



OBSERVATÓRIO NACIONAL
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA

CURVAS DE FASE DE OBJETOS EM ÓRBITA
PRÓXIMA DA TERRA COMO PARTE DO
PROJETO IMPACTON

PLÍCIDA MARIA DA SILVA ARCOVERDE
ORIENTADORA: DRA. DANIELA LAZZARO

RIO DE JANEIRO - RJ
2018

CURVAS DE FASE DE OBJETOS EM ÓRBITA PRÓXIMA DA TERRA COMO
PARTE DO PROJETO IMPACTON

Plícida Maria da Silva Arcoverde

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional/MCTI, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Ciências.

Orientador: Daniela Lazzaro

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2018

"CURVAS DE FASE DE OBJETOS EM ÓRBITA PRÓXIMA DA TERRA COMO
PARTE DO PROJETO IMPACTON"

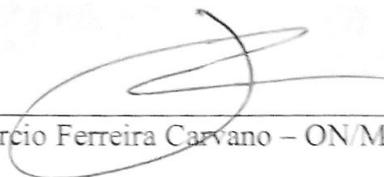
PLÍCIDA MARIA DA SILVA ARCOVERDE

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRA EM ASTRONOMIA.

Aprovada por:



Dra. Daniela Lazzaro- ON/MCTIC (Orientadora)



Dr. Jorge Marcio Ferreira Carvano – ON/MCTIC



Dr. Gonzalo Tancredi- Instituto de Fisica - Uruguai

RIO DE JANEIRO – BRASIL

23 DE FEVEREIRO DE 2018

Arcoverde, Plícida Maria da Silva

Curvas de fase de objetos em órbita próxima da Terra como parte do projeto IMPACTON /Plícida Maria da Silva Arcoverde. – Rio de Janeiro: ON/MCTI, 2018.

XIII, 88 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Daniela Lazzaro

Dissertação (mestrado) – ON/MCTI/Programa de Pós-graduação em Astronomia, 2018.

Bibliography: p. 64 – 68.

1. Objetos próximos da Terra. 2. Curva de fase.
3. IMPACTON. I. , . II. Observatório Nacional/MCTI, Programa de Pós-graduação em Astronomia. III. Título.

*À Romero e Márcia. O amor de
você me ajudam a enfrentar a
saúde.*

Agradecimentos

Após muito esforço e dedicação, chego ao fim deste Mestrado que não seria possível sem o apoio e colaboração de muitos, para os quais aqui eu apresento os meus agradecimentos.

À minha família, meus pais, **Romero e Márcia** e meus irmãos, **Romerito e Diego**, que mesmo distante sempre deram seu amor e apoio para suportar a saudade. Em especial **à meu irmão Romerito e minha cunhada Paula**, por toda ajuda e carinho, e por sempre estar presente mesmo na distância.

À todos da família Arcoverde, que torcem e ajudam a tornar a distância entre nós cada vez menor, obrigada!

À meus amigos pernambucanos: Camila, Evandro e Jéssica, que mesmo distante se fazem presente para me dá forças.

À Isabella, companheira de todos momentos felizes que vivi na cidade maravilhosa. **À David**, por todos os momentos felizes. Em especial **à Carol**, obriga por ser minha amiga de todas as horas, sem você essa jornada não seria tão feliz e leve.

Ao Observatório Nacional, por oferecer a infraestrutura necessária para minha formação e realização deste trabalho.

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ, que financiou este trabalho.

A minha orientadora, proferora Dra. Daniela Lazzaro, pelo suporte, grande paciência, dedicação e incentivo ao longo de todo o período de desenvolvimento do trabalho.

Ao grupo de Ciências Planetárias do Observatório Nacional: a todos os professores e alunos, pela oportunidade de participar de um grupo qualifi-

cado e diversificado onde é feita uma constate discussão de diversos temas científicos.

À equipe do projeto IMPACTON, por toda iniciativa e esforços para manter nossa pesquisa em andamento.

À equipe de observadores: Hissa, Filipe e Eduardo, pelas noites de observação. Sem vocês não seria possível a conclusão desse trabalho.

Ao professor e grande amigo Dr. Antônio Carlos Miranda, pelo grande incentivo e apoio tanto na conclusão do curso de Física quanto do mestrado.

Aos meus colegas do Observatório Nacional, por todos bons momentos nas salas, na copa, nos ajudando no dia a dia.

A todos, que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta Dissertação.

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional/MCTI como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CURVAS DE FASE DE OBJETOS EM ÓRBITA PRÓXIMA DA TERRA COMO PARTE DO PROJETO IMPACTON

Plícida Maria da Silva Arcoverde

Fevereiro/2018

Orientador: Daniela Lazzaro

Programa: Astronomia

Neste trabalho vamos apresentar os resultados obtidos do estudo da curva de fase de 29 NEO através de observações com o telescópio do Observatório do Sertão de Itaparica (OASI), do projeto IMPACTON. Atualmente conhece-se mais do que 17.000 objetos desta população, entretanto, ainda é pequeno o conhecimento que se tem de suas propriedades físicas. Entre as diversas propriedades físicas que podem ser obtidas a partir de observações fotométricas de um NEO, a curva de fase é particularmente interessante pois permite ter informação sobre o brilho intrínseco do objeto, sua magnitude absoluta H , e sobre as propriedades superficiais, o parâmetro de inclinação G . Define-se por curva de fase o ajuste das magnitudes reduzidas de um asteroide medidas em diversos ângulos de fase solar. O estudo de como essas propriedades se distribuem dentro de um conjunto significativo de NEO, permite estabelecer vínculos para melhor entender os processos de formação e evolução desta população. Neste trabalho foram utilizados os ajustes $H-G$, para obtenção de nossas curvas de fase, e o ajuste $H-G_{12}$, para comparar alguns parâmetros. Determinamos ao todo 24 curvas de fase de diferente qualidade devida essencialmente à cobertura obtida em termos de ângulo de fase solar.

Abstract of Dissertation presented to Observatório Nacional/MCTI as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PHSE CURVES OF OBJECTS IN ORBIT CLOSE TO EARTH AS PART OF
THE IMPACTON PROJECT

Plícida Maria da Silva Arcoverde

February/2018

Advisor: Daniela Lazzaro

Department: Astronomy

In this work we present the results obtained from the study of the phase curve of 29 NEO through observations with the telescope of the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI), of the IMPACTON project. Currently, more than 17,000 objects of this population are known, however, there is still little knowledge on their physical properties. Among the various physical properties that can be obtained from photometric observations of a NEO, the phase curve is particularly interesting because it allows to have information on the object's intrinsic brightness, its absolute magnitude H , and of the surface properties, the slope parameter G . A phase curve is defined as the fit of the reduced magnitudes of an asteroid measured at various solar phase angles. The study of how these properties are distributed within a significant set of NEO, allows to establish links to better understand the processes of formation and evolution of this population. In this work, the H - G fits were used to obtain our phase curves, and the H - G_{12} fit to compare some parameters. We have determined 24 phase curves of different quality due essentially to the coverage obtained in terms of solar phase angle.

Contents

List of Figures	xi
List of Tables	xiii
1 Introdução e fundamentação	1
1.1 Objetos em órbitas próximas da Terra	2
1.2 Reflexão da luz por corpos sem atmosfera	8
1.2.1 Efeito de oposição	10
1.3 Curva de Fase	11
1.3.1 Modelo H-G	13
1.3.2 Modelo H- G_1 - G_2	15
1.3.3 Modelo H- G_{12}	17
1.4 Influência da rotação e albedo na curva de fase	18
2 Metodologia e Processamento de dados	22
2.1 Obtenção dos Dados	22
2.1.1 Instrumentação	23
2.2 Amostra	25
2.3 Redução dos dados	27
2.4 Fotometria absoluta	29
2.5 Ajustes da curva de fase	31
2.5.1 Ajuste H-G	32
2.5.2 Ajuste H- G_{12}	33
3 Resultados e discussão	36
3.1 NEOs com melhor cobertura da curvas de fase	38
3.1.1 (326683) 2002 WP	38
3.1.2 (484506) 2008 ER7	38
3.1.3 2016 WJ1	39
3.2 NEOs com cobertura apenas na região do efeito de oposição	41
3.2.1 (16816) 1997 UF9	41
3.2.2 (175189) 2005 EC224	41

3.2.3	(470510) 2008 CJ116	41
3.2.4	2017 CR32	42
3.3	NEO com cobertura na parte linear da curva de fase	44
3.3.1	(138846) 2000 VJ61	44
3.3.2	(469634) 2004 SZ19	44
3.3.3	(471241) 2011 BX18	45
3.3.4	(474163) 1999 SO5	45
3.3.5	(480004) 2014 KD91	45
3.3.6	(489337) 2006 UM	46
3.4	NEO com diferentes coberturas em ângulo de fase	49
3.4.1	(36236) 1999 VV	49
3.4.2	(40267) 1999 GJ4	49
3.4.3	(203217) 2001 FX9	50
3.4.4	(438955) 2010 LN14	50
3.4.5	(464797) 2004 FZ1	52
3.4.6	2001 QE34	52
3.4.7	2005 TF	52
3.4.8	2014 AD17	52
3.4.9	2016 RP33	55
3.4.10	2017 AC5	55
3.4.11	2017 AF5	55
3.5	NEO com curvas de fase não determinadas	57
3.6	Discussão	57
4	Conclusões e perspectivas	61
	Bibliography	64
A	Condições observacionais e magnitude reduzida dos NEO observa- dos	69
B	Curva de fase dos 24 NEO	76

List of Figures

1.1	3
1.2	<i>Representação orbital dos subgrupos da população de NEAs, sendo a) Amor, b) Apollo, c) Aten e d) Atira.</i>	4
1.3	<i>Gráfico da fração da população de NEOs em termos de sua classe taxonômica. Nas colunas as partes vazias e preenchidas são os dados em três ou quatro bandas, respectivamente (figura retirada de Carry et al. 2016).</i>	6
1.4	<i>Histograma da distribuição de classes taxonômica de mais de 1000 NEO (figura retirada de Binzel et al. (2015)).</i>	7
1.5	<i>Distribuição taxonômica comparativa de NEOs e sua principal fonte progenitora, a região interna do cinturão principal (figura retirada de Carry et al. (2016)).</i>	7
1.6	<i>Geometria de observação do asteroide, sendo: α o ângulo de fase, θ o ângulo de de aspecto, Δ a distância do asteroide até a Terra e r distância do asteroide até o Sol.</i>	8
1.7	<i>Curva de fase do asteroide 20 Massalia do trabalho de Gehrels (1956).</i>	10
1.8	<i>Curva de fase do asteroide 44 Nysa do trabalho de Belskaya and Shevchenko (2000).</i>	13
1.9	<i>Exemplo da curva de fase do asteroide 44 Nysa do trabalho de Muinonen et al. (2010) para o sistema H-G.</i>	15
1.10	<i>Exemplo da curva de fase do asteroide 44 Nysa do trabalho de Muinonen et al. (2010) para dados de alta qualidade.</i>	16
1.11	<i>Curva de fase do asteroide 1862 Apollo com os ajustes H-G (direita) e H-G₁ – G₂ (esquerda). (Figura retirada de Muinonen et al. (2010).)</i>	18
1.12	<i>Curva de fase do asteroide 1862 Apollo com os ajustes H-G₁₂. As linhas tracejadas mostram o erro do ajuste. (Figura retirada de Muinonen et al. (2010).)</i>	18
1.13	<i>Geometria de observação em que mostra a variação do brilho do asteroide de acordo com seu ângulo de aspecto.</i>	19
2.1	<i>Telescópio do OASI e câmera CCD Apoge, modelo Alta U42, acoplada à roda de filtros.</i>	24

2.2	<i>Cúpula e casa de apoio do OASI.</i>	24
2.3	<i>Sala de operação do OASI (http://www.on.br/impacton/index.html).</i>	25
2.4	<i>Representação da abertura na qual são medidas as contagens referentes ao asteroide, anel de raio a, e ao céu, anel de raio $(b - c)$.</i>	29
2.5	<i>Curva de fase dos asteroides 2016 WJ1, (a), e (175189) 2005 EC224, (b) obtidas com o programa MPO Canopus.</i>	33
2.6	<i>Curva de fase do NEO 2016 WJ1 com dados da missão observacional do mês de Dezembro de 2016. Ajuste com o programa MAGRED_{CF}.</i>	34
2.7	<i>Curva de fase do NEO 2016 WJ1 com dados da missão observacional do mês de Dezembro de 2016. Ajuste com o calculador online do ajuste $H-G_{12}$.</i>	35
3.1	<i>Curvas de fase dos asteroides (326683) 2002 WP, (484506) 2008 ER7 e 2016 WJ1.</i>	40
3.2	<i>Curvas de fase dos asteroides (16816) 1997 UF9, (175189) 2005 EC224, (470510) 2008 CJ116 e 2017 CR32.</i>	43
3.3	<i>Curvas de fase dos asteroides (138846) 2000 VJ61, (469634) 2004 SZ19 e (471241) 2011 BX18.</i>	47
3.4	<i>Curvas de fase dos asteroides (474163) 1999 SO5, (480004) 2014 KD91 e (489337) 2006 UM.</i>	48
3.5	<i>Curvas de fase dos asteroides (36236) 1999 VV, (40267) 1999 GJ4, (203217) 2001 FX9 e (438955) 2010 LN14.</i>	51
3.6	<i>Curvas de fase dos asteroides (464797) 2004 FZ1, 2001 QE34, 2005 TF e 2014 AD17.</i>	54
3.7	<i>Curvas de fase dos asteroides 2016 RP33, 2017 AC5 e 2017 AF5.</i>	56

List of Tables

1.1	<i>Subgrupos de NEO, sua definição e número de objetos conhecidos até a data de 29-01-2018, onde a é o semi-eixo maior, Q a distância afélica e q a distância periélica.</i>	5
1.2	<i>Relação do G com albedo e classes taxonômicas (Wisniewski et al., 1997).</i>	20
1.3	<i>Relação do G com albedo e classes taxonômicas Warner et al. (2009).</i>	21
2.1	<i>Parâmetros físicos dos 29 objetos observados entre Julho de 2016 e Março de 2017. Os dados foram obtidos dos sites NEODyS-2 e EARN.</i>	27
3.1	<i>Tabela de comparação da magnitude absoluta obtida utilizando: $MAGRED_{CF}$, MPO Canopus e Calculador online.</i>	37
3.2	<i>Resumo dos resultados obtidos para 24 NEO.</i>	59
3.3	<i>Tabela de comparação dos objetos que já possuem albedo publicado.</i>	59

Chapter 1

Introdução e fundamentação

O Sistema Solar é composto por corpos com diferentes características físicas e dinâmicas, divididos basicamente em três classes: planetas, planetas anões e pequenos corpos. A classe dos pequenos corpos engloba populações distintas como os asteroides, localizados nas regiões mais internas, e os centauros, os transnetunianos (ou TNOs) e os cometas, nas mais externas, em geral, além da órbita de Netuno.

O estudo das diversas propriedades físicas de pequenos corpos do Sistema Solar permite obter um melhor conhecimento de como estas se distribuem dentro das diferentes populações. Essas distribuições, por sua vez, permitem obter informações importantes sobre os processos físicos atuantes, ou que atuaram no passado, e impor vínculos aos modelos de formação e evolução do nosso sistema planetário. As características físicas de cometas e TNO, objetos que foram formados e permaneceram nas regiões mais frias do Sistema Solar, permitem inferir sobre o ambiente interestelar e as condições no sistema planetário exterior. Os asteroides, por outro lado, permitem melhor entender a zona de transição entre os planetas terrestres e os gigantes, região de sua formação. Acredita-se que todas essas populações sejam diretamente relacionadas aos planetesimais que formaram os planetas.

Os objetos em órbitas próximas da Terra, que tanto podem ser asteroides como cometas, formam uma população particularmente interessante de ser estudada (ver, por exemplo, Binzel et al. 2015). Considerando que estes objetos se encontram em órbitas instáveis sobre a idade do Sistema Solar, isto implica tratar-se de uma população transiente, cuja proveniência ainda está em discussão (Michel et al. 2000, Bottke et al. 2002, Morbidelli et al. 2015) e cujo destino pode variar desde uma colisão com um dos planetas terrestre até a ejeção para os confins do Sistema Solar. É fato notório de que todos os dias centenas de corpos atingem a Terra. Devido ao seu pequeno tamanho a maioria acaba sendo desintegrada em sua passagem pela atmosfera. Entretanto, o mesmo não ocorre com os corpos maiores. Em 1981

a identificação de uma concentração anômala de irídio no limite entre o período Cretáceo e a era Mesozóica (K/T ou Cretáceo/Terciário) foi associada à cratera de impacto de Chixculub (Alvarez et al., 1980). É importante ressaltar de que a gravidade das consequências de um impacto é função direta do tamanho do objeto e de sua estrutura interna, sendo estas fundamentais para quantificar corretamente seu perigo.

O principal problema em relação a esta população é o pequeno conhecimento que se tem tanto de seu tamanho (Harris and D'Abramo, 2015) quanto de suas propriedades físicas (Binzel et al., 2015). Entretanto, são exatamente essas propriedades as que podem fornecer indícios importantes sobre a origem e os mecanismos de transporte dos objetos até suas órbitas atuais. O projeto IMPACTON, dentro do qual o presente trabalho se insere, visa o estudo sistemático de diversas características físicas de objetos em órbitas próximas da Terra (Lazzaro, 2010).

O objetivo do presente projeto é a determinação, para um conjunto de NEO, de suas magnitudes absolutas e características superficiais. A magnitude absoluta quantifica o brilho intrínseco de um asteroide, o qual é função do diâmetro e, particularmente, do albedo. Lembrando que o albedo é definido como a razão entre a luz incidente e a refletida pela superfície de um corpo, então este parâmetro tem relação com a composição superficial. Diversos sistemas de magnitudes asteroidais tem sido desenvolvidos ao longo dos anos visando uma determinação mais precisa, mas, de forma geral, todos se baseiam na análise da curva de fase de um asteroide, que nada mais é do que a variação do brilho do objeto com o ângulo de iluminação solar, também chamado de ângulo de fase solar (ver próximas sessões para mais detalhes).

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no capítulo 1 é dada a fundamentação teórica enquanto no capítulo 2 é descrita a metodologia utilizada e a instrumentação de coleta de dados. Por fim, no capítulo 3 são apresentados os resultados obtidos, assim como sua discussão.

1.1 Objetos em órbitas próximas da Terra

A maior parte da população dos asteroides está concentrada entre as órbitas de Marte e de Júpiter, no chamado Cinturão Principal (CP). Existem, entretanto, muitos objetos tanto na região mais interna, entre Marte e Mercúrio, quanto na

própria órbita de Júpiter. Os NEO, do inglês *Near Earth Objects*, são definidos como aqueles objetos cuja órbita tem periélio q , menor do que 1.3 UA, podendo assim se aproximarem tanto da Terra quanto de Marte. O primeiro asteroide descoberto com órbita próxima da Terra foi (433) Eros, em 13 de agosto de 1898 por Gustav Witt, em Berlim, e por Auguste Charlois, em Nice. Atualmente (433) Eros, com 3,3 km de diâmetro, é o segundo maior asteroide da população dos NEO atrás apenas de (1036) Ganymed (com 6,49 km).

Na Figura 1.1 é mostrada uma representação esquemática do Sistema Solar interno com todos os objetos conhecidos até a data de 29-01-2018, obtida do site <https://minorplanetcenter.net>. Na figura, as linhas em azul claro representam as órbitas dos planetas de Mercúrio até Júpiter, sendo Mercúrio, Terra e Júpiter representados por um círculo com uma cruz no meio. Os pontos verdes representam os asteroides do CP, os círculos vermelhos os NEO, os pontos azuis (na órbita de Júpiter, 60° à frente e 60° atrás do planeta) os Troianos e os quadrados azuis os cometas.

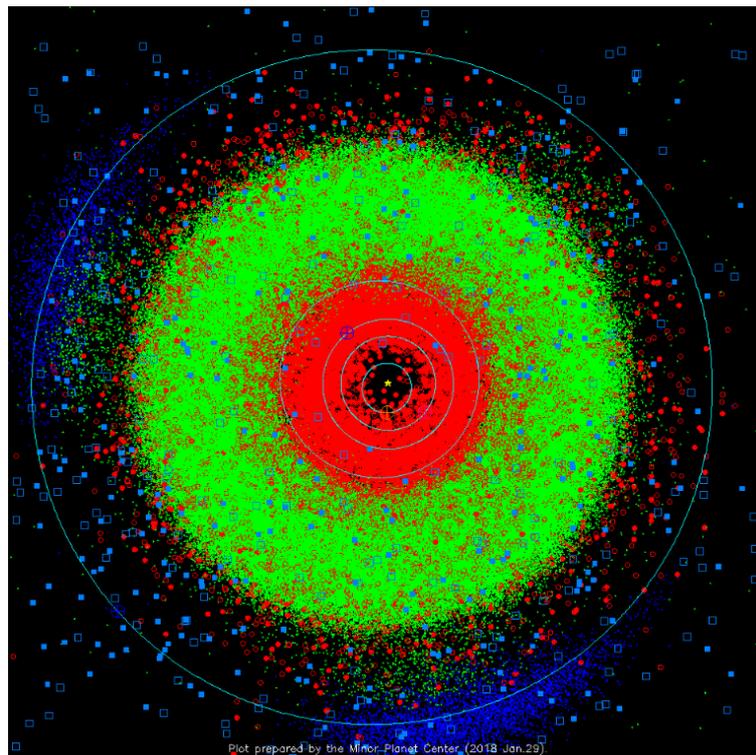


Figure 1.1: .

A população dos NEO, dependendo dos elementos orbitais dos objetos, é dividida em quatro subgrupos: Aten, Apollo, Amor e Atira (Shoemaker et al. 1979, Binzel et al. 2015). Na Figura 1.2 são mostradas esquematicamente as

órbitas, em relação àquela da Terra, de objetos dos diversos subgrupos e onde pode ser facilmente notado que objetos Apollo e Aten cruzam a órbita da Terra enquanto os Amor e Atira apenas se aproximam desta. Um outro importante subgrupo é o dos PHA, do inglês *Potentially Hazardous Asteroids*, definido por aqueles objetos que possuem uma distância mínima de interseção, ou MOID (do inglês *Minimum Orbit Intersection Distance*), menor ou igual a 0,05 UA e uma magnitude absoluta (H) menor ou igual a 22,0. Como será visto na próxima sessão, essa magnitude absoluta corresponde a um tamanho da ordem de 150m. Na tabela 1.1 é dada a definição rigorosa de cada subgrupo, assim como o número de objetos conhecidos até a data de 29-01-2018, de acordo com o *Minor Planet Center* (<https://minorplanetcenter.net>). Como pode ser visto na tabela, até o momento são conhecidos cerca de 17.400 NEO, entretanto, de acordo com Binzel et al. (2015), se conhece alguma propriedade física para não mais do que 2000 desses objetos.

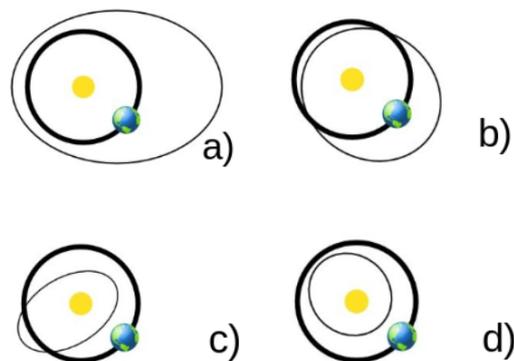


Figure 1.2: *Representação orbital dos subgrupos da população de NEAs, sendo a) Amor, b) Apollo, c) Aten e d) Atira.*

Conforme mencionado acima, o estudo dos asteroides permite obter informações importantes sobre a formação do Sistema Solar por sua relação direta com os planetesimais que formaram os maiores corpos do nosso sistema planetário. Entretanto, esse estudo esbarra em limitações devido ao fato dos asteroides estarem distantes e serem, em sua grande maioria, pequenos dificultando assim sua observação e a obtenção de dados a partir da Terra. Vale aqui ser lembrado de que os asteroides, assim como os demais corpos planetários, não tem luz própria e apenas refletem a que recebem do Sol. De forma geral é possível dizer que a distância do Sol e ao observador é fator preponderante para sua observação: entre dois asteroides de mesma composição e estrutura superficial, o mais distante será sempre mais difícil de ser observado! Os NEO, portanto, devido ao fato de poder se aprox-

Table 1.1: *Subgrupos de NEO, sua definição e número de objetos conhecidos até a data de 29-01-2018, onde a é o semi-eixo maior, Q a distância afélica e q a distância periélica.*

Subgrupo de NEAs	Definição	N° de objetos conhecidos
Atiras	$a < 1UA$ e $Q < 0,983UA$	30
Atens	$a < 1UA$ e $Q > 0,983UA$	1.288
Apollos	$a > 1UA$ e $q \leq 1,017UA$	8.800
Amors	$a > 1UA$ e $1,017 < q \leq 1,3UA$	7.524
Total		17.642
PHAs	$MOID \leq 0,05UA$ e $H \leq 22$	1.894

imar muito da Terra, são excelentes para obter informações sobre os menores corpos.

O estudo direto da composição superficial de asteroides só é possível através de meteoritos encontrados na Terra ou, no caso de missões espaciais que retornam com amostras desses objetos. Uma das formas de estudo da composição mineralógica da superfície, é por meio da comparação de dados obtidos de observações remotas de asteroides com aqueles de meteoritos e minerais obtidos em laboratório. Com base nesses dados é possível dividir os asteroides em diferentes classes taxonômicas. Essa classificação se dá a partir de características do fluxo de reflexão por comprimento de onda, ou espectro de reflexão no visível, obtidas da fotometria de multi-banda ou espectroscopia. Como a composição superficial está diretamente relacionada com a composição original e com processos diversos sofridos pelo asteroide com o passar do tempo, espera-se que haja uma correlação entre a composição mineralógica superficial e cada classe taxonômica.

Na literatura existem diferentes classificações taxonômicas, que partem da distribuição dos asteroides em 3 classificações, como em Chapman et al. (1975), e chegando até 26 classificações (como visto em Bus and Binzel 2002). Trabalhos mais recentes utilizam dados fotométricos de grandes mapeamentos tais como o *Sloan Digital Sky Survey* ou SDSS (<http://www.sdss.org/surveys/>), para criar classes compatíveis com as taxonomias derivadas de espectros (ver Carvano et al. 2010). O trabalho de Carry et al. (2016), usa dados do SDSS de NEO e MC (cruzadores de Marte) agrupando-os em uma versão reduzida da classificação de DeMeo et al. (2009).

Na figura 1.3 observamos a distribuição observada por Carry et al. (2016) de NEOs, com três e quatro bandas fotométricas. Mesmo com poucos dados, vemos que grande parte está concentrada nas classes C e S. Essa concentração dos tipos taxonômicos C e S também é mostrada no trabalho de Binzel et al. (2015), como reproduzido na figura 1.4.

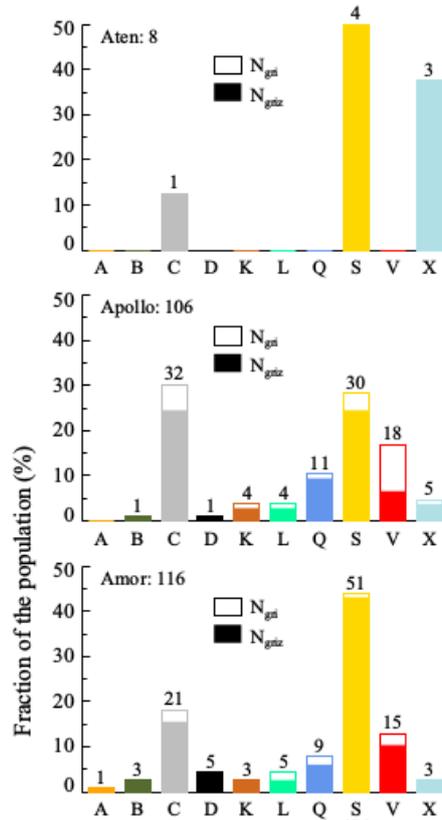


Figure 1.3: Gráfico da fração da população de NEOs em termos de sua classe taxonômica. Nas colunas as partes vazias e preenchidas são os dados em três ou quatro bandas, respectivamente (figura retirada de Carry et al. 2016).

Sendo os NEO uma população transiente, originária em sua maioria das regiões mais internas do Cinturão Principal, seu estudo permite ter dados sobre os asteroides daquela região, como podemos ver na figura 1.5, em que é feita uma correlação dos principais locais de proveniência de NEO de acordo com os tipos taxonômicos destes com objetos do cinturão principal. Outra consequência da instabilidade das órbitas dos NEO é de que sua permanência na região é de cerca de 10^6 anos (Bottke et al., 2002; Morbidelli et al., 2002) quando então podem ou colidir com um planeta terrestre ou serem ejetados devido a encontros próximos com estes. Nesse sentido, também é uma população potencialmente perigosa para a Terra (Morrison, 2003) sendo fundamental o conhecimento de suas propriedades

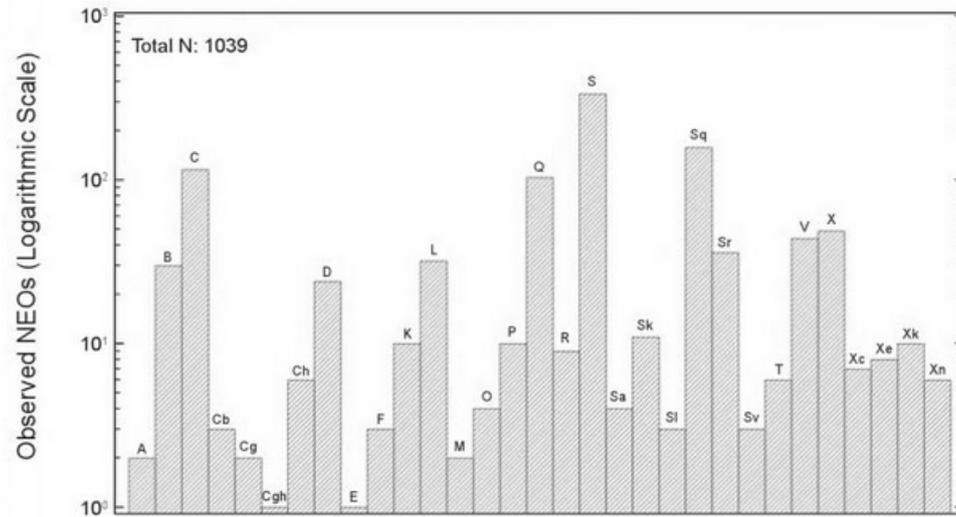


Figure 1.4: *Histograma da distribuição de classes taxonômica de mais de 1000 NEO (figura retirada de Binzel et al. (2015)).*

físicas para poder melhor quantificar seu risco para a humanidade.

No que segue vamos detalhar alguns conceitos fundamentais sobre as propriedades de reflexão da luz de superfícies planetárias para emtão introduzir a curva de fase.

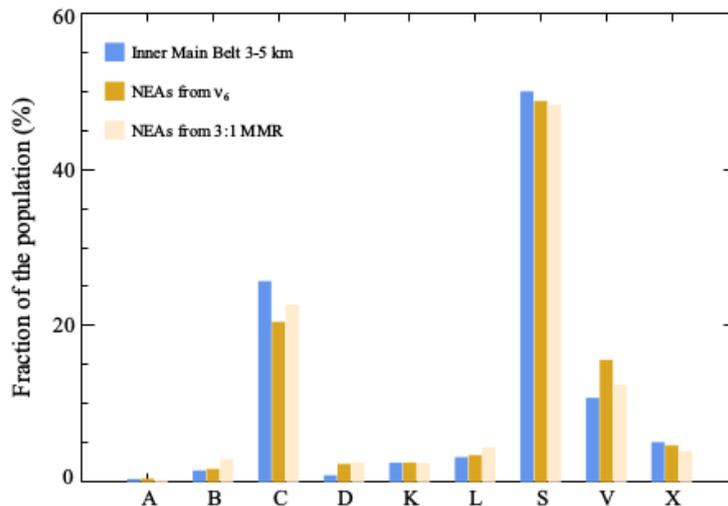


Figure 1.5: *Distribuição taxonômica comparativa de NEOs e sua principal fonte progenitora, a região interna do cinturão principal (figura retirada de Carry et al. (2016)).*

1.2 Reflexão da luz por corpos sem atmosfera

A superfície de pequenos corpos do Sistema Solar sem atmosfera é composta por uma camada de grãos, com tamanhos variando de micrômetros a centímetros, e cujas propriedades óticas estão relacionadas com sua composição e sua forma. Esta camada, chamada de regolito, é a que determina o brilho de um corpo planetário, a partir da forma como esta reflete a radiação solar incidente. Neste sentido, estuda-se como o brilho de uma superfície planetaria depende da geometria de iluminação e de observação para poder inferir sobre as propriedades do regolito.

