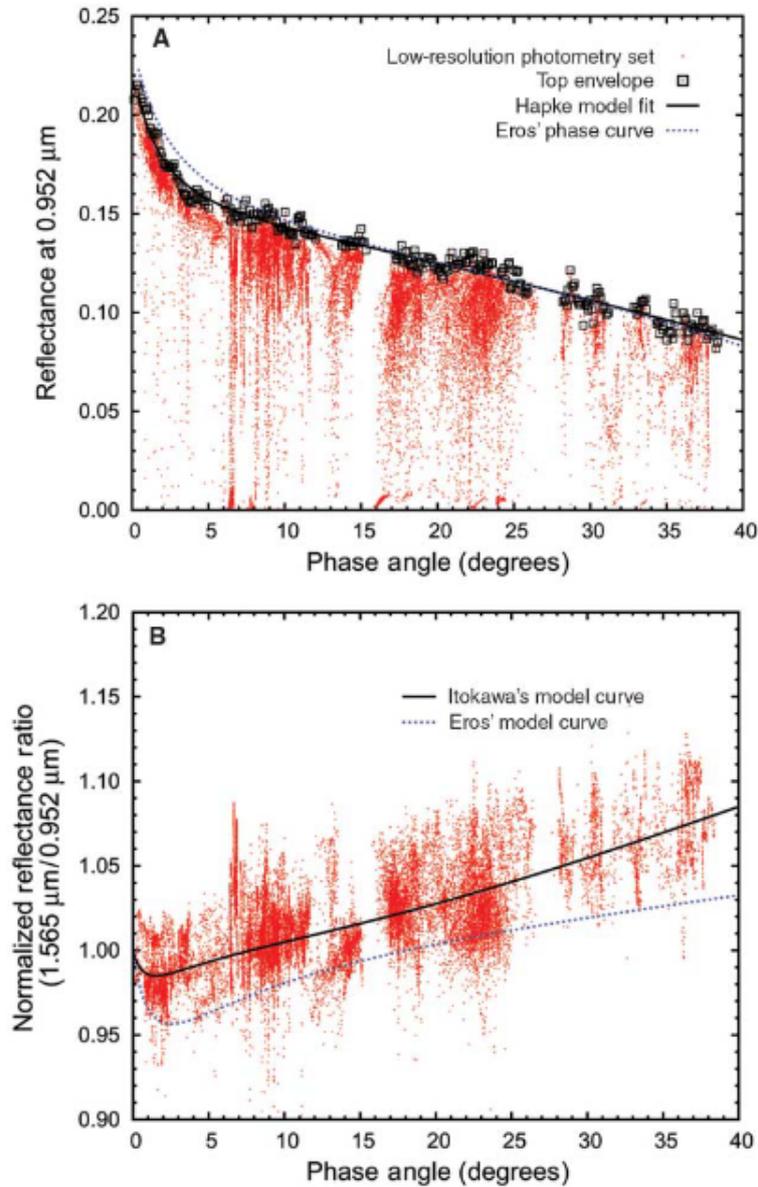


Figura 3.13: (A) Reflectância no comprimento de onda de $0,952 \mu\text{m}$ do asteroide (25143) Itokawa em função do ângulo de fase solar. As caixas representam os *top envelope* para cada intervalo de $0,2^\circ$ de ângulo de fase. Os *top envelope* são os dados que possuem maior razão sinal ruído e foram utilizados para gerar o modelo fotométrico. (B) Razão da reflectância em $1,565 \mu\text{m}$ em relação a $0,952 \mu\text{m}$ em função do ângulo de fase. Tanto em (A) quanto em (B), há uma comparação com o asteroide (433) Eros. (ABE *et al.*, 2006)

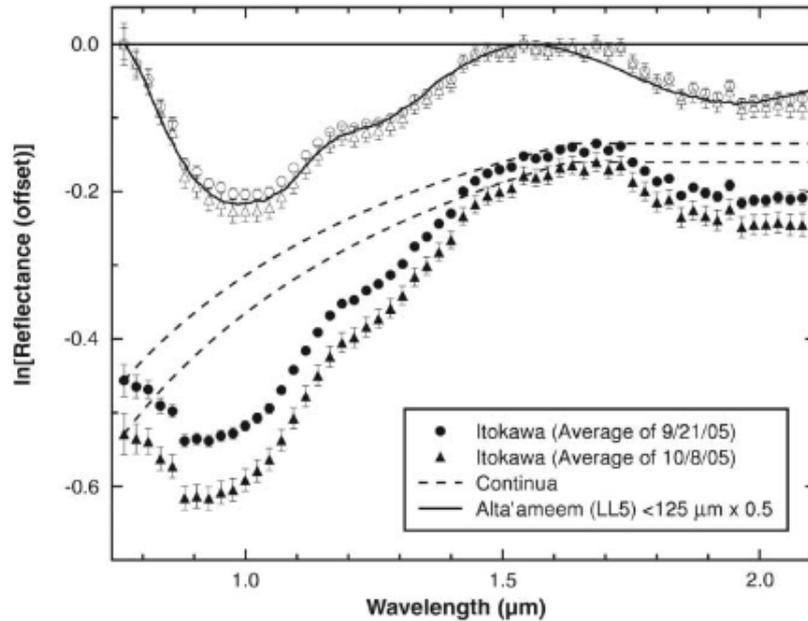


Figura 3.14: Espectros de reflectância observados pelos NIRS em 21 de setembro de 2005 (círculos sólidos) e 8 de outubro de 2005 (triângulos sólidos). O contínuo de fundo (curvas pontilhadas) é subtraído das curvas de reflectância e são gerados novamente (círculos abertos e triângulos abertos) com o espectro do meteorito condrito ordinário LL5 Alta'ameem (linha sólida). (ABE *et al.*, 2006)

e misturas de minerais contendo ortopiroxênio, olivina e plagioclásio. Essa comparação levou em consideração a razão da intensidade de absorção em $1,25 \mu\text{m}$ e $1,05 \mu\text{m}$ em relação a $0,95 \mu\text{m}$ (figura 3.15). Os autores constataram que o asteroide Itokawa parece ser um conjunto rico em olivina semelhante aos condritos LL5 ou LL6. Mais especificamente, O gráfico sugere que o asteroide Itokawa possui uma razão olivina/(olivina+piroxênio) de cerca de 70 a 80% em sua composição superficial média.

Além disso, os autores compararam diretamente espectros obtidos pelo NIRS em diferentes regiões de Itokawa, uma região mais suave do asteroide e duas regiões mais pedregosas com menor e maior albedo. O resultado observado foi uma grande variabilidade de albedo entre os terrenos. O espectrômetro encontrou uma variação de mais de 10% no albedo e na profundidade da banda de absorção em $1 \mu\text{m}$ entre a região pedregosa mais escura e a de maior albedo.

KITAZATO *et al.* (2008) apresentaram outra análise fotométrica a partir dos dados do instrumento NIRS onde foi aplicado o modelo de Hapke (HAPKE, 2002). Diferentemente do trabalho apresentado anteriormente, o trabalho de KITAZATO *et al.* (2008) está mais preocupado em derivar as propriedades fotométricas globais em termos do modelo fotométrico de Hapke. Para estimar a visão geométrica de cada observação, os autores utilizaram o modelo de forma de Gaskell mais atualizado até então, que consistia em 49.152 faces. A seleção dos dados preencheram os seguintes critérios: as efemérides

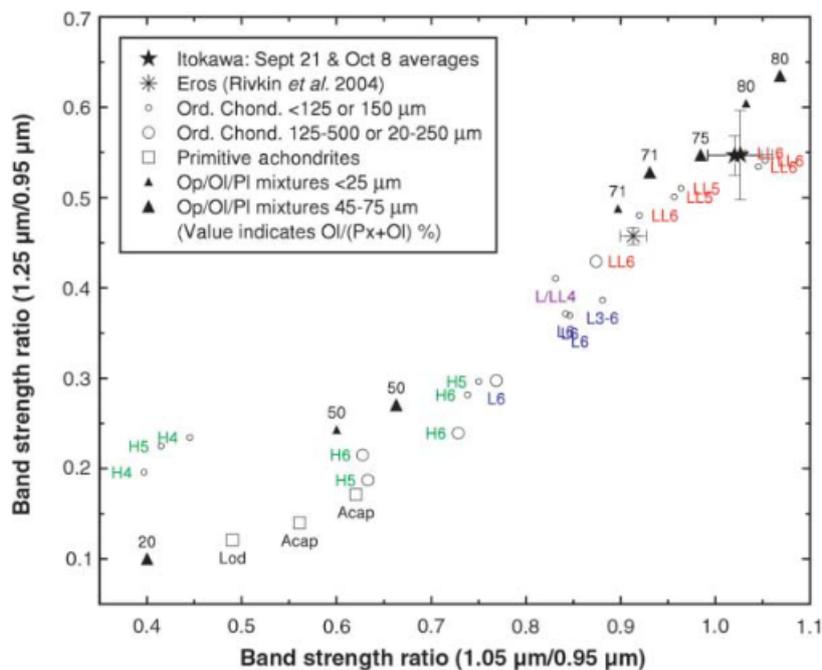


Figura 3.15: Comparação das forças de absorção em $1,25 \mu\text{m}$ e $1,05 \mu\text{m}$ de espectros médios do asteroide (25143) Itokawa obtidos pelo NIRS em 21 de setembro e 8 de outubro de 2005 em comparação com o asteroide (433) Eros, amostras de condritos ordinários, amostras de acondritos primitivos e amostras de misturas de minerais contendo ortopiroxênio, olivina e plagioclásio. (ABE *et al.*, 2006)

estarem disponíveis; o FOV (campo de visão, no inglês field of view) estar em uma superfície totalmente iluminada e sem grandes sombras; ter sido obtido entre 17 de setembro e 16 de outubro. Esse último critério parece arbitrário, porém os autores afirmam que a seleção dessas datas possui a razão de atender à maior cobertura de ângulo de fase, nivelando a distribuição em ângulo de fase e resolução espacial, assim como limitando a quantidade de espectros. Ao todo, restaram 10 mil espectros para a análise fotométrica. O ângulo de incidência, o ângulo de emissão e o ângulo de fase para cada uma das faces do modelo de forma de Itokawa foi computado utilizando o software SPICE desenvolvido pelo JPL¹ (Jet Propulsion Laboratory).

Os seguintes parâmetros foram selecionadas para a aplicação do modelo de Hapke: o albedo de espalhamento simples, o fator de rugosidade macroscópica, a amplitude e a largura do efeito de oposição e o parâmetro de assimetria. Esse ajuste foi feito para cada um dos 64 canais do NIRS. A equação aplicada é dado abaixo:

¹Acesso em: <http://naif.jpl.nasa.gov/naif/index.html>

$$\frac{I}{F} = \frac{\omega}{4\pi} \frac{\mu_{0e}}{\mu_{0e} + \mu_0} \left[1 + B(g, B_0, h) \right] p(g, \xi)^2 \quad (3.13)$$

$$+ H(\mu_{0e}, \omega) H(\mu_e, \omega - 1) S(i, e, g, \bar{\theta})$$

Onde o ω é o albedo de espalhamento simples, μ_{0e} e μ_0 são os cossenos efetivos do ângulo de incidência e de emissão, respectivamente. $B(g, B_0, h)$ é o efeito de oposição, $p(g, \xi)$ é a função de fase de Henyey-Greenstein de um lóbulo, ξ é o cosseno assimétrico, o parâmetro da função da fase, g é o ângulo de fase solar, e $S(i, e, g, \bar{\theta})$ é o fator de sombreamento da rugosidade superficial macroscópica. As funções $H(\mu_{0e})$ e $H(\mu_e)$ são as funções H de Ambartsumian-Chandrasekhar.

A rotina adotada foi um método de mínimos quadrados usando o algoritmo Nelder e Mead Simplex que minimiza o χ^2 e varia os parâmetros livres simultaneamente. O parâmetro χ^2 é definido como a soma dos quadrados das diferenças entre a reflectância observada e modelada em cada ponto dos dados. Os autores apresentam a curva de fase solar do Itokawa apenas para os 10 mil espectros e encontram soluções semelhantes a de ABE *et al.* (2006), um avermelhamento espectral em relação ao aumento do ângulo de fase.

Os autores ajustaram primeiramente o parâmetro de rugosidade para todos os canais e o fixaram em um valor médio de $26^{\circ} \pm 1^{\circ}$. Após fixarem a rugosidade, ajustaram todos os outros parâmetros ao mesmo tempo, em função do comprimento de onda. O procedimento da aplicação do modelo foi executado 100 vezes com valores iniciais aleatórios de cada um dos parâmetros. Os resultados podem ser observados na figura 3.16.

Como pode ser observado na figura 3.16, os ajustes realizados pelos autores apresentaram um parâmetro de assimetria e uma amplitude do efeito de oposição independentes do comprimento de onda e um albedo de espalhamento simples e uma largura do efeito de oposição dependentes do comprimento de onda.

Dentro das estimativas realizadas neste trabalho, o albedo de espalhamento simples de Itokawa é, dentro de todo o comprimento de onda do instrumento observado, menor que o de Eros em 30-40%. Baseado no espectro do asteroide Itokawa, ABE *et al.* (2006) estimaram que a mineralogia de Itokawa deva ser semelhante à de condritos ordinários LL5 ou LL6. Eros, por outro lado, parecia mais semelhante com a composição dos condritos ordinários L6 (IZENBERG *et al.*, 2003).

Com o intuito de realizar uma comparação direta entre o albedo de espalhamento simples encontrado para o Itokawa e meteoritos cuja composição já sugerida

²Há um erro nessa expressão. KITAZATO *et al.* (2008) adicionam um π que não deveria existir no denominador. Isso indicaria que é um cálculo para a reflectância bidirecional. No entanto, a grandeza que ele está calculando é o fator de radiância I/F. O fator de radiância é o produto da reflectância bidirecional por π .

