

Gustavo Ourique

**Uso de anãs brancas para a determinação
de parâmetros físicos de aglomerados globulares**

Porto Alegre

2016

Gustavo Ourique

**Uso de anãs brancas para a determinação
de parâmetros físicos de aglomerados globulares**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto de Física da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul a fim de preencher os
requisitos para obtenção do título de Bacharel
em Física com ênfase em Pesquisa Básica

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Instituto de Física

Orientador: Prof. Dr. Kepler de Souza Oliveira Filho

Porto Alegre

2016

Agradecimentos

Aos meu avós, Olíria e Osvaldo, por me acolher e apoiar nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Carlos Roberto e Maria da Glória, e ao meu irmão Rafael, por estarem ao meu lado sempre que foi preciso.

Ao meu orientador, Prof. Kepler, por me motivar a sempre continuar perguntando.

A Anna Bárbara, pelas inúmeras discussões e conselhos que me levaram a ser quem eu sou hoje.

A minha colega de pesquisa Ingrid, que sempre considerei uma irmã mais velha, me ajudando a ver meus erros e a corrigi-los.

A minha ex-colega de pesquisa Fabíola, pelas várias horas que trabalhamos juntos.

A todos os demais colegas do meu grupo de pesquisa.

A minha professora Rita Margarete, por me incentivar a compreender o universo ao meu redor.

Ao meu amigo de longa data Luckaz Xavier, que mesmo não conhecendo-o pessoalmente sempre esteve muito próximo.

Aos meus amigos, que passaram por diversas situações comigo, como estudar loucamente para uma prova ou sair para se divertir e esquecer da mesma.

Resumo

Neste trabalho apresentamos um método para determinar parâmetros físicos de aglomerados globulares levando em conta a densidade de estrelas em um mesmo estágio evolutivo, a função de massa inicial e a dispersão fotométrica em função da magnitude. O método proposto consiste em utilizar processos de *Monte Carlo* para simular as cores de estrelas seguindo uma isócrona e uma função de massa inicial e adicionar a elas a dispersão fotométrica em torno das magnitudes determinadas pela isócrona.

Eu apliquei esse método para determinar a idade, módulo de distância verdadeiro e o parâmetro α , que define a inclinação da função de massa inicial, dos aglomerados globulares NGC 6397 e 47 Tucanae utilizando a fotometria de suas anãs brancas obtida com o Telescópio Espacial Hubble. A idade, módulo de distância verdadeiro e parâmetro α determinados para o aglomerado NGC 6397 foram, respectivamente, 12.86 ± 0.25 bilhões de anos, 11.88 ± 0.18 e 2.14 ± 0.29 . Já para o aglomerado 47 Tucanae foram determinadas a idade, módulo de distância verdadeiro e parâmetro α , sendo eles, 12.40 ± 0.40 bilhões de anos, 13.14 ± 0.08 e 3.05 ± 0.69 , respectivamente. As determinações para ambos aglomerados está coerente com a literatura.

Abstract

In this work we present a method to determinate physical parameters of globular clusters taking into account the density of stars in each evolutionary stage, the initial mass function and the photometric dispersion by magnitude. The proposed method is to use *Monte Carlo* process to simulate the colors of stars following an isochrone and an initial mass function and then give them a photometric dispersion around the magnitude determined by isochrone.

I've applied this method to determinate the age, true distance modulus and the α parameter that defines the initial mass function slope, of globular clusters NGC 6397 and 47 Tucanae using photometry of their white dwarfs taken by the Hubble Space Telescope. The age, true distance modulus and α parameter determined for NGC 6397 are, respectively, 12.86 ± 0.25 billion years, 11.88 ± 0.18 and 2.14 ± 0.29 . For 47 Tucanae the determined the age, true distance modulus and α parameter are, respectively, 12.40 ± 0.40 billion years, 13.14 ± 0.08 e 3.05 ± 0.69 . The determinations for both clusters are consistent with the literature.