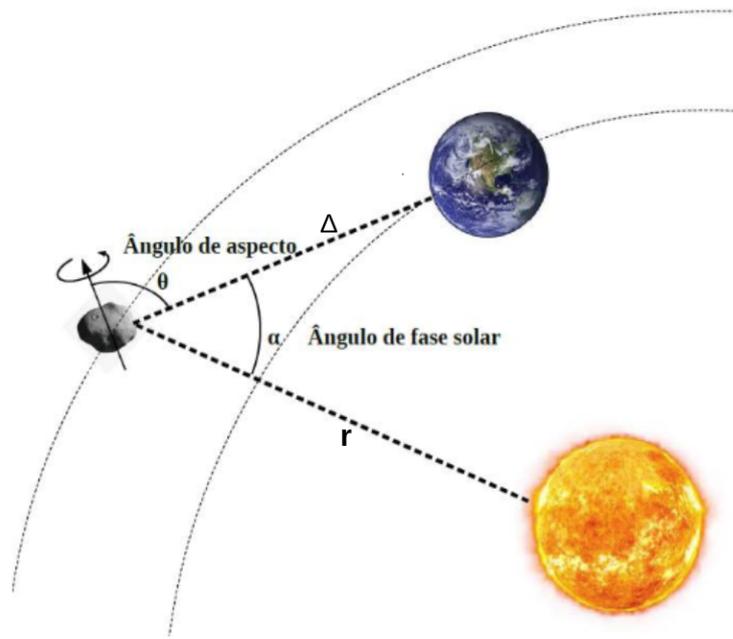


Figure 1.6: *Geometria de observação do asteroide, sendo: α o ângulo de fase, θ o ângulo de de aspecto, Δ a distância do asteroide até a Terra e r distância do asteroide até o Sol.*

A geometria básica de observação de um asteroide a partir da Terra é mostrada na figura 1.6 onde o ângulo de fase é definido como sendo aquele entre o Sol e a Terra, como visto do asteroide, o ângulo de aspecto é aquele entre a Terra e a direção do eixo de rotação do asteroide, r e Δ são as distâncias ao Sol e à Terra, respectivamente. Por outro lado, a geometria do espalhamento da luz é definida por três ângulos: o de incidência, entre a fonte de luz e a normal à superfície do corpo, o de emissão, entre o observador e a normal à superfície do corpo, e o de fase, definido acima. A dependência do brilho da superfície em relação a esses ângulos é determinada pelas propriedades óticas e mecânicas da superfície e, em última análise, pela camada de regolito (Li et al., 2015).

Diversos modelos teóricos e empíricos tem sido desenvolvidos ao longo dos anos visando determinar as propriedades físicas da superfície de um asteroide a partir de observações fotométricas, embora sem uma completa solução até o momento. Em particular, o modelo de Hapke (descrito em diversos artigos entre 1981 e 2012) e o de Shkuratov (Shkuratov et al., 1999) são atualmente os mais aceitos. Foge do escopo deste trabalho descrever esses modelos teóricos os quais são revistos em detalhe no artigo de Li et al. (2015), no livro Asteroids IV. Vamos aqui apenas descrever alguns parâmetros e conceitos básicos, relevantes para entender a curva de fase e os parâmetros derivados desta.

- *Reflectância* - Parâmetro que define o espalhamento da luz por uma superfície. De acordo com Hapke (2012), de modo geral a reflectância é definida como a razão da radiância espalhada, também chamada de intensidade, pela incidente, ou fluxo. Em geral são utilizados dois prefixos para especificar como a luz incidente e as condições de medição da luz espalhada são colimadas. A reflectância bi-direcional, por exemplo, é uma quantidade que supõe ser a luz incidente perfeitamente colimada com luz refletida na linha de visada. Na observação da maior parte dos asteroides esta suposição é uma boa aproximação, a não ser em ângulos de fase próximo de zero quando ocorre o efeito de oposição, descrito abaixo.
- *Albedo físico, ou geométrico* - Tem definição similar à reflectância mas em relação a uma superfície ideal que espalha toda luz incidente isotropicamente, também chamada de superfície perfeitamente refletora de Lambert ou superfície Lambertiana. Note que um espalhamento não isotrópico pode tornar uma superfície mais brilhante do que uma superfície Lambertiana perfeitamente refletora. O albedo geométrico, p_v , é, portanto, definido como a razão entre o brilho integral de um corpo em ângulo de fase zero e o brilho de uma superfície perfeitamente Lambertiana de mesmo tamanho e à mesma distância, mas iluminada e observada perpendicularmente. É importante notar de que para objetos extremamente brilhantes e com forte retroespalhamento *backscattering* (ver abaixo), o albedo geométrico pode ser próximo ou superior a 1. Por exemplo, Encelados, Tethys e Dione, pequenos satélites de Saturno, tem albedo geométrico de, respectivamente, 1,38, 1,23 e 1,00 (Verbiscer et al., 2007).
- *Albedo Bond, ou Bond esférico* - Parâmetro que mede a capacidade de um corpo absorver energia incidente. É definido como a fração total de irradiância incidente espalhada por uma superfície em todas as direções. Por definição este parâmetro não pode ser maior do que 1.

1.2.1 Efeito de oposição

O efeito de oposição, ou OE (*Opposition Effect*), foi inicialmente identificado a partir de observações dos anéis de Saturno no ano de 1887 (Lumme and Bowell, 1981). Desde então viu-se que esse é um fenômeno comum em corpos do Sistema Solar sem atmosfera e diversos estudos tem visado compreender o mecanismo físico envolvido. Em termos observacionais o efeito de oposição é um aumento não-linear do brilho de um corpo sem atmosfera em ângulos de fase próximos de zero. Na figura 1.7 é mostrada a curva de luz de (20) Massalia, o primeiro asteroide para o qual o efeito de oposição foi observado (Gehrels, 1956).

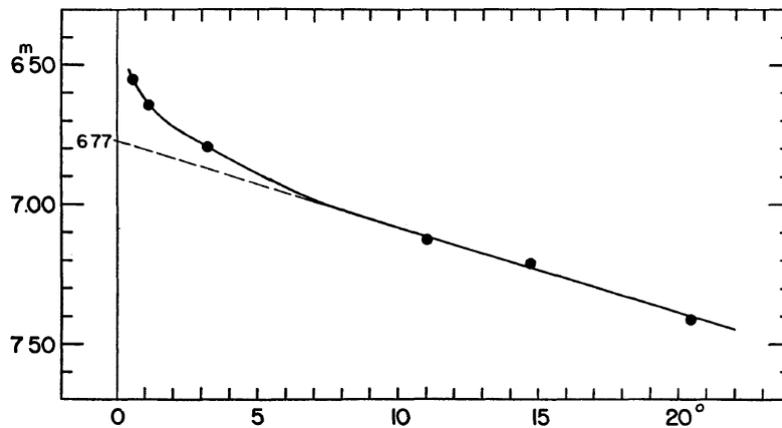


Figure 1.7: *Curva de fase do asteroide 20 Massalia do trabalho de Gehrels (1956).*

Dois mecanismos de espalhamento da luz tem sido considerados como responsáveis pelo efeito de oposição: o ocultamento por sombra (Irvine 1966, Hapke 1981, Shkuratov et al. 1999, Morozhenko and Vidmachenko 2013) e o retroespalhamento coerente (Mishchenko and Dlugach 1992, Mishchenko 1992, Mishchenko et al. 2009, Muinonen et al. 2012). O primeiro, conhecido como *shadowing-mechanism*, ou SH, ocorre devido ao desaparecimento das sombras mútuas entre as partículas que compõem o regolito quando a fase zero é atingida, ou próximo desta. O segundo, conhecido como *coherent-backscattering*, ou CB, ocorre quando os raios emergentes produzidos após múltiplos espalhamentos entre os grãos do regolito interferem coerentemente com o raio de incidência, efeito que acontece próximo da fase zero.

Estes mecanismos além de serem responsáveis pelo aumento não-linear na curva de fase também explicariam o ramo da polarização negativa em curvas polarimétricas de asteroides (Muinonen et al., 2002; Shkuratov et al., 2002). O SH é um mecanismo de espalhamento simples, ou seja, considera que a radiação

é espalhada apenas uma vez, enquanto o CB considera múltiplas reflexões do raio incidente. Além disso existe uma diferença quanto ao tamanho dos grãos do regolito necessário para que cada um destes mecanismo ocorra. Para que o SH aconteça é necessário que as sombras estejam definidas, implicando que o tamanho dos grãos deve ser maior do que o comprimento de onda da radiação incidente. No caso do CB, entretanto, os grãos devem ser da ordem ou menor do que o comprimento de onda da radiação, ou devem ser transparentes de tal forma que um espalhamento múltiplo seja possível. Atualmente é bastante aceito ser o CB o principal mecanismo responsável pelo efeito de oposição observado em pequenos corpos sem atmosfera (Belskaya and Shevchenko, 2000).

1.3 Curva de Fase

O estudo fotométrico de corpos sem atmosfera por meio da variação do brilho de acordo com o ângulo de fase vem sendo feito desde o século XIX com o trabalho de Gustar Muller (como citado em Helfenstein and Veverka 1989). Esse estudo não basea-se em apenas obter um bom ajuste de pontos de dados fotométricos, mas sim compreender as propriedades geológicas e físicas dos regolitos presentes na superfície desses objetos a partir do espalhamento da radiação solar incidente.

Desde então vem ocorrendo a busca para melhorar a forma de interpretar as observações fotométricas em geral, iniciada na década de 60 devido ao interesse pelo estudo da superfície lunar. Em Hapke (1966) e Irvine (1966) vemos estudos teóricos da fotometria e reflexão da luz por superfícies rugosas, que posteriormente foram aplicados à superfícies de asteroides.

Ao analisar o comportamento do brilho de asteroides de acordo com suas classes taxonômicas, Bowell and Lumme (1979) concluíram que os asteroides tipo S tem comportamento diferente na curva de fase quando comparados com os do tipo-C. Esse comportamento distinto se daria pela forma como ocorre o espalhamento simples da luz de acordo com a composição superficial dos asteroides.

Na década seguinte, foram desenvolvidos modelos mais precisos considerando a presença de regolitos, microestruturas, múltiplo espalhamento e rugosidade em larga escala na superfície dos asteroides. Isso pode ser visto nos trabalhos de Hapke (1981, 1984, 1986) e Lumme and Bowell (1981), os quais realizaram esse estudo de forma independente.

Como vemos em Helfenstein and Veverka (1989), as propriedades de espalhamento da luz podem ser classificadas, de forma geral, em propriedades óticas e estruturais. As propriedades óticas dependem do albedo e padrão de espalhamento da radiação incidente por grãos de regolitos ou pelo acúmulo desse material. Já as propriedades estruturais dependem da microestrutura das partículas de regolitos, seu tamanho, forma, porosidade, assim como da topografia da superfície onde estão distribuídas. O estudo de espalhamento da luz de acordo com essas propriedades pode ser feita a partir da análise da curva de fase. Assim, o primeiro asteroide a ter sua curva de fase determinada foi (20) Massalia (ver figura 1.7), verificando que o fenômeno do OE é comum a todos os corpos sem atmosfera. A análise da curva de fase, com ênfase na região do OE, se faz então importante por nos dar informações sobre composição superficial e albedo do objeto.

A partir de então vem ocorrendo a busca pela melhor forma de ajustar a curva de fase. Um exemplo é dado na figura 1.8 (Belskaya and Shevchenko, 2000), onde a curva de fase do asteroide (44) Nysa é ajustada utilizando distintos modelos. Diante dos diferentes modelos propostos para o ajuste da curva de fase, em 1985 a *International Astronomical Union* (IAU) adotou o sistema H-G fotométrico como padrão desenvolvido por Bowell e só publicado em Bowell et al. (1989). O ajuste conta com dois parâmetros determinados a partir da curva de fase, a magnitude absoluta, H, e o parâmetro de inclinação da curva, G. Este modelo possui um bom desempenho no intervalo de $\sim 10^\circ$ a $\sim 60^\circ$ em ângulo de fase, porém acaba não sendo muito preciso para regiões de OE no caso de algumas classes taxonômicas.

Mesmo o ajuste H-G fornecendo resultados satisfatórios, ele falha em reproduzir o brilho de oposição para as classes E e F (Oszkiewicz et al., 2012). Portanto, os modelos de ajustes da curva de fase foram sendo melhorados com o objetivo de encontrar ajuste mais precisos para o parâmetro de inclinação. Belskaya and Shevchenko (2000) notaram que o ajuste com três parâmetros fornece os melhores resultados.

Diante disso, Muinonen et al. (2010) desenvolveram um ajuste fotométrico de três parâmetros, o sistema H- G_1 - G_2 . Este fornece um ajuste da curva de fase com três parâmetros, mais indicado para dados de alta precisão. Como nem sempre é possível obter dados de alta precisão para a construção da curva de fase, Muinonen et al. (2010) e Penttilä et al. (2016) desenvolveram então o ajuste H- G_{12} de dois parâmetros, que fornece bons resultados para dados menos precisos. A partir de 2012 a IAU passou a adotar como padrão os ajustes H- G_1 - G_2 e H- G_{12} .

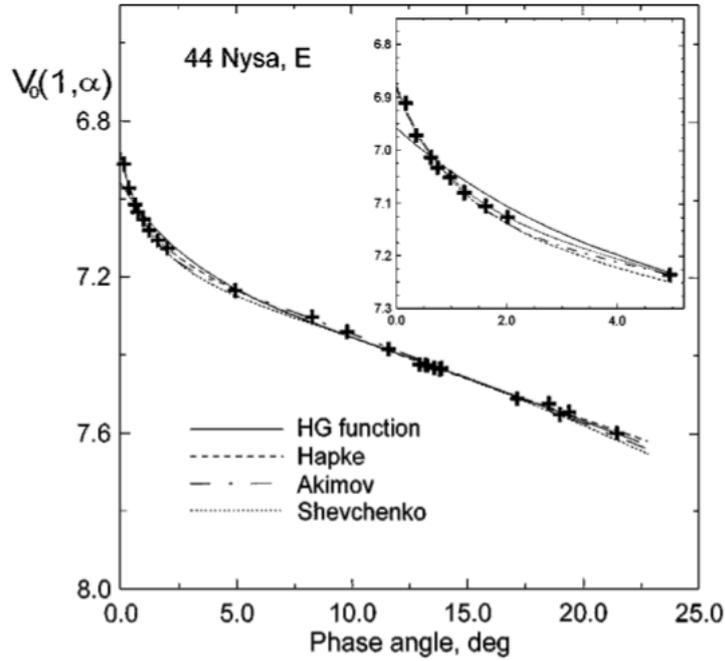


Figure 1.8: *Curva de fase do asteroide 44 Nysa do trabalho de Belskaya and Shevchenko (2000).*

No que segue vamos revisar brevemente os três ajuste mencionados acima.

1.3.1 Modelo H-G

No modelo fotométrico proposto por Bowell et al. (1989) temos que para cada ângulo de fase solar (α) a magnitude do objeto pode ser descrita pela seguinte equação:

$$V(\alpha) = H - 2.5 \log_{10}[(1 - G)\Phi_1(\alpha) + G\Phi_2(\alpha)], \quad (1.1)$$

onde $V(\alpha)$ é a magnitude reduzida do asteroide e Φ_1 e Φ_2 são duas funções normalizadas em $\alpha = 0^\circ$. A partir da equação 1.1 a curva de fase de um objeto se dá como o particionamento das funções Φ_1 e Φ_2 na proporção $(1 - G):G$. Com isso o parâmetro de inclinação G se aproxima de 0 para curvas mais inclinadas e de 1 para curvas com pouca inclinação, embora $G < 0$ e $G > 1$ não estão formalmente excluídos.

De acordo com Bowell et al. (1989) e com as correções propostas por Muinonen et al. (2010) as magnitudes observadas $V(\alpha)$ podem ser obtidas a partir de:

$$10^{-0.4V(\alpha)} = a_1\Phi_1(\alpha) + a_2\Phi_2(\alpha), \quad (1.2)$$

$$H = -2.5 \log_{10}(a_1 + a_2),$$

$$G = \frac{a_2}{a_1 + a_2}. \quad (1.3)$$

Os coeficientes a_1 e a_2 são estimados a partir das observações usando o método dos mínimos quadrados lineares. Portanto, para termos a função de fase utiliza-se:

$$\Phi_i = W\Phi_{iS} + (1 - W)\Phi_{iL}; \quad i = 1, 2$$

$$W = \exp(-90,56 \tan^2 \frac{1}{2}\alpha)$$

$$\Phi_{iS} = 1 - \frac{C_i \sin \alpha}{0,119 + 1,341 \sin \alpha - 0,754 \sin^2 \alpha}$$

$$\Phi_{iL} = \exp[-A_i(\tan \frac{1}{2}\alpha)^{B_i}]$$

$$A_1 = 3,332 \quad A_2 = 1,862$$

$$B_1 = 0,631 \quad B_2 = 1,218$$

$$C_1 = 0,986 \quad C_2 = 0,238. \quad (1.4)$$

Essas funções podem ser aproximadas por:

$$\Phi_i = \exp[-A_i(\tan \frac{1}{2}\alpha)^{B_i}]; \quad i = 1, 2$$

$$A_1 = 3,33 \quad A_2 = 1,87$$

$$B_1 = 0,63 \quad B_2 = 1,22. \quad (1.5)$$

A forma da função de fase H-G foi sugerida por modelos teóricos da dispersão da luz. Esta foi desenvolvida e testada por meio de uma análise detalhada das melhores curvas de fase disponíveis na época, tendo as duas funções da equação 1.4 constituindo o estado da arte dessa função de fase fotométrica. Na figura 1.9 é mostrado o ajuste H-G para os dados do asteroide (44) Nysa, onde pode ser notado que na região do efeito de oposição poderia ter um melhor ajuste.

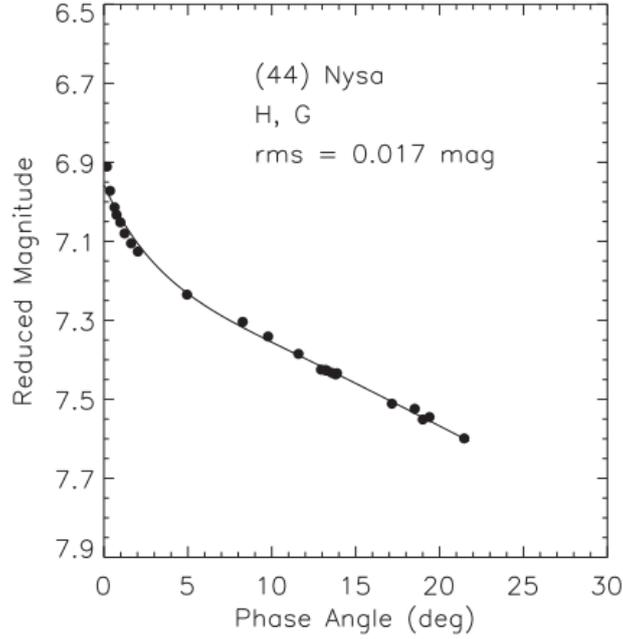


Figure 1.9: *Exemplo da curva de fase do asteroide 44 Nysa do trabalho de Muinonen et al. (2010) para o sistema H-G.*

1.3.2 Modelo H- G_1 - G_2

Segundo o trabalho de Muinonen et al. (2010), a função de fase H-G tem limites que impossibilitam uma melhoria substancial no ajuste para dados de fase fotométricos. Esse limite se dá por ser uma função de fase linear de dois parâmetros. Mesmo que função H-G seja um método simples e tenha bons resultados, para um melhor ajuste de dados de alta qualidade é necessária a adição de mais um parâmetro no modelo da curva de fase.

No modelo H- $G_1 - G_2$, a magnitude reduzida $V(\alpha)$ é dada a partir de:

$$\begin{aligned} 10^{-0.4V(\alpha)} &= a_1\Phi_1(\alpha) + a_2\Phi_2(\alpha) + a_3\Phi_3(\alpha) \\ &= 10^{-0.4H}[G_1\Phi_1(\alpha) + G_2\Phi_2(\alpha) + (1 - G_1 - G_2)\Phi_3(\alpha)], \end{aligned} \quad (1.6)$$

onde $\Phi_1(0) = \Phi_2(0) = \Phi_3(0) = 1$. A magnitude H e os parâmetros G_1 e G_2 são dados pelas equações:

$$H = -2.5 \log_{10}(a_1 + a_2 + a_3),$$

$$G_1 = \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3},$$

$$G_2 = \frac{a_2}{a_1 + a_2 + a_3} \quad (1.7)$$

aqui também os coeficientes a_1, a_2 e a_3 são estimados a partir das observações usando o método dos mínimos quadrados lineares. O método H- $G_1 - G_2$ segue as relações não lineares da equação 1.7, e tem as funções Φ_1, Φ_2 e Φ_3 dadas por:

$$\Phi_1(\alpha) = 1 - \frac{6\alpha}{\pi}$$

$$\Phi_2(\alpha) = 1 - \frac{9\alpha}{5\pi},$$

$$\Phi_3(\alpha) = \exp(-4\pi \tan^{\frac{2}{3}} \frac{1}{2}\alpha). \quad (1.8)$$

Ao acrescentar mais um parâmetro na função de fase foi possível ajustar adequadamente as curvas de fase dos asteróides de alto albedo e de baixo albedo. Na Figura 1.10 podemos ver o ajuste dos dados do asteroide (44) Nysa com o modelo H- $G_1 - G_2$. Se compararmos com o ajuste H-G feito anteriormente utilizando os mesmos dados, notamos uma melhor qualidade no ajuste com valores menores dos resíduos (rms).

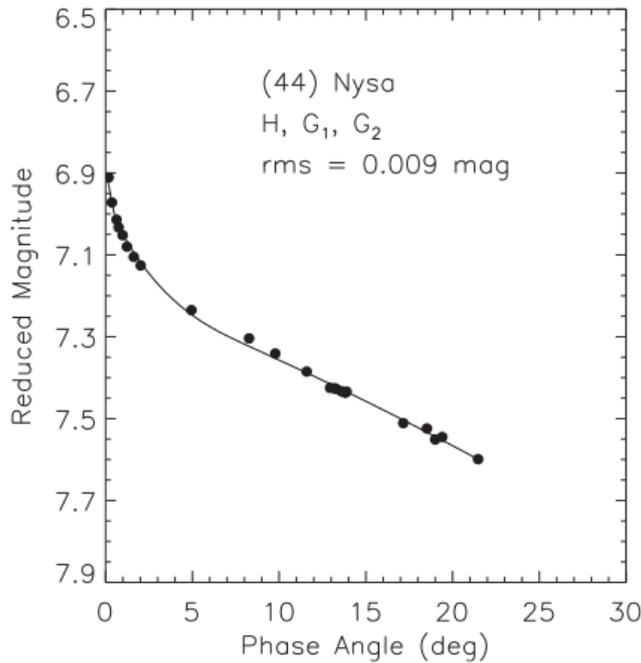


Figure 1.10: *Exemplo da curva de fase do asteroide 44 Nysa do trabalho de Muinonen et al. (2010) para dados de alta qualidade.*

1.3.3 Modelo H- G_{12}

Além de permitir um melhor ajuste da curva de fase, o modelo H- $G_1 - G_2$ permitiu o desenvolvimento da função de fase não linear de dois parâmetros H- G_{12} (Muinonen et al. (2010) e Penttilä et al. (2016)), que fornece um ajuste melhor para dados com poucas observações.

Na grande maioria dos casos as curvas de fase não possuem uma quantidade de dados suficientes para um bom ajuste. Portanto, o principal motivo para procurar uma função de fase de dois parâmetros foi obter uma função que mantivesse precisão no cálculo da magnitude absoluta, mesmo neste caso. Portanto, os dois parâmetros G_1, G_2 foram transformados em um único parâmetro G_{12} , em que esta correlação entre os parâmetros G_1, G_2 e G_{12} pode ser feita de forma linear e não linear.

Na função de fase de dois parâmetros, podemos encontrar a magnitude reduzida a partir da seguinte equação:

$$10^{-0.4V(\alpha)} = L_0[G_1\Phi_1(\alpha) + G_2\Phi_2(\alpha) + (1 - G_1 - G_2)\Phi_3(\alpha)] \quad (1.9)$$

onde L_0 é o brilho integrado ao disco em ângulo de fase zero e os parâmetros G_1, G_2 são expressos por um único parâmetro G_{12} . Com isso a magnitude absoluta pode ser dada por:

$$H = 2.5 \log_{10} L_0. \quad (1.10)$$

Quanto as funções base Φ_1, Φ_2 e Φ_3 , continuam sendo as mesmas dadas pela equação 1.8.

Com isso a função de fase H- G_{12} passa a ser mais eficiente para ajuste de curvas com poucos dados. Na figura 1.11 é mostrado o ajuste H-G e H- $G_1 - G_2$ para o mesmo objeto, (1862) Apollo. Na figura 1.12 os dados da curva de fase do asteroide foram divididos em dois: os dados mais próximos do OE e os mais distantes, com $\alpha > 40^\circ$. Os pontos sólidos mostram o ajuste H- G_{12} e as cruces são pontos previstos pelo ajuste. As duas figuras mostram que o ajuste H- G_{12} traça com precisão as observações excluídas do ajuste, e com menores resíduos.

Com isso o modelo H- G_{12} é indicado para ajustes com poucos dados, semelhante ao modelo H-G, porém com mais precisão no ajuste.

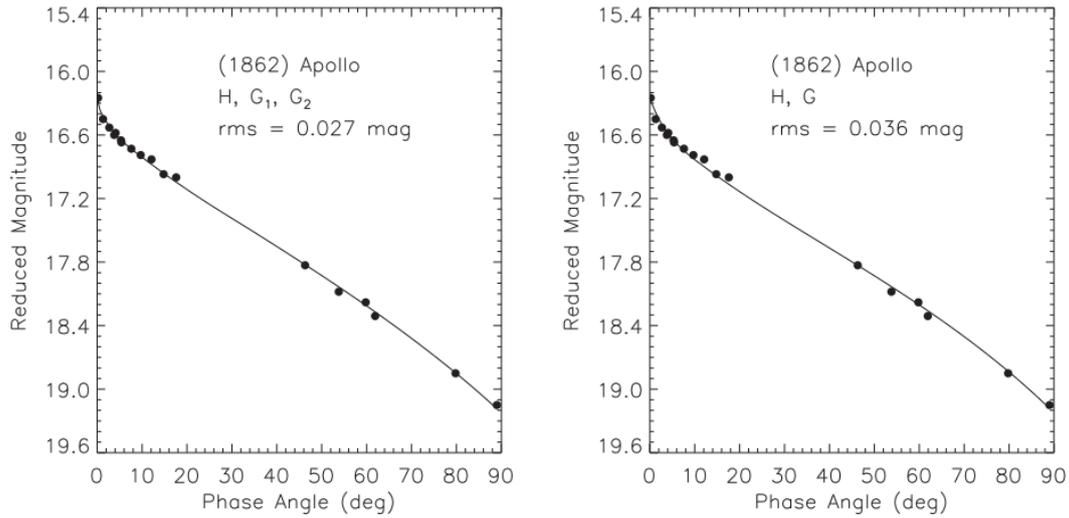


Figure 1.11: *Curva de fase do asteroide 1862 Apollo com os ajustes H-G (direita) e H-G₁ – G₂ (esquerda). (Figura retirada de Muinonen et al. (2010).)*

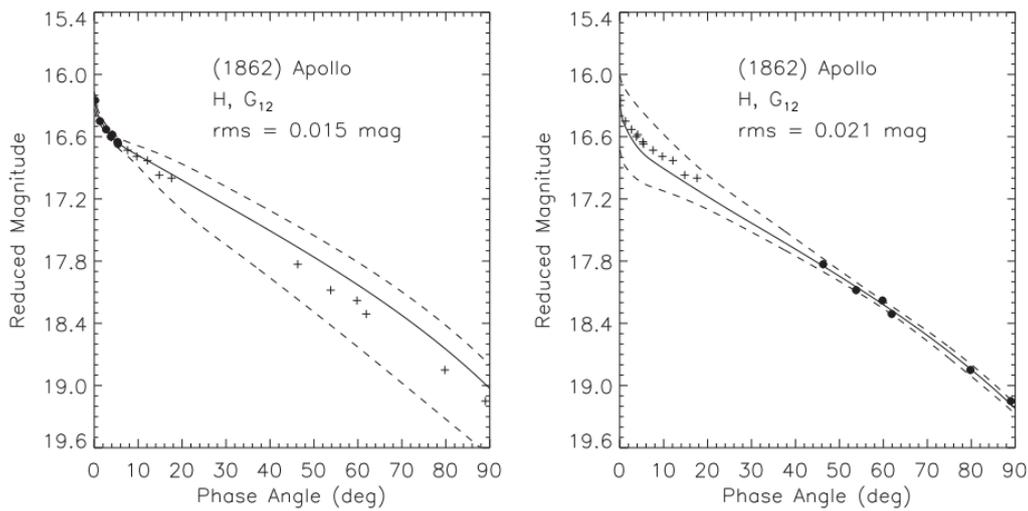


Figure 1.12: *Curva de fase do asteroide 1862 Apollo com os ajustes H-G₁₂. As linhas tracejadas mostram o erro do ajuste. (Figura retirada de Muinonen et al. (2010).)*

1.4 Influência da rotação e albedo na curva de fase

Na determinação de uma curva de fase, além de uma boa cobertura em ângulo de fase e de uma boa precisão nas magnitudes reduzidas, é muito importante conhecer-se a geometria de observação. E aqui nos referimos não apenas ao ângulo de fase e distâncias ao Sol e ao observador, mas também ao ângulo de aspecto e forma do objeto. Devido à forma irregular da maioria dos asteroides, sua rotação provoca uma variação periódica no brilho causado pela variação na área de reflexão

da luz solar. E é exatamente esta variação que permite determinar o período de rotação do objeto. Entretanto, enquanto o período de rotação é invariante no tempo (na maioria dos casos), a amplitude da variação de brilho não o é. Esta amplitude depende da geometria de observação, e particularmente do ângulo de aspecto, definido (ver figura 1.6) entre o eixo principal de rotação do asteroide e a linha de visada de um observador na Terra. Na figura 1.13 pode-se observar como a amplitude da curva de luz varia dependendo da geometria de observação, sendo seu máximo observado quando o ângulo de aspecto é 90° .