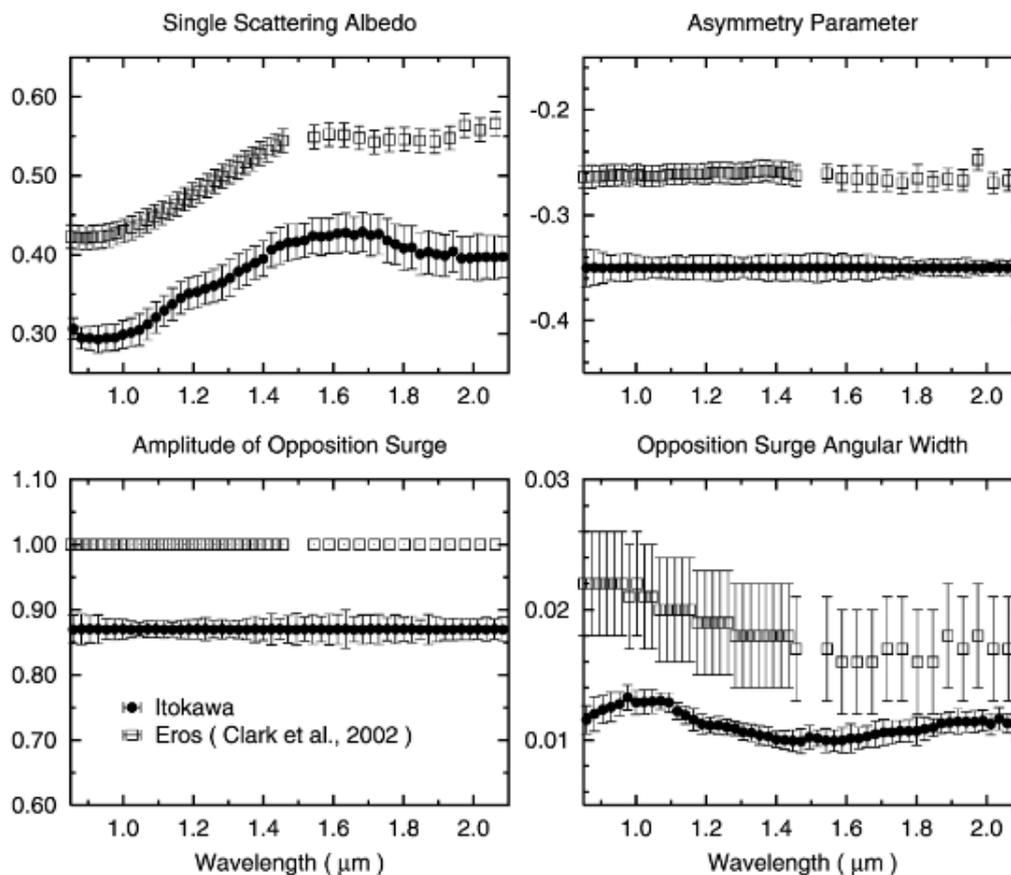


Figura 3.16: Parâmetros livres de Hapke em função do comprimento de onda. Acima, os parâmetros são (da esquerda para a direita): albedo de espalhamento simples e o parâmetro de assimetria. Abaixo, os parâmetros são (da esquerda para a direita): a amplitude do efeito de oposição e a largura do efeito de oposição. Todos os gráficos possuem uma comparação direta com os resultados para o asteroide (443) Eros apresentados em CLARK *et al.* (2002). (KITAZATO *et al.*, 2008)

previamente como similar, os autores calcularam o que seria o albedo de espalhamento simples para três classes de condritos ordinários (H, L, LL) como função de tamanho do grão. Considerando esse albedo teórico para os condritos e sua comparação direta com o albedo de espalhamento simples de Itokawa, é possível supor que o tamanho médio do grão da superfície de Itokawa deve ser superior a 150 μm . Dentro dessa comparação, os condritos LL parecem possuir uma melhor compatibilidade com Itokawa. Os condritos H não parecem nada compatíveis com o material superficial do asteroide, em contrapartida, não há uma excludência com a possibilidade dos condritos L. Essa comparação pode ser observada na figura 3.17.

Após observarem que os valores do parâmetro de rugosidade entre os asteroides Itokawa e Eros são bastante semelhantes, os autores afirmam que essa semelhança reforça a hipótese de asteroides do tipo-S comumente possuírem valores de rugosidade variando de 20° a 30°. Eles apresentam valores do parâmetro da rugosidade para Gaspra e para a

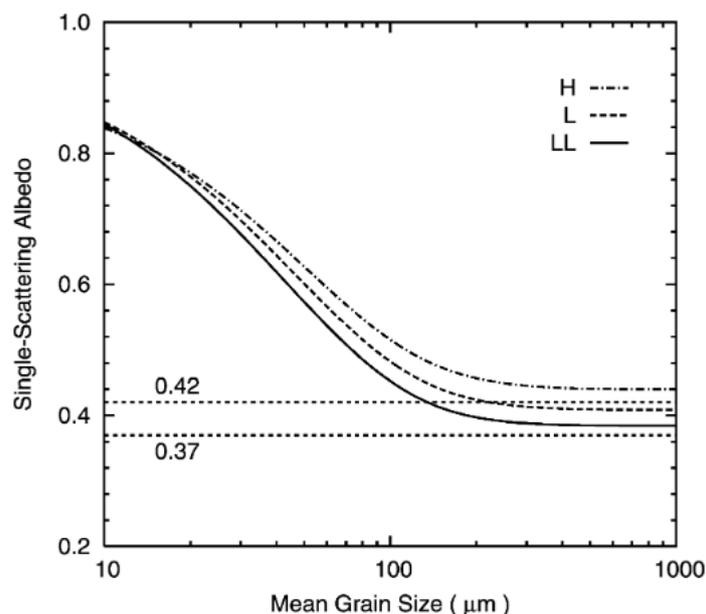


Figura 3.17: O albedo teórico de espalhamento simples para os condritos H, L e LL em função do tamanho médio dos grãos no comprimento de onda de $1,40 \mu\text{m}$. As linhas tracejadas são os valores ajustados de albedo de espalhamento simples para o asteroide (25143) Itokawa, 0,37 em $1,30 \mu\text{m}$ e 0,42 em $1,58 \mu\text{m}$. (KITAZATO *et al.*, 2008)

média dos tipo-S encontrado por outros trabalhos, inclusive do asteroide (243) Ida, cujo parâmetro de rugosidade obtido foi 18° .

O que destaca a missão Hayabusa de suas precursoras é justamente o fato dela ter coletado amostras do regolito de um asteroide e trazido para a Terra. A região selecionada para a coleta de amostras foi a região de Muses Sea. As partículas de poeira coletadas foram recuperadas por dois métodos: utilizar uma espátula de teflon para varrer partículas da superfície de um coletor de amostras; o outro método foi bater suavemente no coletor de amostras, fazendo com que as partículas caíssem em uma lâmina de vidro de sílica pura.

NAKAMURA *et al.* (2011), por meio de um microscópio eletrônico, identificaram 1534 partículas sólidas coletadas pelo método da espátula de teflon. As partículas tinham diâmetros variando de 3 a $40 \mu\text{m}$, cuja maioria era menor do que $10 \mu\text{m}$. 1087 eram monominerálicas, incluindo 580 partículas de olivina, 126 partículas de piroxênios com baixo teor de cálcio, 56 partículas de piroxênio com alto teor de cálcio, 186 partículas de feldspato (172 plagioclásio e 14 feldspato alcalino), 113 troilitas, 13 cromitas, 10 partículas de fosfato de cálcio, 3 grãos de Fe-Ni. As 447 partículas restantes eram misturas de minerais, principalmente silicatos. O segundo método liberou mais 40 partículas, cujos diâmetros variavam de 30 até $180 \mu\text{m}$, e foram analisadas por microtomografia computadorizada de raios-x e difração de raios-x. 38 dessas partículas foram submetidas a uma análise mineralógica mais detalhada. Não foi observado uma grande variação de

composição. Olivina foi encontrada em 29 dessas partículas com uma faixa média de composição de $Fa_{28,6\pm 1,1}$ ³, piroxênios com baixo teor de Ca foram identificados em 15 partículas com uma faixa média de composição de $Fs_{23,1\pm 2,2}Wo_{1,8\pm 1,7}$ ⁴, piroxênios com alto teor de Ca foram identificados em 14 partículas com uma medida de composição de $Fs_{8,9\pm 1,6}Wo_{43,5\pm 4,5}$ e plagioclásio foram identificados em 23 partículas com uma média de composição de $Ab_{83,9\pm 1,3}Or_{5,5\pm 1,2}$ ⁵.

A análise da química desses 38 partículas revelou que elas podem ser divididas em duas diferentes populações: 6 partículas fracamente equilibradas e 32 partículas fortemente equilibradas. Essa diferença entre fracamente ou fortemente equilibrada se deve a como as partículas estão distribuídas uniformemente no fragmento. Uma partícula desses fragmentos do Itokawa é considerado fracamente equilibrado quando a distribuição dos minerais não for uniforme e houver aglomerações de determinados minerais em áreas específicas. O oposto se adéqua as partículas fortemente equilibradas. As partículas fracamente equilibradas possuem tanto olivina como piroxênio com baixo teor de cálcio na sua composição cujos intervalos de composição são $Fa_{24,428,9}$ e $Fs_{11,2-23,8}$, respectivamente. As partículas fortemente equilibradas possuem os mesmos minerais em sua composição, cujos intervalos são $Fa_{27,1-30,7}$ e $Fs_{22,5-25,7}$. A partir da composição dessas partículas, os autores puderam criar uma comparação direta com minerais e grupos mineralógicos já conhecidos da literatura. Essas comparações podem ser observadas na figura 3.18.

Os autores concluíram que as variações composicionais das partículas são muito similares com a de condritos LL5 e LL6, principalmente àquelas fortemente equilibradas. Essa é uma confirmação dos resultados espectroscópicos e fotométricos apresentados anteriormente nesta dissertação.

A hipótese de que os meteoritos condritos ordinários possuem uma mineralogia semelhante a de asteroide do tipo-S é originada pela análise espectral de exemplos desses grupos de meteoritos e asteroides, porém apesar da semelhança na configuração das bandas, há um avermelhamento no espectro do asteroide. NOGUCHI *et al.* (2011) analisou as amostras coletadas pela sonda espacial Hayabusa com o intuito de compreender melhor o papel e a causa do intemperismo espacial em Itokawa. Os autores analisaram 10 partículas do Itokawa a partir das técnicas *High-Angle Annular Dark-field Scanning Transmission Electron Microscope* (HAADF-STEM) e *Bright Field Scanning Transmission Electron Microscopy* (BF-STEAM) e observaram que em 5 dessas partículas foi possível identificar uma camada de npFe (nanofase de ferro). A espessura dessas camadas varia de 30 a 60

³'Fa' é um mineral do grupo das olivinas cujo nome é faialite (Fe₂SiO₄). O número subscrito indica a porcentagem média de ferro contida na estrutura cristalina.

⁴'Fs' é uma abreviação de ferrossilita (Fe₂Si₂O₆), um mineral de silicato de ferro e magnésio; 'Wo' é uma abreviação de wollastonita (CaSiO₃), um mineral de silicato de cálcio. Ambos pertencem à família dos inossilatos.

⁵'Ab' é uma abreviação de albita (NaAlSi₃O₈), mineral de silicato de alumínio e sódio pertencente à família dos feldspatos; 'Or' é uma abreviação de ortoclásio (KAlSi₃O₈), um mineral de silicato de alumínio e potássio.

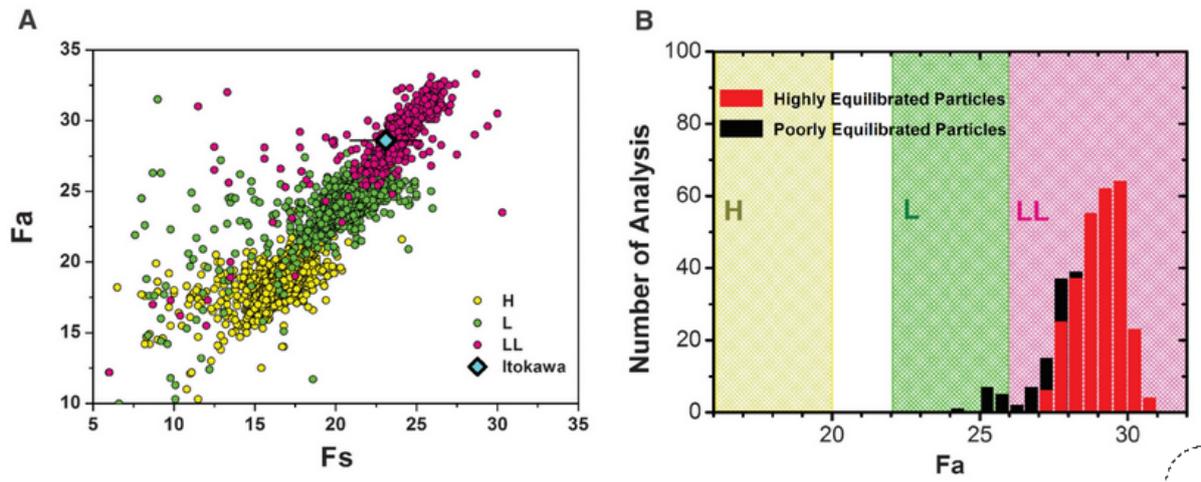


Figura 3.18: (A) a média de 'Fa' e 'Fs' em todas as 38 partículas oriundas do segundo método de remoção. (B) A distribuição de 'Fa' nos cristais de olivina nas 29 partículas que continham olivina em sua composição. (NAKAMURA *et al.*, 2011)

nanômetros, o que, segundo os autores, é superior às amostras da lua. Essas partículas de npFe possuem um tamanho médio de 2 nm, enquanto as partículas presentes nas amostras da lua possuíam um tamanho médio de 3 nm, podendo encontrar inclusive partículas variando de 5 a 10 nm. Seções transversais de olivina, piroxênio e plagioclásio apresentaram uma primeira camada superficial amorfa de 5 a 15 nm de espessura contendo nanopartículas ricas em ferro e enxofre, e uma segunda de 20 a 50 nanômetros contendo também partículas de nanofase de ferro (figura 3.19). A presença desses materiais é atribuída ao intemperismo espacial.