Lista de ilustrações

Figura 1.1 – Concepção artística da morfologia da <i>Via Láctea</i>	15
Figura 1.2 – Modelo de Herschel para a <i>Via Láctea</i> (1785)	16
Figura 1.3 – Modelo de Kapteyn para a <i>Via Láctea</i> (1922)	17
Figura 1.4 – Distribuição de aglomerados globulares da <i>Via Láctea</i> feita por Shapley (1918)	17
Figura 1.5 – Esboço do modelo de formação de aglomerados globulares	18
Figura 1.6 – Concepção artística de um diagrama cor-magnitude	20
Figura 1.7 – Concepção artística do caminho evolucionário percorrido no diagrama cor-magnitude por uma estrela do tipo Solar	21
Figura 1.8 – Espectro da anã branca <i>SDSS J074804.82+440632.3</i>	23
Figura 1.9 – Fração de átomos de hidrogênio no nível atômico $n = 2$ em comparação ao total de átomos de hidrogênio na atmosfera estelar	24
Figura 1.10 – Imagem nos filtros RGB do aglomerado NGC 6397	25
Figura 1.11 – Imagem no infravermelho do aglomerado 47 Tucanae	26
Figura 2.1 – Curvas de transmissão para os filtros F606 e F814	29
Figura 2.2 – Diagrama cor-magnitude do aglomerado NGC 6397, tendo destacado sua sequência de resfriamento das anãs brancas	30
Figura 2.3 – Campo observado pelo telescópio espacial Hubble do aglomerado NGC 6397	31
Figura 2.4 – Diagrama cor-magnitude para a sequência de resfriamento do NGC 6397	31
Figura 2.5 – Campo observado pelo telescópio espacial Hubble do aglomerado 47 Tucanae	32
Figura 2.6 – Diagrama cor-magnitude para a sequência de resfriamento do 47 Tucanae	33
Figura 3.1 – Método para a construção de isócronas a partir de modelos de evolução estelar	36
Figura 3.2 – Exemplo de matrizes de dispersão	37
Figura 3.3 – Completeza em função da magnitude para os filtros F606 e F814	37
Figura 3.4 – Comparação das funções de massa inicial de Salpeter (1955), Kroupa (2001) e Chabrier (2003)	38
Figura 3.5 – Relação massa inicial-final para diferentes metalicidades	40
Figura 3.6 – Diagramas cor-magnitude para aglomerados simulados com diferentes isócronas	41
Figura 3.7 – Comparação entre a função de luminosidade contínua e a discreta	42
Figura 3.8 – Comparação do diagrama cor-magnitude usual com o diagrama de Hess calculado com os dados do aglomerado NGC 6397	42
Figura 3.9 – Comparação entre o diagrama de Hess contínuo e o discreto	43
Figura 4.1 – Mapa de χ^2 normalizado para a determinação simultânea de idade e μ_0 para o aglomerado NGC 6397	46

Figura 4.2 – Comparação das estrelas do aglomerado NGC 6397 com as estrelas simuladas com idade igual a 12.84 bilhões de anos e μ_0 igual a 13.58 . . .	47
Figura 4.3 – Mapa de χ^2 normalizado para a determinação simultânea de idade e α para o aglomerado NGC 6397	47
Figura 4.4 – Comparação das estrelas do aglomerado NGC 6397 com as estrelas simuladas com idade igual 12.86 bilhões de anos e parâmetro α igual a 2.17	48
Figura 4.5 – Mapa de χ^2 normalizado para a determinação simultânea de idade e μ_0 para o aglomerado 47 Tucanae	49
Figura 4.6 – Comparação das estrelas do aglomerado 47 Tucanae com as estrelas simuladas com idade igual a 12.76 bilhões de anos e μ_0 igual a 13.14 . . .	49
Figura 4.7 – Mapa de χ^2 normalizado para a determinação simultânea de idade e α para o aglomerado 47 Tucanae	50
Figura 4.8 – Comparação das estrelas do aglomerado 47 Tucanae com as estrelas simuladas com idade igual 12.40 bilhões de anos e parâmetro α igual a 3.05	51

Lista de tabelas

Tabela 1.1 – Determinações de idade para o aglomerado NGC 6397.	25
Tabela 1.2 – Determinações de módulo de distância para o aglomerado NGC 6397. .	26
Tabela 1.3 – Determinações de idade para o aglomerado 47 Tucanae.	27
Tabela 1.4 – Determinações de módulo de distância para o aglomerado 47 Tucanae.	27

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Perspectiva Histórica	16
1.2	Formação de Aglomerados Globulares	18
1.3	Diagrama Cor-Magnitude de Aglomerados Globulares	19
1.4	Incerteza na Determinação de Parâmetros Físicos	22
1.5	Anãs Brancas em Aglomerados Globulares	22
1.6	Módulo de Distância	23
1.7	NGC 6397	24
1.8	47 Tucanae	25
2	DADOS FOTOMÉTRICOS	29
2.1	NGC 6397	30
2.2	47 Tucanae	32
3	DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICOS	35
3.1	Construção das Isócronas	35
3.2	Construção das Matrizes de Dispersão	36
3.3	Simulação de Aglomerados	38
3.4	Comparação das Simulações com os Dados	40
3.4.1	Comparação de Função de Luminosidade	40
3.4.2	Comparação de Diagrama de Hess	41
3.4.3	Cálculo de χ^2	43
4	RESULTADOS	45
4.1	NGC 6397	45
4.1.1	Determinação de Idade e Módulo de Distância Verdadeiro	45
4.1.2	Determinação de Idade e Parâmetro α	46
4.2	47 Tucanae	48
4.2.1	Determinação de Idade e Módulo de Distância Verdadeiro	48
4.2.2	Determinação de Idade e Parâmetro α	49
5	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS	55