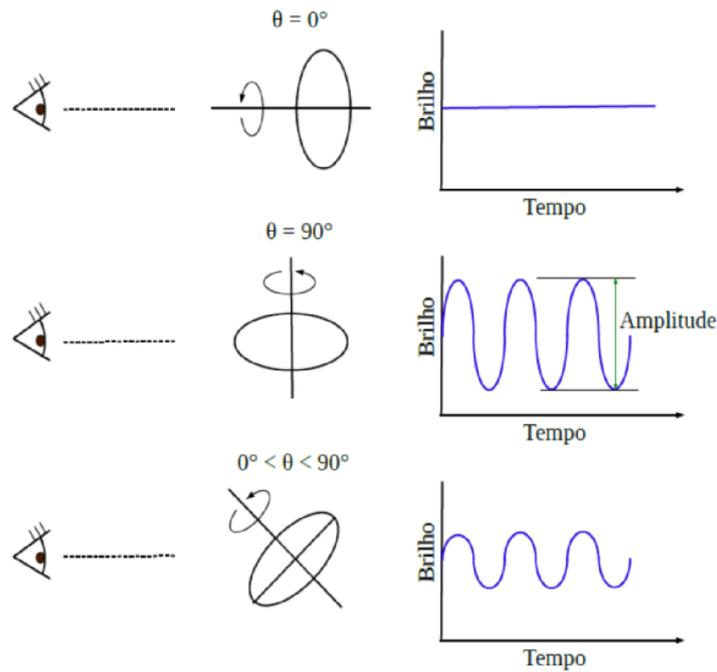


Figure 1.13: *Geometria de observação em que mostra a variação do brilho do asteroide de acordo com seu ângulo de aspecto.*

Isso acarreta dois problemas na determinação da curva de fase, em particular para objetos muito alongados. O primeiro é de que a grande amplitude de sua curva de luz gera diferenças significativas entre o valor da magnitude determinada no mínimo ou no máximo. Isso leva à flutuações que não são estritamente devidas às propriedades superficiais do asteroide, mas sim à sua forma, mas terão grande influência nos erros dos valores do ajuste. Outro problema é de que dados de aparições distintas, ou seja, em diferentes ângulos de aspecto, vão levar a flutuações que, novamente, irão impactar nos erros. Por este motivo, não se tendo conhecimento sobre o ângulo de aspecto não é recomendado construir curvas de fase com dados de distintas aparições (Buchheim, 2010). Por outro lado, conhecendo-se a amplitude da curva de luz é possível realizar uma média entre o valor da magnitude reduzida

no máximo e no mínimo e assim eliminar, ou diminuir, as flutuações na curva de fase.

Conforme mencionado acima, o parâmetro de inclinação, G , da curva de fase tem relação com propriedades superficiais do objeto. Em particular, esse parâmetro se correlaciona com o albedo visto que tende a aumentar com o aumento do albedo (Harris and Young 1989, Belskaya and Shevchenko 2000). Por outro lado, conhecendo-se o albedo geométrico, p_v , e a magnitude absoluta H podemos determinar o diâmetro do asteroide (em km) por meio da equação:

$$\log_{10} D = 3.1236 - 0.2H_V - 0.5 \log_{10} p_v, \quad (1.11)$$

em que o p_v está relacionado com a composição e textura da superfície.

Com o objetivo de correlacionar o G com o albedo ou classe taxonômica, Harris (1989) e Lagerkvist and Magnusson (1990) determinaram o parâmetro de inclinação para 69 asteroides. Foi encontrado que objetos com baixo albedo apresentam valores de G de ≈ 0.04 , enquanto os de alto albedo tem G com valor ≈ 0.45 . Posteriormente, Wisniewski et al. (1997) relacionaram o valor de G com a classificação taxonômica e o albedo para uma amostra de 125 asteroides obtendo valores médios para as diferentes classes (tabela 1.2). Desta forma, seria possível utilizar o valor de G como indicativo da taxonomia de um asteroide.

Table 1.2: *Relação do G com albedo e classes taxonômicas (Wisniewski et al., 1997).*

Taxonômia	G	p_v
C, G, B, F, P, T, D;	$0,09 \pm 0,09$	$0,06 \pm 0,02$
M	$0,21 \pm 0,06$	$0,12 \pm 0,03$
S, A	$0,23 \pm 0,11$	$0,18 \pm 0,06$
E, V, R	$0,42 \pm 0,8$	$0,40 \pm 0,06$

Mais recentemente, Warner et al. (2009), utilizando uma amostra maior, também apresentaram a relação do G com o albedo, dividido agora em baixo albedo, baixo albedo intermediário, albedo intermediário e albedo alto. Os valores médios de G e p_v para as diferentes classes encontrados por esses autores são apresentados na tabela 1.3. Vale ressaltar que esses valores serão utilizados por nós para ter uma indicação sobre o albedo dos objetos estudados.

Tendo um melhor conhecimento sobre a função de fase e seus diferentes modelos

Table 1.3: *Relação do G com albedo e classes taxonômicas Warner et al. (2009).*

Taxonômia	G	p_V	
C, G, B, F, P, T, D;	$0,12 \pm 0,09$	$0,057 \pm 0,02$	Albedo baixo
M	$0,20 \pm 0,07$	$0,16 \pm 0,04$	Albedo baixo intermediário
S, Q	$0,24 \pm 0,11$	$0,20 \pm 0,07$	Albedo intermediário
E, V, R	$0,43 \pm 0,08$	$0,46 \pm 0,06$	Albedo alto

de ajustes, iremos a seguir abordar a metodologia usada para esse trabalho.

Chapter 2

Metodologia e Processamento de dados

No presente capítulo iremos abordar a escolha de nossos objetos de pesquisa assim como a justificativa do método utilizado para análise dos dados. Iremos falar também da instrumentação utilizada na coleta dos dados, ou seja, os equipamentos que compõem o Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI). Por fim, mostraremos como foi feita a escolha dos alvos e todos os passos seguidos para a redução das imagens, desde as imagens de calibração até as magnitudes reduzidas que compõem a curva de fase.

2.1 Obtenção dos Dados

Conforme já mencionado, a observação de NEO para a obtenção de sua curva de fase permite obter uma boa cobertura em um curto período de tempo por serem objetos que se aproximam bastante da Terra, provocando a rápida variação do seu ângulo de fase.

A coleta dos dados foi realizada em missões observacionais mensais de 15 noites, utilizando o telescópio do OASI do projeto IMPACTON. Em cada missão foram observados, em média, 4 NEO. Cada objeto foi observado no filtro R do sistema Johnson entre 30 minutos e 1 hora por noite. Além dos NEO também foi observada uma estrela padrão do catálogo Landolt (<http://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/Landolt.html>) em massas de ar diferentes para determinar o coeficiente de extinção da noite e o ponto zero.

Para obter as imagens do asteroide foi utilizado um tracking diferencial, ou seja, o movimento do telescópio na mesma velocidade do asteroide somado ao tracking

sideral. Isso se faz necessário pelo fato do asteroide ser muito rápido e por muitas vezes os objetos escolhidos terem magnitudes com valores acima de 17, acarretando em tempos de exposição longos. Sem o tracking diferencial a imagem do asteroide ficaria alongada. Durante a observação também foram obtidas imagens de *bias*, *flatfiels* e *dakfields*, para correções de efeito do instrumento e ruído.

Ao longo de 2016 e início de 2017 foram realizadas sete missões observacionais no OASI, todas remotamente a partir do ON. A descrição do OASI e seus instrumentos estão especificadas a seguir.

2.1.1 Instrumentação

Como parte do projeto IMPACTON, que tem como principal objetivo realizar o seguimento e a caracterização das propriedades físicas de asteroides e cometas em órbitas próximas da Terra, foi instalado o Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica - OASI, em Itacuruba (Pernambuco) (<http://www.on.br/impacton/index.html>).

O observatório conta com um telescópio de 1m de diâmetro, com completa automação e montagem Alto-azimutal. Conta com duas câmeras CCDs modelo Alta U42 e modelo Alta U47 com resfriamento termelétrico (sistema Peltier), de dimensões de 2048 x 2048 pixels e de 1024 x 1024 pixels, respectivamente. As câmeras CCDs possuem uma alta eficiência quântica na região do visível e quando acopladas ao telescópio o primeiro modelo fornece um campo de 11,8 x 11,8 minutos de arco e o segundo de 5,9 x 5,9 minutos de arco. A câmera utilizada em nossas observações foi a primeira. A roda de filtros acoplada à CCD disponibiliza o filtro R do sistema Johnson e os filtros u' , g' , r' , i' , z' do sistema SDSS. Na figura 2.1 podemos ver o telescópio com a câmera CCD e a roda de filtros acoplados.

Os demais equipamentos que compõem o OASI são mostrados na figura 2.2. Nesta foto podemos ver a casa de apoio do observatório com alguns instrumentos, como estação meteorológica, câmera *All-Sky*, sensor de chuva, que fecha automaticamente a cúpula quando há um aumento de humidade relativa do ar, o receptor de internet e as câmeras de vigilância. Ao lado da casa de apoio temos a cúpula automatizada e o telescópio. Uma canelata entre a cúpula e a casa de apoio contém os cabos que permitem a conexão física do telescópio e periféricos aos computadores instalados na sala de controle.

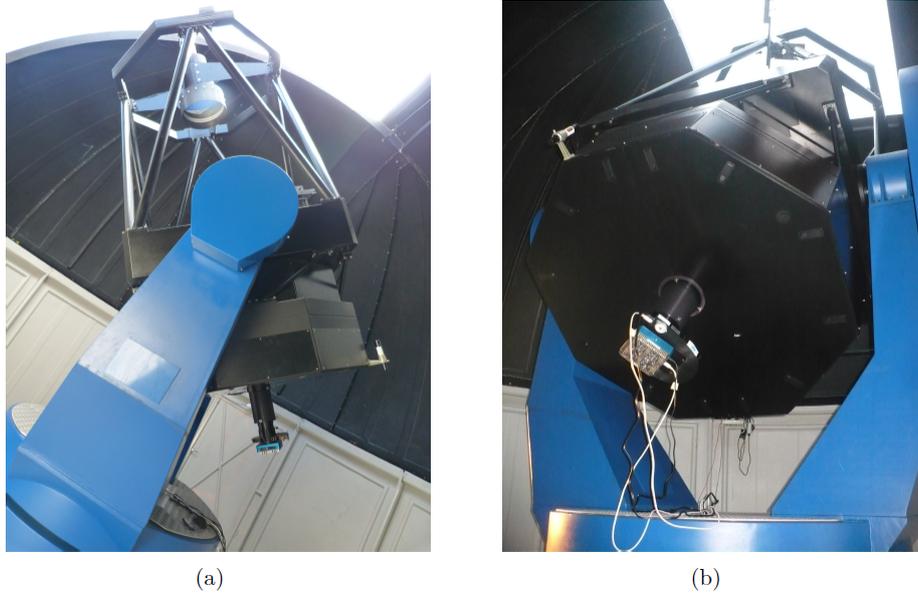


Figure 2.1: *Telescópio do OASI e câmera CCD Apoge, modelo Alta U42, acoplada à roda de filtros.*

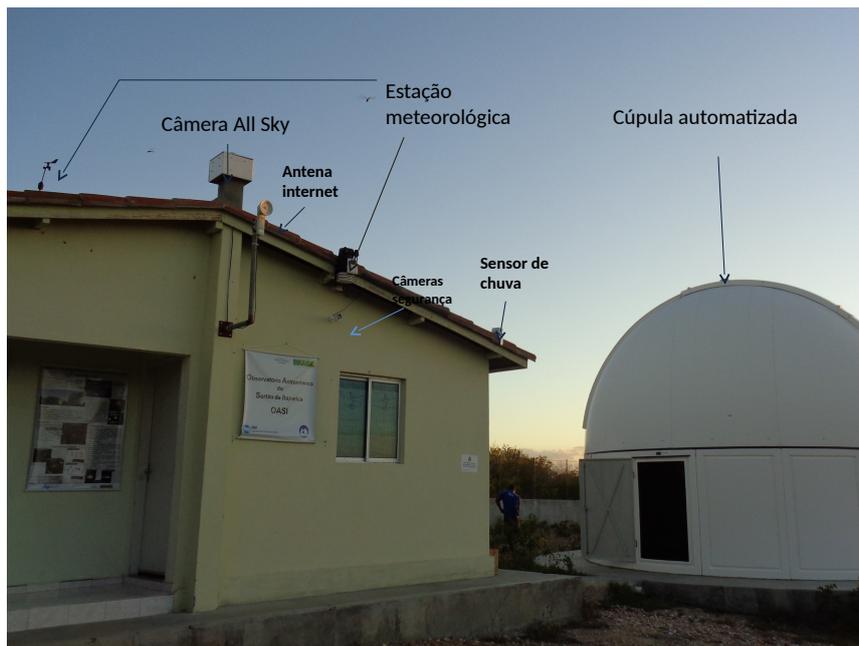


Figure 2.2: *Cúpula e casa de apoio do OASI.*

Para a observação remota contamos com uma sala no ON com um computador que permite a conexão, via *Team Viewer*, com os computadores do OASI. Todo procedimento inicial/final de ligar/desligar equipamentos e auxílio na utilização dos mesmos é feito pelo técnico de suporte, atualmente Airton Santiago, no próprio OASI. O controle do telescópio é feito por um computador industrial capaz de controlar os motores do telescópio para abertura, fechamento e foco do

espelho, além da abertura, fechamento e seguimento da cúpula. O armazenamento temporário dos dados é feito em outro computador do OASI, e ao término de cada missão esses dados são transferidos via internet para o ON. Na figura 2.3 vemos a sala de operação do OASI.



Figure 2.3: *Sala de operação do OASI* (<http://www.on.br/impacton/index.html>).

2.2 Amostra

Para a escolha dos objetos a serem observados foram considerados os seguintes critérios:

- 1) O asteroide tem que estar visível do OASI por toda a missão observacional ou, em alguns casos, por mais de uma missão, para obter uma boa cobertura da curva de fase;
- 2) Os objetos escolhidos tem que ter uma boa variação de ângulo de fase entre 0° e cerca de 30° ;
- 3) A magnitude aparente dos objetos deve ser inferior ou igual a 18 para que os dados coletados tenham uma boa qualidade fotométrica de acordo as características do telescópio e CCD.

Foram observados 29 asteroides cujas propriedades físicas são dadas na tabela 2.1. Todos os dados foram obtidos do site *Near Earth Objects - Dynamic Site* (NEODyS-2, <http://newton.dm.unipi.it/neodys2/>) o qual reproduz as propriedades físicas dadas no site *European Asteroid Research Node - NEA database*

(<http://earn.dlr.de/>). Na tabela para cada objeto é dado: o número e nome, o subgrupo ao qual pertence, o diâmetro, o albedo e a variação mínimo e máximo do ângulo de fase em que foi observado. Quando não existe albedo conhecido o diâmetro é estimado utilizando valores mínimo e máximo de 0,2 e 0,04.

Como pode ser visto na tabela, todos os asteroides observados são pequenos, com diâmetro variando entre 4 e 0,1 km. Entre os 5 objetos com albedo determinados (Mainzer et al., 2011), três tem um valor alto (0,3), possivelmente relacionado com material diferenciado, e apenas dois tem um valor menor do que 1%, ou seja, de composição mais primitiva. A amostra observada consiste de 15 Amor, 13 Apollo, sendo que 5 destes também são PHA, e apenas 1 Aten.

No que se refere à cobertura em ângulo de fase, podemos notar que não temos nenhum asteroide para o qual foi possível obter dados na cobertura desejada, ou seja, entre 0° e 30° . Em ângulos de fase próximos de 0° foram observados apenas dois objetos, (470510) 2008 CJ116 e 2017 CR32, porém cobrindo até cerca de 10° . Outros dois objetos foram observados próximos de 1° , (34613) 2000 UR13 e (16816) 1997 UF9, porém também não cobrindo ângulos de fase maiores que 10° . Para 11 asteroides conseguimos um $\alpha_{máx}$ acima de 20° , sendo três, (471241) 2011 BX18, (480004) 2014 KD91 e 2016 WJ1, até cerca de 29° , no entanto dentre eles apenas um, 2016 WJ1, teve um $\alpha_{mín}$ próximo ao OE, com $5,5^\circ$. Para 9 objetos o $\alpha_{mín}$ foi entre 5° e $8,5^\circ$, ainda próximo ao OE.

Dentre os 29 asteroides de nossa amostra para 5 deles os dados coletados não foram suficientes para obter uma curva de fase. Condições de tempo ruim acabaram prejudicando a obtenção de dados. No apêndice A para cada asteroide observado são dadas as condições observacionais, ou seja, data da observação, distância ao Sol (r) e a Terra (Δ) e ângulo de fase (α), obtidos do *Minor Planet Center*, e as magnitudes reduzidas, cuja determinação será detalhada na próxima seção.

Table 2.1: *Parâmetros físicos dos 29 objetos observados entre Julho de 2016 e Março de 2017. Os dados foram obtidos dos sites NEODYS-2 e EARN.*

Asteroide	Subgrupo	D (km)	p_V	α (mín - máx)
(3360) Syrinx	Apollo	1,8	0,07	10 - 11,4
(4055) Magellan	Amor	2,781	0,330	1,7 - 8,2
(16816) 1997 UF9	Apollo	1 - 3	-	1,7 - 3,9
(34613) 2000 UR13	Amor	1,9 - 4,3	-	1,2 - 8
(36236) 1999 VV	Apollo	2,0 - 4,5	-	7,5 - 13
(40267) 1999 GJ4	Apollo	1,700	0,3	5 - 17,3
(138846) 2000 VJ61	Apollo	1,9 - 4,3	-	17,9 - 21,7
(175189) 2005 EC224	Amor	0,659 - 1,473	-	3,1 - 8,2
(203217) 2001 FX9	Amor	0,574 - 1,283	-	7,8 - 9,6
(326683) 2002 WP	Amor	0,518	0,315	3,7 - 21,9
(370702) 2004 NC9	Amor	0,997 - 2,230	-	2,8 - 8
(438955) 2010 LN14	Apollo (PHA)	0,190 - 0,425	-	6,3 - 17,8
(464797) 2004 FZ1	Apollo	0,659 - 1,473	-	8,5 - 22,8
(469634) 2004 SZ19	Amor	0,435 - 0,973	-	16,7 - 24,2
(470510) 2008 CJ116	Amor	0,456 - 1,019	-	0,1 - 10,6
(471241) 2011 BX18	Apollo (PHA)	3,0	0,012	21,6 - 28,6
(474163) 1999 SO5	Apollo (PHA)	0,199 - 0,445	-	15,5 - 22,4
(474238) 2001 RU17	Aten	0,151 - 0,337	-	9,8 - 12,2
(480004) 2014 KD91	Amor	1,1 - 2,4	-	14,8 - 26,6
(484506) 2008 ER7	Apollo (PHA)	0,287 - 0,643	-	2,4 - 24,4
(489337) 2006 UM	Amor	0,601 - 1,344	-	15,1 - 23,9
2001 QE34	Apollo	0,477 - 1,067	-	5,5 - 15,1
2005 TF	Amor	0,262 - 0,586	-	4,4 - 13,5
2014 AD17	Amor	0,274 - 0,614	-	7,4 - 16,5
2016 RP33	Amor	0,379 - 0,848	-	7,6 - 23,1
2016 WJ1	Apollo (PHA)	0,165 - 0,370	-	5,5 - 27,5
2017 AC5	Amor	0,315 - 0,705	-	9,6 - 15,3
2017 AF5	Apollo	0,829 - 1,855	-	8,4 - 14,6
2017 CR32	Amor	0,109 - 0,244	-	0,8 - 9,8

2.3 Redução dos dados

A redução das imagens de ciência se inicia com sua calibração utilizando as imagens de *bias*, *darks* e *flats* obtidas na mesma noite. Esta calibração segue o seguinte procedimento:

- *bias*: O *bias* é a estrutura pixel-a-pixel no ruído de leitura em uma imagem, a qual varia de acordo com o CCD. Uma imagem de *bias* é adquirida

simplesmente tomando uma exposição de zero segundos com o obturador fechado. Na prática, se adquire múltiplas imagens de *bias* e, em seguida, se usa a média dessas imagens (chamada *masterbias*) para a correção. Após realizar esse processo de média é feita a subtração dos *masterbias* nas imagens dos objetos de ciência, ou seja, asteroide e estrela padrão.

- *flatfields*: São imagens que permitem corrigir as diferenças de sensibilidade e defeito que existem nas diversas regiões do CCD, como o problema de iluminação não uniforme sobre o CCD durante as coletas de imagens de ciência. Para isso é necessário que se faça imagens de *flatfields* para cada filtro utilizado, no nosso caso, apenas o filtro R. Esta variação de sensibilidade é obtida iluminando-se de forma homogênea a CCD, seja apontando o telescópio para uma tela branca, obtendo um *domeflat*, ou para o céu, no anoitecer ou amanhecer, obtendo um *skyflat*. É aconselhável obter várias imagens de *flatfields* e depois utilizar uma imagem média, chamada *masterflat*. Deste processo resulta a resposta de cada pixel para uma mesma intensidade de luz. Dividindo a imagem de ciência pela imagem de *masterflat*, qualquer pixel com uma resposta menor terá seu nível de resposta elevado e qualquer pixel com um nível de resposta maior será abaixado.
- *dark*: Um *dark-frame* é uma imagem obtida com o obturador fechado por um tempo igual a das imagens de ciência, visando eliminar o ruído do CCD. Uma média de vários *dark-frame*, o *masterdark*, pode então ser subtraída das imagens de ciência para corrigir o ruído padrão fixo, como o causado pela corrente escura. O ruído visível do padrão fixo é muitas vezes causado por pixels quentes - sensores de pixel com uma corrente escura mais alta do que a normal. Em uma exposição prolongada, eles podem aparecer como pixels brilhantes, chamados de pixels quentes. Em CCDs resfriadas criogênicamente esse efeito é pequeno, mas pode se tornar importante para CCDs resfriadas eletronicamente, como é o nosso caso.

A redução das imagens é realizada utilizando o software IRAF. Após realizar a calibração das imagens, tanto do asteroide quanto da estrela padrão, fazemos a determinação das magnitudes instrumentais e seus erros. O cálculo das magnitudes instrumentais do asteroide e da estrela padrão é realizado utilizando a tarefa QPHOT do software IRAF, procedendo da seguinte maneira:

- 1) são definidos três raios a partir do centro do objeto: o primeiro identificando a região ocupada pelo objeto, e os demais demarcando um anel de céu próximo do objeto (figura 2.4);
- 2) o anel é utilizado para obter informação sobre a contagem do fundo do céu (na figura 2.4 é o anel mais externo);
- 3) a magnitude instrumental é dada pela contagem total dentro da abertura do objeto, subtraído do valor do fundo do céu, determinado no passo 2.

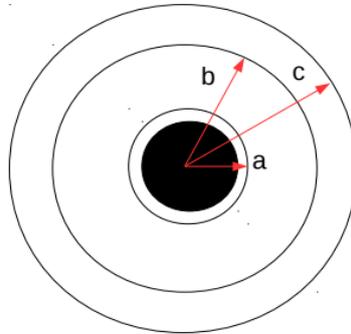


Figure 2.4: *Representação da abertura na qual são medidas as contagens referentes ao asteroide, anel de raio a , e ao céu, anel de raio $(b - c)$.*

Esse procedimento é realizado tanto para o asteroide quanto para estrela padrão obtendo assim suas magnitudes instrumentais. É claro que a precisão será tanto maior quanto mais estáveis forem as condições atmosféricas.

2.4 Fotometria absoluta

Para realizar fotometria absoluta é necessário inicialmente realizar a correção da extinção atmosférica e, posteriormente, a redução ao sistema padrão de magnitudes de asteroides, passos que serão detalhados a seguir.

A extinção atmosférica é a redução do brilho de um objeto devido à absorção e à dispersão da luz pela atmosfera. O mecanismo que provoca a extinção atmosférica é o *Scattering Rayleigh*, devido à absorção de radiação por partículas com tamanho da ordem de moléculas. Este é o principal mecanismo da extinção por nossa

atmosfera e é fortemente dependente do comprimento de onda.

O efeito da extinção atmosférica sobre a magnitude de um objeto é dada, em primeira aproximação, por:

$$M = M_{atm} + K_V M_{ar} \quad (2.1)$$

onde:

M = magnitude do objeto como vista da Terra;

M_{atm} = magnitude do objeto fora da atmosfera;

K_V = coeficiente de extinção no filtro V;

M_{ar} = massa de ar, dada pela quantidade de ar ao longo da linha de visada dividida pela quantidade de ar na vertical.

Como nossas observações são realizadas no filtro R, o coeficiente de extinção é K_R .

Na prática a resolução da eq. 2.1 é obtida da seguinte forma: observamos a estrela padrão várias vezes ao longo da noite em diferentes alturas, ou seja, em diferentes massas de ar. Com os dados da magnitude instrumental da estrela em cada imagem e sua massa de ar, respectivamente, é feita uma regressão linear dada por

$$m = m_0 + KX \quad (2.2)$$

onde o valor de K é dado pela inclinação da reta e m_0 a ordenada na origem.

Tendo determinado o coeficiente de extinção da noite utilizamos a eq. 2.1 para obtermos o valor da magnitude do asteroide e da estrela corrigidas dos efeitos atmosféricos, M_{atm} e M_{atm}^* . Em seguida determinamos o ponto zero da noite:

$$PZ = M_{atm}^* - M_{tabela}^* \quad (2.3)$$

dado pela diferença entre a magnitude da estrela padrão corrigida dos efeitos atmosféricos (M_{atm}^*), e o seu valor tabelado (M_{tabela}^*).

Ao subtrair este valor PZ da magnitude do asteroide corrigida de efeitos atmosféricos, M_{atm} , obtemos sua magnitude observada M_{obs}

$$M_{obs} = M_{atm} - PZ. \quad (2.4)$$

Por fim, determinamos o valor da magnitude reduzida, M_{red} , definida como a magnitude que seria observada se o asteroide estivesse a uma distância padrão de 1UA tanto do Sol quanto da Terra, ou seja:

$$M_{red} = M_{obs} - 5\log(r\Delta), \quad (2.5)$$

onde r e Δ são as distâncias do asteroide, respectivamente, ao Sol e à Terra (essa geometria de observação pode ser visualizada na fig. 1.6).

Para obter o valor da magnitude reduzida e seu respectivo erro, utilizamos um programa desenvolvido por Hissa Medeiros no software R, em que são resolvidas as eq. de 2.1 a 2.5. Os valores das magnitudes instrumentais e de massa de ar são obtidos utilizando o software IRAF, enquanto os valores de r e Δ são das efemérides da noite, obtidas do site do *Minor Planet Center*.

Uma observação importante a ser feita é de que como nossas observações são realizadas no filtro R do sistema Johnson, as magnitudes reduzidas encontradas são dadas neste filtro, M_R , assim como nossa magnitude absoluta H_R . A magnitude absoluta padrão, entretanto, é dada no filtro V do sistema Johnson, H_V . Vale ressaltar de que é possível transformar H_R em H_V (Pravec et al., 2012), caso necessário (essa mudança será melhor abordada no capítulo 3).

Com os valores das magnitudes reduzidas em cada ângulo de fase, fazemos então o gráfico da curva de fase cujo ajuste nos fornecerá a magnitude absoluta e o parâmetro de inclinação. A seguir iremos abordar os ajustes escolhidos e como estes foram realizados.

2.5 Ajustes da curva de fase

Após encontrar a magnitude reduzida do objeto em cada noite e para cada ângulo de fase, utilizamos 3 programas para realizar nosso ajuste da curva de fase. Como já mencionado na seção 1.3, existem três ajustes possíveis: H-G, H- G_1 - G_2 e H- G_{12} . De acordo, com a qualidade e distribuição dos nossos dados, os ajustes utilizados serão os H-G e H- G_{12} . Como os dados para cada objeto, em sua maioria, são obtidos em uma única missão observacional, a quantidade de dados obtida não

é suficiente para obter uma boa distribuição para utilizar o ajuste H- G_1 - G_2 .

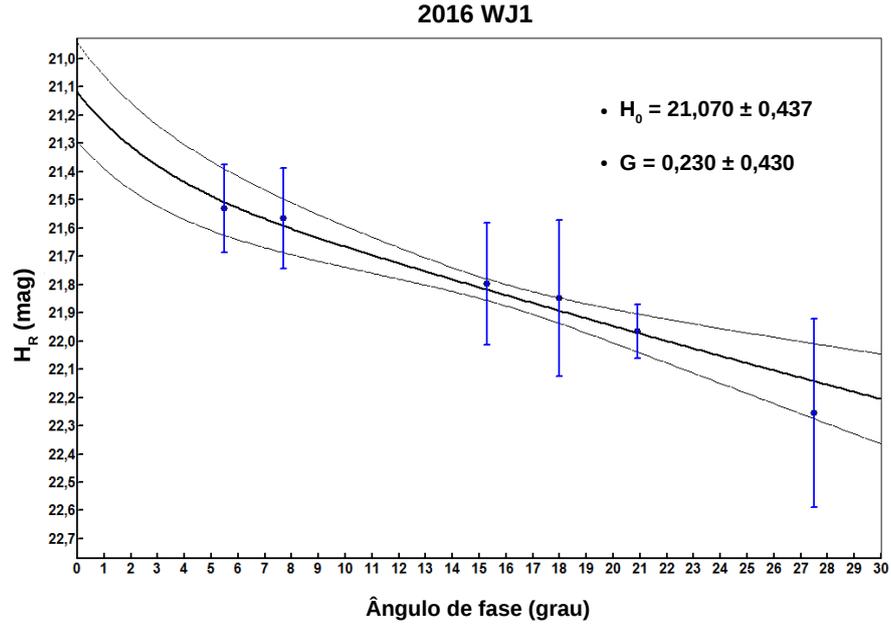
Cada ponto que obtemos na curva de fase é correspondente a um conjunto de imagens feitas em um determinado ângulo de fase. Após a redução é realizada uma média da magnitude instrumental para posteriormente encontrar a magnitude reduzida correspondente àquele ângulo. Vale ressaltar que, em alguns casos, o objeto é observado a diferentes ângulos de fase durante uma mesma noite. Os diferentes ajustes serão abordados separadamente nas subseções a seguir.

2.5.1 Ajuste H-G

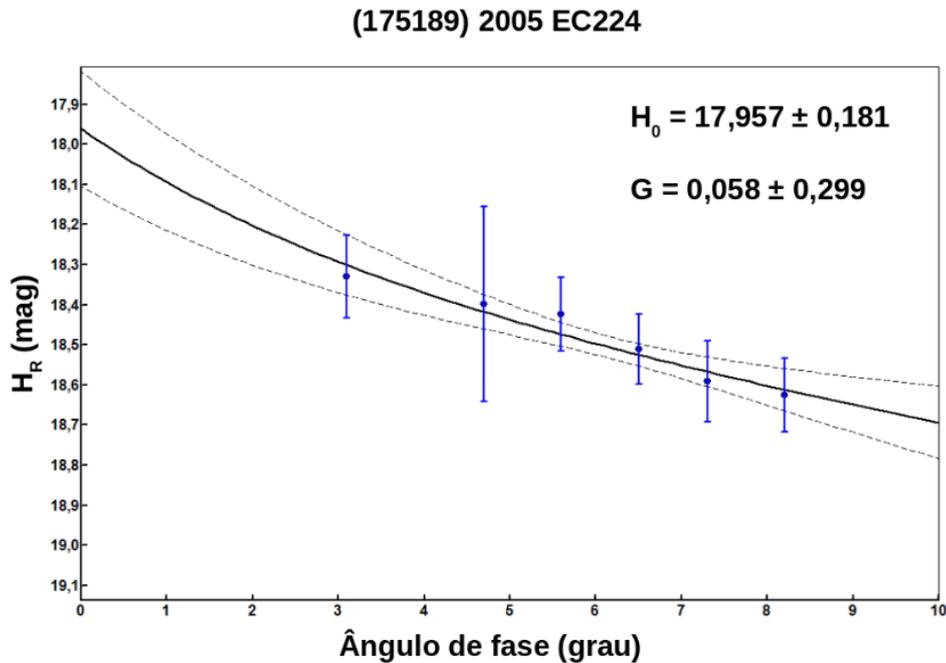
Para o ajuste H-G desenvolvido por *Bowell et al. (1989)* utilizamos o software MPO Canopus desenvolvido por *Warner (2004)* e o programa desenvolvido por *Hissa Medeiros* no software R, *MAGRED_{CF}*. No caso do MPO Canopus utilizamos apenas a função do ajuste da curva, embora seja possível realizar a redução completa.