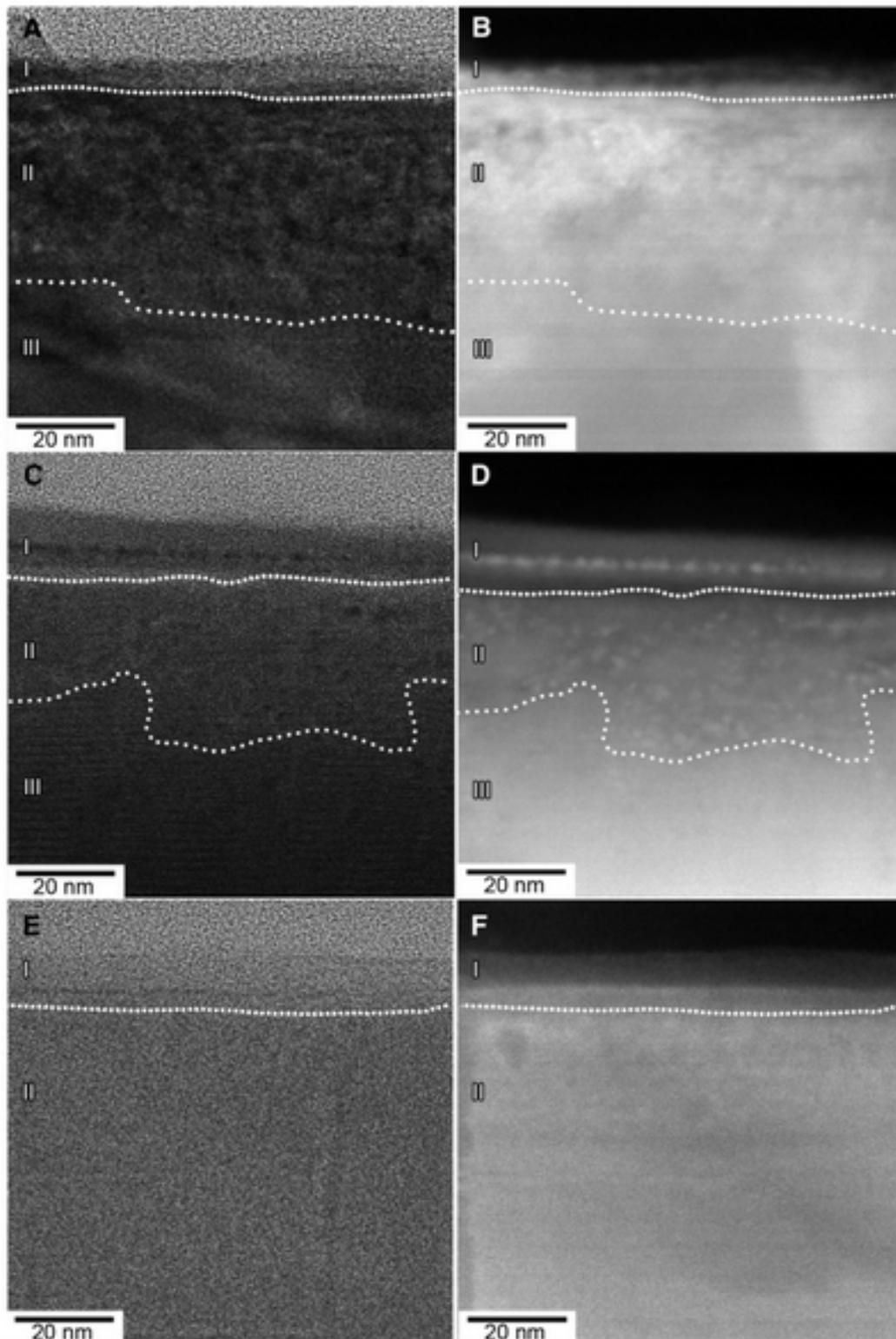


Figura 3.19: Imagens a partir das técnicas BF-STEM e HAADF-STEM, respectivamente, da borda de uma amostra de: A e B - amostra de olivina; C e D - amostra de um piroxênio E e F - amostra de um plagioclásio. As bordas desses minerais são divididas em três zonas com base em sua textura: zona I, camada superficial amorfa contendo npFe; zona II, área parcialmente amorfizada; zona III, minerais de substrato cristalino. A zona II de olivina e piroxênio apresentam também nano partículas de ferro abundante. Os limites entre as zonas são indicados por curvas pontilhadas. (NOGUCHI *et al.*, 2011)

3.2.3 Resumo dos resultados oriundos da missão Hayabusa

A partir dos dados obtidos pelos instrumentos da sonda espacial Hayabusa, podemos sintetizar alguns dos resultados obtidos. O Itokawa é um asteroide que parece ser composto por duas partes elipsoidais unidas (FUJIWARA *et al.*, 2006). O terreno de Itokawa é predominantemente pedregoso e sua estrutura se encaixa como a de um asteroide *rubble-pile* (SAITO *et al.*, 2006). Apesar de ser coberto quase majoritariamente por regiões pedregosas, apresenta duas grandes regiões de terrenos mais suaves, a região de Muses Sea e a região de Sagamihara. As amostras coletadas foram justamente da região de Muses Sea.

As dimensões dos eixos do Itokawa são $535 \text{ m} \times 294 \text{ m} \times 203 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$ e sua massa é de $3,51 \times 10^{10} \pm 0,105 \times 10^{10} \text{ kg}$ (FUJIWARA *et al.*, 2006). O volume calculado para o asteroide é $1,84 \pm 0,092 \times 10^7 \text{ m}^3$ DEMURA *et al.* (2006a), portanto sua densidade média é de $1,9 \pm 0,13 \text{ g cm}^{-3}$ (FUJIWARA *et al.*, 2006). Uma segunda estimativa de volume foi apresentada por GASKELL *et al.* (2006), $0,0178 \pm 0,0001 \text{ km}^3$, portanto a densidade média apresentada pelos autores foi $2,0 \text{ g cm}^{-3}$.

O espectro de Itokawa é semelhante ao de condritos ordinários H, L ou LL, porém avermelhados (ABE *et al.*, 2006) (KITAZATO *et al.*, 2008). Dentro desses grupos de condritos, os LL parecem possuir uma melhor compatibilidade com Itokawa. Os condritos H não parecem compatíveis, não parecem nada compatíveis com o material superficial do asteroide, em contrapartida, não há uma exclusão com a possibilidade dos condritos L (KITAZATO *et al.*, 2008). Os espectros que apresentam maior compatibilidade ao de Itokawa é o dos condritos ordinários LL5 ou LL6 e isso entra em concordância com a análise das amostras do asteroide Itokawa (NAKAMURA *et al.*, 2011). O Itokawa possui uma razão olivina/(olivina+piroxênio) de 78 a 80 % em sua composição média (ABE *et al.*, 2006) e um parâmetro de rugosidade de 26° (KITAZATO *et al.*, 2008). Foi identificado a presença de uma camada de npFe° variando de 30 a 60 nanômetros nas amostras coletada pela sonda espacial, o que reforça a teoria da contribuição desses grãos para o avermelhamento do espectro (NOGUCHI *et al.*, 2011).

3.3 Comparações entre os resultados das observações terrestres em relação aos dados da missão Hayabusa I

As missões espaciais, como a missão espacial Hayabusa, promovem uma oportunidade rara de analisarmos o quanto nossos instrumentos em solo terrestre e os modelos criados são confiáveis para descrever as características físicas de um asteroide. As sondas espaciais são capazes de observar seu objeto alvo a poucos quilômetros, ou até mesmo na escala de metros, portanto são capazes de obter dados com uma resolução inalcançável para um observador na Terra. Apesar da existência dessa larga desvantagem dos telescópios em solo terrestre em comparação com os instrumentos das missões espaciais, houve uma grande concordância entre os resultados da missão e de observatórios terrestres para o caso do asteroide (25143) Itokawa.

As maiores concordâncias entre os resultados estão na análise espectral do asteroide. Concordantemente com as observações do instrumento NIRS e a coleta das amostras do regolito de Itokawa, a semelhança entre a mineralogia do Itokawa com os condritos ordinários já havia sido identificado pelos observatórios na Terra. Não só a semelhança entre os condritos, mas também os subgrupos mais prováveis - L ou LL. As análises fotométricas utilizando os dados do NIRS e a análise química a partir da coleta das amostras da região de Muses Sea reafirmaram essa semelhança, restringindo inclusive os subgrupos mais prováveis, os LL5 e LL6. A hipótese da presença de npFe^0 no regolito de Itokawa devido ao caráter avermelhado do espectro do asteroide também foi confirmada a partir da análise química das partículas coletadas e trazidas para a Terra.

Muitas tentativas foram feitas para medir as dimensões do asteroide (25143) Itokawa utilizando dados de radar. Dentro das margens de erro apresentadas, as melhores estimativas não divergem muito das medidas realizadas pela sonda espacial. A missão Hayabusa obteve medidas dos três eixos do asteroide, indicando que suas dimensões são de $535 \text{ m} \times 294 \text{ m} \times 203 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$. No entanto, os resultados de observações terrestres apresentados nesta dissertação apresentaram que o primeiro eixo pode variar de 548 a 620 metros, o segundo de 280 a 323 metros e o terceiro de 160 a 310 metros. Dentro dessas estimativas, apenas o maior valor do primeiro eixo e o menor valor para o terceiro eixo não estão bem representados pelas medidas provenientes da missão dentro da margem de erro.

Uma das maiores divergências apresentadas entre os dados terrestre e da missão espacial foi derivado da aplicação do modelo fotométrico de Hapke, como é o caso do parâmetro de rugosidade. Enquanto o modelo de Hapke aplicado para os dados terrestres apresenta uma solução de 40° para o parâmetro de rugosidade médio de Itokawa, os dados do NIRS indicam que esteja próximo de 26° . Como se trata de uma aplicação de

um modelo fotométrico que depende também da quantidade, qualidade e das escolhas dos autores, não é possível afirmar que o resultado utilizando os dados do NIRS são mais confiáveis. Porém, há dois pontos relevantes a serem comentados com relação à análise utilizando os dados de observatórios terrestres. A primeira é que há uma pequena falta de espectros próximos a 0° , ou seja, próximo do limite do efeito de oposição, o que poderia prejudicar a qualidade dos resultados. A segunda é que o modelo de Hapke utilizando os dados terrestres identificaram corretamente o caráter pedregoso da superfície de Itokawa, portanto, por mais que os dados da missão possuam maior resolução, há uma correta solução para a aplicação utilizando os dados de observações terrestres.

Uma possível explicação para as discrepâncias nos parâmetros obtidos nos modelos de Hapke é a degenerescência que frequentemente ocorre durante o ajuste das observações utilizando esses modelos, além das escolhas feitas por diferentes autores em relação aos termos do modelo que devem ser considerados e a metodologia utilizada no ajuste dos parâmetros. No próximo capítulo, discutiremos mais sobre a aplicação do modelo de Hapke aos dados da NIRS realizada por KITAZATO *et al.* (2008) e proporemos uma metodologia alternativa para o ajuste dos parâmetros, apresentando resultados preliminares.

De modo geral, é possível afirmar que as conclusões baseadas nas observações terrestres foram capazes de fornecer uma alta confiabilidade, considerando os resultados da missão espacial Hayabusa como referência.

Capítulo 4

Aplicação do modelo de Hapke aos dados da Hayabusa/NIRS

Dentre os trabalhos abordados na revisão bibliográfica, o único que tentou ajustar parâmetros de Hapke diretamente das observações da sonda espacial Hayabusa I foi o de KITAZATO *et al.* (2008). Os parâmetros que eles ajustaram foram o albedo de espalhamento simples, a rugosidade macroscópica, a amplitude do efeito de oposição, a largura do efeito de oposição e o efeito de rugosidade. Porém, quando nós analisamos a metodologia escolhida para os ajustes, observamos algumas questões que pareceram problemáticas.

Os autores resolveram utilizar apenas um efeito de oposição, e eles escolheram o efeito de oposição devido à ocultação de sombras. Porém, quando realizaram os ajustes, o fizeram colocando a largura do efeito de forma dependente do comprimento de onda. Isso é inconsistente. O modelo de Hapke prevê que a largura do efeito de oposição por ocultação de sombras não deveria depender do comprimento de onda. Em teoria, apenas o efeito de oposição por retroespalhamento coerente deve ter alguma dependência com o comprimento de onda, como vimos anteriormente.

Há também alguns problemas em seus resultados. Seus ajustes mostram um parâmetro de assimetria independente do comprimento onda. A mesma situação acontece com a amplitude do efeito de oposição. Isso também não está de acordo com o que é esperado do modelo de Hapke. Pelo modelo, os parâmetros da função de fase dependem das propriedades óticas do meio, que vão variar pelo comprimento de onda. A mesma exata condição acontece com a amplitude do efeito de oposição, que também deveria depender das propriedades óticas do meio, mas os valores que os autores encontram também são constantes.

Um outro problema no ajuste é a desconsideração do efeito de porosidade. Isso não foi, no entanto, escolha dos autores. Essa correção só foi introduzida pelo Hapke no mesmo período da publicação do trabalho de KITAZATO *et al.* (2008). Então provavelmente ele não tinha conhecimento dessa correção e nem poderia, portanto, adicioná-la.

Porém, essa correção também é importante, pois alteraria os valores dos parâmetros.

A partir dessas questões e considerando os avanços do modelo de Hapke desde então resolvemos estudar possibilidades de utilizar uma versão do modelo de Hapke de uma maneira mais coerente com as hipóteses do modelo e que levasse também em conta o efeito de porosidade. Além disso, gostaríamos de aplicar um modelo baseada apenas em parâmetros físicos na análise dos dados da Hayabusa/NIRS. As tentativas iniciais desta aplicação do modelo aos dados será apresentada a seguir.