1 Introdução

Aglomerados globulares são sistemas compostos por dezenas de milhares a milhões de estrelas que se mantêm coesas em uma forma aproximadamente esférica devido a autogravitação. A maioria dos aglomerados globulares são velhos, possuindo mais de dez bilhões de anos, pouco metálicos (Zinn, 1985) e são sistemas puramente estelares pois praticamente não possuem gás ou poeira. Acredita-se que a poeira e o gás foram expulsos dos aglomerados nos primeiros bilhões de anos devido a explosão das primeiras supernovas das suas estrelas massivas. Atualmente se conhecem cerca de 160 aglomerados globulares (Harris; Harris; Alessi, 2013) e eles se localizam tanto no halo quanto próximos ao centro Galáctico. A figura 1.1 é uma concepção artística da morfologia da *Via Láctea* e suas componentes.

O principal objetivo deste trabalho é determinar a idade, o módulo de distância e o efeito da difusão estelar para os aglomerados NGC 6397 e 47 Tucanae.

Esta introdução foi baseada na tese de doutorado de Campos (2013), intitulada “Estudo da evolução estelar através de aglomerados globulares galácticos”.

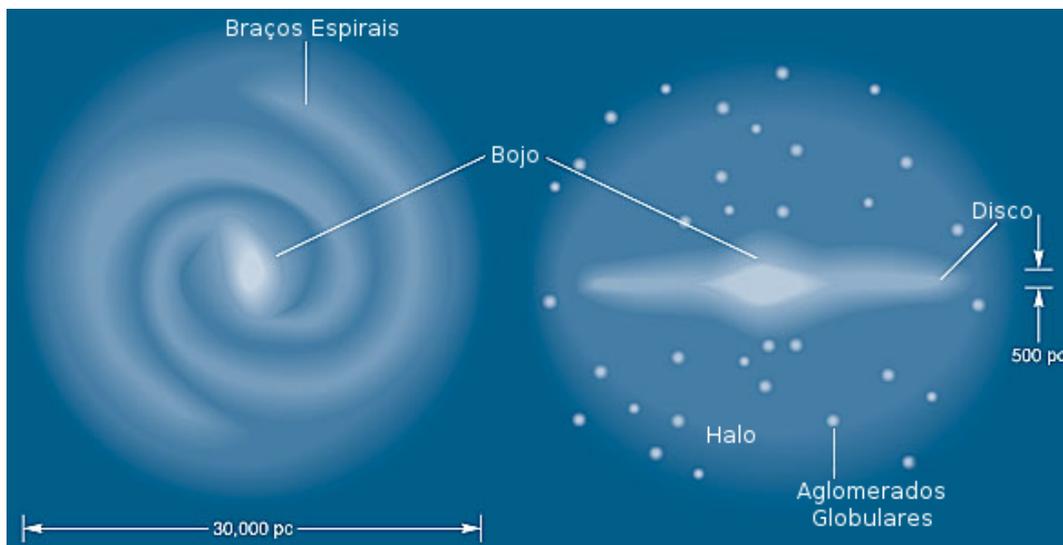


Figura 1.1 – Concepção artística da morfologia da *Via Láctea*. A figura da esquerda representa a *Via Láctea* sendo vista de cima, enquanto a da esquerda, alinhado com o plano de rotação. Figura adaptada de <http://www.icc.dur.ac.uk/~tt/Lectures/Galaxies/Schombert/MilkyWay/Source/images/milky_way_sketch.jpg> (acessado em 07/11/2016).

1.1 Perspectiva Histórica

Acredita-se que a primeira pessoa a descobrir um aglomerado globular foi o astrônomo amador Abraham Ihle, em 1665, classificando erroneamente M 22 como uma nebulosa, objeto que mais tarde foi classificado como aglomerado globular. Em 1764 Messier observou M 4, o aglomerado globular mais próximo ao Sol, e foi capaz de identificar estrelas individuais. Já em 1782 até 1802, William Herschel, utilizando um telescópio com abertura de aproximadamente 47 cm, descobriu mais de 2400 objetos no céu que eram visualmente difusos. A abertura do telescópio de Herschel era suficientemente grande para conseguir resolver em estrelas alguns desses objetos e com isso encontrou novos 37 aglomerados globulares, totalizando 70 conhecidos na época.