Para o cálculo do ajuste H-G com o MPO Canopus utilizamos a função do programa “*H and G calculator*”, onde é necessário inserir as magnitudes reduzidas com seus respectivos erros, os ângulos de fase e as datas de observação. Na figura 2.5(a) vemos a saída do programa com o ajuste do asteroide 2016 WJ1. A linha contínua central é o ajuste, onde sua inclinação corresponde ao parâmetro G e em $\alpha = 0^\circ$, o valor de H. O envelope correspondente às linhas mais finas acima e abaixo da linha central indicam o erro do ajuste. Esse envelope nos dá informação da incerteza do ajuste de acordo com a distribuição e erros dos pontos. Em locais onde temos uma dispersão maior dos pontos o envelope se afasta da curva, em locais onde a dispersão é menor vemos como esse envelope se aproxima do ajuste e onde o erro do ponto é pequeno temos uma aproximação ainda maior. Na figura 2.5(b) também podemos ver o comportamento do envelope na curva de fase do asteroide (175189) 2005 EC224, onde em valores entre $5^\circ \leq \alpha \leq 8^\circ$ temos um menor erro e uma boa distribuição dos pontos, com isso o envelope se torna bem pequeno.

Já na figura 2.6 vemos a curva de fase do asteroide 2016 WJ1 obtida com o programa *MAGRED_{CF}*. Como podemos ver os dois ajustes fornecem resultados de H e G muito próximos, com apenas pequenas diferenças nos erros.



a)



b)

Figure 2.5: *Curva de fase dos asteroides 2016 WJ1, (a), e (175189) 2005 EC224, (b) obtidas com o programa MPO Canopus.*

2.5.2 Ajuste $H-G_{12}$

Para o ajuste $H-G_{12}$ utilizamos um calculador *online* desenvolvido por Muinonen et al. (2010) e Penttilä et al. (2016), dado em: <http://www.helsinki.fi/project/psr/HG1G2/>. Dado um arquivo de texto com a magnitude reduzida e seu respectivo ângulo de fase, o programa calcula a magnitude reduzida e o parâmetro de inclinação com seus respectivos erros, e ainda

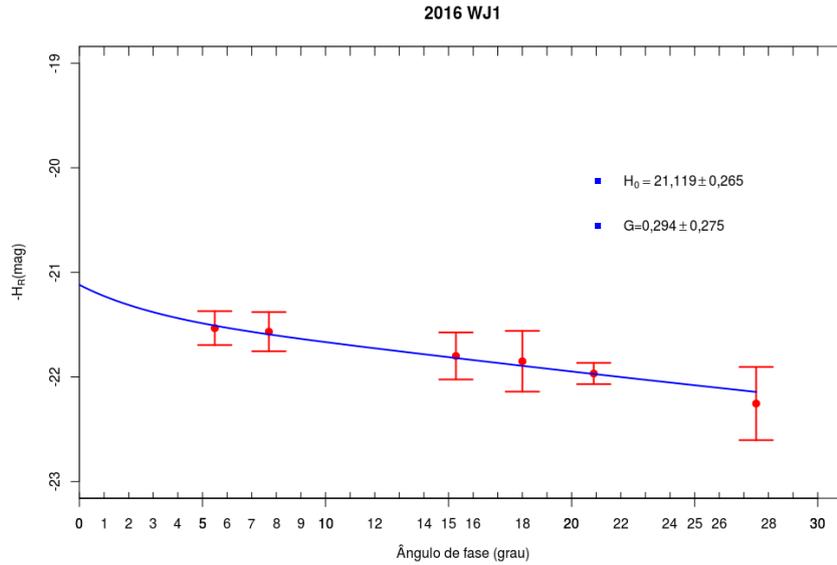


Figure 2.6: *Curva de fase do NEO 2016 WJ1 com dados da missão observacional do mês de Dezembro de 2016. Ajuste com o programa MAGRED_{CF}.*

fornece um indicativo de classificação taxonômica. Este indicativo taxonômico é dado de acordo com o modelo H-G desenvolvido por Bowell et al. (1989), com base no parâmetro de inclinação (seção 1.3), relacionado ao albedo. Na figura 2.7 é dado novamente o ajuste do asteroide 2016 WJ1, realizado agora com o calculador *online* H-G₁₂.

Para todos os objetos de nossa amostra foram realizados os ajustes abordados acima os quais serão detalhados no próximo capítulo.

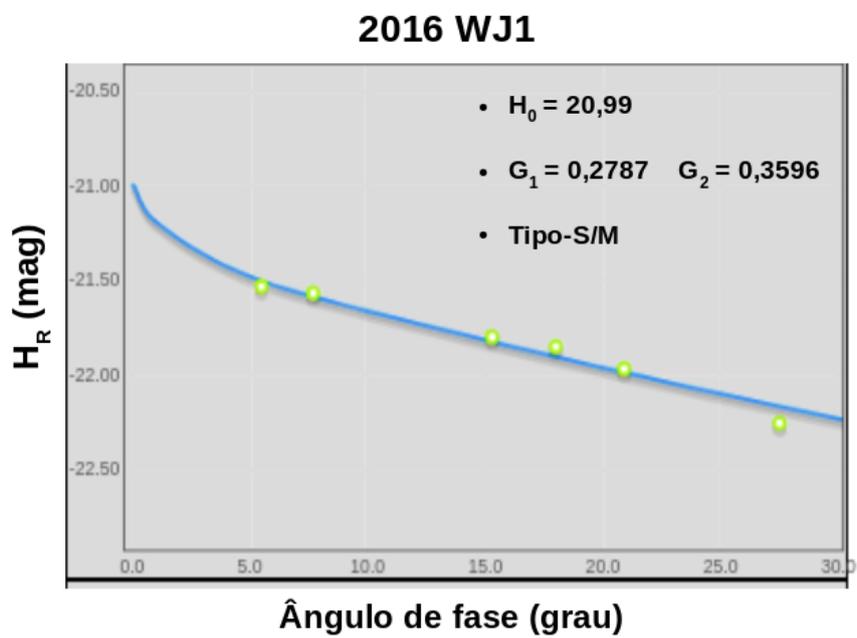


Figure 2.7: *Curva de fase do NEO 2016 WJ1 com dados da missão observacional do mês de Dezembro de 2016. Ajuste com o calculador online do ajuste $H-G_{12}$.*

Chapter 3

Resultados e discussão

Apresentaremos aqui os resultados obtidos do estudo da curva de fase de 29 NEO. Para cinco desses objetos, embora observados, não foi possível obter a curva de fase devido, em sua maioria, às condições meteorológicas adversas. Para os restantes 24 asteroides foram obtidas curvas de fase de diferentes qualidades e abrangência em termos de intervalo de ângulo de fase, as quais serão objeto deste capítulo. Lembramos que, conforme detalhado no capítulo 1, uma boa curva de fase deveria abranger um intervalo em ângulos de fase entre 0° e 30° . Isso porque nesse intervalo é possível determinar tanto o efeito de oposição, na região entre 0° e 8° , quanto a parte linear da função de fase, entre 8° e, pelo menos, 20° - 30° . No caso dos NEO isso, em geral, implica em ter dados ao longo de uma, no máximo duas, missões observacionais. Se de um lado essa é uma vantagem, por outro lado, algumas noites não fotométricas dentro das 15 noites de nossas missões, já podem inviabilizar completamente a obtenção de uma boa curva de fase, tanto no que diz respeito à magnitude determinada quanto à cobertura em ângulos de fase.

No caso das nossas curvas de fase, por nenhuma ser completa em termos de ângulos de fase e os erros fotométricos nem sempre serem pequenos, resolvemos utilizar o sistema H-G. Conforme mencionado no capítulo anterior, para realizar esse ajuste temos três possibilidades: 1) utilizar o programa *MAGRED_{CF}*, desenvolvido pela equipe de Ciências Planetárias do ON de acordo com o trabalho de *Bowell et al. (1989)* e suas correções (*Muironen et al., 2010*), 2) utilizar o software *MPO Canopus* (*Warner, 2004*) ou, 3) utilizar o programa *online* (*Muironen et al., 2010; Penttilä et al., 2016*) através do ajuste *H-G₁₂*. Os três programas fornecem resultados muito similares, em particular no valor de H_R , como pode ser visto na tabela 3.1 abaixo, na qual são dados os resultados obtidos para quatro asteroides.

Os objetos da tabela 3.1 foram escolhidos por representar curvas de fase de diferentes qualidades tanto em relação à cobertura em ângulo de fase, quanto a

precisão dos pontos. Como podemos observar, os resultados obtidos pelos três procedimentos são bem coerentes entre si, lembrando que formalmente o ajuste $H-G_{12}$ é distinto do H-G, onde ocorrem as maiores diferenças.

Table 3.1: *Tabela de comparação da magnitude absoluta obtida utilizando: $MAGRED_{CF}$, MPO Canopus e Calculador online.*

Asteroide	H_R $MAGRED_{CF}$	H_R MPO Canopus	H_R Calculador <i>online</i>	intervalos de α
2016 WJ1	21,119	21,070	20,99	melhor cobertura
2017 CR32	22,363	22,360	22,130	efeito de oposição
(480004) 2014 KD91	16,902	16,858	17,08	parte linear $\alpha > 15^\circ$
(464797) 2004 FZ1	17,643	17,638	17,440	outros

Resolvemos, portanto, utilizar o programa $MAGRED_{CF}$, não apenas por permitir um controle total do ajuste, mas também por questões praticas. O ajuste $H-G_{12}$, por exemplo, não utiliza o erro individual das magnitudes para calcular o erro final do ajuste. Isso pode ser aceitável quando os erros são pequenos, mas isso não é sempre verdade em nosso caso. Esse ajuste, entretanto, será utilizado para comparar o albedo, determinado através do valor obtido para o parametro G, com o indicativo de classe taxonômica dado pelo programa *online*. O programa MPO Canopus, por outro lado, funciona como uma "caixa preta", onde, de um lado você fornece os valores dos ângulos de fase, magnitudes reduzidas e seus erros e ele retorna um grafico com o melhor ajuste e os valores de H e G. Entretanto, como esse grafico não é editavel, isso dificulta a comparação entre objetos diversos. Portanto, no que segue todos os ajustes foram feitos com o programa $MAGRED_{CF}$ e os graficos com os eixos x e y, ângulo de fase e magnitude absoluta H_R , iguais. O ângulo de fase em todas as figuras varia de 0° a 30° , enquanto H_R tem uma variação de 4 magnitudes. Nos gráficos podemos ver que o erro dos pontos varia de acordo com a noite, sendo o principal fator a extinção atmosférica (K), encontrada a partir da redução das imagens da estrela *standard*. Os dados das curvas de fase, magnitude reduzida e seus erros, são dados no apêndice A.

No que segue vamos analisar a curva de fase de cada asteroide descrevendo o número de noites em que foi observado, quantas efetivamente forneceram dados para a curva de fase, qual a cobertura em ângulo de fase e discutindo os resultados obtidos. Dependendo da cobertura efetiva em ângulo de fase (notar que esta pode diferir da apresentada na tabela 2.1) resolvemos dividir nossos asteroides em cinco grupos: os com melhor cobertura da curva de fase, aqui definida como sendo de

pelo menos 15° entre o primeiro (menor) e último (maior) ângulo de fase, aqueles com cobertura apenas na região do efeito de oposição, ou seja, com α entre 0° e próximo de 8° , aqueles com cobertura na parte linear da curva de fase, ou seja, com pontos apenas acima de 15° , os demais com curva de fase determinada e, por fim os que não tiveram dados suficientes para obter suas curvas de fase. Essa divisão resultou em 3 asteroides no primeiro grupo, 4 no segundo, 6 no terceiro, 11 no quarto e 5 no último. Todos serão discutidos individualmente nas sessões que seguem e coletivamente na seção 3.6. No apêndice B são dadas todas as curvas de fase para uma melhor visualização.

3.1 NEOs com melhor cobertura da curvas de fase

Em nossa amostra, apenas 3 asteroides tiveram curva de fase determinada num intervalo em α de, pelo menos, 15° . A curva de fase desses objetos cobre, mesmo que parcialmente, tanto a região do efeito de oposição quanto a parte linear. Na figura 3.1 são dadas as curvas de fase dos 3 asteroides de forma a facilitar sua comparação, e cada um será discutido individualmente abaixo.

3.1.1 (326683) 2002 WP

(326683) 2002 WP foi observado durante 5 noites em dezembro de 2016. Esse asteroide faz parte do subgrupo Amor e tem sua curva de fase mostrada na figura 3.1. Apesar de ter poucos pontos, a curva de fase possui uma boa cobertura, com o ângulo de fase variando entre $3,7^\circ$ e $21,9^\circ$ e pequena flutuação dos pontos. Do ajuste da curva de fase obtemos $H_R = 18,185 \pm 0,253$ e $G = 0,472 \pm 0,393$. O valor de G indica um objeto de alto albedo. Esse valor é compatível com aquele determinado por Mainzer et al. (2011) de 0,315, assim como com o resultado do ajuste H-G₁₂ que sugere ser um asteroide do tipo-E.

3.1.2 (484506) 2008 ER7

O asteroide (484506) 2008 ER7, do subgrupo Amor, não possui propriedades físicas conhecidas e seu diâmetro pode ser estimado entre 287 e 643m. Foi observado ao longo de 8 noites no mês de fevereiro de 2017, embora apenas 3 puderam ser aproveitadas. A curva de fase obtida é dada na figura 3.1 onde pode ser visto o grande intervalo em ângulo de fase, desde $2,4^\circ$ até 18° , em que foram determinadas as magnitudes reduzidas. Os dois primeiros pontos estão na região do efeito de

oposição e o último permite ter uma ideia sobre a parte linear. A magnitude absoluta determinada foi de $H_R = 19,895 \pm 0,246$ e parâmetro de inclinação $G = 0,352 \pm 0,399$. Utilizando a tabela 1.3, esse valor de G indica que o asteroide deve ter um albedo de valor intermediário. Este resultado é compatível com a indicação de um objeto do tipo-S/M dada pelo ajuste H- G_{12} .

3.1.3 2016 WJ1

Este asteroide do subgrupo Apollo, também classificado como PHA, foi observado por 6 noites na missão de dezembro de 2016. Inicialmente este objeto não fazia parte da lista de objetos selecionados, mas observações para aprimoramento da órbita nos foram solicitadas por nosso colaborador Marco Micheli, dentro da colaboração existente com o *NEO Coordination Center* da ESA (Roma, Itália). Este objeto, descoberto em 19 de novembro de 2016, tinha sido classificado com risco de colisão com a Terra, sendo o único asteroide com valor 1 na Escala de Turim. Foram exatamente as observações realizadas por nosso grupo que permitiram aprimorar sua órbita de modo que o valor na referida escala baixou para 0, ou seja, sem risco de colisão com a Terra. De qualquer forma, o asteroide acabou somando aos alvos da missão visando também determinar sua curva de fase.

A curva de fase obtida é dada na figura 3.1 que, como pode ser visto, tem uma boa cobertura, com o α variando entre $\sim 5^\circ$ e 28° . Os pontos estão bem distribuídos embora sem mapear a região do efeito de oposição. O ajuste H-G forneceu os valores de $H_R = 21,119 \pm 0,265$ e $G = 0,294 \pm 0,275$. O valor do parâmetro de inclinação indica um objeto de albedo intermediário. Este resultado é comparável ao obtido pelo ajuste H- G_{12} , o qual indica tipo-S/M.

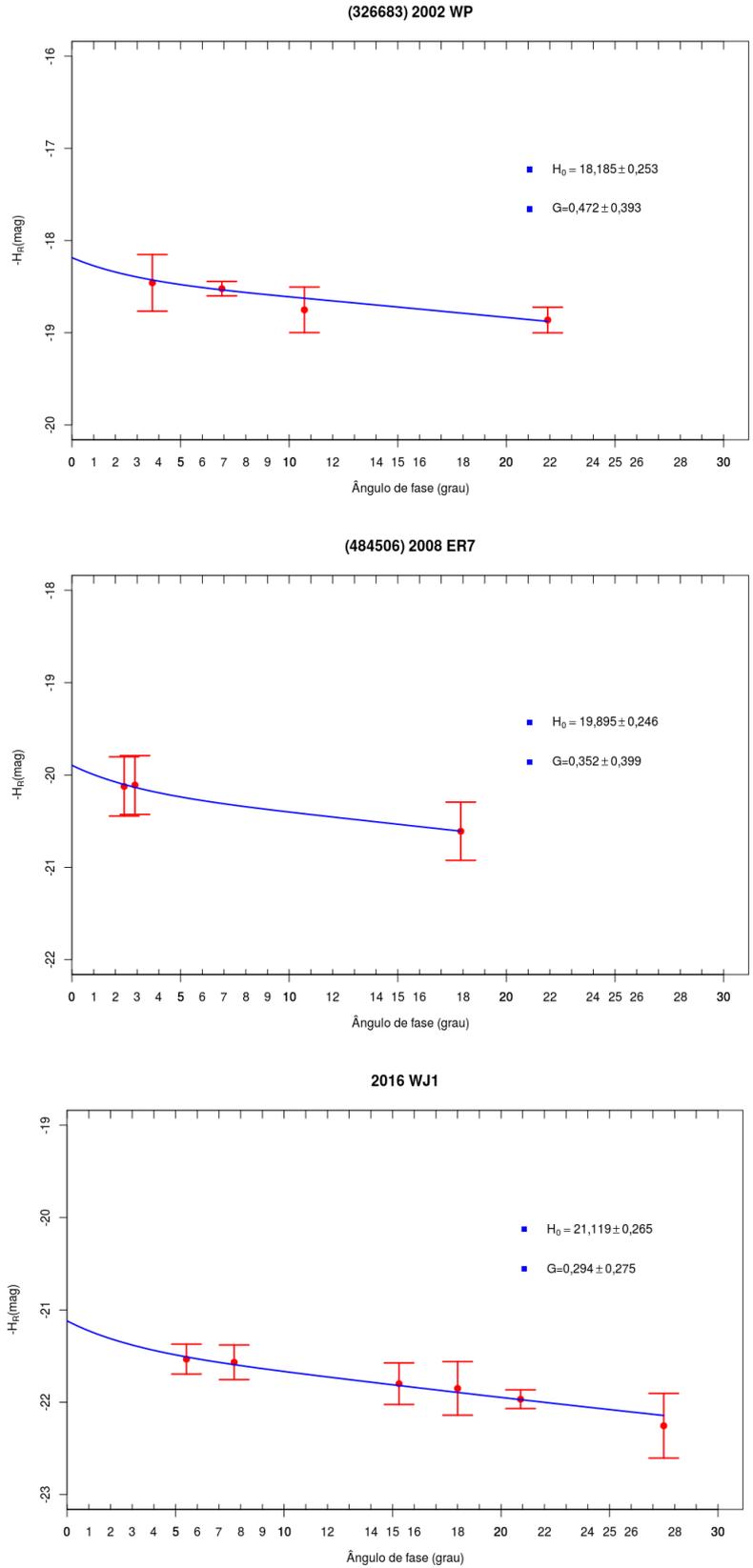


Figure 3.1: *Curvas de fase dos asteroides (326683) 2002 WP, (484506) 2008 ER7 e 2016 WJ1.*

3.2 NEOs com cobertura apenas na região do efeito de oposição

Em nossa amostra, 4 NEO tiveram curva de fase determinada apenas na região do efeito de oposição, ou seja, entre 0° e 8° . Na figura 3.2 são dadas as curvas de fase desses objetos e cada um será discutido individualmente abaixo.

3.2.1 (16816) 1997 UF9

Esse objeto faz parte do subgrupo Apollo e não possui propriedades físicas na literatura. Foi observado durante 5 noites em outubro de 2016, embora apenas 3 noites puderam ser aproveitadas. Sua curva de fase é mostrada na figura 3.2, onde vemos que foi coberta apenas uma pequena faixa do efeito de oposição, chegando a $\alpha_{\min} = 1^\circ$. Isso causa um erro elevado no parâmetro de inclinação por não haver dados na parte linear da curva. Sua magnitude absoluta e parâmetro de inclinação são dados por $H_R = 17,979 \pm 0,242$ e $G = 0,151 \pm 1,015$. Os ajuste H-G e H- G_{12} fornecem valores discordantes quanto a classe taxonômica do objeto, o que é de se esperar em vista da grande incerteza nos valores de G e G_{12} determinados.

3.2.2 (175189) 2005 EC224

Esse NEO também teve cobertura do seu ângulo de fase apenas na região do efeito de oposição. Observado por 6 noites na missão de março de 2017, seus dados compõem a curva de fase mostrada na figura 3.2. Pertencente ao subgrupo Amor, não possui propriedades físicas determinadas e seu diâmetro é estimado entre 659 e 1473m. Vemos que o erro de seus pontos são pequenos, nos dando uma magnitude absoluta e parâmetro de inclinação de $H_R = 17,961 \pm 0,223$ e $G = 0,061 \pm 0,374$. O ajuste H- G_{12} indica um objeto tipo-C. Este resultado é compatível com o ajuste H-G que nos indica um baixo albedo.

3.2.3 (470510) 2008 CJ116

O asteroide (470510) 2008 CJ116 faz parte do subgrupo Amor, possui diâmetro estimado entre 456 e 1.019m. Foi observado por 7 noites, sendo utilizados dados de apenas 3 noites. Na figura 3.2 temos sua curva de fase com magnitude absoluta e G dados por $H_R = 18,863 \pm 0,169$ e $G = 0,772 \pm 0,954$. Os dados cobre apenas a região do efeito de oposição, embora com bastante flutuações. Seu G indica um

alto albedo, o que é compatível com o ajuste $H-G_{12}$ que indica um tipo-E. Este NEO possui curva de luz determinada (Warner, 2017) com uma amplitude de 1,0 mag, o que deve ser responsável pelas flutuações observadas

3.2.4 2017 CR32

Observado por 6 noites em março de 2017, mas com dados utilizados de apenas 5 noites, o NEO 2017 CR32 faz parte do subgrupo Amor, e tem diâmetro estimado entre 109 e 244m. Sua curva de fase é mostrada na figura 3.2, com valores de magnitude absoluta e parâmetro de inclinação dados por $H_R = 22,363 \pm 0,154$ e $G = 0,660 \pm 0,430$. Assim, como o ajuste $H-G_{12}$ que nos dá um indicativo de tipo-E, o ajuste $H-G$ nos indica um alto albedo. As magnitudes reduzidas da curva possuem erros pequenos e boa cobertura na região do efeito de oposição, chegando a $\alpha_{\min} = 0,8^\circ$. Isso permite ter uma boa precisão na determinação de H_R .

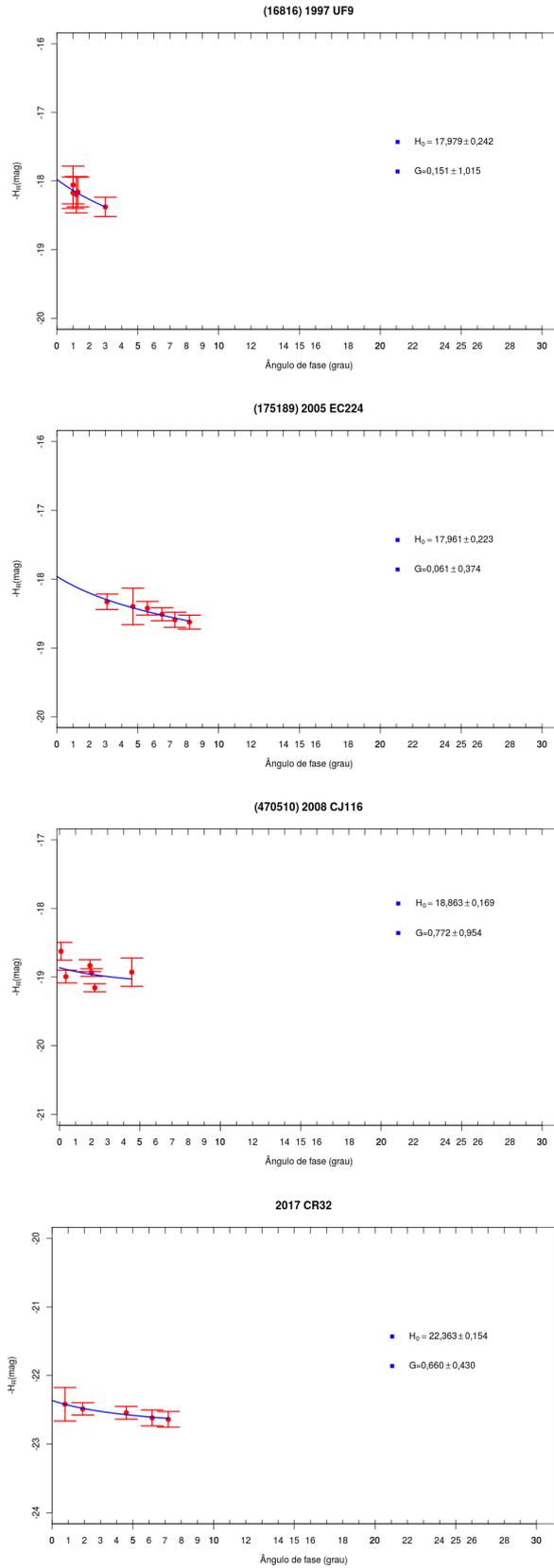


Figure 3.2: *Curvas de fase dos asteroides (16816) 1997 UF9, (175189) 2005 EC224, (470510) 2008 CJ116 e 2017 CR32.*

3.3 NEO com cobertura na parte linear da curva de fase

Em nossa amostra, 6 NEO tiveram curva de fase determinada apenas na região da parte linear, ou seja, com magnitudes em α maiores do que 15° . Nas figuras 3.3 e 3.4 são apresentadas as curvas de fase desses asteroides onde podemos notar que a quantidade de pontos e cobertura em termos de ângulo de fase é bastante variada. Entretanto, o mais importante é notar que o fato de não ter pontos em ângulos de fase pequenos faz com que o erro na determinação do H_R seja grande independentemente da qualidade individual dos pontos. O erro na inclinação da curva de fase também não fica menor pois o ajuste tem grande incerteza na identificação da parte linear da curva por não se ter nenhuma informação sobre a forma do efeito de oposição. Os detalhes sobre cada um dos objetos desse grupo e a curva de fase determinada são discutidos no que segue.

3.3.1 (138846) 2000 VJ61

O objeto (138846) 2000 VJ61 pertence ao subgrupo Apollo e tem sua curva de fase mostrada na figura 3.3. Este NEO foi observado por 4 noites em dezembro de 2016. Com cobertura apenas da parte linear com $17^\circ < \alpha < 22^\circ$. Da curva de fase podemos deduzir que as condições de tempo das noites estavam boas, principalmente em $\alpha = 21,7$, onde o erro é muito pequeno.

Esse objeto não possui nenhuma propriedade física na literatura, e tem diâmetro estimado entre 1,9 e 4,3 km. Do ajuste da curva de fase obtemos uma magnitude absoluta de $H_R = 15,025 \pm 0,483$ e um parâmetro de inclinação $G = 0,251 \pm 0,181$. Este último nos fornece a indicação de ser um objeto de albedo intermediário, podendo pertencer às classes S e Q. Pelo ajuste H- G_{12} , entretanto, a taxonomia indicada seria do tipo-C.

3.3.2 (469634) 2004 SZ19

Este objeto foi observado durante 14 noites, sendo uma em agosto e 13 em setembro de 2016, entretanto, utilizamos apenas 4 noites de setembro para obter a curva de fase mostrada na figura 3.3. O NEO pertence ao subgrupo Amor, com um período de 16,39h e uma amplitude da curva de luz de 0,34 mag (Warner, 2017). A cobertura da parte linear de sua curva de fase foi de $19^\circ < \alpha < 25^\circ$. A magnitude absoluta e o parâmetro de inclinação determinados pelo ajuste são

dados por $H_R = 18,770 \pm 1,948$ e $G = 0,116 \pm 1,402$. O alto erro dos parâmetros encontrados são devidos a pouca distribuição dos pontos na curva. Esse objeto não possui albedo determinado, tendo um diâmetro estimado entre 435 e 973 m. O ajuste H- G_{12} fornece que o objeto pertencente à classe P, o que está de acordo com o indicativo dado pelo G, de baixo albedo.

3.3.3 (471241) 2011 BX18

Este NEO, faz parte do subgrupo Apollo e classificado como um PHA, possui diâmetro de 3,0 km, albedo de 0,012 e um período de 3.448h com uma amplitude da curva de luz entre 0,27 - 0,32 mag (Carbognani, 2017; Warner, 2017). Foi observado durante 4 noites em dezembro de 2016, sendo utilizados dados de apenas 3 noites. Sua magnitude absoluta e parâmetro de inclinação são dados por $H_R = 16,578 \pm 1,118$ e $G = 0,238 \pm 0,317$. O valor de G sugere um albedo intermediário, muito diferente do valor determinado por Mainzer et al. (2011) de 0,012. Nossa curva de fase, mostrada na figura 3.3, tem apenas 3 pontos no intervalo de $24,1^\circ < \alpha < 28,6^\circ$. Isso acarreta a grande incerteza nos parâmetros encontrados pelo ajuste. O ajuste H- G_{12} indica um tipo-C, sendo esta uma classificação mais compatível com o valor de seu albedo.

3.3.4 (474163) 1999 SO5

Esse NEO, do subgrupo Apollo, foi observado na missão de outubro de 2016 durante 4 noites. A região de sua curva de fase que conseguimos cobrir foi entre 15° e 23° , acarretando incertezas no valor da magnitude absoluta. Os parâmetros encontrados pelo ajuste foram de $H_R = 18,984 \pm 0,874$ e $G = 0,411 \pm 0,208$. Na figura 3.4 é dada a curva de fase do objeto cujo diâmetro é estimado entre 199 e 445 m. Tem curva de luz publicada (Warner, 2016) com período de 1,380h e amplitude de 0,73 mag. Com o valor do parâmetro de inclinação estimamos um alto albedo, podendo o objeto pertencer às classes taxonômicas E, V e R. Pelo modelo H- G_{12} seu ajuste é melhor explicado por um objeto tipo-C, diferente do que encontramos.

3.3.5 (480004) 2014 KD91

O NEO (480004) 2014 KD91 do subgrupo Amor, foi observado durante 8 noites na missão de outubro de 2016. Das 11 noites só foram utilizados dados de 6 noites. Na figura 3.4 vemos sua curva de fase, com valores de magnitude absoluta e

parâmetro de inclinação dados por $H_R = 16,902 \pm 0,930$ e $G = 0,044 \pm 0,568$. A variação do ângulo de fase é entre $14,8^\circ$ e $26,9^\circ$, cobrindo apenas a parte linear da curva de fase, e causando um alto erro nos parâmetros determinados, em particular, no valor de H_R . Com diâmetro estimado entre 1,1 e 2,4 km, entre as propriedades físicas conhecidas, só existe a curva de luz, com período de 2,837h amplitude baixa, entre 0,15 e 0,1 mag (Carbognani, 2017; Warner, 2017). A partir do parâmetro de inclinação G obtido, estimamos um objeto de baixo albedo, de acordo com a classificação de tipo-C dada pelo ajuste $H-G_{12}$.

3.3.6 (489337) 2006 UM

(489337) 2006 UM, do subgrupo Amor, foi observado por 4 noites em dezembro de 2016, mas utilizamos dados de apenas 3 noites. Possui um diâmetro entre 601 e 1344 m e tem classificação taxonômica tipo Sq (DeMeo et al., 2014). Sua curva de fase pode ser vista na figura 3.4, onde nota-se o pequeno intervalo em ângulo de fase, entre 15° e $23,9^\circ$. O ajuste fornece os valores $H_R = 17,550 \pm 1,362$ e $G = 0,165 \pm 0,753$, com erros bastante grandes. O valor de G sugere um asteroide de baixo albedo, o que está de acordo com o ajuste $H-G_{12}$, que indica um tipo-C. Porém, ambas diferem do resultado obtido pela análise de seu espectro.