4.1 Modelo utilizado

Como queríamos que o modelo que fossemos utilizar dependesse exclusivamente de parâmetros físicos da superfície de Itokawa, escolhemos um modelo que levava em consideração o efeito de oposição por ocultação de sombras, consideramos o fator de porosidade e também os efeitos da rugosidade macroscópica. Não utilizamos, no entanto, o efeito de oposição por retro espalhamento coerente exatamente porque não existe até este momento uma correlação clara entre os parâmetros físicos e os parâmetros desse efeito. Todas as expressões utilizadas foram retiradas da segunda edição do livro *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy* (HAPKE, 2012). A expressão do nosso modelo pode ser observado a seguir:

$$\frac{I}{F} = K \frac{\omega}{4} \frac{\mu_{0i}}{\mu_{0i} + \mu_{0e}} \left[p_{(g,b,c)} B_{(g,B0,h)} + H_{(\mu_{0i}/K,\omega)} H_{(\mu_{0e}/K,\omega)} - 1 \right] S_{(i,e,g,\bar{\theta})} \quad (4.1)$$

Onde ω é o albedo de espalhamento simples, μ_{0i} e μ_{0e} são os cossenos efetivos do ângulo de incidência e de emissão, respectivamente, e $B_{(g,B0,h)}$ é a contribuição da ocultação de sombras no efeito de oposição. Como citado, a correção pela rugosidade macroscópica é representada pelo K . Essa correção foi apresentada na introdução, equação (1.7)

Nós utilizamos uma aproximação algébrica para a função H de Ambartsumian - Chandrasekhar que pode ser observada a seguir:

$$H(x) = \left[1 - \omega x \left(r_0 + \frac{1 - 2r_0x}{2} \ln \frac{1+x}{x} \right) \right]^{-1} \quad (4.2)$$

Onde x representa o cosseno do ângulo de emissão de ou incidência. Nós escolhemos a função de fase de Henyey - Greenstein de dois lóbulos:

$$p_{(g,b,c)} = \frac{1+c}{2} \frac{1-b^2}{(1+2bcos(g)+b^2)^{3/2}} + \frac{1-c}{2} \frac{1-b^2}{(1+2bcos(g)+b^2)^{3/2}} \quad (4.3)$$

Para os valores de b e c nós utilizamos o modelo de SLAB equivalente e relações empíricas derivadas de medidas de laboratório:

$$c = \frac{\Delta Q_s}{Q_s} \quad b = \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{3.29}{c+0.908}\right)}{17.4}} \quad (4.4)$$

Esse modelo de SLAB equivalente deriva expressões para a eficiência de espalhamento (Q_s) usando os índices de refração do material e o tamanho efetivo da partícula. Para o caso de partículas grandes, essa eficiência de espalhamento é equivalente ao albedo de espalhamento simples. Então usando esse modelo podemos derivar o albedo de espalhamento simples e os parâmetros da função de fase:

$$\Delta Q_s = S_e - \frac{\Theta(1-S_e)(1-S_e)}{1+\Theta S_e} \quad Q_s = S_e + \frac{\Theta(1-S_e)(1-S_e)}{1-\Theta S_e} \quad (4.5)$$

Onde ‘ S_e ’ é o coeficiente de reflexão da superfície externa, a fração total da luz externamente espalhada da superfície da partícula, e Θ é o fator de transmissão interna de partícula. Para calcular essas grandezas utilizamos a aproximação de Kerker:

$$R_0 = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad S_e = 0.0587 + 0.8543R_0 + 0.087R_0^2 \quad (4.6)$$

$$\Theta = \frac{2n^2}{d_A^2} \left[e^{-d_A \sqrt{1-1/n^2}} \left(1 + d_A \sqrt{1-1/n^2} \right) - e^{-d_A} (1 + d_A) \right] \quad (4.7)$$

$$d_A = 4k \frac{\pi D_{eff}}{\lambda} \quad (4.8)$$

Onde n e k são, respectivamente, as partes real e imaginária do índice de refração. d_A é o coeficiente de absorção, D_{eff} o diâmetro efetivo das partículas e λ o comprimento de onda.

Além disso, consideramos o efeito de oposição por ocultação de sombras. A intensidade desse efeito pode ser observada a seguir:

$$B_{0s} = \frac{R_{0(n,k)}}{wp_{(0,b,c)}} \quad (4.9)$$

Um outro parâmetro do efeito de ocultação de sombras, a largura desse efeito, depende do fator de preenchimento e da distribuição do tamanho das partículas. O que fizemos foi considerar uma distribuição como uma função exponencial com um parâmetro -4 . Como já dito, essa função é utilizada para modelar regolitos da lua e é uma sugestão do Hapke. A distribuição do tamanho das partículas pode ser observada a seguir:

$$N_{(D)} = \left(\frac{D}{aL} \right)^\nu \quad (4.10)$$

Onde D é o diâmetro de uma partícula. Supondo uma distribuição onde $\nu = -4$, temos que a largura da oposição é:

$$h_s = \frac{3}{8} K \phi \frac{\sqrt{3}}{\ln(aL/aS)} \quad (4.11)$$

Portanto, a largura do efeito de oposição vai depender do fator de porosidade (K), do fator de preenchimento (ϕ) e também está em função do maior tamanho das partículas (aL) e o menor tamanho (aS). De acordo com esse tipo de distribuição de partículas, podemos relacionar o diâmetro efetivo utilizado para derivar o albedo de espalhamento simples com o menor e o maior tamanho das partículas. O diâmetro efetivo pode ser calculado a partir da distribuição de partículas e seus limites como:

$$D_{eff} = \frac{\int_{aS}^{aL} D N_{(D)} dD}{\int_{aS}^{aL} N_{(D)} dD} \quad (4.12)$$

Além disso, temos também a correção por rugosidade macroscópica ($\bar{\theta}$) que já foi abordada na introdução. Essa correção é responsável por fornecer o ângulo médio das inclinações das facetas na superfície dos elementos de volume.

Portanto, os parâmetros livres do modelo escolhidos até então foram: O menor tamanho das partículas (aS), o maior tamanho das partículas (aL), o fator de preenchimento (ϕ) e o parâmetro de rugosidade ($\bar{\theta}$).

Além disso, o modelo precisa especificar as propriedades óticas do material observado e isso é feito a partir dos índices de refração médio do meio. Como observado na revisão bibliográfica, o asteroide (25143) Itokawa parece ter uma mineralogia compatível com condritos ordinários LL, mais especificamente com os subgrupos LL5 e LL6. Um melhor análogo observado até então é o meteorito Alta'ameen, porém sabemos que só de fato é o melhor análogo quando é removido o avermelhamento em seu espectro causado pelo intemperismo espacial. E o que é sugerido pela literatura é que há uma relação entre esse avermelhamento do espectro com a presença de nano partículas de Ferro na superfície dos asteroides. Ou seja, as nano partículas de ferro alteram as propriedades físicas da superfície dos asteroides.

A sugestão de Hapke para estudar os efeitos das partículas de nano-ferro é modificar os índices de refração do material usando o modelo de meio efetivo de Maxwell-Garnett e os índices de refração de ferro. Esse método permite modelar o comportamento óptico das partículas de nano-ferro em um material compósito, onde as partículas estão distribuídas aleatoriamente. Portanto, nós calculamos as constantes óticas do meteorito a partir de espectros do RELAB utilizando a metodologia de DAVALOS *et al.* (2017) e utilizamos as constantes óticas de Ferro de CAHILL *et al.* (2019) para poder utilizar o modelo de meio efetivo. Dessa maneira, nós temos um parâmetro a mais no nosso modelo de Hapke. O percentual por volume de ferro que está afetando as constantes óticas é mais um parâmetro livre de nosso modelo.

4.1.1 Limitações do modelo

O modelo que adotamos para a análise fotométrica apresenta algumas restrições em relação aos parâmetros utilizados. Em primeiro lugar, o fator de porosidade (K) só é definido para valores de fator de preenchimento (ϕ) menores que 0,52. Além disso, a ótica geométrica só pode ser aplicada para partículas com diâmetros muito maiores que o comprimento de onda da luz incidente, sendo que adotamos um limite inferior de 25 microns para os diâmetros das partículas consideradas.

Diante dessas limitações, foram realizados testes para avaliar os efeitos de cada parâmetro sobre o modelo.

4.2 Testes do Modelo

Os cinco parâmetros livres escolhidos para a análise fotométrica contribuem de maneira diferente sobre a reflectância do espectro. Com o intuito de compreender melhor essa relação, ajustamos espectros fictícios simulando variações em cada um desses parâmetros para observar sua influência na reflectância em cada canal e na configuração espectral. Utilizamos valores de referência para gerar cada um desses espectros. Os valores de referência foram para o menor tamanho das partículas (aS) = $25\mu\text{m}$, para o maior tamanho das partículas (aL) = $2000\mu\text{m}$, para o parâmetro de rugosidade macroscópica ($\bar{\theta}$) = 25° , para o fator de preenchimento (ϕ) = 0,25 e para o volume de ferro (volFe) = 4×10^{-4} . A partir desses valores de referência variamos cada um desses parâmetros para observar a dependência da configuração do espectro em relação aos mesmos.

Geramos então gráficos para a reflectância não normalizada fixando a geometria da observação em 30° de emissão, 0° de incidência e 30° de ângulo e fixando todos os outros parâmetros e variando cada um dos parâmetros livres. Esses gráficos podem ser vistos na figura 4.1.

O que podemos perceber é que o efeito do maior tamanho da partícula (aL)

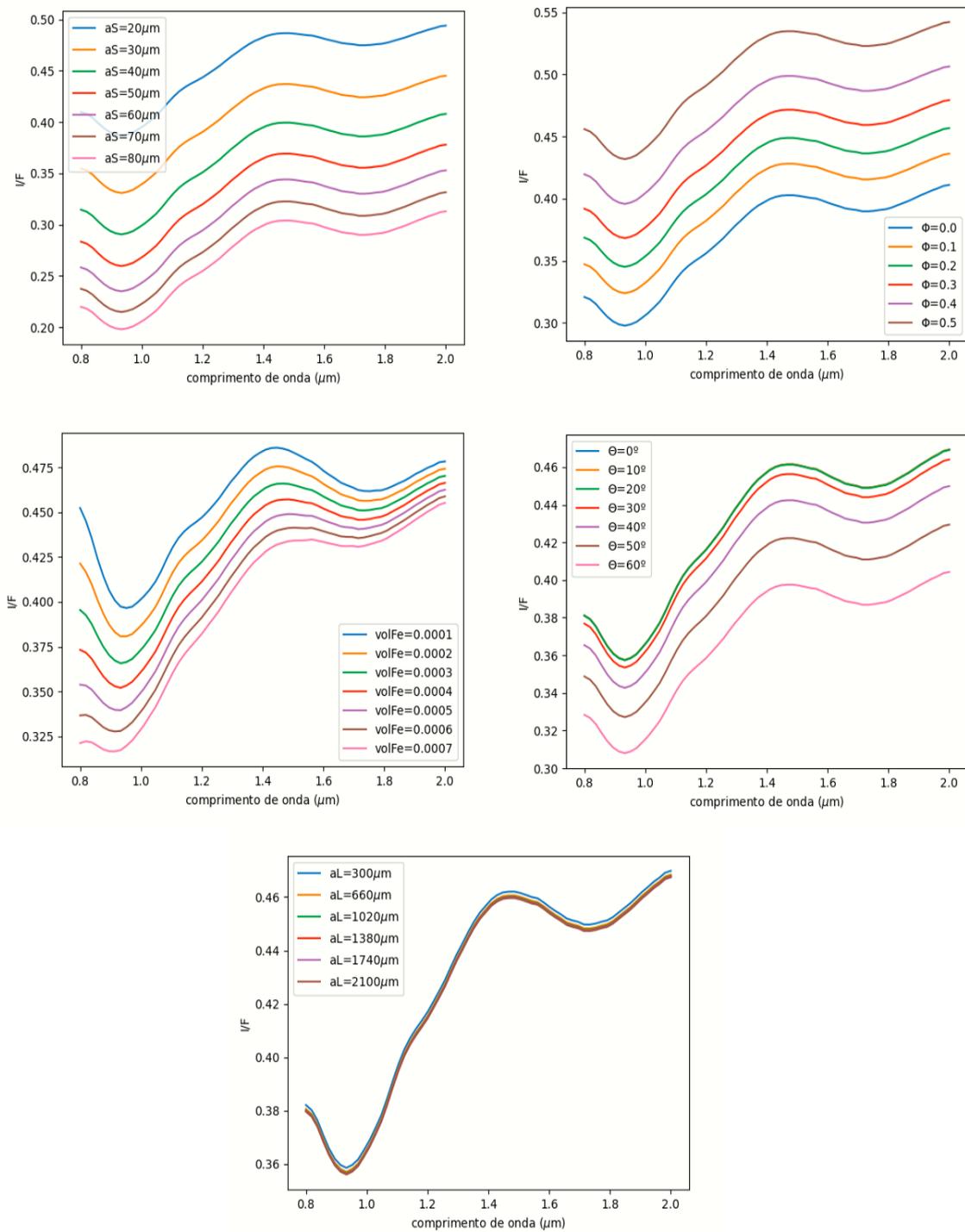


Figura 4.1: Espectros sintéticos não normalizados modelados a partir do modelo de Hapke. Na primeira coluna: a figura apresenta espectros modelados a partir de diferentes valores do maior tamanho das partículas (aL). Na segunda coluna: a figura de cima são espectros modelados a partir de diferentes valores do menor tamanho das partículas (aS) e abaixo para diferentes valores de volume de ferro ($volFe$). Na terceira coluna: a figura de cima são espectros modelados a partir de diferentes valores do fator de preenchimento (ϕ) e abaixo são espectros para valores diferentes do parâmetro de rugosidade macroscópica (θ).

da distribuição para a reflectância é quase imperceptível, exceto quando você tem uma distribuição muito estreita de partículas de partículas. Ou seja, quando o maior tamanho de partículas é próximo do menor tamanho. De outro modo, não é importante. Para o caso dos valores do menor tamanho das partículas (aS) é possível perceber uma influência tanto na forma do espectro quanto na intensidade da reflectância. O mesmo efeito pode ser percebido para o fator de preenchimento (ϕ), tanto forma quanto na reflectância geral. O volume de ferro (volFe) também possui uma grande influência nos espectros. Essa influência, por sua vez, é até mais pronunciada sobre a forma do espectro. Por fim, o parâmetro de rugosidade macroscópica ($\bar{\theta}$) também é importante na intensidade da reflectância. Mas, de modo geral, esse efeito só é importante quando os valores da rugosidade macroscópica for maiores que 30° . De modo contrário, não afeta a forma do espectro nem a intensidade da reflectância.

Além disso, fizemos o exato mesmo procedimento agora para os espectros normalizados em $1,44\mu\text{m}$. Esses gráficos podem ser observados na figura 4.2.

Para os espectros normalizados, o menor tamanho das partículas (aL) não apresenta nenhum efeito sobre a reflectância. Por outro lado, o menor tamanho (aS) vai afetar a forma do espectro. O que se observa é que essa influência se dá justamente a intensidade das bandas de absorção. Quando se têm partículas menores, você percebe bandas mais rasas. Quando se têm partículas maiores, os espectros apresentam bandas de absorção mais profundas. O que percebe é essa mesma influência no espectro para o fator de preenchimento (ϕ). A variação desse fator aprofunda ou deixa as bandas mais rasas. O volume de ferro (volFe) mantêm uma influência muito similar aos espectros não normalizados. De maneira geral, a influência desse parâmetro altera contundentemente a forma do espectro. Deixando-o mais avermelhado para maiores valores do volume de ferro. Por sua vez, valores diferentes para a rugosidade macroscópica ($\bar{\theta}$) não apresenta nenhuma influência sobre a reflectância normalizada.