Partindo de suas observações, Herschel também tentou determinar o formato da *Via Láctea*, concluindo erroneamente que ela era achatada e que o Sol se localizava próximo ao seu centro, como mostra a figura 1.2

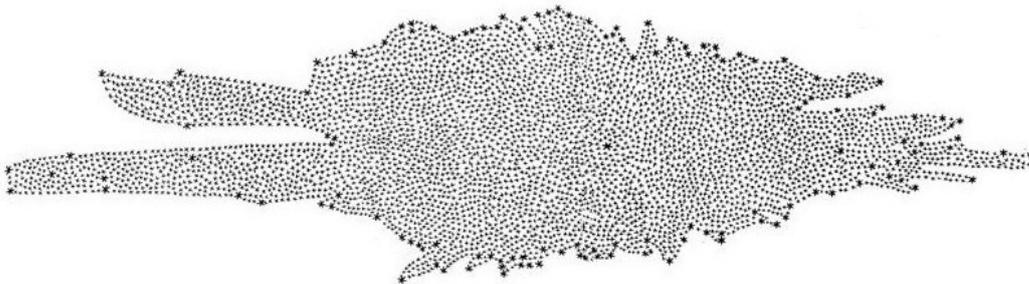


Figura 1.2 – Modelo de Herschel para a *Via Láctea* (1785). Figura adaptada de <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit4/Images/Herschel_MW_1785.jpg> (acessado em 07/11/2016).

Em 1922, Jacobus Kapteyn estudou diversas áreas distintas no céu ao longo de diferentes anos, o que permitiu que ele determinasse o movimento próprio das estrelas e comparou com o movimento próprio de estrelas com a distância já determinada por paralaxe. Partindo disso ele generalizou uma lei que relacionava o movimento próprio, a magnitude e a distância das estrelas e propôs um modelo para a Galáxia. O modelo de Kapteyn determinou erroneamente que o Sol estaria a uma distância de 650 pc do centro da *Via Láctea*, como mostra a figura 1.3.

Em 1918, Harlow Shapley argumentou que as estrelas da *Via Láctea* podem estar distribuídas em uma região estreita do céu, uma ideia semelhante a um disco composto por estrelas, mas os aglomerados estão distribuídos pelo céu todo com uma distribuição não uniforme, havendo uma maior concentração de aglomerados na direção da grande nuvem de estrelas em Sagitário. É esperado que os aglomerados globulares se agrupem ao redor do centro do sistema, implicando que se o Sol estivesse próximo ao centro da *Via Láctea* observaríamos uma distribuição uniforme de aglomerados em torno do Sol, mostrando que

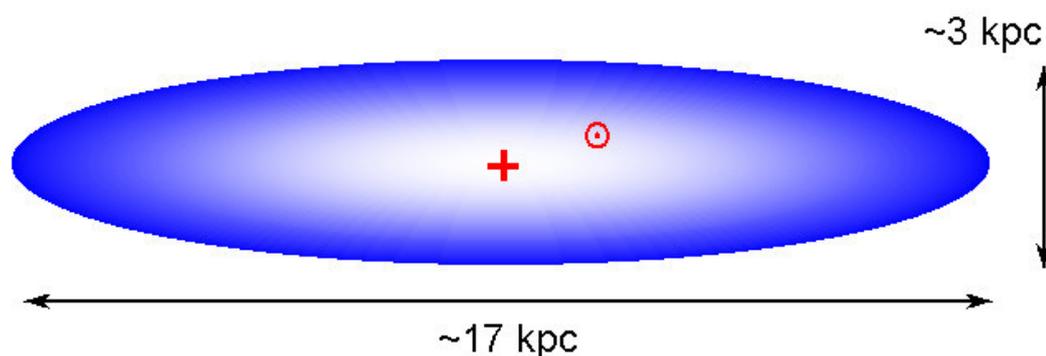


Figura 1.3 – Modelo de Kapteyn para a *Via Láctea* (1922). A cruz vermelha representa o centro da *Via Láctea* e o círculo vermelho a posição do Sol. Figura adaptada de <<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit4/Images/kapteyn.gif>> (acessado em 07/11/2016).

o Sol está distante do centro da *Via Láctea*. Shapley também estimou que a distância do Sol ao centro da Galáxia está em torno de 15 kpc, como mostra a figura 1.4.