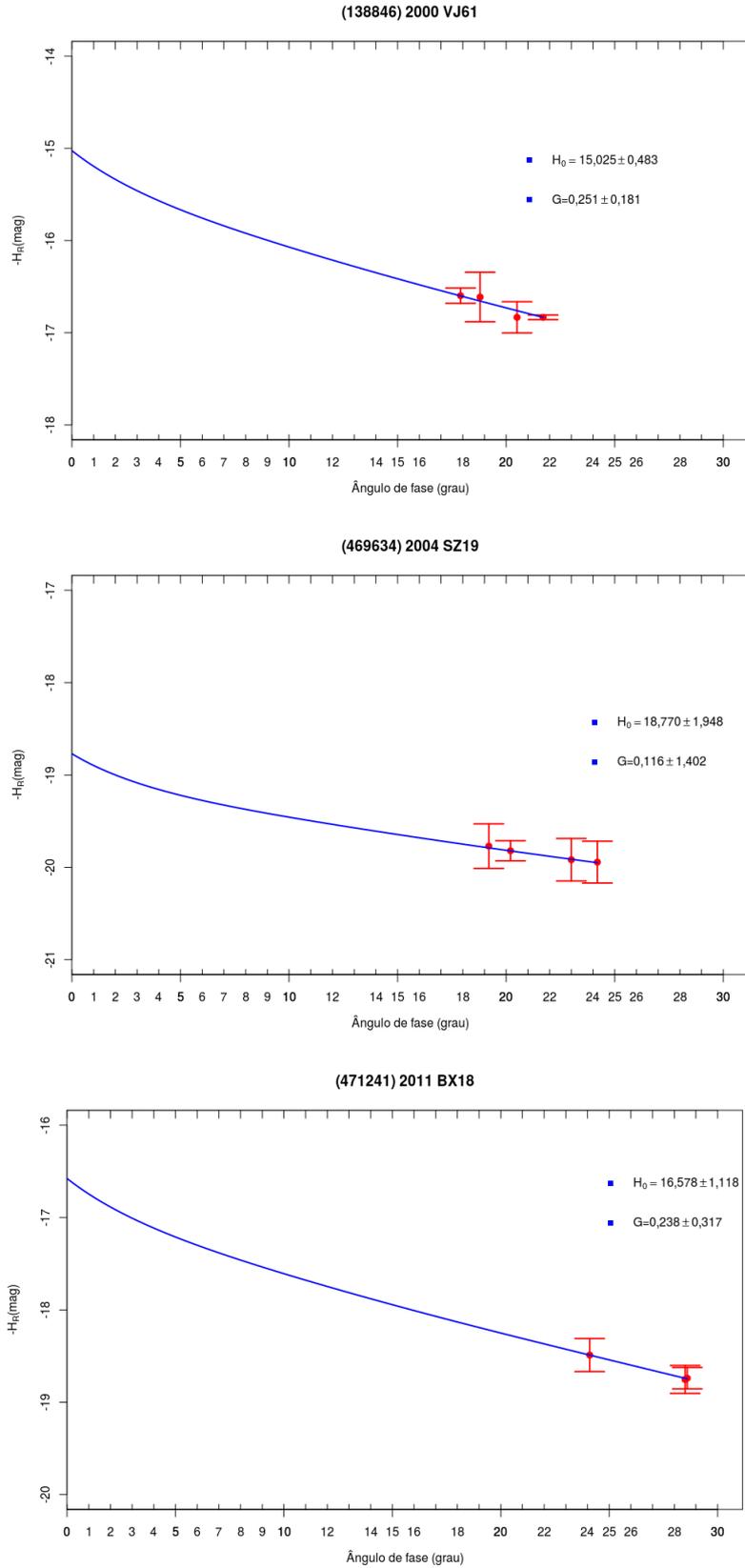


Figure 3.3: *Curvas de fase dos asteroides (138846) 2000 VJ61, (469634) 2004 SZ19 e (471241) 2011 BX18.*

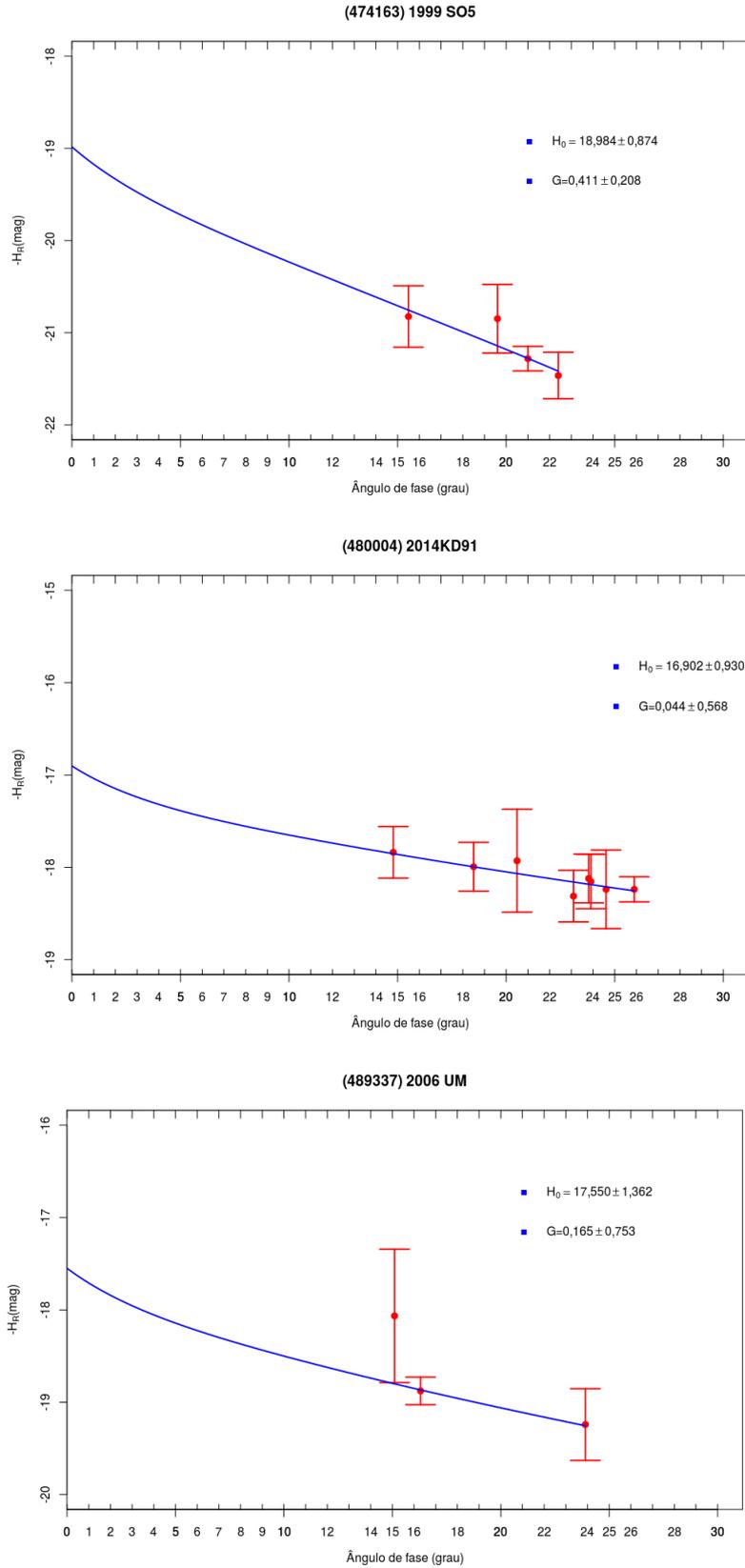


Figure 3.4: *Curvas de fase dos asteroides (474163) 1999 SO5, (480004) 2014 KD91 e (489337) 2006 UM.*

3.4 NEO com diferentes coberturas em ângulo de fase

Em nossa amostra, 11 NEO tiveram curva de fase com cobertura em ângulo de fase muito pequena, e sem cobrir partes importantes desta. Em alguns poucos casos, diferentemente dos objetos da sessão anterior, o erro na magnitude absoluta determinada ficou bastante aceitável. Isso foi devido ao fato de que nesses casos específicos, embora o intervalo de ângulos de fase cobertos tenha sido pequeno a cobertura na importante região do efeito de oposição fez a diferença. Um exemplo disso é dado pelos asteroides (464797) 2004 FZ1 e 2005 TF. Para ambos os dados cobrem um intervalo em ângulo de fase de aproximadamente 8° e ambos tem 4-6 pontos na curva. Entretanto, no caso do primeiro, a variação em ângulo de fase é entre 9° e 17° , enquanto no segundo é desde cerca $4,5^\circ$ até $12,5^\circ$. O erro é quase o dobro no primeiro caso, mesmo que os erros individuais nas magnitudes reduzidas sejam bem menores do que no segundo caso. O que realmente faz a diferença é de que neste segundo caso os 3 pontos, embora muito próximos entre si, estão mapeando a região do efeito de oposição. A seguir vamos descrever os detalhes de cada um dos objetos desse grupo e da curva de fase determinada.

3.4.1 (36236) 1999 VV

Esse NEO do subgrupo Apollo, com diâmetro estimado entre 2,0 e 4,5 km, foi observado por 9 noites em dezembro de 2016, sendo apenas 7 utilizadas. Esse objeto não possui nenhuma propriedade física publicada. Na figura 3.5 mostramos sua curva de fase cujo ajuste fornece $H_R = 15,674 \pm 0,267$ e $G = 0,045 \pm 0,370$. Esses valores fornecem indicativo de um objeto de baixo albedo, o que é coerente com o ajuste $H-G_{12}$, que indica um asteroide do tipo-C.

3.4.2 (40267) 1999 GJ4

O asteroide (40267) 1999 GJ4 foi observado por 5 noites em fevereiro de 2017 mas sendo aproveitadas apenas 4 destas. Esse NEO, do subgrupo Apollo, é o único de nossa amostra que tem curva de fase publicada (Galád et al., 2005; Pravec et al., 2012), com valores de H_R e G dados, respectivamente, por 15,59 e 0,5. Também possui diversas propriedades físicas conhecidas tais como: albedo de 0,30 (Mainzer et al., 2011), classe taxonômica tipo-Sq (Bus and Binzel, 2002) e curva de luz com período de 4,9569h e amplitude de 1,11 mag (Galád et al., 2005; Polishook, 2012;

Warner, 2014).

A figura 3.5 mostra a curva de fase por nós obtida, com o ajuste fornecendo valores de H_R e G de $14,896 \pm 0,510$ e $0,681 \pm 0,313$. Esse valor de G sugere um objeto de alto albedo, diferentemente do ajuste H- G_{12} , que indica um objeto do tipo-C. Vale ressaltar de que embora o valor do albedo estimado pelo ajuste H-G se aproxime do valor dado na literatura (Mainzer et al., 2011), esse valor não parece ser compatível com a classificação taxonômica dada por Bus and Binzel (2002). Por outro lado, o valor de H_R determinado através de nossa curva de fase é bem diferente do valor publicado. Essa diferença deve ser atribuída ao fato de nossa curva de fase possuir poucos pontos e sem uma adequada cobertura na região do efeito de oposição. Além disso, a grande amplitude da curva de luz, deveria ser levada em consideração na determinação do ajuste.

3.4.3 (203217) 2001 FX9

O asteroide (203217) 2001 FX9 pertence ao subgrupo Amor e não possui propriedades físicas publicadas. O objeto foi observado por 5 noites na missão de dezembro de 2017, com dados de todas as noites utilizados para obter a curva de fase dada na figura 3.5. Os valores de magnitude absoluta e parâmetro de inclinação obtidos são $H_R = 18,746 \pm 4,386$ e $G = 0,420 \pm 7,272$. Esse objeto é o que apresenta os maiores erros nos parâmetros determinados e isso se dá pela pouca variação na cobertura do ângulo de fase, entre $7,8^\circ$ e $9,6^\circ$, e possivelmente uma grande amplitude da sua curva de luz.

3.4.4 (438955) 2010 LN14

Esse asteroide foi observado durante 5 noites em janeiro de 2017, embora só 3 foram utilizadas. O NEO classificado como PHA faz parte do subgrupo Apollo e tem diâmetro estimado entre 190 e 425 m. Sua curva de fase é mostrada na figura 3.5, com o ajuste H-G fornecendo $H_R = 20,606 \pm 0,854$ e $G = 0,459 \pm 1,137$. As magnitudes tem grandes erros, o que se reflete no valor do erro do parâmetro de inclinação. Se utilizamos mesmo assim o valor de G determinado, temos a indicação de um alto albedo, sendo este compatível com a taxonomia indicada pelo ajuste H- G_{12} , ou seja, tipo-E.

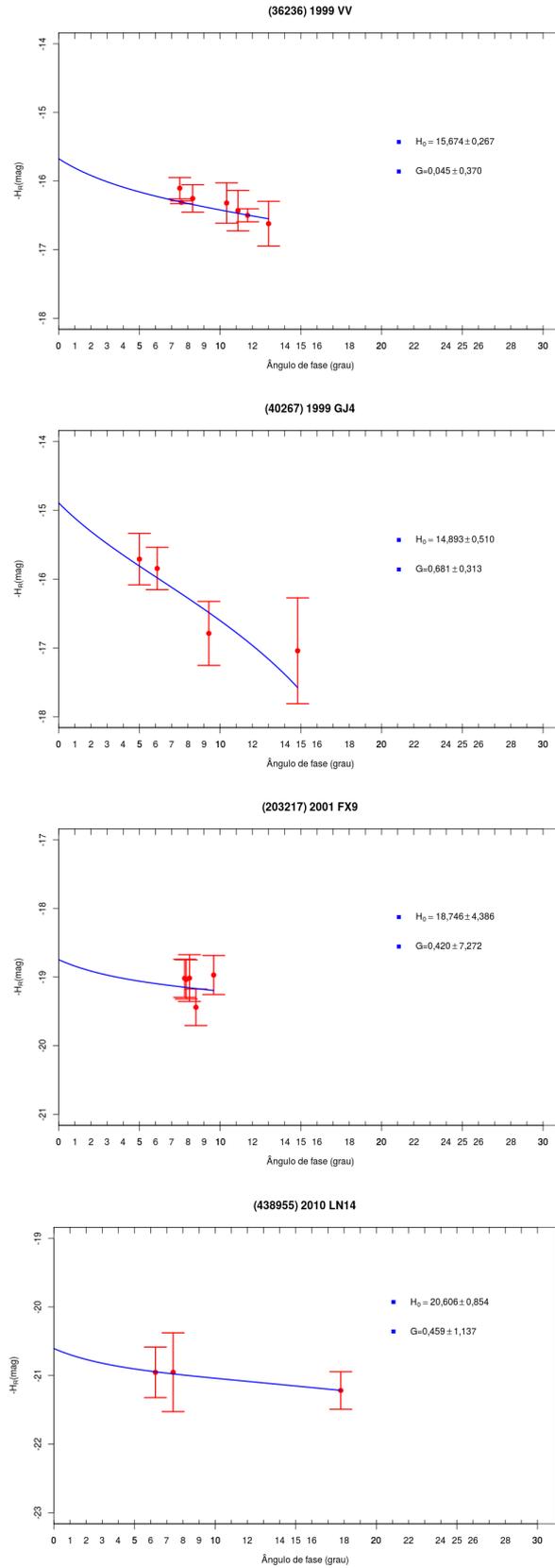


Figure 3.5: *Curvas de fase dos asteroides (36236) 1999 VV, (40267) 1999 GJ4, (203217) 2001 FX9 e (438955) 2010 LN14.*

3.4.5 (464797) 2004 FZ1

Esse asteroide foi observado por 7 noites em setembro de 2016, entretanto foi possível aproveitar dados de apenas 3 noites. Seu diâmetro é estimado entre 659 e 1473m, e a curva de luz tem período de 45,2h e amplitude de 0,39 mag (Warner, 2017), ou seja, não muito grande. O ajuste da curva de fase, mostrada na figura 3.6, indica $H_R = 17,643 \pm 0,439$ e $G = 0,383 \pm 0,566$. Os pequenos erros dos pontos indicam as noites utilizadas foram fotométricas. O valor de G determinado indica um asteroide de alto albedo, entre as classes E, V e R, em acordo com a classe dada pelo ajuste H- G_{12} , tipo-E.

3.4.6 2001 QE34

Observado em janeiro de 2016 por 8 noites, com apenas 3 com aproveitamento, o asteroide 2001 QE34 pertencente ao subgrupo Amor e um diâmetro estimado entre 0,477 e 1,067 m. Sua curva de fase é mostrada na figura 3.6, com valores de magnitude absoluta e parâmetro de inclinação $H_R = 17,918 \pm 1,382$ e $G = 0,711 \pm 1,214$. Com o G determinado temos um indicativo de alto albedo, diferentemente do ajuste H- G_{12} que nos dá um asteroide tipo-C. Aqui também, a pouca cobertura torna inconclusivos os valores obtidos.

3.4.7 2005 TF

Para o asteroide 2005 TF, das suas 8 noites de observação, apenas 5 puderam ser utilizadas. O asteroide faz parte do subgrupo Amor e dos parâmetros físicos publicados possui apenas o período rotacional de 2,57h e amplitude da curva de luz de 0,29 mag (Warner, 2017). Apesar de ter uma boa quantidade de pontos em sua curva de fase, mostrada na figura 3.6, estes não estão bem distribuídos. A magnitude absoluta e parâmetro de inclinação determinados foram $H_R = 19,285 \pm 0,260$ e $G = 0,345 \pm 0,352$. De acordo com esse parâmetro de inclinação é indicado um objeto de albedo intermediário, o que não é compatível com a classe C que o ajuste H- G_{12} indica.

3.4.8 2014 AD17

O asteroide 2014 AD17 teve 8 noites de observações na missão de janeiro de 2017, podendo ser aproveitados dados de apenas 3 noites. Com diâmetro estimado na faixa de 274 - 614 m, o asteroide faz parte do subgrupo Amor, e não tem nenhuma

propriedade física publicada. Na figura 3.6, é dada a curva de fase do objeto cujo ajuste fornece os valores de $H_R = 14,540 \pm 0,203$ e $G = 0,717 \pm 0,047$. O G sugere um objeto de alto albedo, enquanto o ajuste H- G_{12} indica um objeto do tipo-C.

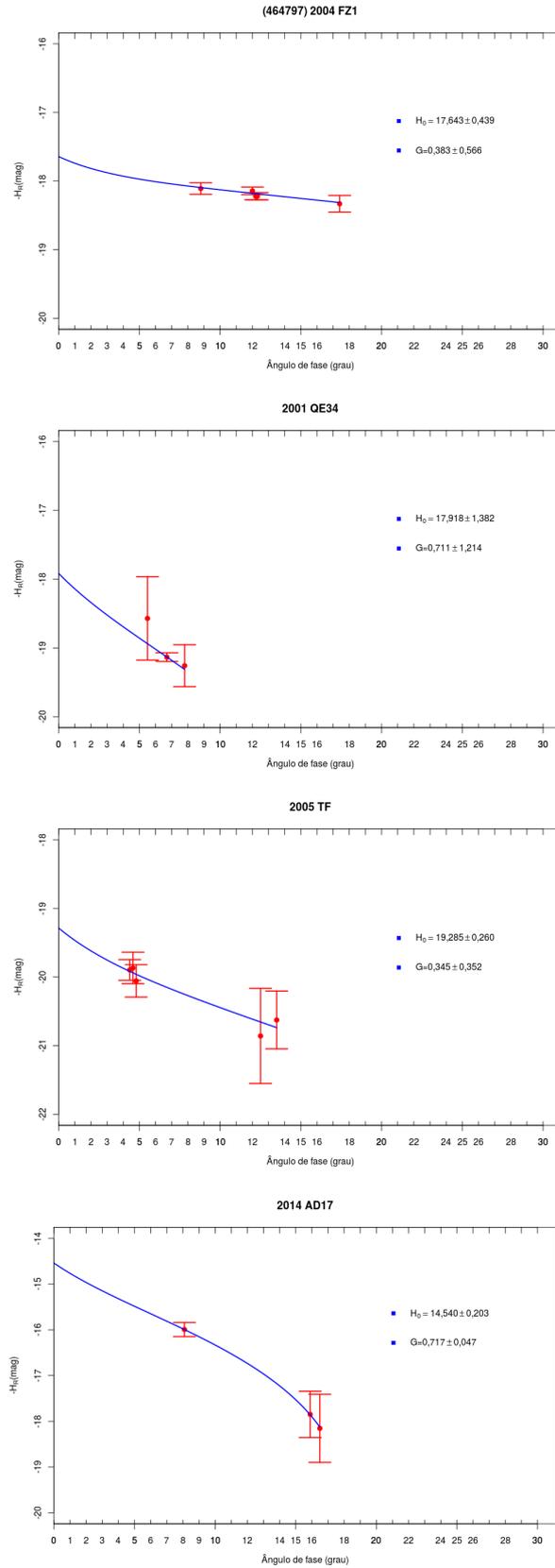


Figure 3.6: *Curvas de fase dos asteroides (464797) 2004 FZ1, 2001 QE34, 2005 TF e 2014 AD17.*

3.4.9 2016 RP33

Com 9 noites de observação, a curva de fase do asteroide 2016 RP33 (figura 3.7), é composta por 7 pontos de apenas 4 noites. Com diâmetro estimado entre 379 e 848 m, tem apenas curva de luz com período de 4,682h e amplitude de 0,15 mag (Warner, 2017), como propriedade física conhecida. Para este objeto encontramos valores de magnitude absoluta e parâmetro de inclinação de $H_R = 18,275 \pm 0,323$ e $G = 0,242 \pm 0,288$, sugerindo um albedo intermediário, e tipo S ou Q. O ajuste H- G_{12} entretanto sugere um tipo-C.

3.4.10 2017 AC5

O asteroide 2017 AC5 não possui nenhuma propriedade física determinada, sendo seu diâmetro estimado entre 315 e 705m. Observado por 6 noites em março de 2017, utilizamos apenas dados de 5. Sua curva de fase é mostrada na figura 3.7, onde podemos ver que os pontos, embora com erros pequenos, se distribuem numa faixa muito restrita de ângulo de fase entre 8° e 15° aproximadamente. O ajuste indica uma magnitude absoluta $H_R = 18,188 \pm 0,273$ e um parâmetro de inclinação $G = 0,717 \pm 0,061$. O valor de G indica um alto albedo, o qual não é compatível com o tipo-C sugerido pelo ajuste H- G_{12} .

3.4.11 2017 AF5

Sem propriedades físicas publicadas, o asteroide 2017 AF5 pertence ao subgrupo Apollo e tem uma estimativa de diâmetro entre 829 e 1855 m. O objeto foi observado por 6 noites, mas puderam ser aproveitados dados de apenas 3 noites, mostrados na figura 3.7. Novamente, a pouca cobertura em ângulo de fase e o um erro significativo nas magnitudes computadas, resultam em uma magnitude absoluta e parâmetro de inclinação com grandes erros, $H_R = 17,638 \pm 1,289$ e $G = 0,530 \pm 1,709$. Apesar do erro significativo no valor de G, o alto albedo estimado é compatível com a classe E sugerida pelo ajuste H- G_{12} .

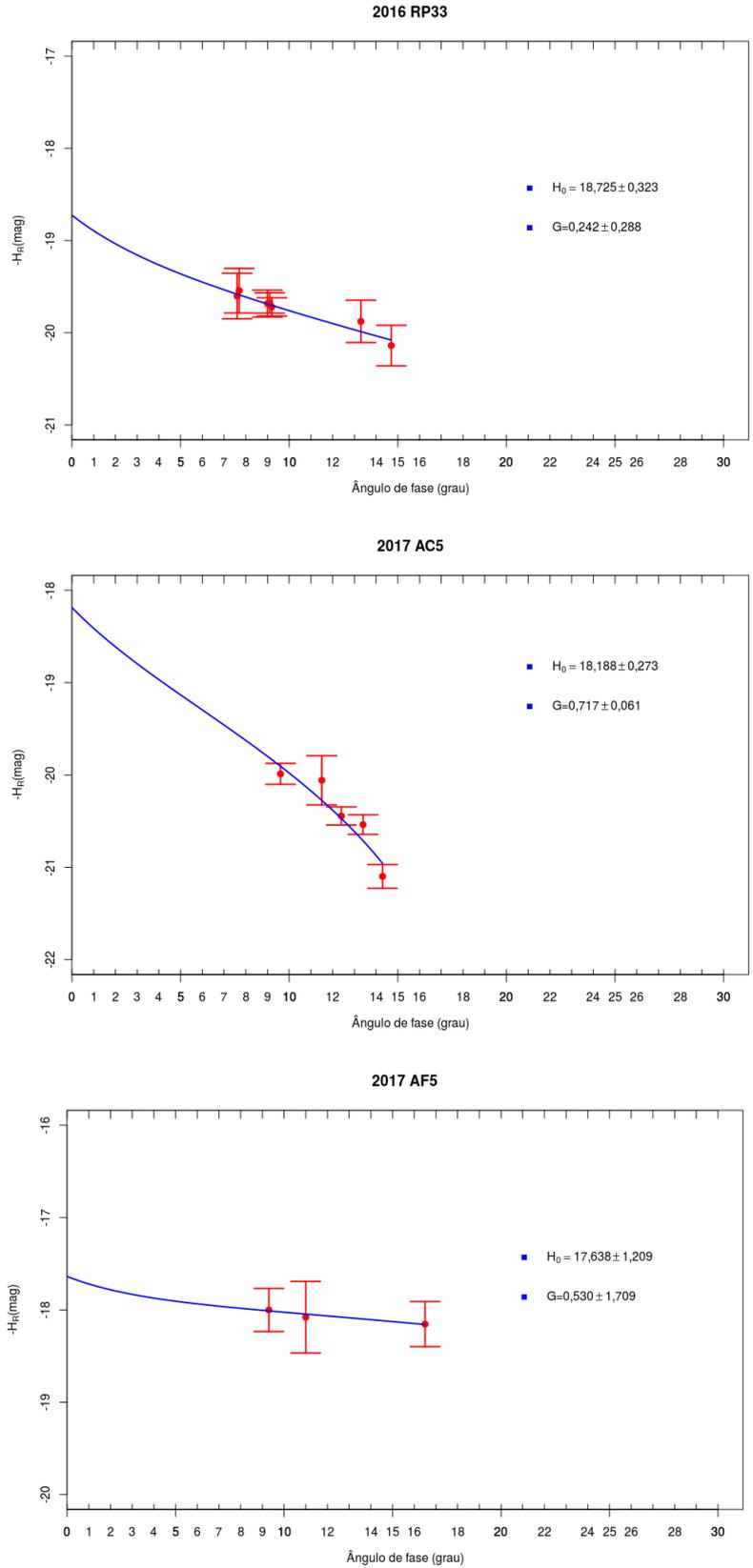


Figure 3.7: *Curvas de fase dos asteroides 2016 RP33, 2017 AC5 e 2017 AF5.*

3.5 NEO com curvas de fase não determinadas

Cinco asteroides de nossa amostra não tiveram dados suficientes para a determinação de sua curva de fase.

No caso dos NEO (34613) 2000 UR13 e (370702) 2004 NC9, ambos do subgrupo Amor, foram observados por 8 noites em janeiro de 2017 e 5 noites em fevereiro de 2017, respectivamente, entretanto a presença de nuvens prejudicaram os dados coletados.

No caso do único NEO do subgrupo Aten de nossa amostra, (474238) 2001 RU17, o qual foi observado durante 4 noites em setembro de 2016, a presença de nuvens impediu que a estrela de calibração fosse observada em diversas alturas, impedindo a determinação da extinção atmosférica.

O asteroide (3360) Syrinx, por outro lado, foi observado por apenas 3 noites em dezembro de 2016, mas se encontrava em um campo muitas estrelas, o que prejudicou a redução e a determinação das magnitudes instrumentais.

Por fim, o asteroide (4055) Magellan foi observado durante 3 noites em fevereiro de 2017, porém com uma extinção atmosférica muito grande. Como esse objeto possui curva de fase determinada, com magnitude absoluta de $H_R = 14,45$ e parâmetro de inclinação de $G = 0,27$ (<http://www.asu.cas.cz/ppravec/newres.txt>), nosso objetivo era completar sua curva de fase na região do efeito de oposição, visto que a variação do ângulo de fase no período era de $1,7^\circ \leq \alpha \leq 8,2^\circ$.

3.6 Discussão

Neste trabalho determinamos a curva de fase para 24 NEO, sendo 12 do subgrupo Amor e 12 do subgrupo Apollo, sendo entre estes últimos 5 são classificados como PHA. Desses objetos apenas 3 já possuíam albedo conhecido e apenas um, (40267) 1999 GJ4, já tinha curva de fase determinada. Vale lembrar que no caso de objetos que não possuem curva de fase utiliza-se o valor de $G = 0,15$ para determinar o valor aproximado de H_V . Este valor é o que consta nos diversos bancos de dados de asteroides, tais como o *Minor Planet Center*, JPL e outros.

Outro ponto a ser ressaltado é de que o resultado de nossas curvas de fase fornece a magnitude absoluta H_R . Porém, para poder comparar esse valor com

os da literatura é necessário realizar a transformação da magnitude absoluta de H_R para H_V . De forma rigorosa isso implicaria em conhecer a diferença entre as magnitudes V e R, mas, de acordo com o trabalho de Pravec et al. (2012), é possível realizar essa transformação conhecendo a classe taxonômica do objeto, e tendo assim uma estimativa de H_V . No nosso caso, como o único objeto já tinha valor H_R determinado, não foi necessário fazer a transformação.

Na tabela 3.2 listamos os resultados encontrados a partir das curvas de fase dos NEO por nós observados. Na tabela estão dadas as magnitudes absolutas, os parâmetros de inclinação, a cobertura em α da curva de fase, além do albedo e indicativo de tipo taxonômico. Como pode ser visto, dentre os 24 asteroides, cerca de 10 tem divergência quanto ao tipo taxonômico indicado entre os ajustes H-G e H- G_{12} . Analisando a tabela podemos notar que, como esperado, os menores erros na determinação da magnitude absoluta são obtidos quando se tem uma boa cobertura na região do efeito de oposição e, em particular, próximo de ângulo de fase 0° . No caso dos objetos (470510) 2008 CJ116 e 2017 CR32, cujos erros em H_R são da ordem de 0,1, foram obtidos, respectivamente, 6 e 5 valores da magnitude em ângulos de fase entre $0,1^\circ$ e $4,5^\circ$ e $0,8^\circ$ e $7,2^\circ$. Por outro lado, em ambos os casos a falta de cobertura na região linear levou a uma determinação com grande incerteza no valor do parâmetro G. No caso dos três objetos aqui classificados como tendo a melhor cobertura, os erros tanto em H_R quanto em G, se mantiveram num patamar aceitável.

Para os asteroides que já possuíam albedo publicado fazemos uma comparação dada na tabela 3.3 com a indicação dada pelos diversos ajustes. Como pode ser visto para dois asteroides os indicativos de albedo determinados pelo ajuste da curva de fase e através de observação no térmico (WISE) são compatíveis. No terceiro caso, em que temos discordância do albedo indicado com o já obtido da literatura, a curva de fase obtida consistiu de apenas 3 pontos em ângulos de fase entre 24° e 29° (figura 3.3). Isto acarreta em grande erro na determinação do G e, consequentemente, do albedo.