Um outro teste significativo que realizamos foi observar como cada um desses parâmetros afetam o comportamento de fase dos espectros. Portanto, de maneira similar ao que fizemos para a reflectância, geramos gráficos da função de fase em $1,44\mu\text{m}$ normalizadas na oposição variando cada um dos parâmetros individualmente. Esses gráficos podem ser vistos na figura 4.3

O que se percebe é que o maior tamanho das partículas (aL) só vai ser importante perto da oposição. Quando se têm uma distribuição muito estreita de partículas não se percebe um efeito de oposição relevante mesmo com o fator de preenchimento (ϕ) baixo. De outra forma, esse parâmetro influência pouco. O menor tamanho das partículas, por sua vez, tem uma influência relevante no comportamento de fase no geral. O fator de preenchimento (ϕ), por outro lado, além de ter uma influência no comportamento de fase no geral, também é importante para definir o comportamento do efeito de oposição. Esse fator afeta o comportamento de fase dentro e fora do intervalo de oposição. A rugosidade

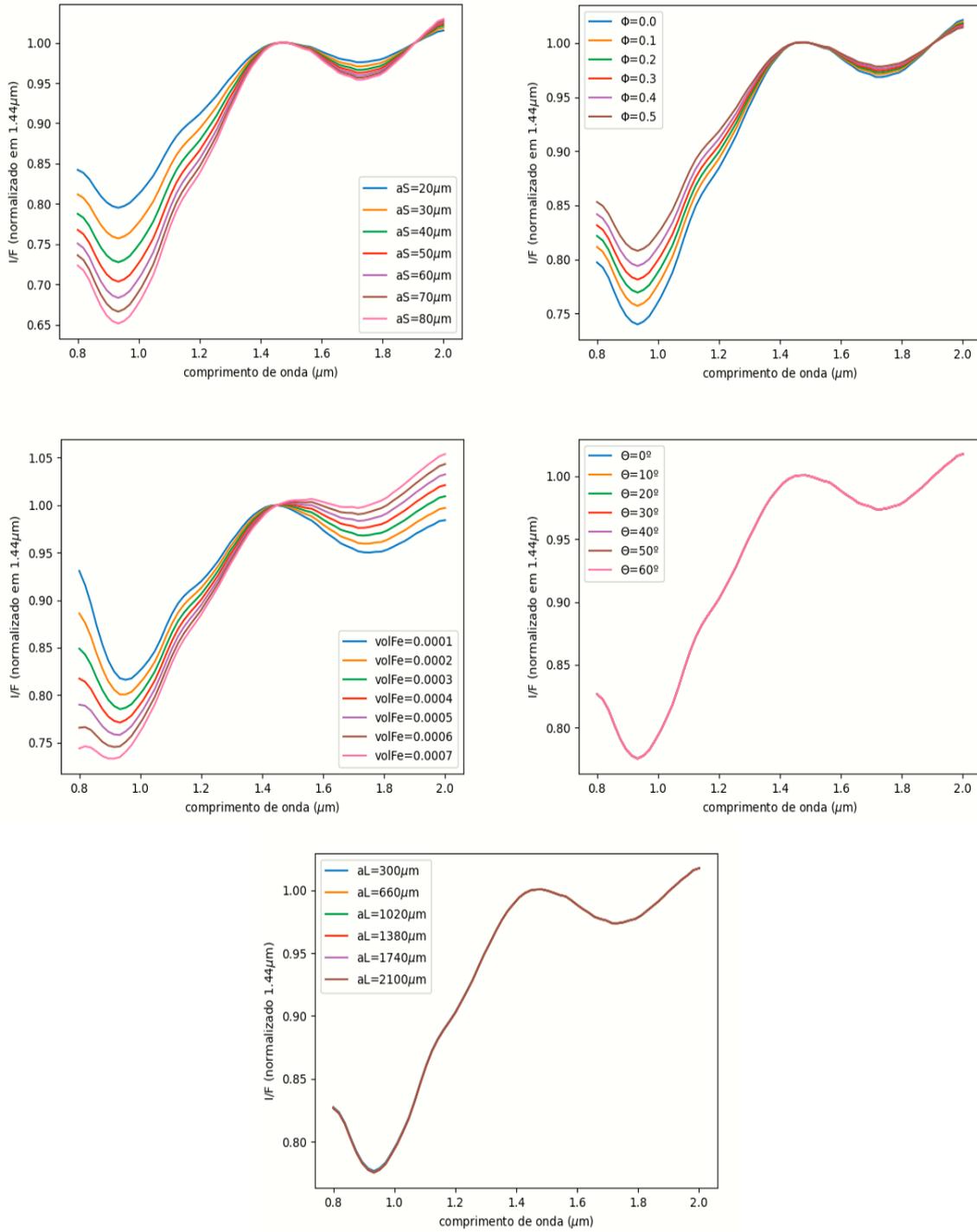


Figura 4.2: Espectros sintéticos normalizados modelados a partir do modelo de Hapke. Na primeira coluna: a figura apresenta espectros modelados a partir de diferentes valores do maior tamanho das partículas (aL). Na segunda coluna: a figura de cima são espectros modelados a partir de diferentes valores do menor tamanho das partículas (aS) e abaixo para diferentes valores de volume de ferro (volFe). Na terceira coluna: a figura de cima são espectros modelados a partir de diferentes valores do fator de preenchimento (ϕ) e abaixo são espectros para valores diferentes do parâmetro de rugosidade macroscópica (θ).

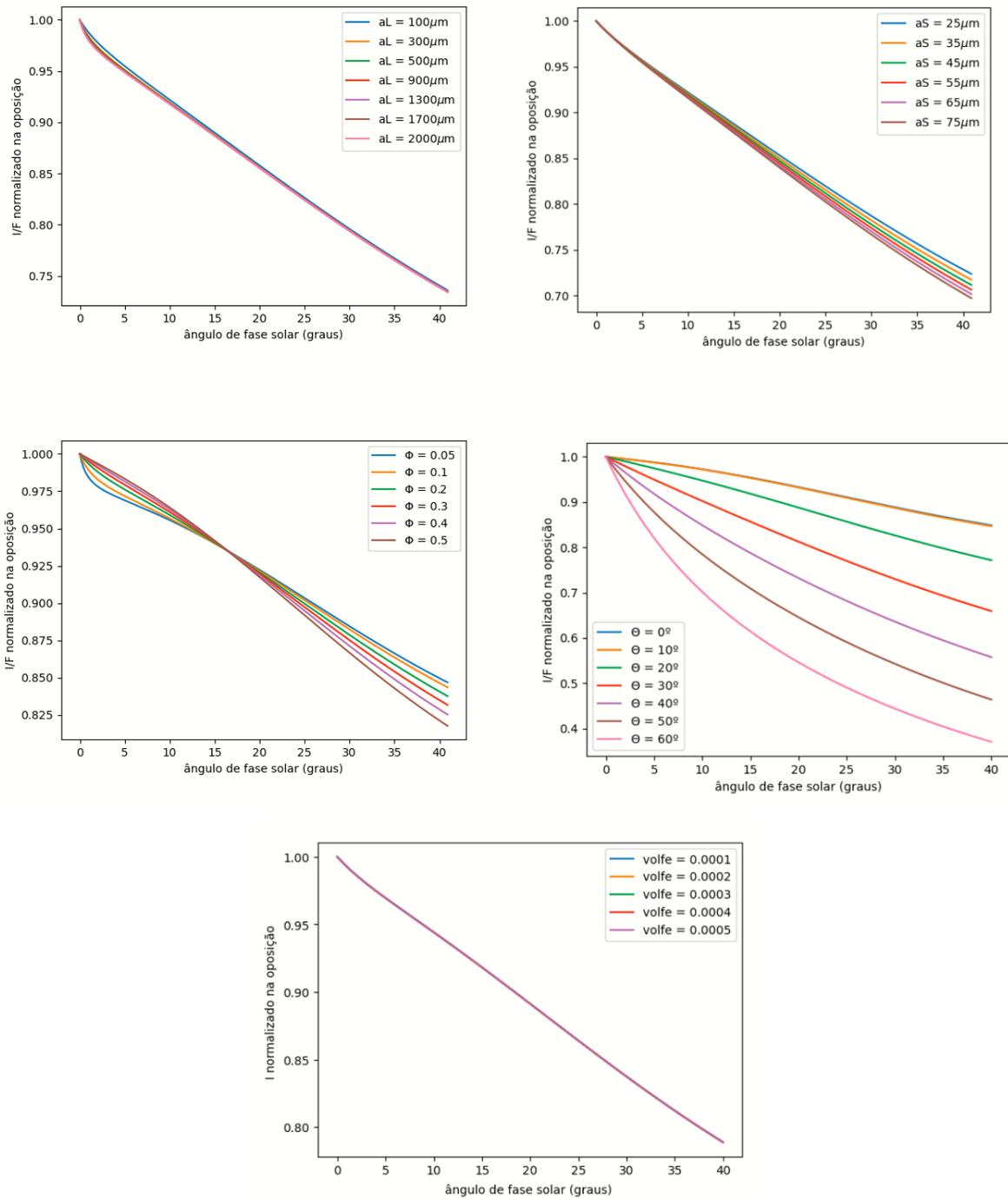


Figura 4.3: Curvas de fase sintéticas normalizadas na oposição modeladas a partir do modelo de Hapke. Na primeira coluna: a figura apresenta curvas de fase modeladas a partir de diferentes valores do maior tamanho das partículas (aL). Na segunda coluna: a figura de cima são curvas de fase modeladas a partir de diferentes valores do menor tamanho das partículas (aS) e abaixo para diferentes valores de volume de ferro ($volFe$). Na terceira coluna: a figura de cima são curvas de fase modeladas a partir de diferentes valores do fator de preenchimento (ϕ) e abaixo são curvas de fase para valores diferentes do parâmetro de rugosidade macroscópica (θ).

macroscópica ($\bar{\theta}$) tem também uma influência importante no comportamento de fase, e essa influência é mais perceptível a partir de 20° . O volume de ferro, por outro lado, não tem nenhuma influência sobre o comportamento de fase.

Analisando todos esses nossos testes, a primeira tentativa foi utilizar os espectros normalizados e ajustar apenas o menor tamanho das partículas (aS), o fator de preenchimento (ϕ) e o volume de ferro (volFe) fixando o maior tamanho das partículas (aL) em $2000 \mu\text{m}$ e o parâmetro de rugosidade macroscópica ($\bar{\theta}$) em 25° . O que nós percebemos é que tanto o fator de preenchimento quanto o menor tamanho das partículas tem efeitos muito semelhantes sobre a reflectância normalizada. Então tentar ajustar esses dois parâmetros juntos não geraria uma solução única e consistente.

Para não lidar com esse problema, nós fizemos os ajustes para o menor tamanho das partículas e para o volume de ferro, variando o fator de preenchimento em um valor fixado entre 0,001 e 0,5. Portanto, para cada espectro que fosse ajustado, teríamos um número de ajustes que mostrará a dependência entre o fator de preenchimento e o menor diâmetro da distribuição. O ajuste foi realizado para cada um dos 64 canais vinculados às observações do NIRS e mantivemos o maior tamanho das partículas muito alto, portanto o valor do menor tamanho da partícula é equivalente ao diâmetro efetivo das partículas. Além disso, utilizamos as constantes óticas do meteorito Alta'Ameen como sendo do Itokawa e modelamos o intemperismo espacial utilizando as constantes óticas do ferro a partir do modelo de misturas.

4.3 Seleção das amostras

O instrumento NIRS adquiriu mais de 80 mil espectros da superfície de Itokawa durante a operação da missão. Os cientistas que trabalharam no instrumento os disponibilizaram individualmente divididos entre as fases da missão e os dias de observação no *Planetary Database System*. Para cada um dos espectros foi disponibilizado o ângulo de incidência, o ângulo de emissão, o ângulo de fase solar. Esses ângulos foram computados utilizando o software SPICE desenvolvido pelo JPL para cada uma das facetas do modelo de forma desenvolvido por Gaskell. Nesses documentos está disponibilizado também a distância entre a sonda Hayabusa e a superfície do asteroide, a latitude e a longitude do centro do *footprint* e a latitude e a longitude dos cantos do *footprint*. São quatro valores de latitude e longitude para cada um dos limites do *footprint*, ou seja, um retângulo de observação. Todos esses dados foram obtidos em conjunto com o instrumento LIDAR e utilizando o modelo de GASKELL *et al.* (2008).

A seleção das amostras adotadas segue os seguintes passos:

- Espectros obtidos entre os dias 17 de setembro de 2005 até dia 15 de outubro de 2005;
- Possuir todas as informações dos ângulos de incidência, emissão e ângulo de fase. Assim como todas as informações de latitude e longitude;
- Não possuir um ângulo de emissão acima de 45°

Apesar do primeiro ponto da seleção de amostras, as datas selecionadas parecerem arbitrárias, não o são. Os espectros entre essas datas estão em parte na fase *gate position*, a outra parte na fase *home position*, além de possuir uma maior cobertura do ângulo de fase. O segundo ponto maximiza as possibilidades de se trabalhar com os espectros. A escolha de eliminar todos os espectros cujo ângulo de emissão é acima de 45° se deve a uma preocupação de evitar grandes sombras que possam contaminar o espectro em si, possibilitando resultados pouco confiáveis. Após a aplicação desses filtros, ao todo sobraram 16607 espectros para a análise.

4.4 Resultados e Discussão

O ajuste foi realizado para cada um dos 16607 espectros da amostra modelando a reflectância para cada um dos 64 canais vinculados às observações do NIRS. Os valores ajustados foram para o diâmetro efetivo e do volume de ferro para cada valor do fator de preenchimento, valores esses indo de 0,001 até 0,500. A maioria dos espectros obtidos puderam ter um ajuste satisfatório supondo uma composição semelhante ao do meteorito afetado pelo intemperismo espacial.

A partir dos ajustes realizados foi possível identificar uma dependência linear entre o menor diâmetro da partícula e o fator de preenchimento. Essa dependência pode ser observada na figura 4.4. Essa figura apresenta a média geral de todos os espectros para o diâmetro efetivo das partículas em função de cada valor do fator de preenchimento. A partir desse resultado, podemos afirmar que não é possível obter um ajuste único para o tamanho das partículas, pois não conseguimos desvincular de imediato seus ajustes do ajuste do fator de preenchimento. O que pudemos fazer, de imediato, é definir intervalos para o diâmetro efetivo das partículas.

Um histograma foi montado para observar os valores máximos, mínimos e a moda do diâmetro efetivo e do volume de ferro para cada valor do fator de preenchimento das partículas. Os valores ajustados para o diâmetro efetivo se mantiveram entre 26 e 180 μm , tendo o pico da distribuição dos valores ajustados para todos os espectros variando de 47 μm à 89 μm dependendo do valor do fator de preenchimento. Esse histograma pode ser observado na figura 4.5.