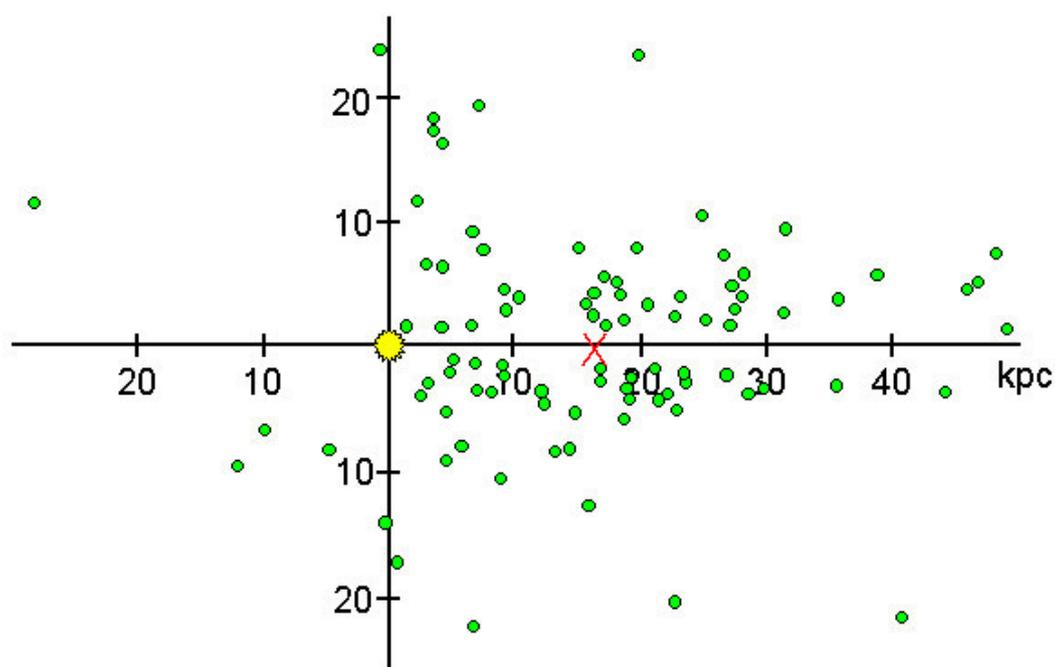


Figura 1.4 – Distribuição de aglomerados globulares da *Via Láctea* feita por Shapley (1918). A estrela amarela é a posição do Sol e o X vermelho é a posição determinada para o centro da *Via Láctea*. Figura adaptada de <<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit4/Images/ShapleyGCs.gif>> (acessado em 07/11/2016).

O valor de distância ao centro da *Via Láctea* determinado por Shapley estava superestimado por que ele não levou em conta o avermelhamento interestelar, que só foi comprovado em 1930 por Robert J. Trumpler, que faz com que os objetos pareçam mais

distantes.

Atualmente estima-se que a distância até o centro da *Via Láctea* esteja entre 7.8-8.6 kpc (Boehle et al., 2016; Fritz et al., 2016), variando consideravelmente de acordo com o método e a amostra de dados utilizada. Malkin (2013) analisou mais de 50 determinações de distância ao centro da Galáxia publicadas de 1992 até 2011 e mostrou que os valores não possuem uma tendência, mas que a incerteza nas determinações têm diminuído.

1.2 Formação de Aglomerados Globulares

Um dos modelos mais aceitos para explicar a formação de aglomerados globulares afirma que durante o colapso das grandes nuvens moleculares, algumas regiões satisfizeram o *critério de instabilidade de Jeans (1902)* e se fragmentam em pedaços menores que passam a colapsar rapidamente de maneira independente do resto da *Via Láctea*, formando estrelas até se tornarem aglomerados globulares. A figura 1.5 é um esboço do processo de formação de aglomerados a partir de uma nuvem molecular.