Outro ponto importante em relação às curvas de fase aqui apresentadas é de que em alguns casos existe uma flutuação dos pontos em relação ao ajuste. Conforme mencionado no capítulo 1, isso se deve a uma curva de luz do asteroide com grande amplitude. Se construimos a curva de fase com observações feitas durante os máximos da curva de luz do objeto esta será distinta daquela construída com observações realizadas nos mínimos. A diferença entre as curvas de fase seria percebida por um deslocamento em relação ao ajuste, para cima ou para baixo

Table 3.2: *Resumo dos resultados obtidos para 24 NEO.*

Asteroide	H_R	erro	G	erro	p_V estimado (G)	Taxonomia (G_{12})	α (mín - máx)
(16816) 1997 UF9	17,979	0,242	0,151	1,015	albedo baixo	S/M	1,0 - 3,0
(36236) 1999 VV	15,674	0,267	0,045	0,370	albedo baixo	C	7,5 - 13,0
(40267) 1999 GJ4	14,896	0,510	0,681	0,313	alto albedo	C	5,0 - 14,8
(138846) 2000 VJ61	15,025	0,483	0,251	0,181	albedo intermediário	C	17,9 - 21,7
(175189) 2005 EC224	17,961	0,223	0,061	0,374	albedo baixo	C	3,1 - 8,2
(203217) 2001 FX9	18,746	4,386	0,420	7,272	alto albedo	E	7,8 - 9,6
(326683) 2002 WP	18,185	0,253	0,472	0,393	alto albedo	E	3,7 - 21,9
(438955) 2010 LN14	20,606	0,854	0,459	1,137	alto albedo	E	7,4 - 17,8
(464797) 2004 FZ1	17,643	0,439	0,383	0,566	alto albedo	E	8,8 - 17,4
(469634) 2004 SZ19	18,770	1,948	0,116	1,402	albedo baixo	P	19,2 - 24,2
(470510) 2008 CJ116	18,863	0,169	0,772	0,954	alto albedo	E	0,1 - 4,5
(471241) 2011 BX18	16,578	1,118	0,238	0,317	albedo baixo intermediário	C	24,1 - 28,6
(474163) 1999 SO5	18,984	0,874	0,411	0,208	alto albedo	C	15,5 - 22,4
(480004) 2014 KD91	16,902	0,930	0,044	0,568	albedo baixo	C	14,8 - 25,9
(484506) 2008 ER7	19,895	0,246	0,352	0,399	albedo intermediário	S/M	2,4 - 17,9
(489337) 2006 UM	17,550	1,162	0,165	0,753	albedo baixo	C	15,1 - 23,9
2001 QE34	17,918	1,382	0,711	1,214	alto albedo	C	5,5 - 7,8
2005 TF	19,285	0,260	0,345	0,352	albedo intermediário	C	4,4 - 13,5
2014 AD17	14,540	0,203	0,717	0,047	alto albedo	C	8,1 - 16,5
2016 RP33	18,275	0,323	0,242	0,288	albedo intermediário	C	7,6 - 14,7
2016 WJ1	21,119	0,265	0,294	0,275	albedo intermediário	S/M	5,5 - 27,5
2017 AC5	18,188	0,273	0,717	0,061	alto albedo	C	9,6 - 14,3
2017 AF5	17,638	1,289	0,530	1,709	alto albedo	E	9,3 - 16,5
2017 CR32	22,363	0,154	0,660	0,430	alto albedo	E	0,8 - 7,2

Table 3.3: *Tabela de comparação dos objetos que já possuem albedo publicado.*

Asteroide	p_V (NEODyS-2)	p_V
40267 (1999 GJ4)	0,3	albedo alto
326683 (2002 WP)	0,315	albedo alto
471241 (2011 BX18)	0,012	albedo baixo itermediário

dependendo se são usados máximos ou mínimos da curva de luz. Uma maneira de corrigir essa flutuação seria fazer uma média entre a amplitude máxima e mínima da curva de luz (Buchheim, 2010). Em nosso trabalho não realizamos essa correção,

porém é possível inferir sobre a amplitude da curva de luz a partir das flutuações observadas nas curvas de fase.

Entre os objetos estudados apenas 9 possuem informação sobre a curva de luz, e, em particular, sua amplitude. Dentre esses vemos que três, (40267) 1999 GJ4, (470510) 2008 CJ116 e (474163) 1999 SO5, tem uma amplitude alta e suas curvas de fase apresentam flutuações não desprezíveis. Por outro lado, os demais objetos, (464797) 2004FZ1, (469634) 2004SZ19, (471241) 2011 BX18, (480004) 2014KD91, 2005 TF e 2016 RP33, possuem pequena amplitude da curva de luz, e as magnitudes em suas curvas de fase não possuem flutuações consideráveis. Desta análise poderíamos inferir que os asteroides (489337) 2006 UM, 2001 QE34 e 2017 AC5 tem curva de luz com grande amplitude já que sua curva de fase apresenta flutuações significativas. É claro, que outros fatores poderiam ser responsáveis pelas flutuações observadas, mas fica como hipótese a ser testada quando for possível obter a curva de luz desses asteroides.

Chapter 4

Conclusões e perspectivas

Neste trabalho estudamos, pela primeira vez dentro do projeto IMPACTON, a curva de fase de asteroides em órbitas próximas da Terra visando determinar sua magnitude absoluta (H) e parâmetro de inclinação (G). Foram observados 29 asteroides, embora para apenas 24 destes foi possível construir sua curva de fase e determinar valores para H e G. É importante ressaltar que as curvas obtidas tiveram diferentes graus de qualidade a qual, na maior parte dos casos, está diretamente relacionada com a cobertura em ângulo de fase alcançada.

Os resultados aqui apresentados são fruto de 7 missões observacionais realizadas pela equipe do projeto IMPACTON, com estratégias observacionais desenvolvidas ao longo do trabalho. Embora as observações tenham sido realizadas por diversos membros da equipe, a redução e análise dos dados foi toda realizada por mim. Por ser a primeira vez que dentro do projeto IMPACTON que foram realizadas observações visando à determinação de curvas de fase, a estratégia observacional adotada se revelou não ser sempre a mais adequada. Infelizmente, isso somente acabou sendo percebido quando a maior parte dos dados já tinha sido adquirida, pois os programas de análise levaram algum tempo para serem desenvolvidos e entendidos de forma adequada. Se de um lado isso acabou não permitindo obter resultados tão bons quanto era esperado, por outro, resultou em um aprendizado precioso que certamente levará ao aprimoramento das observações a serem realizadas a partir de agora dentro do projeto IMPACTON e, certamente, à obtenção de melhores resultados. Entre os pontos/lições que serão levados em consideração na continuação deste trabalho vale citar:

- Acompanhamento diferencial - O acompanhamento diferencial foi utilizado para que a imagem do asteroide ficasse pontual acarretando, entretanto, que as estrelas no campo ficassem "trilhadas". A redução fotométrica utilizada,

por outro lado, não permitiu medir o brilho dessas estrelas. Isso impactou negativamente a determinação do fator de extinção da noite, o qual acabou medido apenas através das estrelas Landolt, por sua vez observadas em poucas massas de ar distintas. No futuro, será importante aprender a realizar fotometria de objetos não-pontuais, ao mesmo tempo que, aumentar o número de vezes em que as estrelas de calibração são observadas.

- Curva de luz - Conforme foi mencionado em diversos pontos da dissertação, o brilho observado de um asteroide depende tanto do ângulo de fase solar quanto de seu ângulo de aspecto. Na presente dissertação apenas consideramos a influência do primeiro desprezando a influência do segundo. Entretanto, sendo que para um NEO é possível obter uma boa cobertura em ângulos de fase durante uma única missão observacional, a determinação do ângulo de aspecto não é tão importante quanto conhecer sua curva de luz, em particular, sua amplitude. Isso implica em passar a obter uma curva de luz do asteroide durante cada missão observacional, seja seu período já conhecido ou não. Isso permitirá incluir a amplitude da curva de luz na determinação da magnitude reduzida para cada ângulo de fase.
- Noites fotométricas - Para obter boas curvas de fase é fundamental que as noites de observação sejam fotométricas. Infelizmente, essa premissa não foi levada devidamente a sério no presente trabalho, o que levou a uma grande quantidade de noites perdidas. Na descrição dos resultados (capítulo 3), para quase todos os objetos estudados consta uma frase do tipo "...o objeto foi observado durante N noites sendo aproveitadas apenas N-M noites...". No futuro, a qualidade fotométrica da noite deve ser determinada no início das observações de uma noite, independentemente se a não-observação implicar em não ter uma adequada cobertura da curva de fase. Outro caminho também a ser seguido para um aproveitamento total dos dados, em particular, os já obtidos, é identificar estrelas no campo que tenham magnitude tabelada de forma a poder determinar a magnitude do asteroide. Esse procedimento deve ser avaliado quanto aos erros que pode introduzir na determinação dos parâmetros desejados, ou seja, a magnitude absoluta e o parâmetro de inclinação da curva de fase.

Independentemente dos problemas acima mencionados, os resultados aqui apresentados são de grande relevância para um melhor conhecimento da população

dos NEO, em particular considerando o pequeno número de objetos para os quais se conhece suas propriedades fotométricas. Note-se que nossos dados são os primeiros obtidos para esmagadora maioria dos objetos estudados (precisamente para 23 dos 24 NEO). Também é importante notar de que mesmo faltando uma cobertura ótima nas curvas de fase dos nossos objetos, estas podem vir a ser complementadas assim que esses NEO voltarem a serem observáveis do OASI. Isso permitirá obter melhores ajustes e uma boa precisão nos parâmetros derivados. Gostaríamos de finalizar deixando claro de que a quantidade de objetos observados e a qualidade dos resultados alcançados não seriam possíveis sem um telescópio dedicado como o do projeto IMPACTON. Os aprimoramentos a serem implementados, tanto no que diz respeito à metodologia de observação quanto à redução e análise dos dados, deverão fornecer cada vez mais resultados fundamentais para uma melhor compreensão da origem e evolução da população de asteroides em órbita próxima da Terra.

Bibliography

- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., and Michel, H. V. (1980). Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science*, 208:1095–1108.
- Belskaya, I. N. and Shevchenko, V. G. (2000). Opposition Effect of Asteroids. *Icarus*, 147:94–105.
- Binzel, R. P., Reddy, V., and Dunn, T. L. (2015). *The Near-Earth Object Population: Connections to Comets, Main-Belt Asteroids, and Meteorites*, pages 243–256.
- Bottke, W. F., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J.-M., Levison, H. F., Michel, P., and Metcalfe, T. S. (2002). Debaised Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects. *Icarus*, 156:399–433.
- Bowell, E., Hapke, B., Domingue, D., Lumme, K., Peltoniemi, J., and Harris, A. W. (1989). Application of photometric models to asteroids. In Binzel, R. P., Gehrels, T., and Matthews, M. S., editors, *Asteroids II*, University of Arizona Press, Tucson, pages 524–556.
- Bowell, E. and Lumme, K. (1979). *Colorimetry and magnitudes of asteroids*, pages 132–169.
- Buchheim, R. K. (2010). Methods and Lessons Learned Determining the H-G Parameters of Asteroid Phase Curves. *Society for Astronomical Sciences Annual Symposium*, 29:101–115.
- Bus, S. J. and Binzel, R. P. (2002). Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy. *Icarus*, 158:146–177.
- Carbognani, A. (2017). Asteroids Lightcurves Analysis at OAVDA: 2016 January - October. *Minor Planet Bulletin*, 44:52–57.
- Carry, B., Solano, E., Eggl, S., and DeMeo, F. E. (2016). Spectral properties of near-Earth and Mars-crossing asteroids using Sloan photometry. *Icarus*, 268:340–354.

- Carvano, J. M., Hasselmann, P. H., Lazzaro, D., and Mothé-Diniz, T. (2010). SDSS-based taxonomic classification and orbital distribution of main belt asteroids. *AAp*, 510:A43.
- Chapman, C. R., Morrison, D., and Zellner, B. (1975). Surface properties of asteroids - A synthesis of polarimetry, radiometry, and spectrophotometry. *Icarus*, 25:104–130.
- DeMeo, F. E., Binzel, R. P., and Lockhart, M. (2014). Mars encounters cause fresh surfaces on some near-Earth asteroids. *Icarus*, 227:112–122.
- DeMeo, F. E., Binzel, R. P., Slivan, S. M., and Bus, S. J. (2009). An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *Icarus*, 202:160–180.
- Galád, A., Pravec, P., Kušnirák, P., Gajdoš, Š., Kornoš, L., and Világi, J. (2005). Joint Lightcurve Observations of 10 Near-Earth Asteroids from Modra and ONDŘEJOV. *Earth Moon and Planets*, 97:147–163.
- Gehrels, T. (1956). Photometric Studies of Asteroids. V. The Light-Curve and Phase Function of 20 Massalia. *ApJ*, 123:331.
- Hapke, B. (1966). An Improved Theoretical Lunar Photometric Function. *AJ*, 71:386.
- Hapke, B. (1981). Bidirectional reflectance spectroscopy. 1. Theory. *JGR*, 86:4571–4586.
- Hapke, B. (1984). Bidirectional reflectance spectroscopy. III - Correction for macroscopic roughness. *Icarus*, 59:41–59.
- Hapke, B. (1986). Bidirectional reflectance spectroscopy. IV - The extinction coefficient and the opposition effect. *Icarus*, 67:264–280.
- Hapke, B. (2012). *Theory of reflectance and emittance spectroscopy*. Cambridge university press.
- Harris, A. W. (1989). The H-G Asteroid Magnitude System: Mean Slope Parameters. In *Lunar and Planetary Science Conference*, volume 20 of *Lunar and Planetary Science Conference*.
- Harris, A. W. and D’Abramo, G. (2015). The population of near-Earth asteroids. *Icarus*, 257:302–312.
- Harris, A. W. and Young, J. W. (1989). Asteroid lightcurve observations from 1979-1981. *Icarus*, 81:314–364.

- Helfenstein, P. and Veverka, J. (1989). Physical characterization of asteroid surfaces from photometric analysis. In Binzel, R. P., Gehrels, T., and Matthews, M. S., editors, *Asteroids II*, University of Arizona Press, Tucson, pages 557–593.
- Irvine, W. M. (1966). The Shadowing Effect in Diffuse Reflection. *JGR*, 71:2931.
- Lagerkvist, C.-I. and Magnusson, P. (1990). Analysis of asteroid lightcurves. II - Phase curves in a generalized HG-system. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 86:119–165.
- Lazzaro, D. (2010). Photometric and spectroscopic studies of small Solar System bodies and the IMPACTON project. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 53:315–324.
- Li, J.-Y., Helfenstein, P., Buratti, B. J., Takir, D., and Clark, B. E. (2015). Asteroid photometry. *Asteroids IV*, University of Arizona Press, Tucson, pages 129–150.
- Lumme, K. and Bowell, E. (1981). Radiative transfer in the surfaces of atmosphereless bodies. II. Interpretation. *AJ*, 86:1705–1721.
- Mainzer, A., Grav, T., Bauer, J., Masiero, J., McMillan, R. S., Cutri, R. M., Walker, R., Wright, E., Eisenhardt, P., Tholen, D. J., Spahr, T., Jedicke, R., Denneau, L., DeBaun, E., Elsbury, D., Gautier, T., Gomillion, S., Hand, E., Mo, W., Watkins, J., Wilkins, A., Bryngelson, G. L., Del Pino Molina, A., Desai, S., Gómez Camus, M., Hidalgo, S. L., Konstantopoulos, I., Larsen, J. A., Maleszewski, C., Malkan, M. A., Mauduit, J.-C., Mullan, B. L., Olszewski, E. W., Pforr, J., Saro, A., Scotti, J. V., and Wasserman, L. H. (2011). NEOWISE Observations of Near-Earth Objects: Preliminary Results. *ApJ*, 743:156.
- Michel, P., Zappalà, V., Cellino, A., and Tanga, P. (2000). NOTE: Estimated Abundance of Atens and Asteroids Evolving on Orbits between Earth and Sun. *Icarus*, 143:421–424.
- Mishchenko, M. I. (1992). The angular width of the coherent back-scatter opposition effect - an application to icy outer planet satellites. *Astrophysics and Space Science*, 194:327–333.
- Mishchenko, M. I., Dlugach, J. M., Liu, L., Rosenbush, V. K., Kiselev, N. N., and Shkuratov, Y. G. (2009). Direct Solutions of the Maxwell Equations Explain Opposition Phenomena Observed for High-Albedo Solar System Objects. *ApJL*, 705:L118–L122.

- Mishchenko, M. I. and Dlugach, Z. M. (1992). The amplitude of the opposition effect due to weak localization of photons in discrete disordered media. *Astrophysics and Space Science*, 189:151–154.
- Morbidelli, A., Bottke, Jr., W. F., Froeschlé, C., and Michel, P. (2002). Origin and Evolution of Near-Earth Objects. In Bottke, Jr., W. F., Cellino, A., Paolicchi, P., and Binzel, R. P., editors, *Asteroids III*, University of Arizona Press, Tucson, pages 409–422.
- Morbidelli, A., Walsh, K. J., O’Brien, D. P., Minton, D. A., and Bottke, W. F. (2015). *The Dynamical Evolution of the Asteroid Belt*, pages 493–507.
- Morozhenko, A. V. and Vidmachenko, A. P. (2013). Shadow mechanism and the opposition effect of brightness of atmosphereless celestial bodies. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 29:228–236.
- Morrison, D. (2003). Impacts and Evolution: Future Prospects. *Astrobiology*, 3:193–205.
- Muironen, K., Belskaya, I. N., Cellino, A., Delbò, M., Lvasseur-Regourd, A.-C., Penttilä, A., and Tedesco, E. F. (2010). A three-parameter magnitude phase function for asteroids. *Icarus*, 209:542–555.
- Muironen, K., Mishchenko, M. I., Dlugach, J. M., Zubko, E., Penttilä, A., and Videen, G. (2012). Coherent Backscattering Verified Numerically for a Finite Volume of Spherical Particles. *ApJ*, 760:118.
- Muironen, K., Piironen, J., Shkuratov, Y. G., Ovcharenko, A., and Clark, B. E. (2002). *Asteroid Photometric and Polarimetric Phase Effects*, pages 123–138.
- Oszkiewicz, D. A., Bowell, E., Wasserman, L. H., Muironen, K., Penttilä, A., Pieniluoma, T., Trilling, D. E., and Thomas, C. A. (2012). Asteroid taxonomic signatures from photometric phase curves. *Icarus*, 219:283–296.
- Penttilä, A., Shevchenko, V. G., Wilkman, O., and Muironen, K. (2016). H, G₁, G₂ photometric phase function extended to low-accuracy data. *Planetary and Space Science*, 123:117–125.
- Polishook, D. (2012). Lightcurves and Spin Periods of Near-Earth Asteroids, The Wise Observatory, 2005 - 2010. *Minor Planet Bulletin*, 39:187–192.

- Pravec, P., Harris, A. W., Kušnirák, P., Galád, A., and Hornoch, K. (2012). Absolute magnitudes of asteroids and a revision of asteroid albedo estimates from WISE thermal observations. *Icarus*, 221:365–387.
- Shkuratov, Y., Ovcharenko, A., Zubko, E., Miloslavskaya, O., Muinonen, K., Piironen, J., Nelson, R., Smythe, W., Rosenbush, V., and Helfenstein, P. (2002). The Opposition Effect and Negative Polarization of Structural Analogs for Planetary Regoliths. *Icarus*, 159:396–416.
- Shkuratov, Y. G., Kreslavsky, M., Ovcharenko, A., Stankevich, D., Zubko, E., Pieters, C., and Arnold, G. (1999). Opposition effect from clementine data and mechanisms of backscatter. *Icarus*, 141(1):132–155.
- Shoemaker, E. M., Williams, J. G., Helin, E. F., and Wolfe, R. F. (1979). Earth-crossing asteroids: orbital classes, population, and fluctuation of population in late geologic time. Technical report.
- Verbiscer, A., French, R., Showalter, M., and Helfenstein, P. (2007). Enceladus: Cosmic Graffiti Artist Caught in the Act. *Science*, 315:815.
- Warner, B. (2004). Book Review: a Practical Guide to Lightcurve Photometry and Analysis / Bdw Publishing, 2003. *Astronomy*, 32(10):90.
- Warner, B. D. (2014). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2014 January-March. *Minor Planet Bulletin*, 41:157–168.
- Warner, B. D. (2016). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2016 April-July. *Minor Planet Bulletin*, 43:311–319.
- Warner, B. D. (2017). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2016 July-September. *Minor Planet Bulletin*, 44:22–36.
- Warner, B. D., Harris, A. W., and Pravec, P. (2009). The asteroid lightcurve database. *Icarus*, 202:134–146.
- Wisniewski, W. Z., Michałowski, T. M., Harris, A. W., and McMillan, R. S. (1997). Photometric Observations of 125 Asteroids. *Icarus*, 126:395–449.

Appendix A

Condições observacionais e magnitude reduzida dos NEO observados

No que segue são dadas as condições observacionais dos 29 asteroides estudados. Assim como as magnitudes reduzidas utilizadas para a determinação das curvas de fase dadas no capítulo 3.

Asteroide	Data	Δ (UA)	r (UA)	α	Magnitude reduzida	Erro
(3360) Syrinx	23/11/2016	1,128	2,067	11,4	-	-
	24/11/2016	1,132	2,077	10,7	-	-
	25/11/2016	1,137	2,087	10,0	-	-
4055 Magellan	21/02/2017	1,349	2,305	8,2	-	-
	22/02/2017	1,343	2,303	7,7	-	-
	05/03/2017	1,290	2,281	1,7	-	-
(16816) 1997 UF9	23/10/2016	0,151	1,142	3,0	18,377	0,141
	24/10/2016	0,147	2,139	2,5	-	-
	24/10/2016	0,146	2,138	2,4	-	-
	26/10/2016	0,138	2,131	1,3	18,160	0,216
	26/10/2016	0,138	2,131	1,2	18,199	0,265
	27/10/2016	0,135	2,135	1,0	18,171	0,229
	27/10/2016	0,134	2,128	1,0	18,058	0,275
(34613) 2000 UR13	28/10/2016	0,131	2,124	1,2	-	-
	21/01/2017	1,185	2,169	1,2	-	-
	22/01/2017	1,181	2,164	1,2	-	-

Asteroide	Data	Δ (UA)	r (UA)	α	Magnitude reduzida	Erro
	23/01/2017	1,177	2,160	1,5	-	-
	24/01/2017	1,173	2,156	2,0	-	-
	25/01/2017	1,169	2,152	2,5	-	-
	26/01/2017	1,166	2,147	3,1	-	-
	27/01/2017	1,163	2,143	3,6	-	-
	03/02/2017	1,149	2,111	8,0	-	-
(36236) 1999 VV	23/11/2016	0,893	1,865	7,7	-	-
	24/11/2016	0,894	1,867	7,5	16,104	0,155
	25/11/2016	0,896	1,868	7,6	16,310	0,020
	28/11/2016	0,904	1,872	8,3	16,254	0,199
	29/11/2016	0,908	1,873	8,8	-	-
	02/12/2016	0,921	1,877	10,4	16,320	0,293
	03/12/2016	0,926	1,878	11,1	16,432	0,294
	04/12/2016	0,932	1,879	11,7	16,499	0,095
	06/12/2016	0,944	1,882	13,0	16,621	0,325
(40267) 1999 GJ4	21/02/2017	0,611	1,596	5,0	15,710	0,374
	22/02/2017	0,622	1,606	6,1	15,846	0,307
	22/02/2017	0,623	1,607	6,2	-	-
	25/02/2017	0,659	1,635	9,3	16,790	0,465
	25/02/2017	0,660	1,636	9,4	-	-
	03/03/2017	0,741	1,690	14,8	17,042	0,769
	05/03/2017	0,771	1,708	17,3	-	-
(138846) 2000 VJ61	25/11/2016	0,927	1,787	21,7	16,832	0,025
	28/11/2016	0,884	1,764	20,5	16,832	0,169
	02/12/2016	0,829	1,734	18,8	16,612	0,269
	04/12/2016	0,803	1,718	17,9	16,597	0,083
(175189) 2005 EC224	21/03/2017	0,537	1,532	3,1	18,330	0,113
	23/03/2017	0,529	1,523	4,7	18,398	0,266
	24/03/2017	0,525	1,518	5,6	18,424	0,099
	25/03/2017	0,521	1,514	6,5	18,512	0,094
	26/03/2017	0,518	1,509	7,3	18,592	0,110
	27/03/2017	0,514	1,504	8,2	18,626	0,101
(203217) 2001 FX9	23/11/2016	0,443	1,421	9,6	18,970	0,284
	28/11/2016	0,428	1,408	8,1	19,015	0,341
	03/12/2016	0,412	1,393	7,8	19,018	0,277
	04/12/2016	0,410	1,390	7,9	19,034	0,286

Asteroide	Data	Δ (UA)	r (UA)	α	Magnitude reduzida	Erro
(326683) 2002 WP	06/12/2016	0,405	1,384	8,5	19,440	0,266
	26/11/2016	0,169	1,141	21,9	18,861	0,139
	02/12/2016	0,156	1,138	10,7	18,751	0,247
	03/12/2016	0,154	1,138	8,8	-	-
	04/12/2016	0,153	1,138	6,9	18,521	0,078
(370702) 2004 NC9	06/12/2016	0,152	1,137	3,7	18,458	0,307
	21/02/2017	0,681	1,668	3,5	-	-
	22/02/2017	0,673	1,661	2,8	-	-
	03/03/2017	0,614	1,660	6,1	-	-
	04/03/2017	0,609	1,593	7,0	-	-
(438955) 2010 LN14	05/03/2017	0,603	1,586	8,0	-	-
	25/01/2017	0,104	1,083	17,8	21,217	0,273
	26/01/2017	0,110	1,091	14,8	-	-
	27/01/2017	0,117	1,099	12,1	-	-
	03/02/2017	0,170	1,154	6,3	20,953	0,368
(464797) 2004 FZ1	04/02/2017	0,177	1,162	7,4	20,951	0,574
	27/08/2016	0,285	1,291	8,5	-	-
	27/08/2016	0,286	1,292	8,6	-	-
	27/08/2016	0,287	1,292	8,8	18,110	0,084
	29/08/2016	0,307	1,308	12,0	18,143	0,055
	29/08/2016	0,307	1,308	12,2	18,222	0,051
	29/08/2016	0,308	1,309	12,3	18,222	0,053
	30/08/2016	0,319	1,316	14,0	-	-
	31/08/2016	0,330	1,323	15,5	-	-
	01/08/2016	0,343	1,331	17,2	-	-
	01/08/2016	0,345	1,333	17,4	18,331	0,121
	02/08/2016	0,356	1,339	18,7	-	-
	02/08/2016	0,357	1,340	18,9	-	-
	02/08/2016	0,358	1,341	19,0	-	-
	(469634) 2004 SZ19	05/08/2016	0,398	1,363	22,7	-
05/08/2016		0,399	1,364	22,8	-	-
31/08/2016		0,271	1,253	23,3	-	-
01/09/2016		0,268	1,253	22,0	-	-
02/09/2016		0,268	1,253	21,9	-	-
02/09/2016		0,266	1,253	20,8	-	-
02/09/2016		0,266	1,253	20,6	-	-
02/09/2016		0,266	1,253	20,6	-	-

Asteroide	Data	Δ (UA)	r (UA)	α	Magnitude reduzida	Erro
	05/09/2016	0,260	1,254	16,8	-	-
	05/09/2016	0,260	1,254	16,7	-	-
	24/09/2016	0,289	1,272	19,2	19,770	0,241
	24/09/2016	0,290	1,272	19,3	-	-
	25/09/2016	0,294	1,273	20,2	19,820	0,109
	26/09/2016	0,299	1,275	21,3	-	-
	27/09/2016	0,304	1,276	22,4	-	-
	28/09/2016	0,309	1,278	23,0	19,917	0,230
	29/09/2016	0,314	1,280	24,2	19,943	0,226
(470510) 2008 CJ116	27/08/2016	0,236	1,246	0,4	18,993	0,092
	27/08/2016	0,236	1,246	0,3	-	-
	27/08/2016	0,235	1,246	0,1	18,624	0,129
	29/08/2016	0,231	1,240	1,9	18,833	0,087
	29/08/2016	0,230	1,240	2,0	18,935	0,055
	29/08/2016	0,230	1,239	2,2	19,156	0,058
	29/08/2016	0,230	1,239	2,3	-	-
	30/08/2016	0,228	1,237	3,0	-	-
	30/08/2016	0,228	1,237	3,2	-	-
	31/08/2016	0,225	1,233	4,5	18,928	0,207
	01/09/2016	0,223	1,231	5,5	-	-
	01/09/2016	0,222	1,230	5,8	-	-
	02/09/2016	0,221	1,227	6,8	-	-
	02/09/2016	0,220	1,227	6,9	-	-
	05/09/2016	0,215	1,219	10,6	-	-
(471241) 2011 BX18	27/08/2016	0,334	1,291	28,6	18,739	0,116
	27/08/2016	0,334	1,291	28,5	18,753	0,151
	01/09/2016	0,381	1,345	24,1	18,489	0,179
	02/09/2016	0,389	1,354	23,5	-	-
	05/09/2016	0,420	1,386	21,6	-	-
(474163) 1999 SO5	02/10/2016	0,171	1,157	22,4	21,463	0,252
	03/10/2016	0,169	1,157	21,0	21,280	0,133
	04/10/2016	0,168	1,157	19,6	20,847	0,372
	07/10/2016	0,164	1,157	15,5	20,823	0,333
(474238) 2001 RU17	04/09/2016	0,159	1,659	12,2	-	-
	05/09/2016	0,157	1,162	11,1	-	-
	07/09/2016	0,153	1,158	9,7	-	-

Asteroide	Data	Δ (UA)	r (UA)	α	Magnitude reduzida	Erro	
(480004) 2014 KD91	08/09/2016	0,151	1,156	9,8	-	-	
	24/09/2016	0,446	1,382	26,6			
	25/09/2016	0,435	1,375	25,9	18,237	0,136	
	27/09/2016	0,413	1,362	24,6	18,237	0,425	
	27/09/2016	0,412	1,362	25,6	-	-	
	28/09/2016	0,401	1,355	23,9	18,153	0,294	
	28/09/2016	0,401	1,355	23,8	18,120	0,264	
	29/09/2016	0,391	1,349	23,1	18,311	0,279	
	02/10/2016	0,359	1,329	20,5	17,928	0,557	
	02/10/2016	0,358	1,329	20,4	-	-	
	04/10/2016	0,340	1,317	18,5	17,993	0,264	
(484506) 2008 ER7	07/10/2016	0,312	1,297	14,8	17,837	0,279	
	19/02/2017	0,228	1,192	24,4	-	-	
	21/02/2017	0,241	1,212	19,9	-	-	
	22/02/2017	0,248	1,223	17,9	20,609	0,315	
	24/02/2017	0,263	1,243	13,8	-	-	
	01/03/2017	0,305	1,294	5,3	-	-	
	02/03/2017	0,314	1,304	4,0	-	-	
	03/03/2017	0,322	1,314	2,9	20,109	0,318	
	04/03/2017	0,333	1,324	2,4	20,124	0,321	
	(489337) 2006 UM	23/11/2016	0,221	1,199	15,1	18,065	0,722
		24/11/2016	0,217	1,194	16,3	18,877	0,149
25/11/2016		0,213	1,187	17,8	-	-	
29/11/2016		0,199	1,165	23,9	19,241	0,388	
2001 QE34	21/01/2017	0,384	1,366	5,5	18,572	0,606	
	22/01/2017	0,372	1,353	6,1	-	-	
	23/01/2017	0,362	1,343	6,7	19,135	0,063	
	24/01/2017	0,351	1,3331	7,8	19,259	0,304	
	25/01/2017	0,340	1,319	9,0	-	-	
	26/01/2017	0,329	1,307	10,4	-	-	
	27/01/2017	0,319	1,295	11,8	-	-	
	29/01/2017	0,299	1,271	15,1	-	-	
2005 TF	02/10/2016	0,253	1,245	13,5	20,625	0,421	
	03/10/2016	0,247	1,240	13,0	-	-	
	04/10/2016	0,242	1,235	12,5	20,858	0,693	
	07/10/2016	0,225	1,219	11,0	-	-	