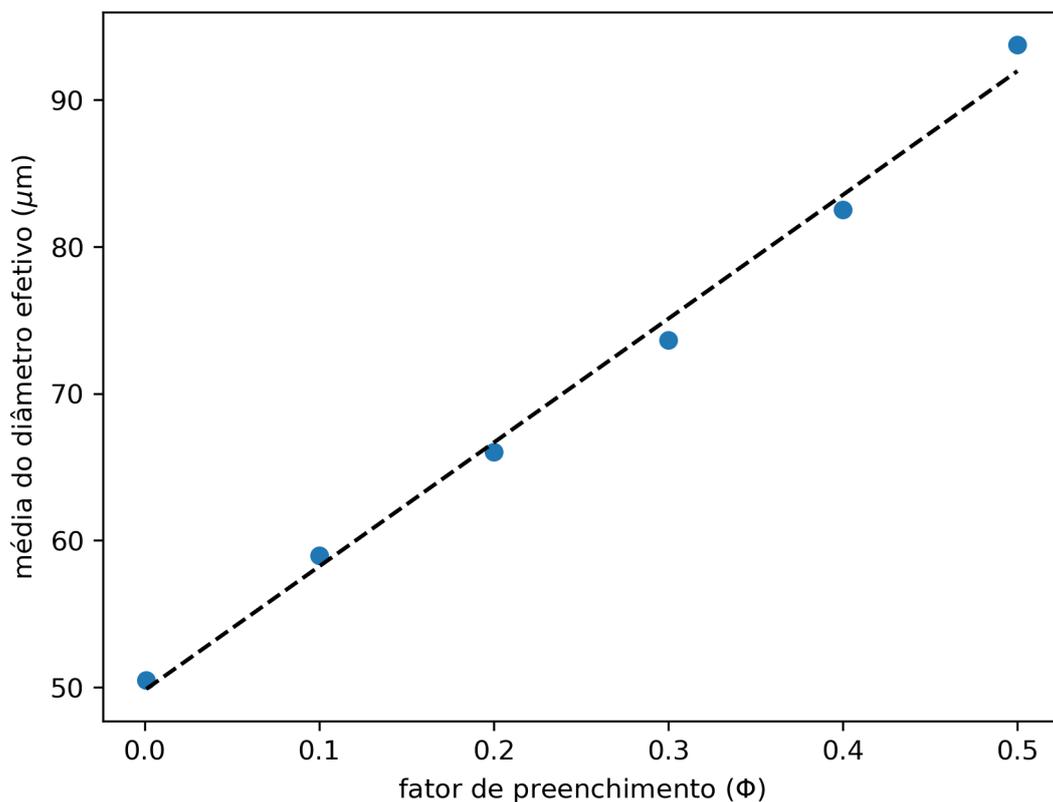


Figura 4.4: Diâmetro efetivo das partículas em função de diferentes valores do fator de preenchimento (ϕ). O valor do diâmetro efetivo das partículas é a média entre todos os espectros para cada um dos valores do fator de preenchimento, é possível observar uma clara dependência linear entre esses dois parâmetros.

Por outro lado, não há dependência entre o volume de ferro e o fator de preenchimento, produzindo assim uma reta de inclinação quase nula que pode ser observada na

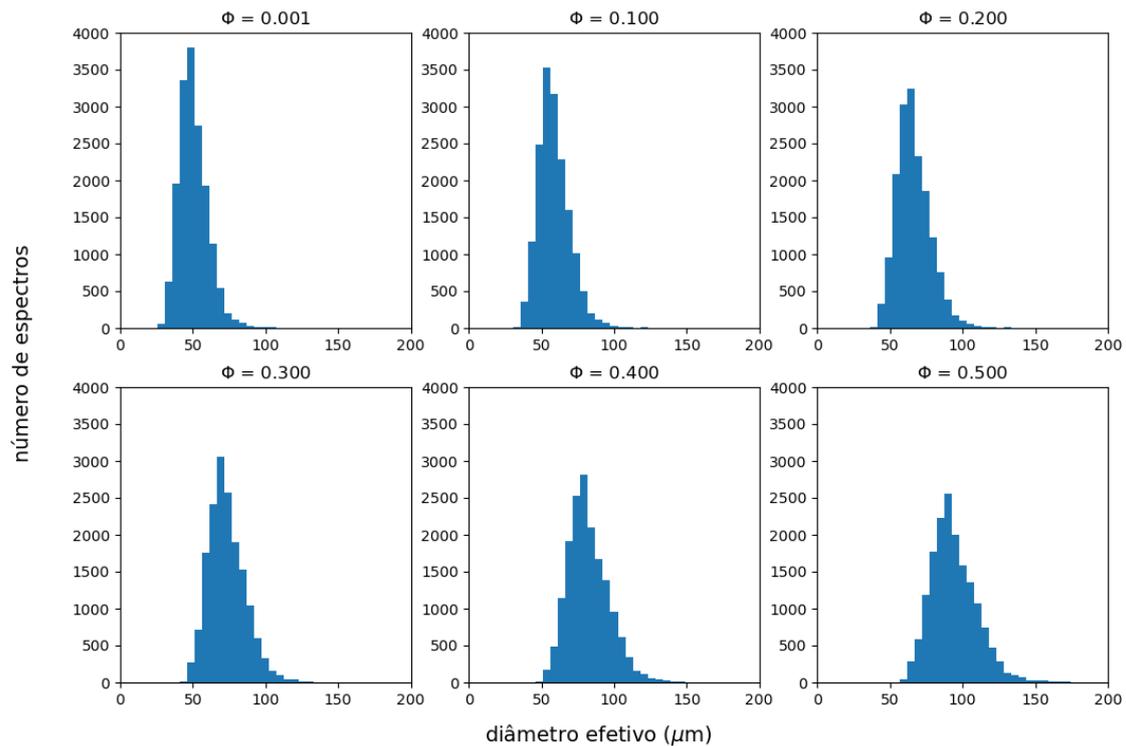


Figura 4.5: Distribuição do diâmetro efetivo das partículas das amostras do espectro do asteroide (25143) Itokawa para seis valores diferentes do fator de preenchimento (ϕ). Há uma descentralização da moda do diâmetro efetivo e um aumento do diâmetro efetivo de modo geral com o aumento do valor de ϕ .

figura 4.6. Essa figura foi produzida a partir da média dos valores ajustados do volume de ferro para todos os espectros para cada valor do fator de preenchimento. O que se vê é que são independentes. Os valores para o volume de ferro ajustado apresentaram uma variedade considerável, variando entre 0.02% e 0.054%.

Como todos os espectros foram disponibilizados juntamente com os dados relativos com a latitude e longitude do campo de visão, foi possível montar mapas de cor que apresenta os valores médios do volume de ferro referente a localização geográfica dos espectros relativos a esses ajustes. A imagem do mapa planejado da superfície de Itokawa foi desenvolvida por STOOKE (2009) se baseando no modelo de forma de GASKELL *et al.* (2008). Um mapa de cor para todos os espectros ao mesmo tempo, dificulta uma análise mais detalhada das regiões de Itokawa devido à grande quantidade de dados em conjunto com os diferentes tamanhos dos polígonos que era impresso no mapa planejado do asteroide. Uma das propostas promissoras foi aplicar um recorte para os dados. A distância entre a sonda espacial e o asteroide está intrinsecamente ligado ao tamanho do campo de visão das observações, portanto essa foi a estratégia escolhida. As distâncias durante a obtenção dos espectros selecionados da minha amostra variavam de pouco mais

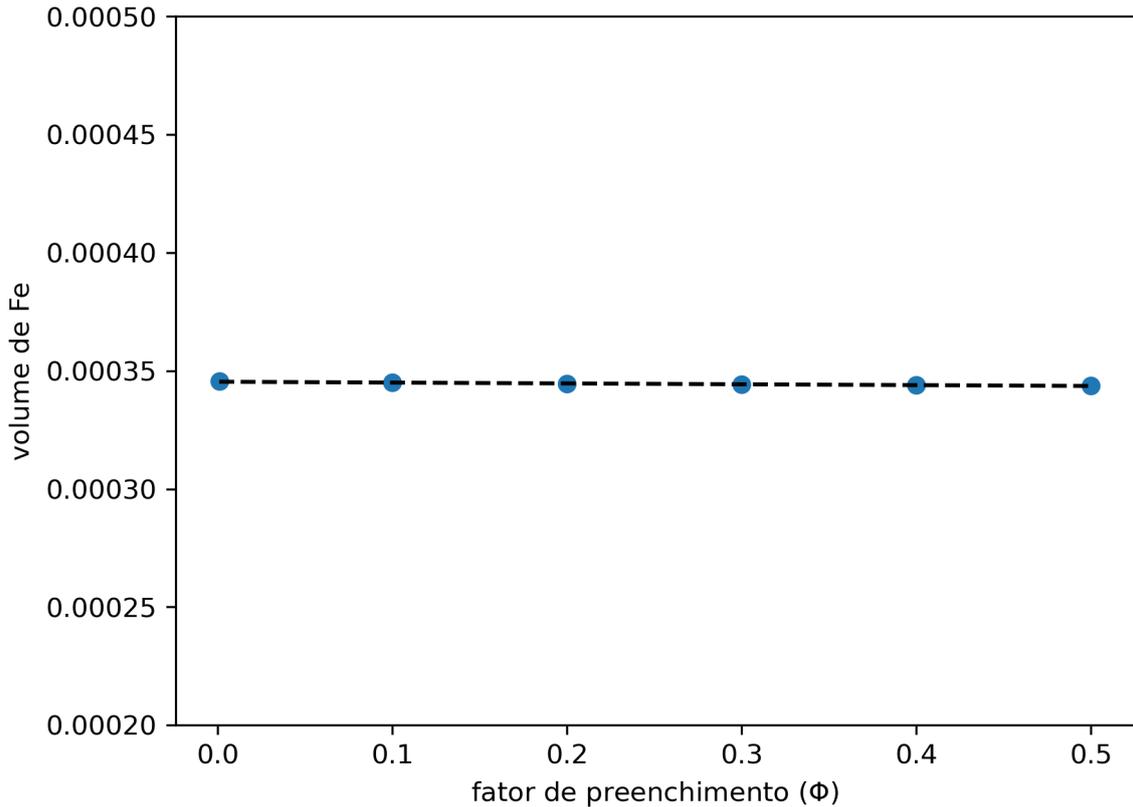


Figura 4.6: Volume de ferro em função de diferentes valores do fator de preenchimento (ϕ). O valor do volume de ferro das partículas é a média entre todos os espectros para cada um dos valores do fator de preenchimento, é possível observar que não parece existir qualquer dependência entre esses dois parâmetros.

de 6 km até pouco menos de 19 km. Portanto, nós produzimos 13 mapas de cor, cada mapa referente a um intervalo de 1 km. Um exemplo desses mapas de cor podem ser observados na figura 4.7.

O que se percebe é há uma certa coerência com as características da superfície do asteroide. Há duas grandes regiões visualmente lisas na superfície do asteroide (25143) Itokawa, a região de Muses Sea e a região de Sagamihara. Dentro da seleção dos dados escolhida por nós, poucos foram os espectros ajustados da segunda região, porém o contrário é verdadeiro para a primeira região. De maneira geral, a região de Muses Sea apresentou uma média de volume de ferro abaixo da média da superfície do asteroide.

A região que apresentou menores valores para a média do volume de ferro é a região próxima ao chamado *Kakuta Boulder* (DEMURA *et al.*, 2006b), centralizada em 0° de latitude e 250° de longitude. Não é uma região lisa, porém não apresenta muitos pedregulhos. Essa região possui, visualmente, um dos maiores albedos da superfície do asteroide em comparação com as outras regiões.

Há duas regiões principais onde o volume de ferro apresentou os maiores valores. A região de Little Woomera, centralizada em 0° de latitude e 180° de longitude, é

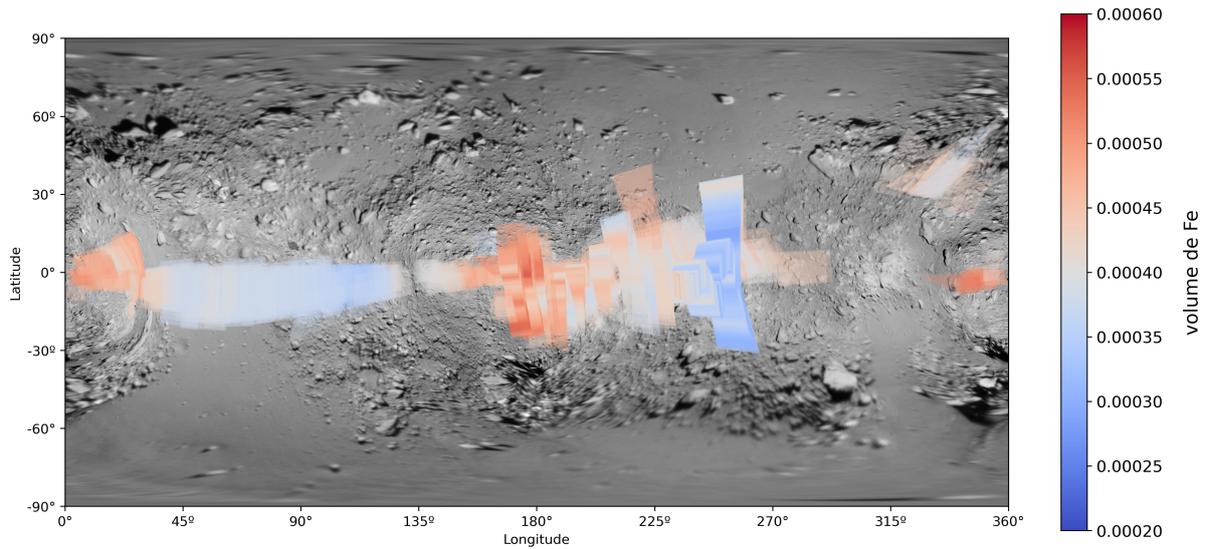


Figura 4.7: Mapa de cor da superfície do asteroide (25143) Itokawa referente ao volume de ferro das partículas de todos os espectros ajustados da amostra para o intervalo de distância de 17 km e 18 km entre a sonda espacial Hayabusa e o asteroide (25143) Itokawa.

uma região de baixo albedo já abordada nesta dissertação e se apresentou com a região com o maior valor médio de volume de ferro. A região ao redor do chamado *Black Boulder* (DEMURA *et al.*, 2006b), centralizada em 0° de latitude e 0° de longitude, também se apresentou como uma região com um alto volume médio de ferro. Essa região é pedregosa, porém não aparenta ter um albedo baixo.