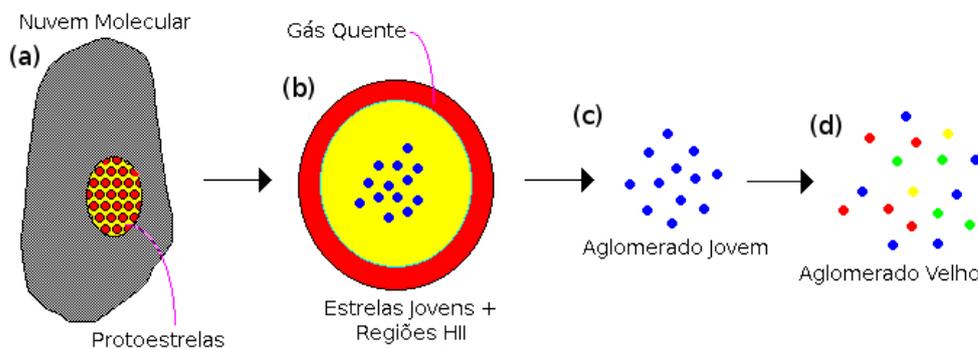


Figura 1.5 – Esboço do modelo de formação de aglomerados globulares. (a) Colapso da nuvem molecular formando protoestrelas; (b) O gás aquece enquanto algumas das protoestrelas se tornam estrelas; (c) As estrelas jovens mais massivas explodem em supernovas expulsando o gás remanescente do colapso da nuvem, formando um aglomerado jovem livre de gás; (d) O aglomerado envelhece, e caso tenha massa suficiente se manterá coeso. Figura adaptada de <http://abyss.uoregon.edu/~js/images/star_cluster.gif> (acessado em 07/11/2016).

É interessante constatar que, como os aglomerados globulares se formam de fragmentos das nuvens que se separaram do colapso, suas estrelas serão originadas do gás existente no momento da fragmentação. Isso nos permite utilizar os aglomerados globulares como *laboratório* para o estudo do histórico de formação e evolução da nossa galáxia.

1.3 Diagrama Cor-Magnitude de Aglomerados Globulares

O estudo fotométrico de aglomerados globulares nos permite estudar diversas características físicas do mesmo, tais como: idade, avermelhamento, distância, parâmetros estruturais, estado dinâmico, massa armazenada nas estrelas e metalicidade.

Algumas das ferramentas mais utilizadas para estudar essas características são: inspeção do diagrama cor-magnitude das estrelas que compõem o aglomerado, ajuste de isócrona, análise de perfil de densidade radial.

O diagrama cor-magnitude é construído utilizando a magnitude determinada em, pelo menos, dois filtros fotométricos. A cor de uma estrela é definida como a diferença da magnitude medida em dois filtros, o que está diretamente relacionado à temperatura da estrela.

Como o raio médio dos aglomerados globulares é aproximadamente 3.5 pc (Bonnato et al., 2007) e a distância do aglomerado globular mais próximo está em torno de 2.2 kpc (Bica et al., 2006), podemos assumir que todas as estrelas de um aglomerado globular estão à mesma distância do Sol. Como o colapso da nuvem que formou o aglomerado globular é muito rápido, todas as estrelas possuem praticamente a mesma idade e metalicidade, nos permitindo medir a distância, o avermelhamento e a idade do aglomerado a partir do ajuste de isócronas ao diagrama cor-magnitude.

Embora todas as estrelas de um aglomerado globular possuam praticamente a mesma idade e metalicidade, elas são formadas com massas diferentes, o que leva a tempos de evolução diferentes para cada estrela, fazendo com que elas estejam em estágios evolutivos diferentes de acordo com suas massas iniciais, e, portanto, ocupem regiões diferentes do diagrama cor-magnitude. Na figura 1.6 vemos uma concepção artística de um diagrama cor-magnitude especificando várias etapas evolutivas das estrelas. Na figura 1.7 vemos uma concepção artística do caminho evolucionário que uma estrela semelhante ao sol percorreria no diagrama cor-magnitude até se tornar uma anã branca.

A forma do diagrama cor-magnitude está associada ao estágio evolutivo de suas estrelas, o que está diretamente relacionado à massa, metalicidade e idade das mesmas.

Ao associarmos uma idade e uma metalicidade a um aglomerado globular, seu diagrama cor-magnitude terá a mesma forma independentemente da distância que se encontra o aglomerado, desta maneira podemos determinar a distância do aglomerado pelo intervalo de magnitudes ocupado pelas estrelas pertencentes ao mesmo.

Como a poeira interestelar absorve mais luz em menores comprimentos de onda, a extinção causado pela poeira fará com que o aglomerado pareça mais distante e mais vermelho, alterando a cor observada nas estrelas.