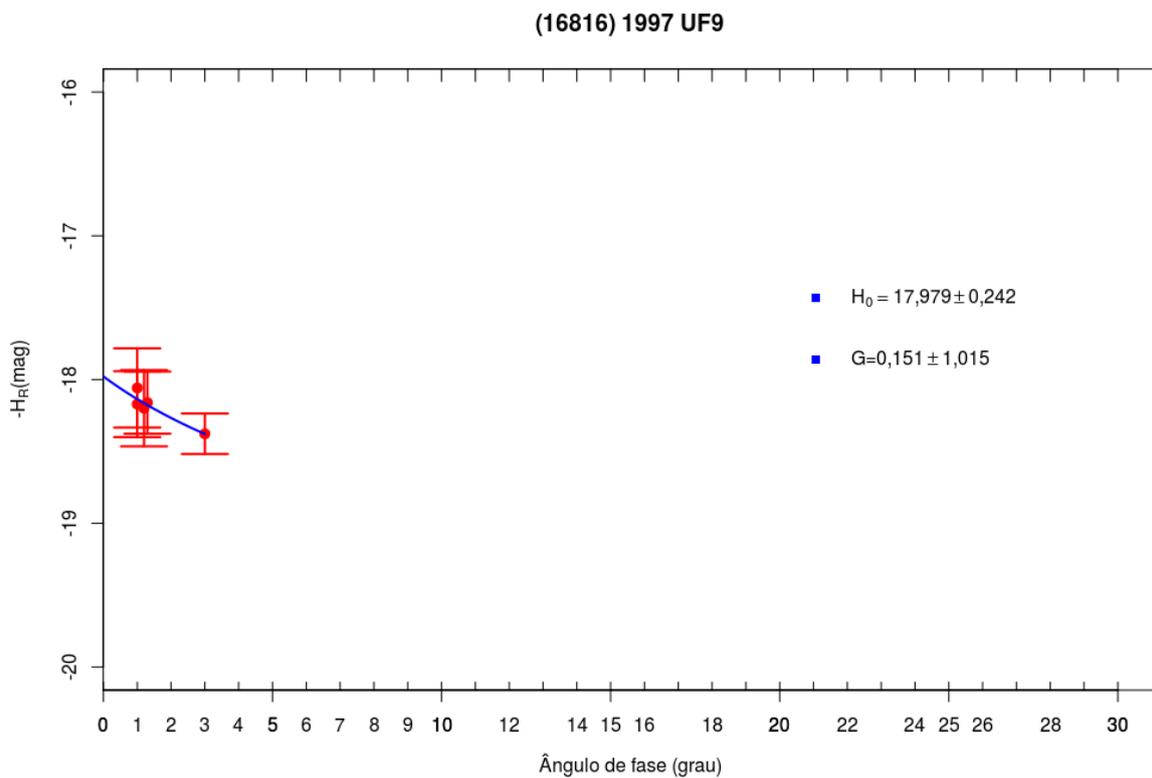
Asteroide	Data	Δ (UA)	r (UA)	α	Magnitude reduzida	Erro
2014 AD17	23/10/2016	0,153	1,148	4,4	19,896	0,151
	26/10/2016	0,143	1,136	4,6	19,867	0,230
	27/10/2016	0,140	1,133	4,8	20,056	0,236
	28/10/2016	0,137	1,129	5,1	-	-
	21/01/2017	0,223	1,205	7,4	-	-
	22/01/2017	0,225	1,206	8,1	15,993	0,154
	24/01/2017	0,228	1,209	9,3	-	-
	25/01/2017	0,230	1,210	10,1	-	-
	26/01/2017	0,232	1,212	10,7	-	-
	27/01/2017	0,235	1,214	11,4	-	-
2016 RP33	03/02/2017	0,255	1,228	15,9	17,848	0,506
	04/02/2017	0,258	1,231	16,5	18,154	0,744
	24/09/2016	0,231	1,232	7,6	19,601	0,247
	24/09/2016	0,232	1,232	7,7	19,543	0,242
	25/09/2016	0,234	1,233	9,0	19,683	0,146
	25/09/2016	0,234	1,233	9,1	19,676	0,110
	25/09/2016	0,235	1,234	9,2	19,719	0,09
	26/09/2016	0,238	1,235	10,5	-	-
	27/09/2016	0,242	1,237	11,9	-	-
	27/09/2016	0,242	1,237	12,0	-	-
	27/09/2016	0,242	1,238	12,1	-	-
	28/09/2016	0,246	1,240	13,3	19,876	0,230
	29/09/2016	0,251	1,242	14,6	-	-
	29/09/2016	0,251	1,242	14,7	20,138	0,220
	2016 WJ1	02/10/2016	0,265	1,249	18,2	-
02/10/2016		0,266	1,250	18,3	-	-
04/10/2016		0,277	1,255	20,3	-	-
04/10/2016		0,277	1,255	20,4	-	-
07/10/2016		0,295	1,264	23,1	-	-
26/11/2016		0,164	1,150	5,5	21,533	0,162
28/11/2016		0,148	1,133	7,7	21,567	0,187
02/12/2016		0,119	1,100	15,3	21,799	0,225
03/12/2016		0,111	1,091	18,0	21,850	0,290
04/12/2016		0,104	1,082	20,9	21,967	0,101
2017 AC5	06/12/2016	0,091	1,065	27,5	22,254	0,350
	21/03/2017	0,218	1,211	9,6	19,988	0,113

Asteroide	Data	Δ (UA)	r (UA)	α	Magnitude reduzida	Erro
2017 AF5	23/03/2017	0,215	1,207	11,5	20,058	0,266
	24/03/2017	0,214	1,205	12,4	20,444	0,098
	25/03/2017	0,213	1,203	13,4	20,537	0,106
	26/03/2017	0,212	1,202	14,3	21,097	0,128
	27/03/2017	0,211	1,200	15,3	-	-
	21/01/2017	0,546	1,502	16,5	18,154	0,244
	24/01/2017	0,581	1,549	11,0	18,079	0,387
	25/01/2017	0,594	1,564	10,1	-	-
	26/01/2017	0,608	1,580	9,3	18,001	0,233
	27/01/2017	0,622	1,595	8,8	-	-
2017 CR32	29/01/2017	0,651	1,625	8,4	-	-
	21/03/2017	0,073	1,069	6,2	22,617	0,116
	23/03/2017	0,073	1,070	0,8	22,418	0,244
	24/03/2017	0,073	1,070	1,9	22,486	0,090
	25/03/2017	0,073	1,071	4,6	22,542	0,093
	26/03/2017	0,074	1,071	7,2	22,638	0,114
	27/03/2017	0,075	1,072	9,8	-	-

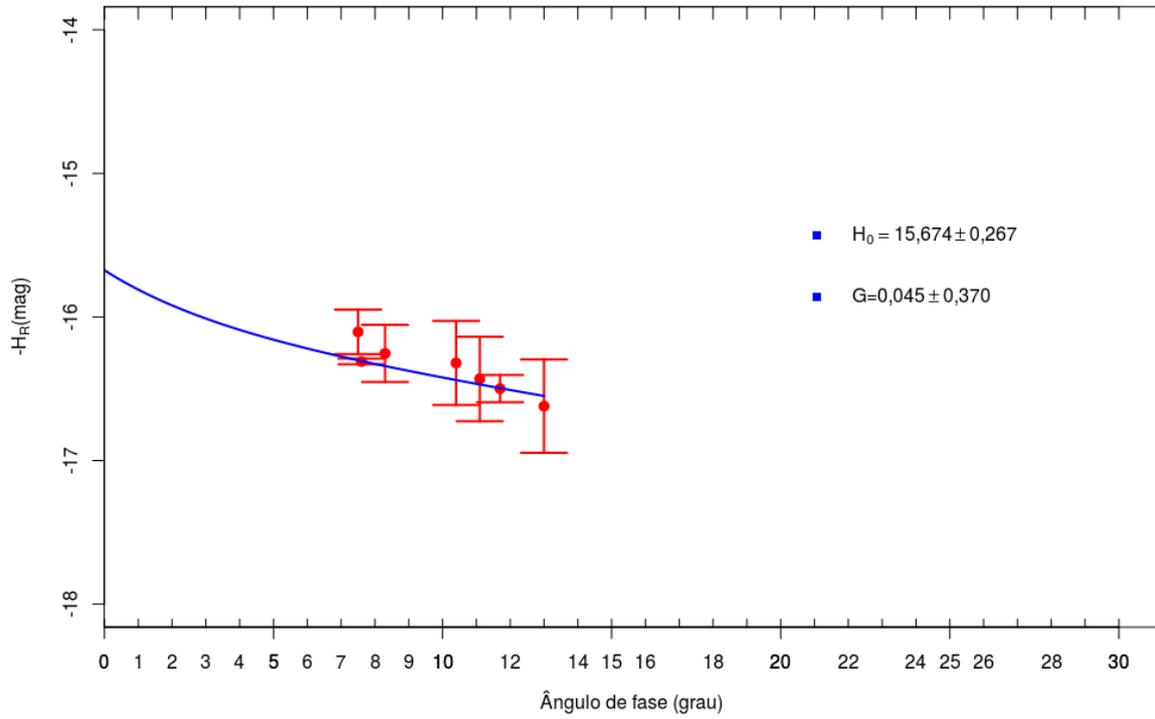
Appendix B

Curva de fase dos 24 NEO

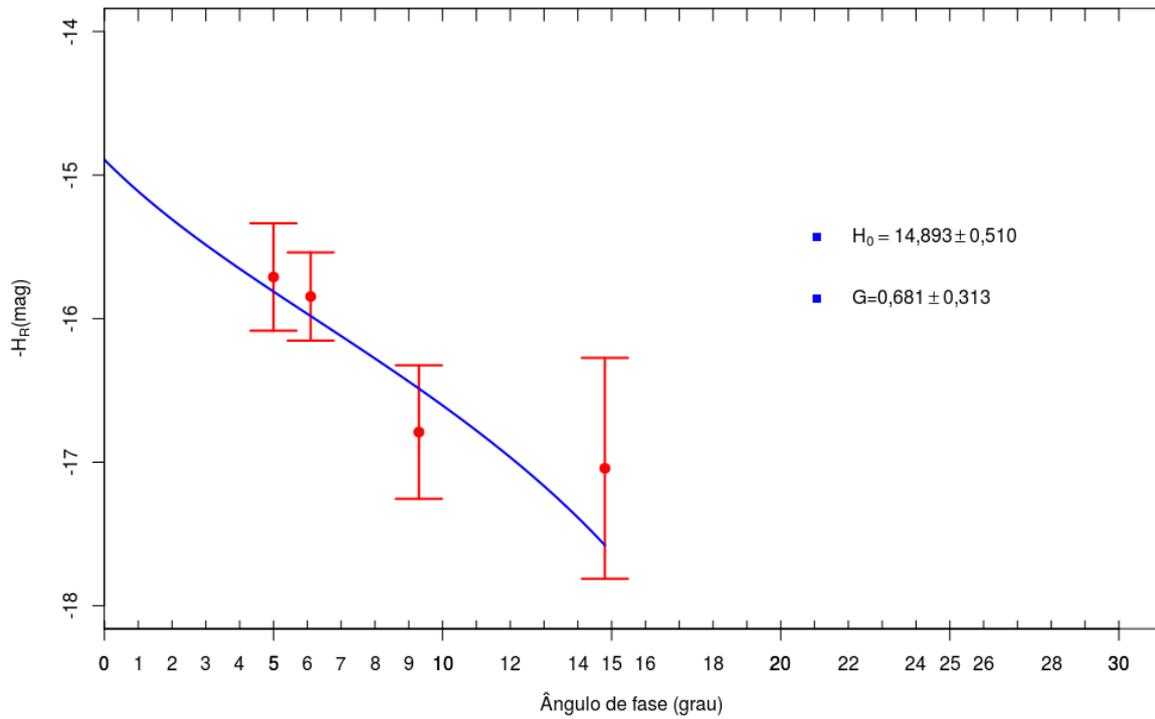
Aqui mostramos, de forma ampliada, as 24 curvas de fase dos objetos discutidos no capítulo 3 para uma melhor visualização.