Os valores ajustados para o volume de nano-partículas de ferro são essencialmente independentes do fator de preenchimento, mas uma análise preliminar sugere uma correlação entre a importância da contribuição dessas partículas com a textura do terreno. Regiões que possuem muitos pedregulhos tendem a obter valores maiores de volume de nano-partículas de ferro, enquanto regiões visualmente mais lisas, como é o exemplo da região de Muses Sea, apresentaram em média um volume menor de ferro menor. Outra correlação que podemos notar é que a região onde o volume de ferro apresenta os maiores valores é uma região de baixo albedo, enquanto a região onde o volume de ferro apresenta uma maior média é uma região de alto albedo. Apesar disso, não se observa com muita clareza alguma correlação entre o albedo e a quantidade de ferro em outras regiões. Uma maior investigação qualitativa é necessária para averiguar uma possível correlação.

Até o presente momento, nós conseguimos definir valores para o volume de ferro de maneira independente de todos os outros parâmetros. Conseguimos também identificar uma relação entre o menor diâmetro das partículas e a porosidade a partir dos espectros normalizados.

O que faremos de imediato a partir de agora é tentar ajustar os parâmetros que faltam. Uma das estratégias que pensamos em adotar é utilizar essa relação entre o menor tamanho das partículas e a porosidade para eliminar o menor tamanho do ajuste.

Faríamos ajustes, então, a partir da reflectância não normalizada apenas utilizando como parâmetros o fator de preenchimento e o fator de rugosidade macroscópica. Para utilizar a reflectância não normalizada devemos evitar as observações feitas próximas da oposição, pois esse modelo que utilizamos não incorpora todos os parâmetros físicos importantes para modelar o efeito de oposição por retroespalhamento. A proposta é limitar essa análise às observações com ângulo de fase maiores que 15° ou 20° . Isso permitiria obter ajustes não contaminados pelo efeito por retroespalhamento coerente e pode ajudar a reduzir as indeterminações nos parâmetros de interesse e fornecer estimativas mais precisas.

A determinação precisa dos parâmetros do fator de preenchimento e da rugosidade macroscópica é fundamental para entender as propriedades físicas das partículas. No entanto, essa determinação é frequentemente afetada por indeterminações causadas pela variação da reflectância com o ângulo de fase solar. Para tentar romper com essas indeterminações, poderíamos também realizar ajustes globais, ajustando simultaneamente todos os espectros e derivando parâmetros médios. Ou também é possível buscar regiões com uma cobertura do ângulo de fase suficiente.

Estudos nesse sentido serão realizados em uma etapa posterior do trabalho, prevista para o doutorado. Esses estudos podem ser úteis para entender melhor as propriedades físicas das partículas em diferentes corpos do sistema solar e melhorar a precisão das estimativas de seus parâmetros. Em imediato, as perspectivas futuras podem ser resumidas na continuidade da análise dos dados que estamos fazendo, buscando ajustar os parâmetros que ainda não foram definidos. Com isso, espera-se obter resultados mais precisos e conclusivos tanto sobre o modelo aplicado como para o regolito do asteroide Itokawa.

Eventualmente, o planejamento é estender a análise para outros dados de missões espaciais, comparando os resultados obtidos com diferentes objetos do Sistema Solar. Essa perspectiva de pesquisa é bastante promissora, uma vez que as missões espaciais têm fornecido cada vez mais dados de alta qualidade, possibilitando muitos testes que podem aprimorar nossos modelos fotométricos e contribuir significativamente no avanço do conhecimento sobre os pequenos corpos do sistema solar.

Apêndice A

O resoluto programa espacial japonês

A segunda guerra mundial pode ser compreendida como um dos maiores marcos da história moderna da humanidade, popularmente compreendida como tendo início em 1939. O Japão participou ativamente da segunda guerra mundial defendendo o que foi chamado de eixo. O eixo era composto pelo Reich Alemão, o reino da Itália (até 1943), a França de Vichy, o reino da Bulgária (até 1944), o estado imperial do Irã (até 1941), o reino da Hungria e o império japonês. A guerra se encerrou em 1945 com a vitória da União Soviética contra a Alemanha nazista na batalha de Berlim, o lançamento das bombas atômicas em Hiroshima e Nagasaki por parte do exército estadunidense e a invasão dos territórios da Manchúria e Coreia pelo exército vermelho soviético na Operação Tempestade de Agosto. Com o encerramento da segunda guerra mundial e a rendição do Japão, as forças aliadas baniram completamente os armamentos japoneses e as pesquisas relacionadas a aeronaves.

Durante a Segunda Guerra Mundial, o cientista e engenheiro aeronáutico Hideo Itokawa (1912 - 1999) estava envolvido em projetos de aeronaves japonesas pela Nakajima Aircraft Company. Entre um de seus projetos está o avião Nakajima Ki-43 Hayabusa. Hayabusa é o nome de uma ave que no Brasil nós conhecemos por falcão peregrino. Em 1948, Itokawa se tornou professor titular na Universidade de Tóquio. Em 1952, quando o acordo de paz pós guerra entrou em vigor, as pesquisas aeronáuticas puderam retornar no país. No ano seguinte, o professor Itokawa visitou os Estados Unidos e pode testemunhar o desenvolvimento de uma pesquisa espacial, algo inédito para ele até então. Inspirado pelos livros que pode ler, ele retorna ao Japão com o desejo de iniciar um programa espacial japonês. Segundo Hideo Itokawa "A América já entrou na era dos foguetes. Devemos também fazer pesquisas sobre foguetes. Vamos voar livremente no espaço em um foguete que é muito estável mesmo sem ar, ao contrário de um avião a jato"

Em 1953, alguns engenheiros e cientistas da Universidade de Tóquio foram liderados pelo professor Itokawa e formaram um grupo de pesquisa chamado AVSA (Avionics and Supersonic Aerodynamics) com o objetivo de desenvolver foguetes no Japão. No dia 12 de abril de 1955 a AVSA realizaram o primeiro lançamento de um foguete. Esse

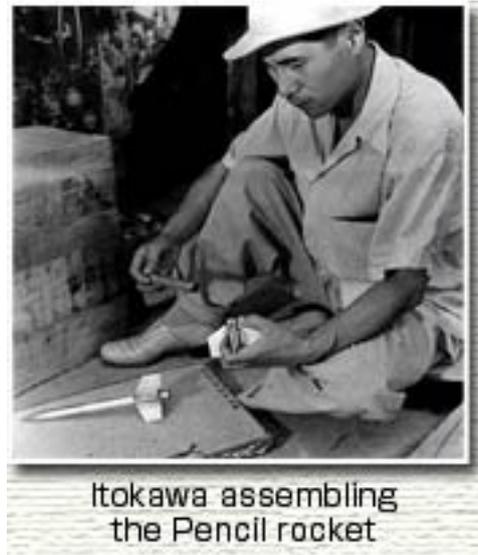


Figura A.1: Hideo Itokawa montando o *Pencil Rocket*. (MATOGAWA, 2015)

foguete ficou conhecido como *Pencil Rocket* (foguete de lápis), suas dimensões eram de 23 cm de comprimento por 1,8 cm de diâmetro e pesava 200 gramas e utilizava combustível sólido como propelente. Posteriormente a esse lançamento, diversos testes com diferentes modelos do *Pencil Rocket* foram realizados. Lançamentos verticais ou horizontais, com diferentes tamanhos e com um ou dois estágios. Oriundas desses experimentos foi fundada a ISAS (Institute of Space and Astronautical Science).

O ano de 1955 foi muito relevante para o desenvolvimento do programa espacial japonês, pois foi o ano da fundação da ISAS, como já citado, mas também da NAL (National Aerospace Laboratory of Japan). A NAL tinha como função desenvolver a pesquisa em aeronaves, foguetes e outros sistemas de transporte aeronáutico e aprimorar as instalações de teste em grande escala. Entre os anos de 1957 e 1958, o Japão participou do evento do Ano Internacional da Geofísica (IGY -International Geophysical Year), que ocorreu entre Julho de 1957 e dezembro de 1958. A participação do país terminou com sucesso com o desenvolvimento do foguete de sondagem K, realizando assim observações da atmosfera superior. Em 1962, foi inaugurado o *Kagoshima Space Center* como um local de lançamento de foguetes de larga grande escala e a ISAS tornou-se uma organização central das atividades espaciais japonesas, juntamente com a NASDA (National Space Development Agency of Japan) que foi fundada em 1969 com o propósito de desenvolver métodos, instalações e equipamentos necessários para o desenvolvimento de satélites, veículos de lançamento e rastreamento. Neste período já havia projetos de desenvolvimento tecnológico para foguetes sob a demanda de realizações de observações científicas com o uso de satélites. O primeiro foguete da ISAS capaz de lançar um satélite do Japão foi o foguete L-4S-5, ele lançou o satélite OHSUMI no dia 11 de fevereiro de 1970 e alavancou o Japão a 4^a nação a ter sucesso no lançamento de satélites, depois apenas da União Soviética, Estados Unidos e França. O OHSUMI foi um satélite cujo único propósito era

tecnológico. O primeiro satélite científico lançado foi o SHINSEI em fevereiro de 1971, esse satélite realizou observações da ionosfera, emissões de rádio solares e raios cósmicos. Desde então começou a era dos satélites científicos do Japão. Desde então a ISAS continuamente realizou outras missões espaciais, das quais eu destaco: as missões Sakigake e Suisei, lançadas em períodos diferentes de 1985 com o intuito de testar a tecnologia para estudar cometas e realizar observações do cometa Halley; a missão YOHKOH, lançada em 1991 com o propósito de realizar observações de raios X solares; a missão Nozomi, lançada em 1998 com o objetivo de estudar a atmosfera do planeta Marte.

No ano de 1996, como já citado no capítulo sobre a missão Hayabusa, a ISAS inicia o planejamento da primeira missão espacial *sample return* a um asteroide. Em 2003 o lançamento do foguete M-V-5 é bem sucedido no lançamento da sonda espacial MUSES-C em direção ao asteroide 1998 SF36. Durante o planejamento da missão, o pioneiro do programa espacial japonês Hideo Itokawa faleceu, portanto como forma de homenagear aquele que ficou conhecido como "Dr. Rocket" no Japão, o asteroide 1998 SF36 foi nomeado como (25143) Itokawa e a sonda espacial MUSES-C mudou seu nome para Hayabusa. No ano do lançamento da sonda Hayabusa a ISAS se une com outras duas agências japonesas, a NASDA e a NAL. Dessa fusão, surge a JAXA.

A JAXA, com a experiência obtida na primeira missão Hayabusa, lançou uma segunda missão *sample return* com destino ao asteroide (162173) Ryugu. Essa missão que é chamada de Hayabusa 2 já concluiu todos seus objetivos vinculados a missão principal até o ano de 2020 e atualmente está em missão estendida onde se encontrará com o asteroide 1998 KY26 até o ano de 2031. Uma outra missão de *sample return* está sendo planejada pela Jaxa para ser lançada em 2024. O nome da missão até o presente momento é MMX (Martian Moons eXploration) e tem como objetivo principal realizar observações *fly-by* da lua Deimos, monitorar o clima do planeta Marte e coletar amostras da lua Phobos.

Referências Bibliográficas

- ABE, M., TAKAGI, Y., KITAZATO, K., et al., 2006, “Near-Infrared Spectral Results of Asteroid Itokawa from the Hayabusa Spacecraft”, *Science*, v. 312, n. 5778 (jun.), pp. 1334–1338. doi: 10.1126/science.1125718.
- BARNOUIN-JHA, O. S., CHENG, A. F., MUKAI, T., et al., 2008, “Small-scale topography of 25143 Itokawa from the Hayabusa laser altimeter”, *Icarus*, v. 198, n. 1 (nov.), pp. 108–124. doi: 10.1016/j.icarus.2008.05.026.
- BARUCCI, M. A., CAPRIA, M. T., CORADINI, A., et al., 1987, “Classification of asteroids using G-mode analysis”, *Icarus*, v. 72, n. 2 (nov.), pp. 304–324. doi: 10.1016/0019-1035(87)90177-1.
- BARUCCI, M. A., DOTTO, E., LEVASSEUR-REGOURD, A. C., 2011, “Space missions to small bodies: asteroids and cometary nuclei”, *Astron. Astrophys. Rev.*, 19: 48. doi: 10.1007/s00159-011-0048-2.
- BINZEL, R. P., GEOPHYS, J., 2001, “1998 SF_36”, *IAU Circ.*, v. 7609 (abr.), pp. 3.
- BINZEL, R. P., RIVKIN, A. S., 2001, “1998 SF_36”, *IAU Circ.*, v. 7598 (mar.), pp. 2.
- BINZEL, R. P., XU, S., 1993, “Chips off of Asteroid 4 Vesta: Evidence for the Parent Body of Basaltic Achondrite Meteorites”, *Science*, v. 260, n. 5105 (abr.), pp. 186–191. doi: 10.1126/science.260.5105.186.
- BINZEL, R. P., RIVKIN, A. S., BUS, S. J., et al., 2001, “MUSES-C target asteroid (25143) 1998 SF36: A reddened ordinary chondrite”, , v. 36, n. 8 (ago.), pp. 1167–1172. doi: 10.1111/j.1945-5100.2001.tb01950.x.
- BOWELL, E., CHAPMAN, C. R., GRADIE, J. C., et al., 1978, “Taxonomy of asteroids”, *Icarus*, v. 35, n. 3 (set.), pp. 313–335. doi: 10.1016/0019-1035(78)90085-4.
- BURBINE, T. H., MCCOY, T. J., JARESOWICH, E., et al., 2003, “Deriving asteroid mineralogies from reflectance spectra: Implications for the MUSES-C target asteroid”, *Antarctic Meteorite Research*, v. 16 (mar.), pp. 185–195.