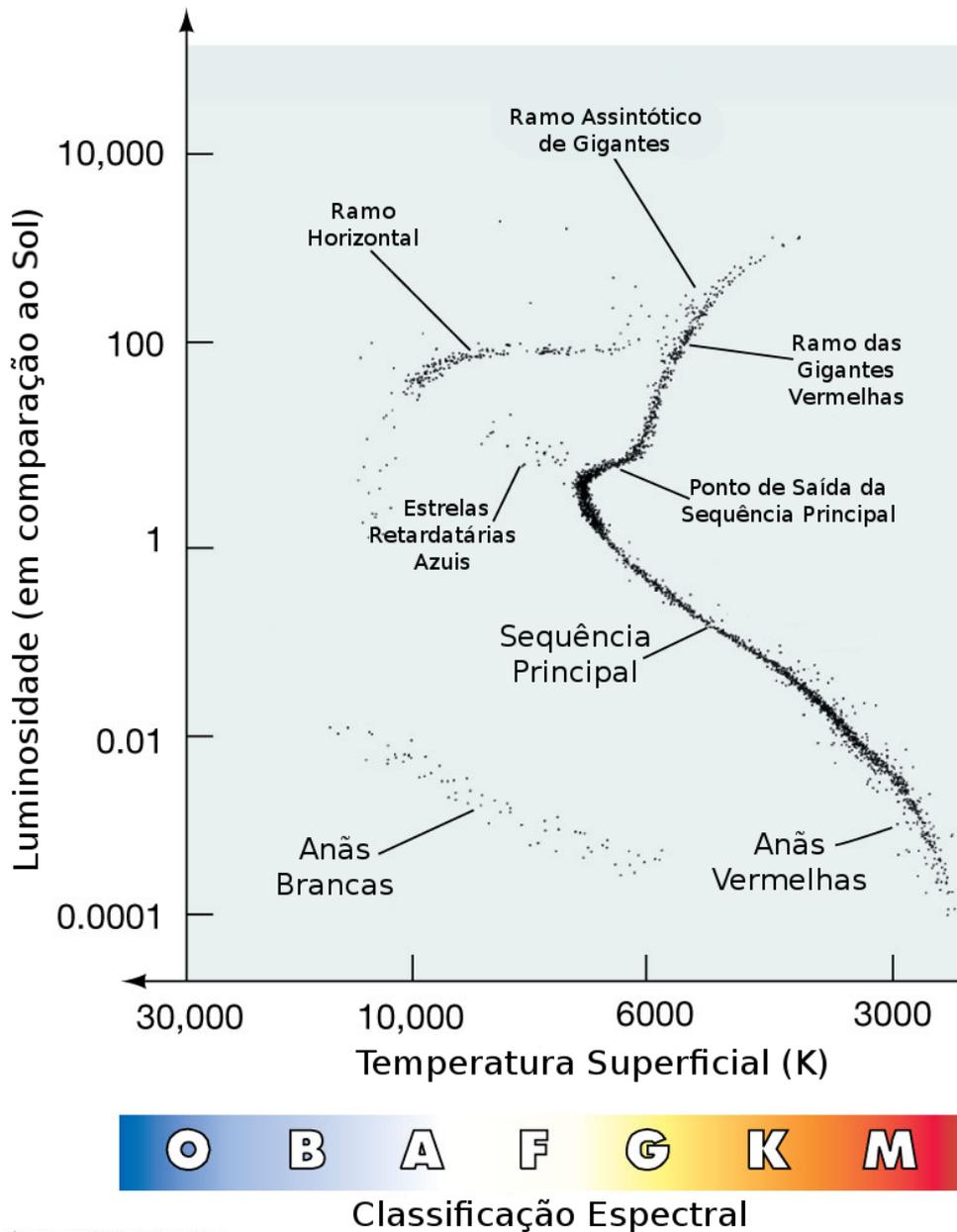


Figura 1.6 – Concepção artística de um diagrama cor-magnitude. Na figura estão descritas as posições dos seguintes estágios evolutivos no diagrama cor-magnitude: Sequência principal (MS); Ponto de saída sequência da principal (MSTO); Ramo das gigantes vermelhas (RGB); Ramo Horizontal (HB); Ramo assintótico de gigantes (AGB); Anãs Brancas (WD). Na figura também estão destacadas a região ocupada pelas estrelas retardatárias azuis (BS), provenientes de evolução binária, e anãs vermelhas (RD). Figura adaptada de <http://pages.uoregon.edu/jimbrau/BrauImNew/Chap20/7th/AT_7e_Figure_20_14b.jpg> (acessado em 07/11/2016).