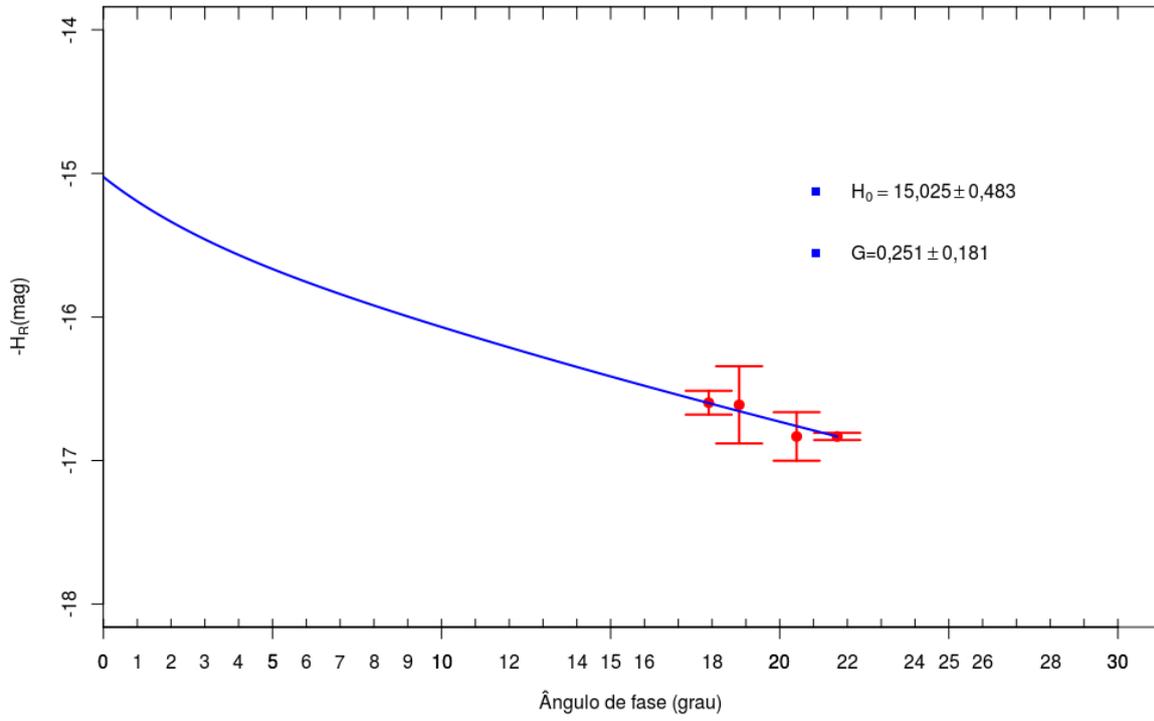
(36236) 1999 VV



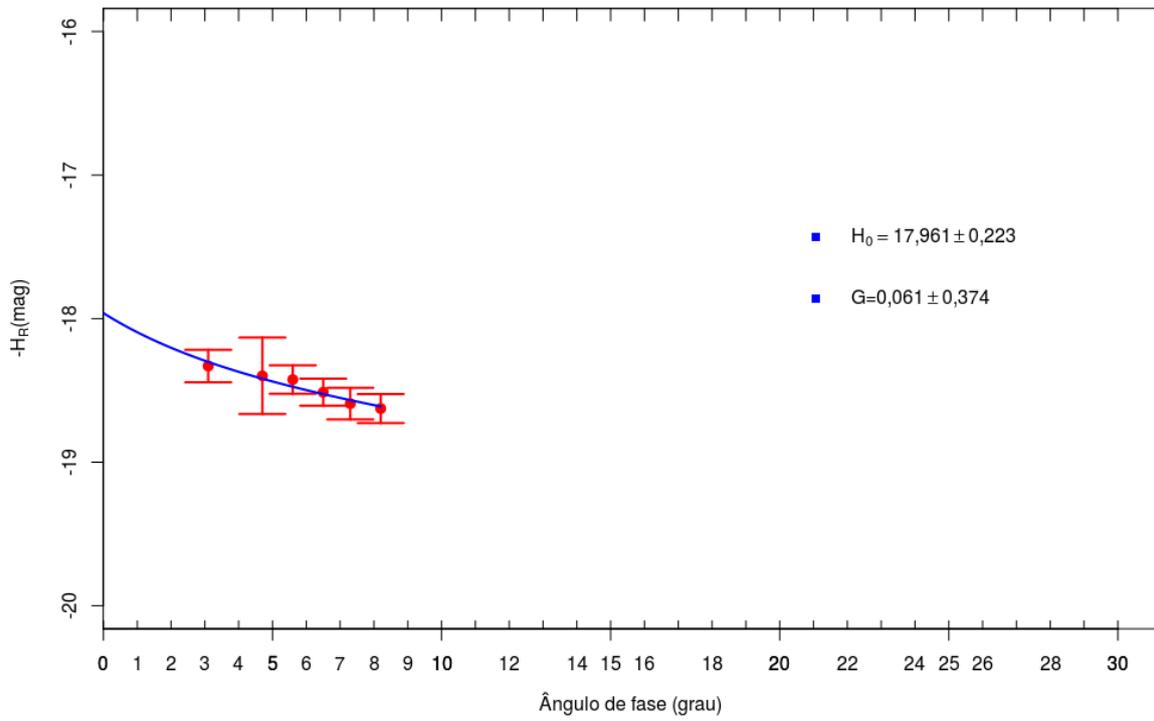
(40267) 1999 GJ4



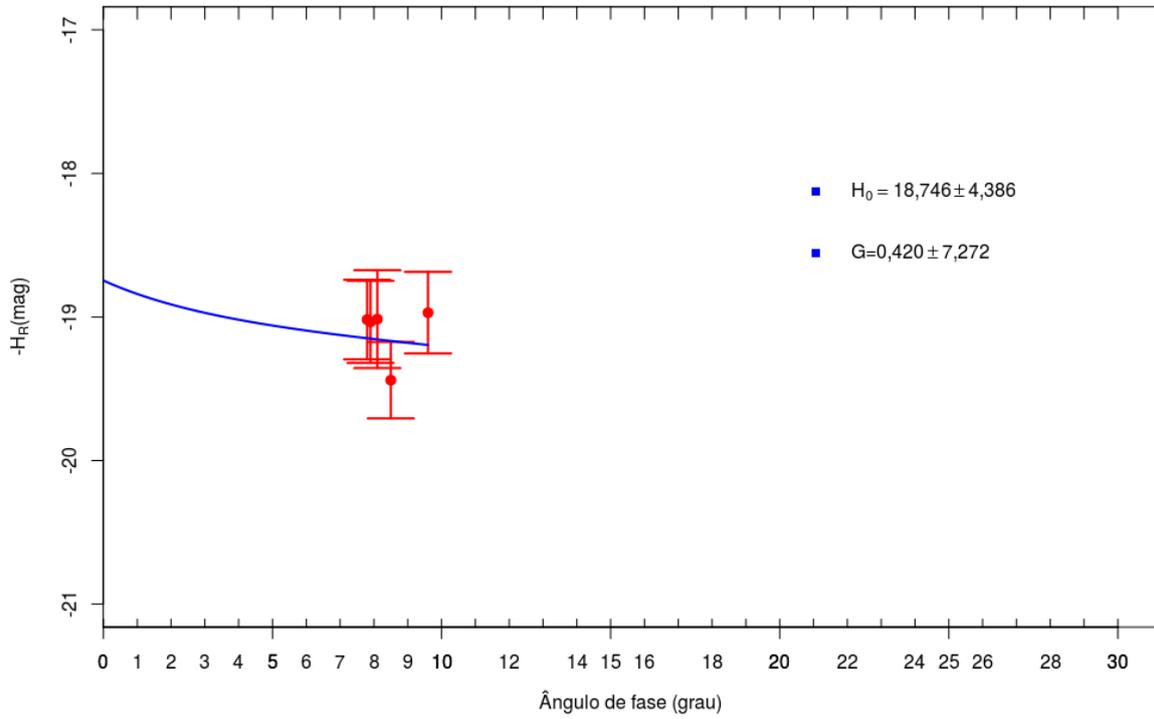
(138846) 2000 VJ61



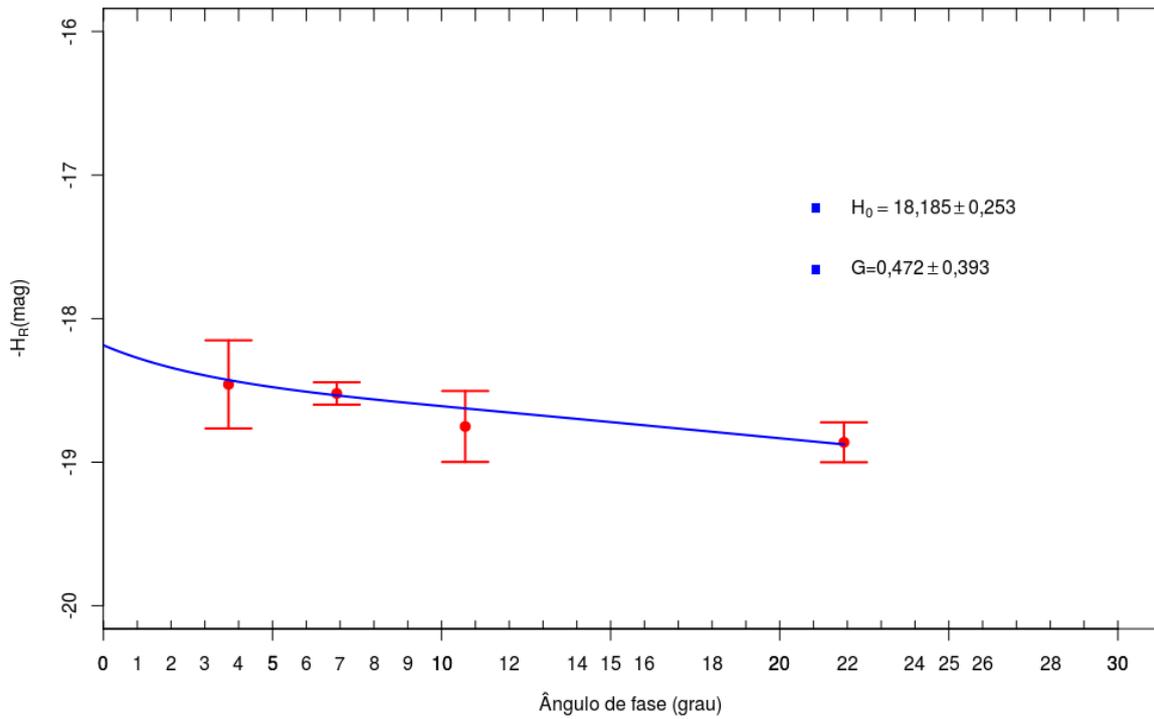
(175189) 2005 EC224



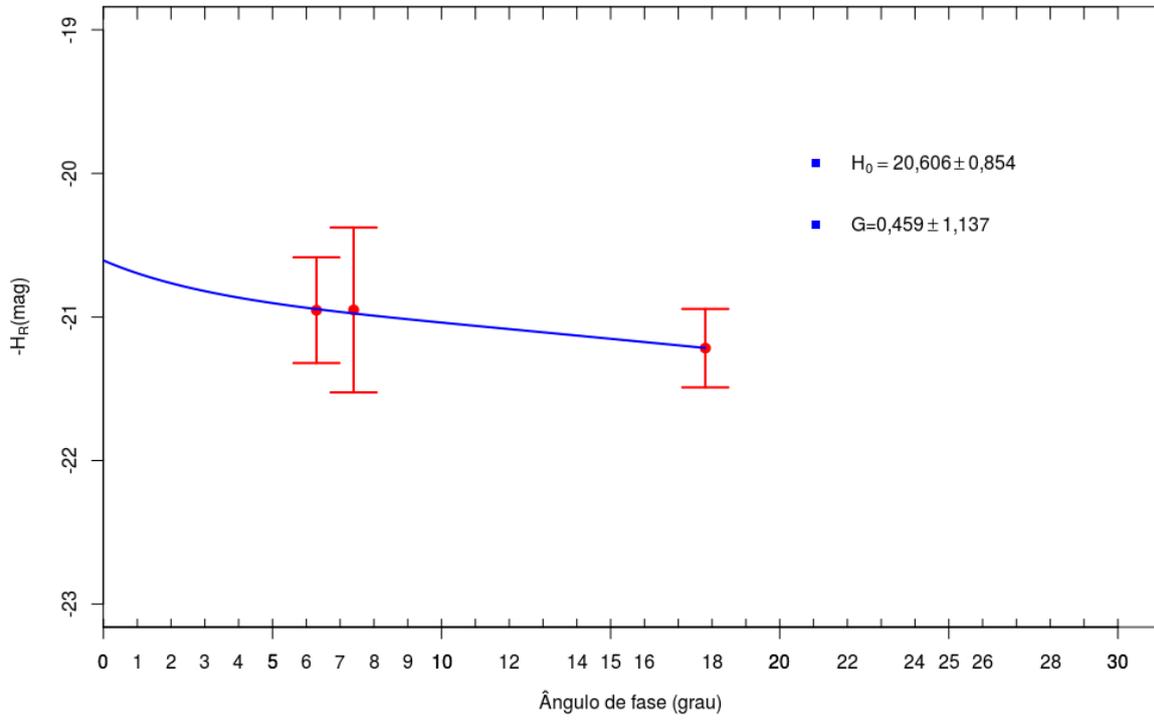
(203217) 2001 FX9



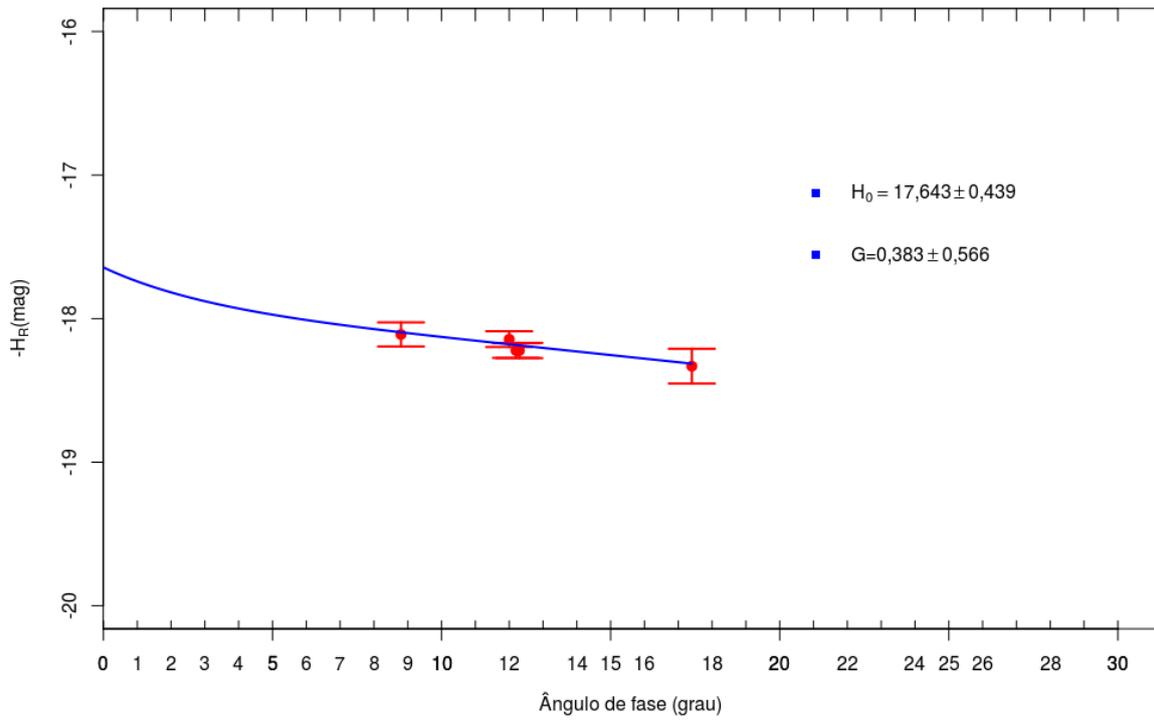
(326683) 2002 WP



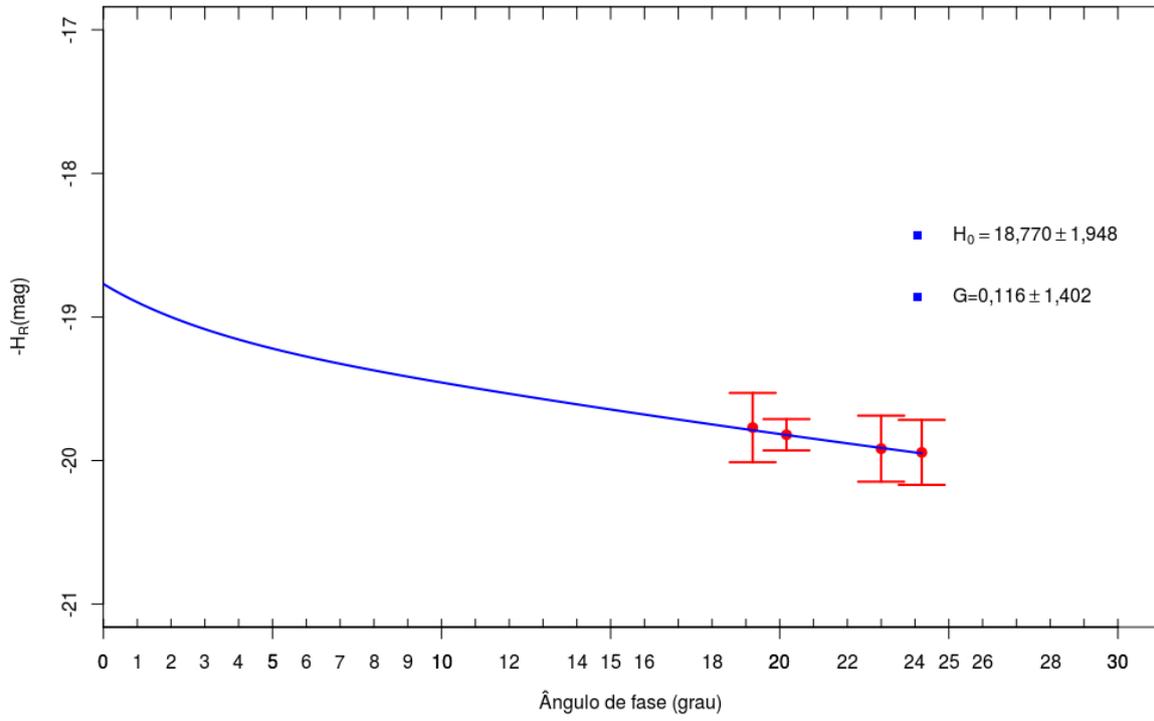
(438955) 2010 LN14



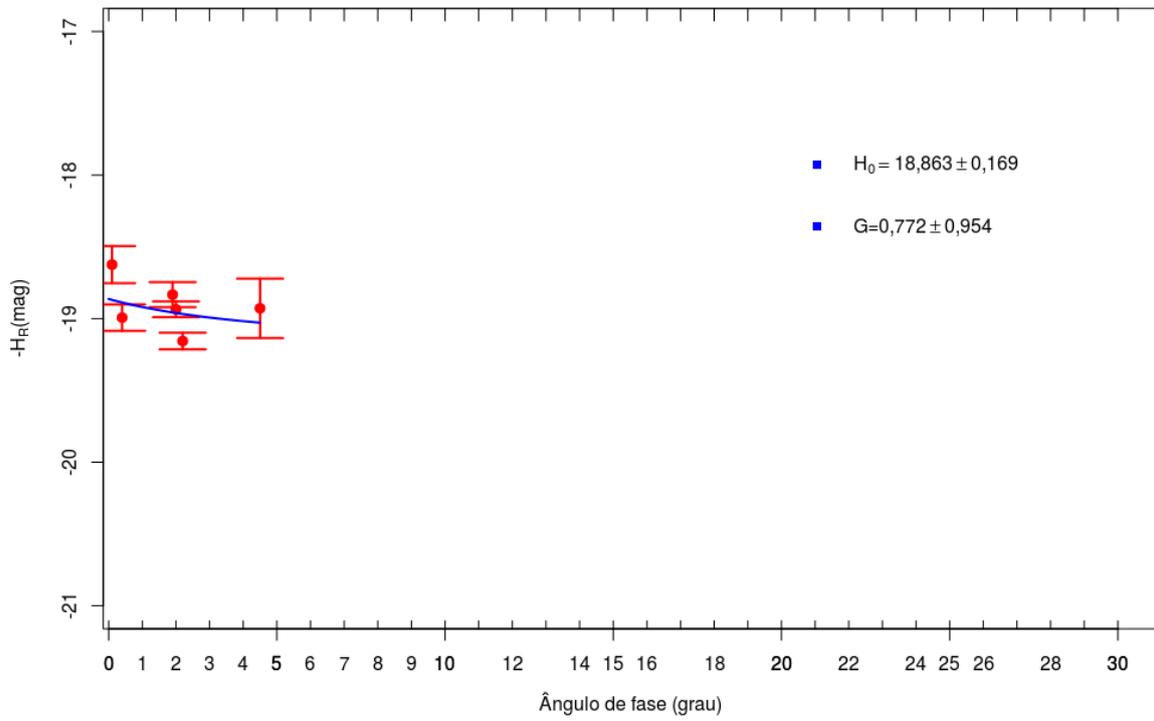
(464797) 2004 FZ1



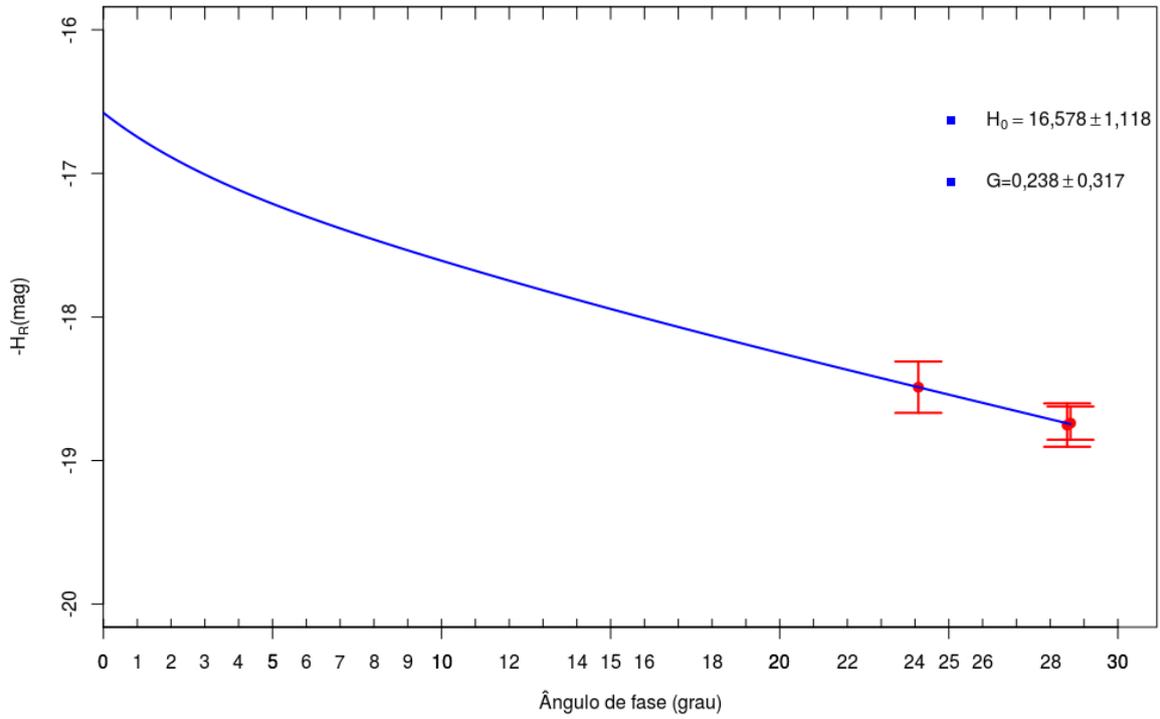
(469634) 2004 SZ19



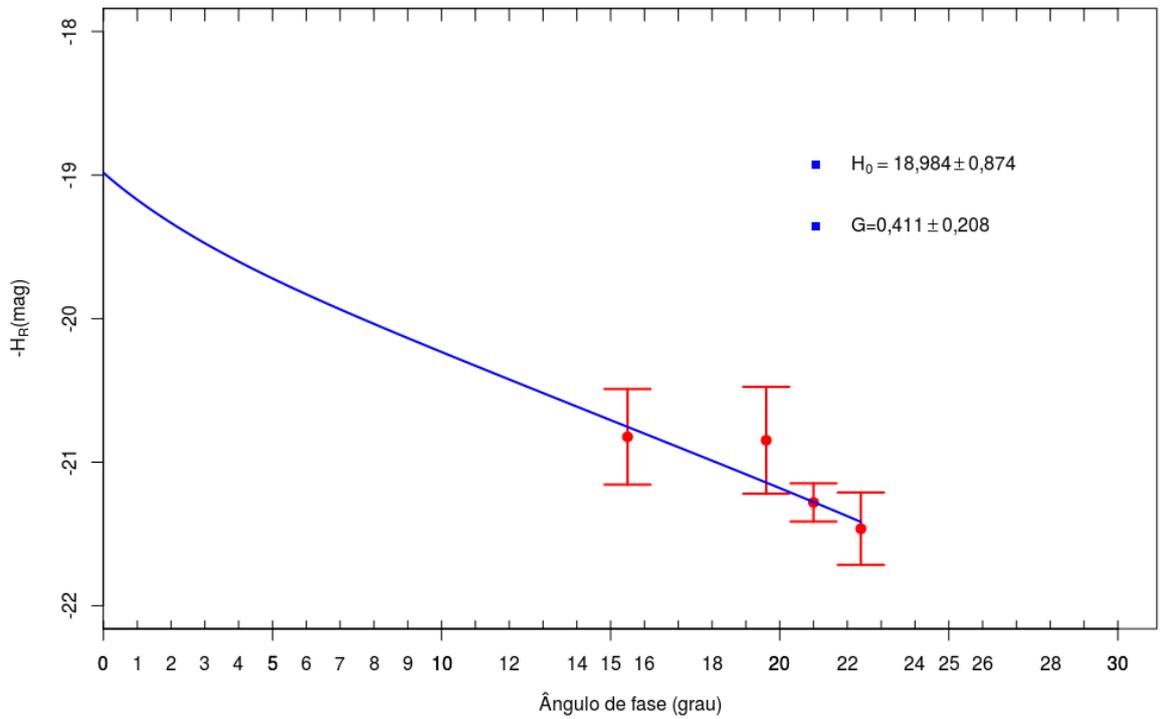
(470510) 2008 CJ116



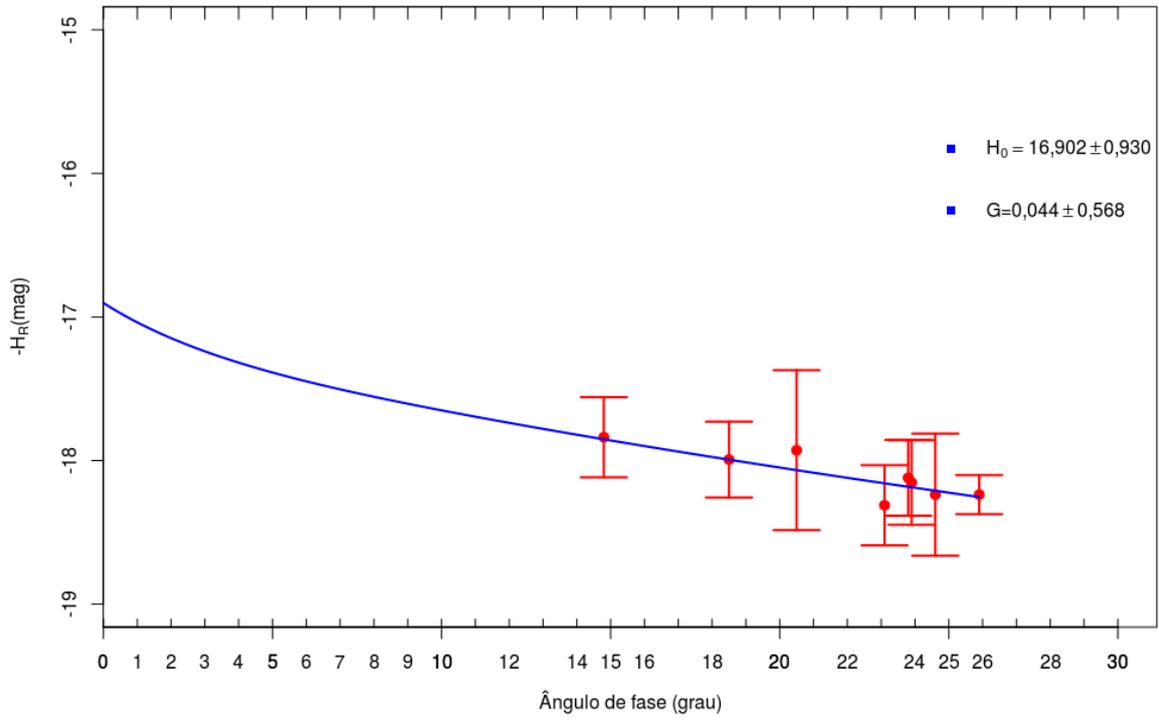
(471241) 2011 BX18



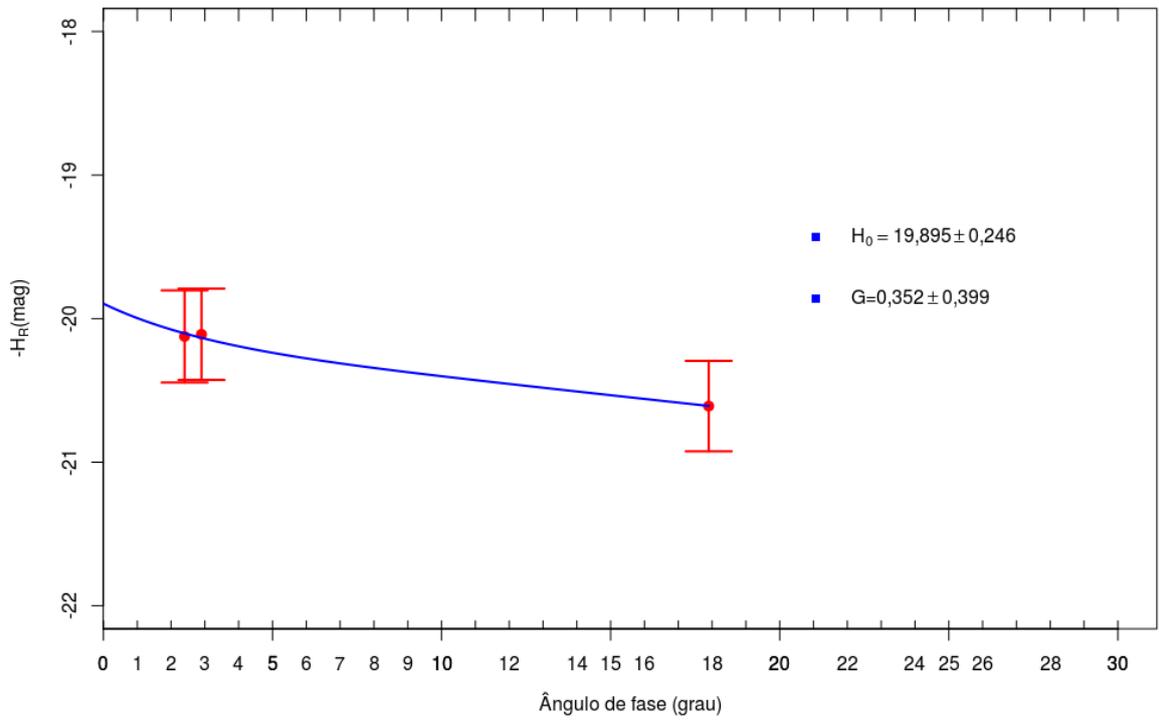
(474163) 1999 SO5



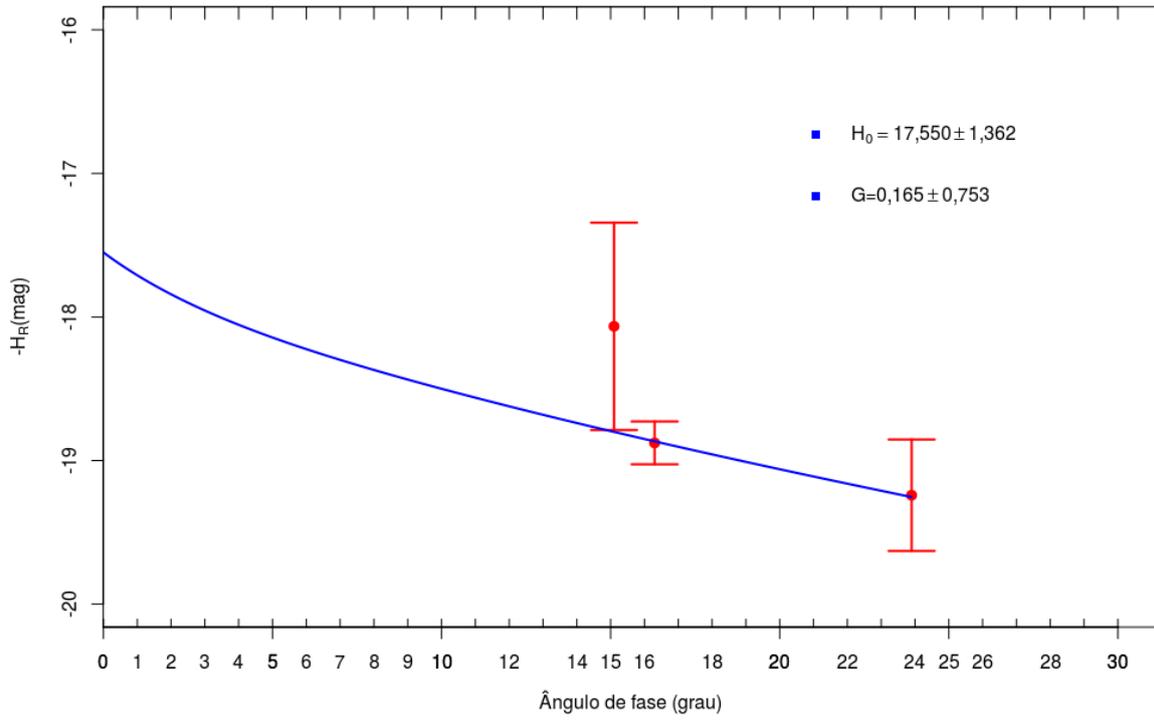
(480004) 2014KD91



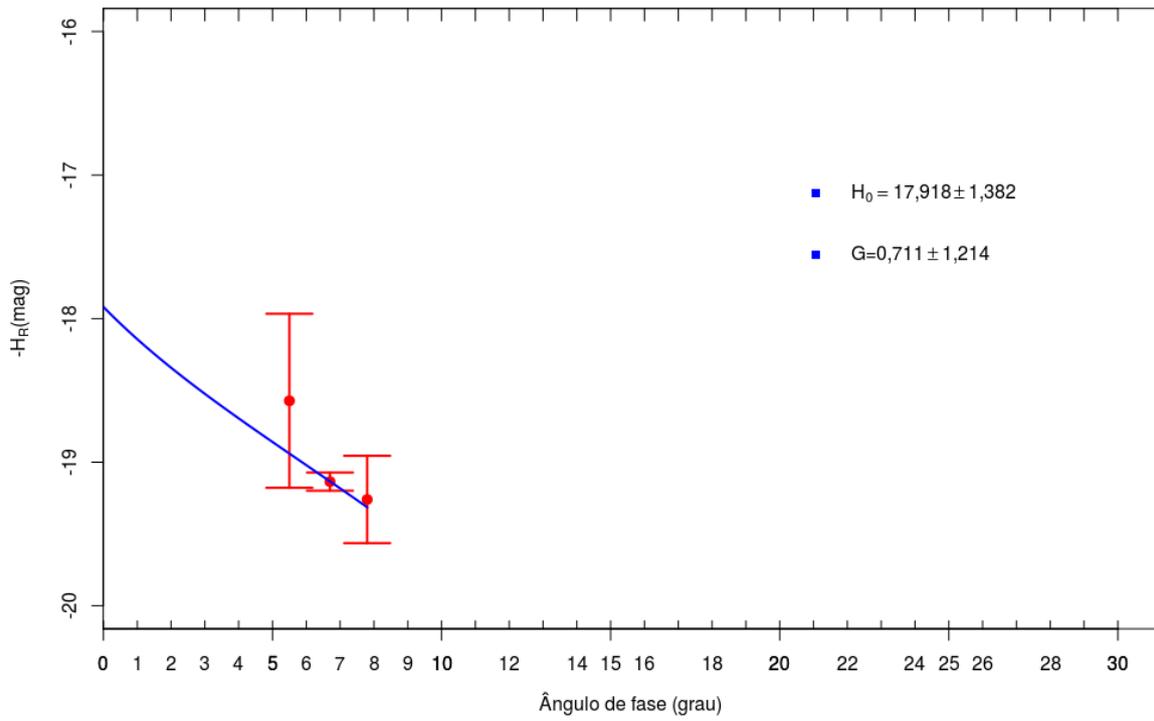
(484506) 2008 ER7



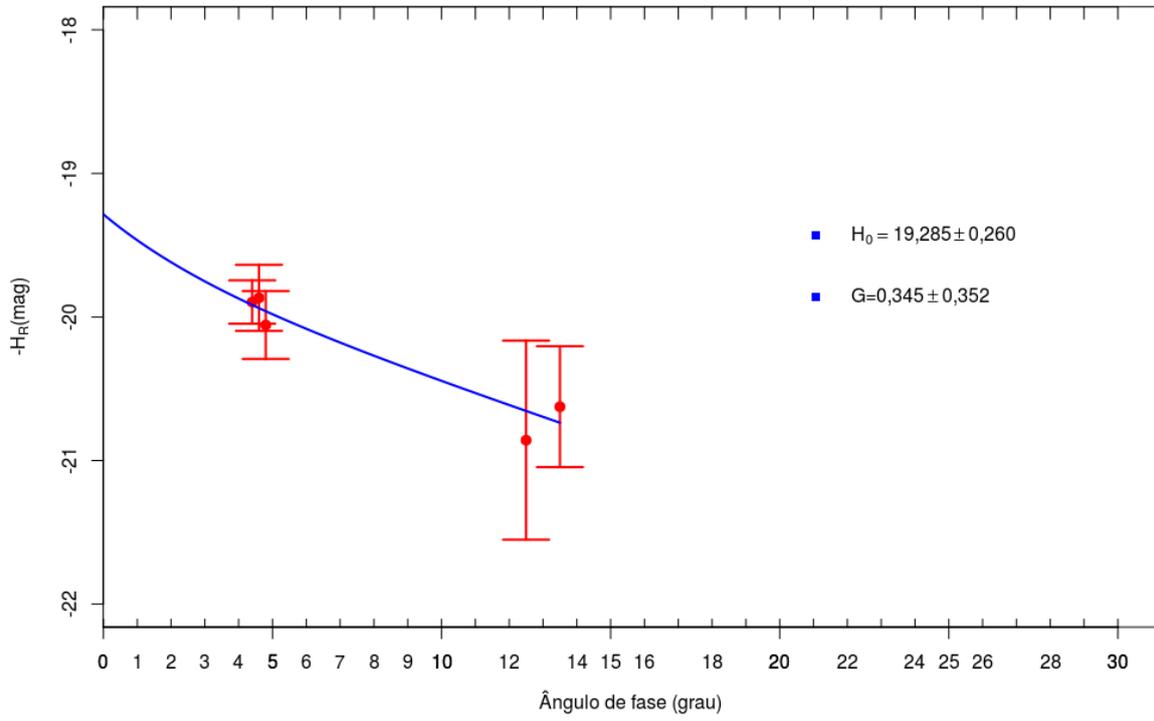
(489337) 2006 UM



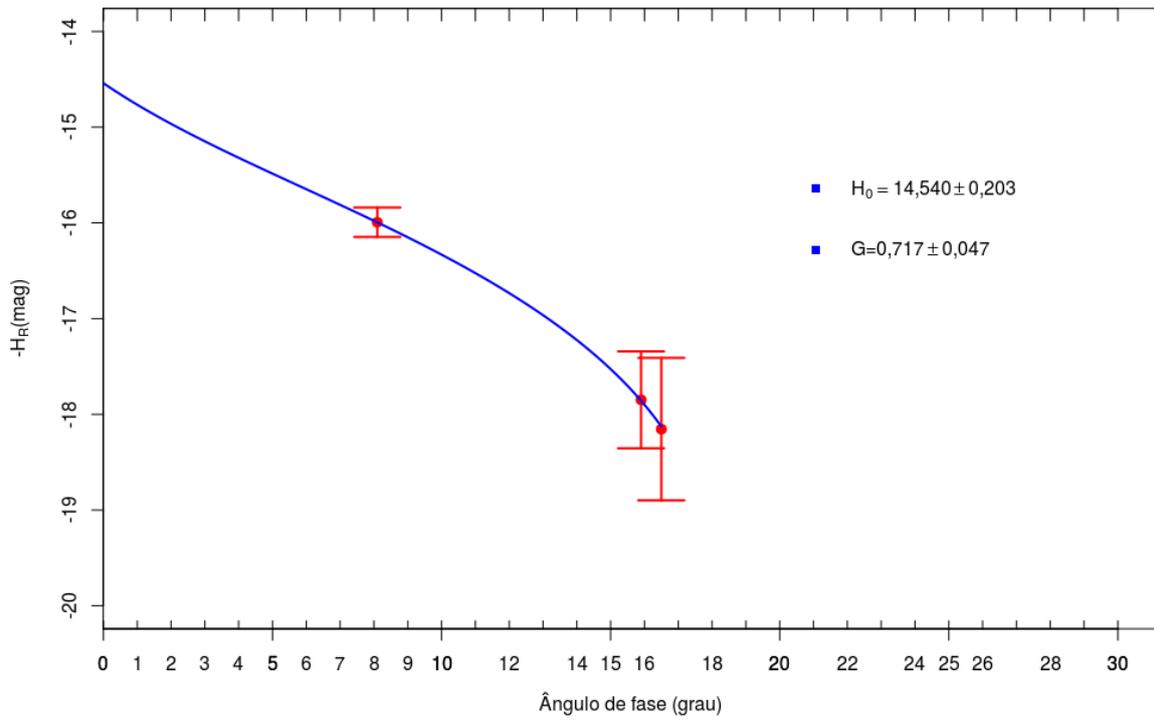
2001 QE34



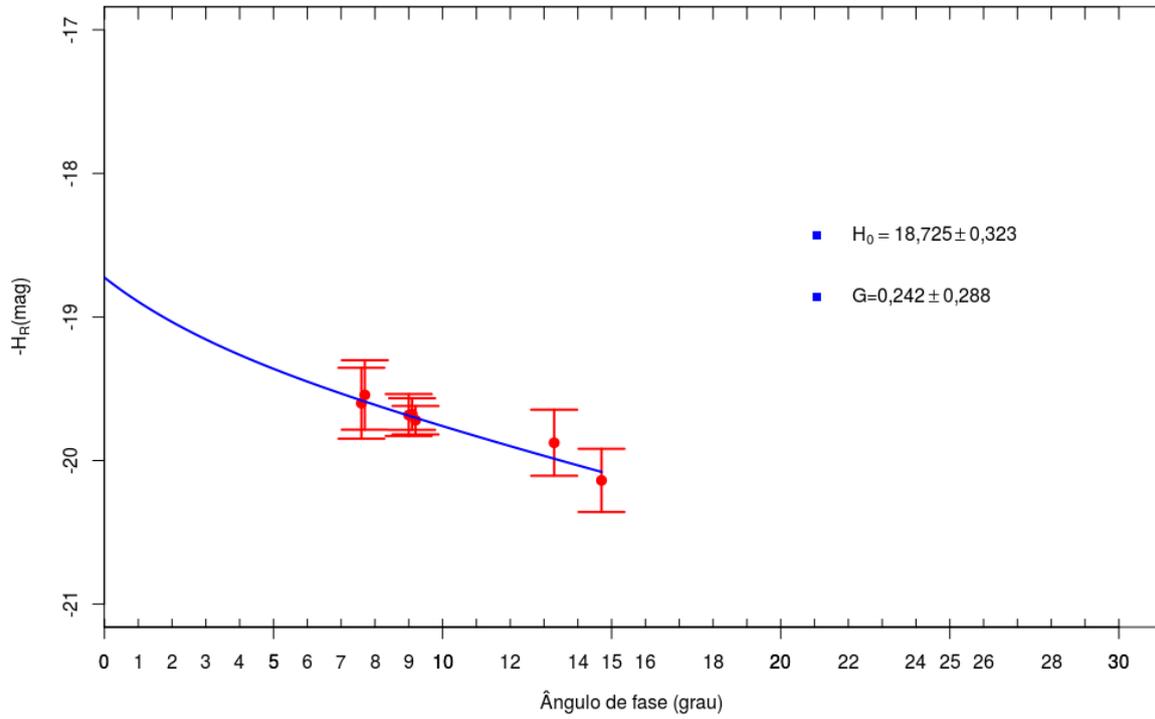
2005 TF



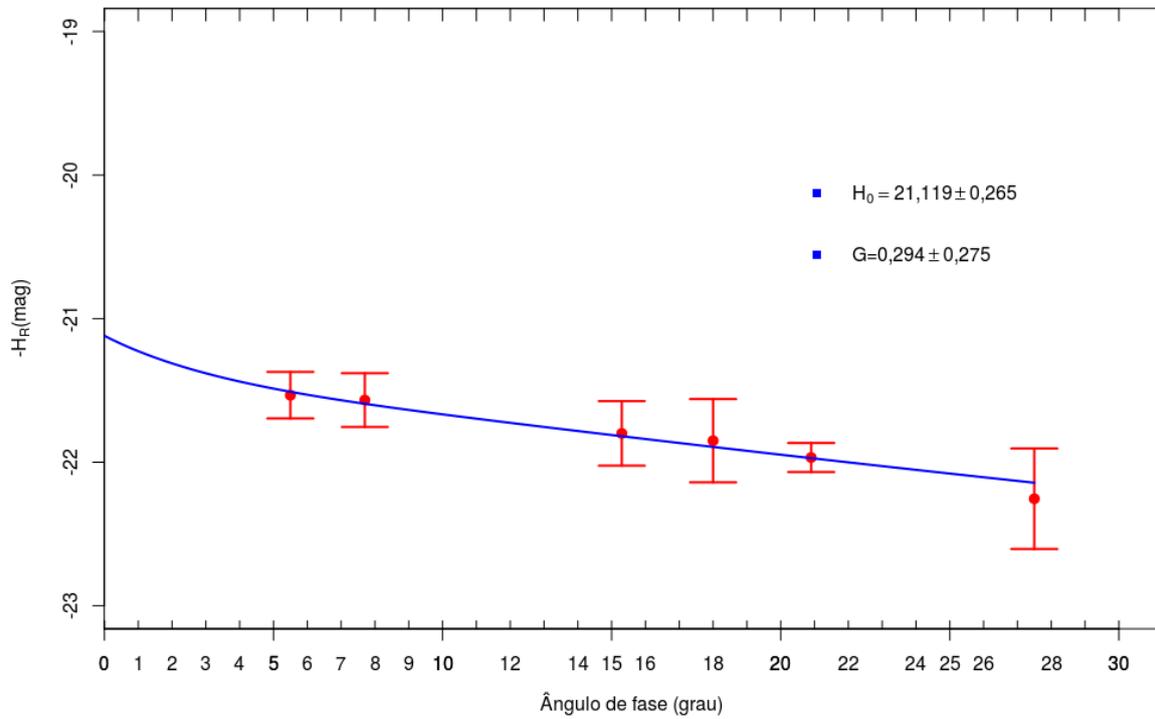
2014 AD17



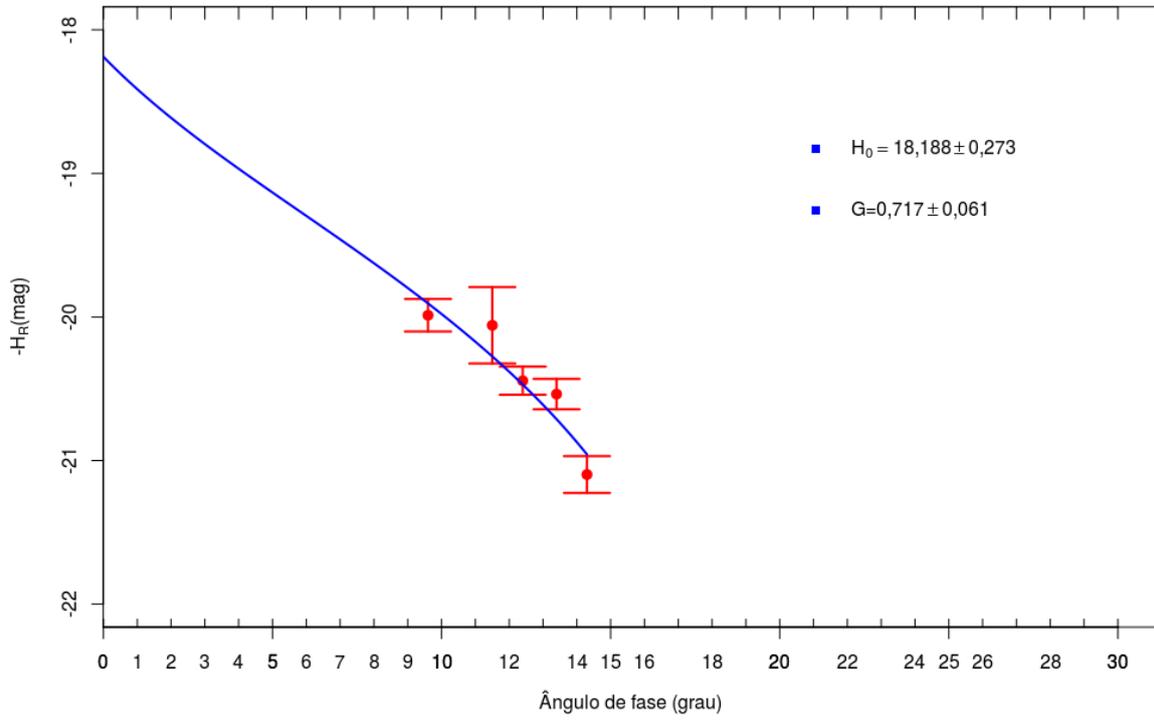
2016 RP33



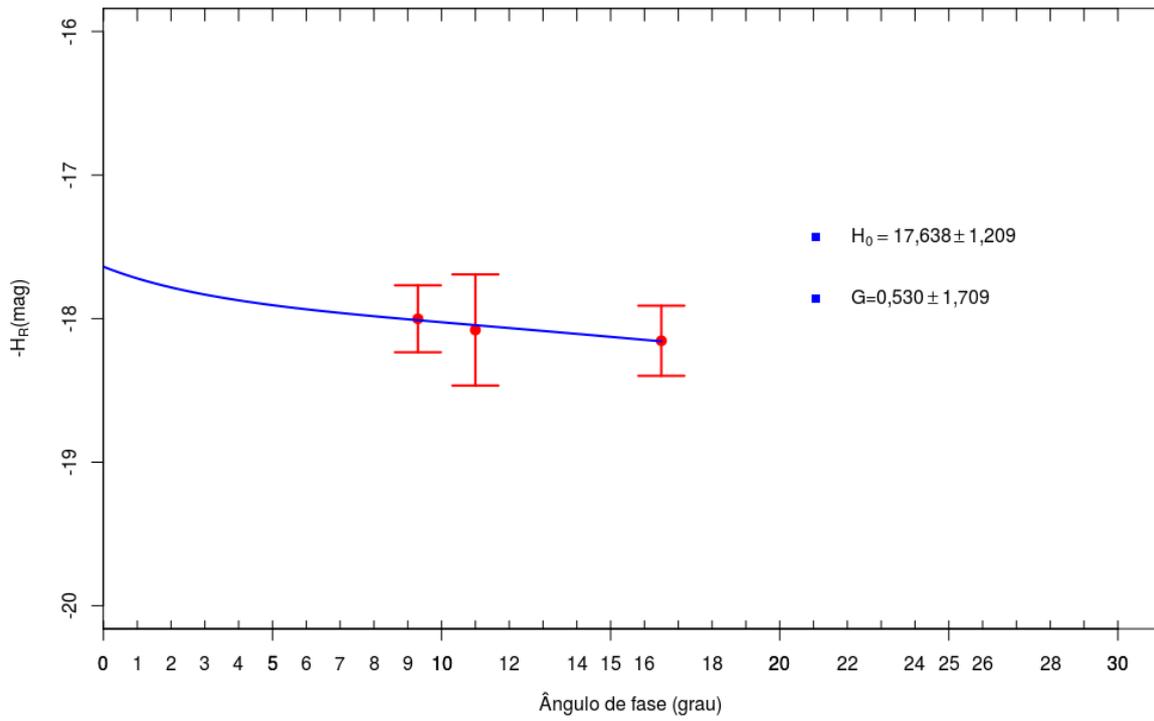
2016 WJ1



2017 AC5



2017 AF5



2017 CR32