- BUS, S. J., 1999, *Compositional structure in the asteroid belt: Results of a spectroscopic survey*. Tese de Doutorado, Massachusetts Institute of Technology, jan.
- CAHILL, J. T. S., BLEWETT, D. T., NGUYEN, N. V., et al., 2019, “Optical constants of iron and nickel metal and an assessment of their relative influences on silicate mixture spectra from the FUV to the NIR”, *Icarus*, v. 317 (jan.), pp. 229–241. doi: 10.1016/j.icarus.2018.07.008.
- CHAPMAN, C. R., MORRISON, D., ZELLNER, B., 1975, “Surface Properties of Asteroids: A Synthesis of Polarimetry, Radiometry, and Spectrophotometry”, *Icarus*, v. 25, n. 1 (maio), pp. 104–130. doi: 10.1016/0019-1035(75)90191-8.
- CLARK, B. E., HELFENSTEIN, P., BELL, J. F., et al., 2002, “NEAR Infrared Spectrometer Photometry of Asteroid 433 Eros”, *Icarus*, v. 155, n. 1 (jan.), pp. 189–204. doi: 10.1006/icar.2001.6748.
- CLOUTIS, E. A., GAFFEY, M. J., JACKOWSKI, T. L., et al., 1986, “Calibrations of phase abundance, composition, and particle size distribution for olivine-orthopyroxene mixtures from reflectance spectra”, *J. Geophys. Res.*, v. 91 (out.), pp. 11,641–11,653. doi: 10.1029/JB091iB11p11641.
- DAVALOS, J. A. G., CARVANO, J. M., BLANCO, J., 2017, “Numerical determination of visible/NIR optical constants from laboratory spectra of HED meteorites”, *Icarus*, v. 285 (mar.), pp. 275–290. doi: 10.1016/j.icarus.2016.10.022.
- DEMEMO, F. E., BINZEL, R. P., SLIVAN, S. M., et al., 2009, “An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared”, *Icarus*, v. 202, n. 1 (jul.), pp. 160–180. doi: 10.1016/j.icarus.2009.02.005.
- DEMEMO, F. E., BURT, B. J., MARSSET, M., et al., 2022, “Connecting asteroids and meteorites with visible and near-infrared spectroscopy”, *Icarus*, 380:114971. doi: 10.1016/j.icarus.2022.114971.
- DEMURA, H., KOBAYASHI, S., NEMOTO, E., et al., 2006a, “Stereogrammetric Shape Modeling for (25143) Itokawa, Hayabusa Mission”. In: Mackwell, S., Stansbery, E. (Eds.), *37th Annual Lunar and Planetary Science Conference*, Lunar and Planetary Science Conference, p. 1716, mar.a.
- DEMURA, H., KOBAYASHI, S., NEMOTO, E., et al., 2006b, “Pole and Global Shape of 25143 Itokawa”, *Science*, v. 312, n. 5778 (jun.), pp. 1347–1349. doi: 10.1126/science.1126574.

- DERMAWAN, B., NAKAMURA, T., FUKUSHIMA, H., et al., 2002, “CCD Photometry of the MUSES-C Mission Target: Asteroid (25143) 1998 SF36”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, v. 54 (ago.), pp. 635–640. doi: 10.1093/pasj/54.4.635.
- DOMINGUE, D. L., ROBINSON, M., CARCICH, B., et al., 2002, “Disk-Integrated Photometry of 433 Eros”, *Icarus*, v. 155, n. 1 (jan.), pp. 205–219. doi: 10.1006/icar.2001.6764.
- FERRAZ-MELLO, S., 1994, “Kirkwood Gaps and Resonant Groups”. In: Milani, A., di Martino, M., Cellino, A. (Eds.), *Asteroids, Comets, Meteors 1993*, v. 160, p. 175, jan.
- FUJIWARA, A., KAWAGUCHI, J., YEOMANS, D. K., et al., 2006, “The Rubble-Pile Asteroid Itokawa as Observed by Hayabusa”, *Science*, v. 312, n. 5778 (jun.), pp. 1330–1334. doi: 10.1126/science.1125841.
- GAFFEY, M. J., 1976, “Spectral reflectance characteristics of the meteorite classes”, *J. Geophys. Res.*, v. 81, n. B5 (fev.), pp. 905–920. doi: 10.1029/JB081i005p00905.
- GAFFEY, M. J., BELL, J. F., BROWN, R. H., et al., 1993, “Mineralogical Variations within the S-Type Asteroid Class”, *Icarus*, v. 106, n. 2 (dez.), pp. 573–602. doi: 10.1006/icar.1993.1194.
- GASKELL, R., SAITO, J., ISHIGURO, M., et al., 2008, “Gaskell Itokawa Shape Model V1.0”, *NASA Planetary Data System*, art. HAY-A-AMICA-5-ITOKAWASHAPE-V1.0.
- GASKELL, R. W., SAITO, J., ISHIGURO, M., et al., 2006, “Shape and Topography of Asteroid 25143 Itokawa”. In: *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #38*, v. 38, *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, p. 59.01, set.
- GREENSTREET, S., NGO, H., GLADMAN, B., 2012, “The orbital distribution of Near-Earth Objects inside Earth’s orbit”, *Icarus*, v. 217, n. 1 (jan.), pp. 355–366. doi: 10.1016/j.icarus.2011.11.010.
- HAPKE, B., 1984, “Bidirectional reflectance spectroscopy 3. Correction for macroscopic roughness”, *Icarus*, v. 59, n. 1 (jul.), pp. 41–59. doi: 10.1016/0019-1035(84)90054-X.
- HAPKE, B., 1986, “Bidirectional reflectance spectroscopy 4. The extinction coefficient and the opposition effect”, *Icarus*, v. 67, n. 2 (ago.), pp. 264–280. doi: 10.1016/0019-1035(86)90108-9.

- HAPKE, B., 2001, “Space weathering from Mercury to the asteroid belt”, *J. Geophys. Res.*, v. 106, n. E5 (maio), pp. 10039–10074. doi: 10.1029/2000JE001338.
- HAPKE, B., 2002, “Bidirectional Reflectance Spectroscopy. 5. The Coherent Backscatter Opposition Effect and Anisotropic Scattering”, *Icarus*, v. 157, n. 2 (jun.), pp. 523–534. doi: 10.1006/icar.2002.6853.
- HAPKE, B., 2012, *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*. 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9781139025683.
- HARTMAN, B., DOMINGUE, D., 1998, “Scattering of Light by Individual Particles and the Implications for Models of Planetary Surfaces”, *Icarus*, v. 131, n. 2 (fev.), pp. 421–448. doi: 10.1006/icar.1997.5861.
- HELFENSTEIN, P., VEVERKA, J., 1987, “Photometric properties of lunar terrains derived from Hapke’s equation”, *Icarus*, v. 72, n. 2 (nov.), pp. 342–357. doi: 10.1016/0019-1035(87)90179-5.
- HICKS, M., WEISSMAN, P., CHAMBERLIN, A., et al., 2001, “1998 SF_36”, *IAU Circ.*, v. 7598 (mar.), pp. 3.
- HOWELL, E. S., MERENYI, E., LEBOFISKY, L. A., 1994, “Classification of asteroid spectra using a neural network”, *J. Geophys. Res.*, v. 99, n. E5 (maio), pp. 10847–10866. doi: 10.1029/93JE03575.
- ISHIGURO, M., ABE, M., OHBA, Y., et al., 2003, “Near-Infrared Observations of MUSES-C Mission Target”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, v. 55 (jun.), pp. 691–699. doi: 10.1093/pasj/55.3.691.
- IZENBERG, N. R., MURCHIE, S. L., BELL, J. F., I., et al., 2003, “Spectral properties and geologic processes on Eros from combined NEAR NIS and MSI data sets”, *J. Geophys. Res.*, v. 38, n. 7 (jul.), pp. 1053–1077. doi: 10.1111/j.1945-5100.2003.tb00298.x.
- JAXA. “Retrieval of the Hayabusa capsule was completed , Heat shield was found in WPA”. [urlhttps://www.isas.jaxa.jp/e/topics/2010/06143.shtml](https://www.isas.jaxa.jp/e/topics/2010/06143.shtml).
- JPL/NASA. “Small-Body Targets of Spacecraft Missions”. [urlhttps://ssd.jpl.nasa.gov/sb/targets.html](https://ssd.jpl.nasa.gov/sb/targets.html).
- KAASALAINEN, M., KWIATKOWSKI, T., ABE, M., et al., 2003, “CCD photometry and model of MUSES-C target (25143) 1998 SF36”, *Astron. Astrophys.*, v. 405 (jul.), pp. L29–L32. doi: 10.1051/0004-6361:20030819.

- KAWAGUCHI, J., UESUGI, K. T., FUJIWARA, A., et al., 1999, “The MUSES-C, mission description and its status”, *Acta Astronautica*, v. 45, n. 4 (nov.), pp. 397–405. doi: 10.1016/S0094-5765(99)00159-9.
- KITAZATO, K., CLARK, B. E., ABE, M., et al., 2008, “Near-infrared spectrophotometry of Asteroid 25143 Itokawa from NIRS on the Hayabusa spacecraft”, *Icarus*, v. 194, n. 1 (mar.), pp. 137–145. doi: 10.1016/j.icarus.2007.08.029.
- LEDERER, S. M., DOMINGUE, D. L., THOMAS-OSIP, J. E., et al., 2008, “The 2004 Las Campanas/Lowell Observatory campaign II. Surface properties of Hayabusa target Asteroid 25143 Itokawa inferred from Hapke modeling”, *Earth, Planets and Space*, v. 60 (jan.), pp. 49–59. doi: 10.1186/BF03352761.
- LONGOBARDO, A., 2021, *Sample Return Missions The Last Frontier of Solar System Exploration*. Elsevier.
- MATOGAWA, Y., 2015, *Pencil Rocket Story: The dawn of Japanese space development*. JAXA.
- MCKAY, D. S., FRULAND, R. M., HEIKEN, G. H., 1974, “Grain size and the evolution of lunar soils.” *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, v. 1 (jan.), pp. 887–906.
- MORBIDELLI, A., BOTTKE, W. F., J., FROESCHLÉ, C., et al., 2002, “Origin and Evolution of Near-Earth Objects”. In: *Asteroids III*, pp. 409–422.
- MUKAI, T., NAKAMURA, A. M., SAKAI, T., 2006, “Asteroidal surface studies by laboratory light scattering and LIDAR on HAYABUSA”, *Advances in Space Research*, v. 37, n. 1 (jan.), pp. 138–141. doi: 10.1016/j.asr.2005.07.086.
- MUKAI, T., ABE, S., HIRATA, N., et al., 2007, “An overview of the LIDAR observations of asteroid 25143 Itokawa”, *Advances in Space Research*, v. 40, n. 2 (jan.), pp. 187–192. doi: 10.1016/j.asr.2007.04.075.
- NAKAMURA, T., NOGUCHI, T., TANAKA, M., et al., 2011, “Itokawa Dust Particles: A Direct Link Between S-Type Asteroids and Ordinary Chondrites”, *Science*, v. 333, n. 6046 (ago.), pp. 1113. doi: 10.1126/science.1207758.
- NAKAMURA, T., NAKAMURA, A. M., SAITO, J., et al., 2001, “Multi-band imaging camera and its sciences for the Japanese near-earth asteroid mission MUSES-C”, *Earth, Planets and Space*, v. 53 (nov.), pp. 1047–1063. doi: 10.1186/BF03351703.

- NESVORNÝ, D., BROŽ, M., CARRUBA, V., 2015, “Identification and Dynamical Properties of Asteroid Families”. In: *Asteroids IV*, pp. 297–321. doi: 10.2458/azu_uapress_9780816532131-ch016.
- NOGUCHI, T., NAKAMURA, T., KIMURA, M., et al., 2011, “Incipient Space Weathering Observed on the Surface of Itokawa Dust Particles”, *Science*, v. 333, n. 6046 (ago.), pp. 1121. doi: 10.1126/science.1207794.
- OKADA, T., SHIRAI, K., YAMAMOTO, Y., et al., 2006, “X-ray Fluorescence Spectrometry of Asteroid Itokawa by Hayabusa”, *Science*, v. 312, n. 5778 (jun.), pp. 1338–1341. doi: 10.1126/science.1125731.
- OSTRO, S. J., BENNER, L. A. M., NOLAN, M. C., et al., 2004, “Radar observations of asteroid 25143 Itokawa (1998 SF36)”, , v. 39, n. 3 (mar.), pp. 407–424. doi: 10.1111/j.1945-5100.2004.tb00102.x.
- OSTRO, S. J., BENNER, L. A. M., MAGRI, C., et al., 2005, “Radar observations of Itokawa in 2004 and improved shape estimation”, , v. 40, n. 11 (nov.), pp. 1563–1574. doi: 10.1111/j.1945-5100.2005.tb00131.x.
- PEROZZI, E., ROSSI, A., VALSECCHI, G. B., 2001, “Basic targeting strategies for rendezvous and flyby missions to the near-Earth asteroids”, *Planet. Space Sci.*, v. 49, n. 1 (jan.), pp. 3–22. doi: 10.1016/S0032-0633(00)00124-0.
- PIETERS, C. M., TAYLOR, L. A., NOBLE, S. K., et al., 2000, “Space weathering on airless bodies: Resolving a mystery with lunar samples”, , v. 35, n. 5 (set.), pp. 1101–1107. doi: 10.1111/j.1945-5100.2000.tb01496.x.
- SAITO, J., MIYAMOTO, H., NAKAMURA, R., et al., 2006, “Detailed Images of Asteroid 25143 Itokawa from Hayabusa”, *Science*, v. 312, n. 5778 (jun.), pp. 1341–1344. doi: 10.1126/science.1125722.
- SALISBURY, J. W., D’ARIA, D. M., JAROSEWICH, E., 1991, “Midinfrared (2.5–13.5 μm) reflectance spectra of powdered stony meteorites”, *Icarus*, v. 92, n. 2 (ago.), pp. 280–297. doi: 10.1016/0019-1035(91)90052-U.
- SEKIGUCHI, T., STERZIK, M., AGEORGES, N., et al., 2001, “1998 SF_36”, *IAU Circ.*, v. 7598 (mar.), pp. 4.
- TEDESCO, E. F., WILLIAMS, J. G., MATSON, D. L., et al., 1989, “A Three-Parameter Asteroid Taxonomy”, *Astron. J.*, v. 97 (fev.), pp. 580. doi: 10.1086/115007.
- THOLEN, D. J., 1984, *Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry*. Tese de Doutorado, University of Arizona, Tucson, set.

- THOMAS-OSIP, J. E., LEDERER, S. M., OSIP, D. J., et al., 2008, “The 2004 Las Campanas/Lowell Observatory Itokawa campaign: I. Simultaneous visible and near-infrared photometry of the Hayabusa mission target”, *Earth, Planets and Space*, v. 60 (jan.), pp. 39–48. doi: 10.1186/BF03352760.
- TOMASKO, M. G., 1976, “Photometry and polarimetry of Jupiter.” In: *Jupiter*, pp. 486–515, jan.
- WEISBERG, M. K., MCCOY, T. J., KROT, A. N., 2006, “Systematics and Evaluation of Meteorite Classification”. In: Lauretta, D. S., McSween, H. Y. (Eds.), *Meteorites and the Early Solar System II*, p. 19.
- YOSHIMITSU, T., KUBOTA, T., NAKATANI, I., 2006, “MINERVA Rover which Became a Small Artificial Solar Satellite”. .