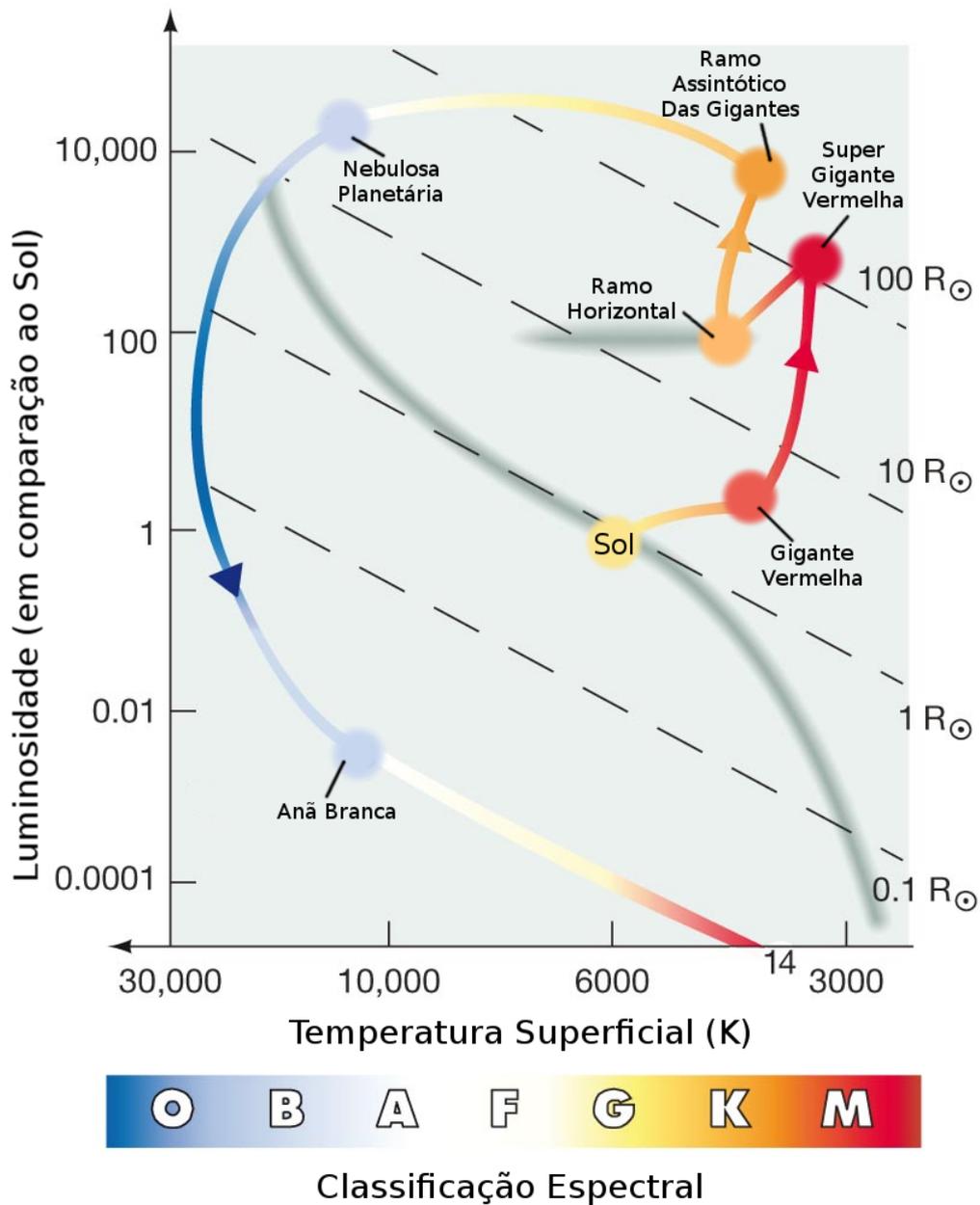


Figura 1.7 – Concepção artística do caminho evolucionário percorrido no diagrama cor-magnitude por uma estrela do tipo Solar. Após se esgotar todo o hidrogênio no núcleo da estrela ela se tornará uma gigante vermelha, continuará se expandindo até se tornar uma super gigante vermelha, contrairá e expandirá novamente até alcançar o ramo assintótico das gigantes onde expulsará suas camadas externas em forma de nebulosa planetária e finalmente se tornar uma anã branca. Figura adaptada de <http://pages.uoregon.edu/jimbrau/BrauImNew/Chap20/8th/20_11_Figure_Unanno.jpg> (acessado em 07/11/2016).

1.4 Incerteza na Determinação de Parâmetros Físicos

Como já foi dito, o ajuste de isócrona é uma das ferramentas mais utilizadas na determinação de parâmetros físicos de aglomerados globulares. Porém o ajuste de isócrona não é uma técnica simples, pois existem quatro parâmetros livres a serem ajustados simultaneamente, idade, distância, avermelhamento e metalicidade. Usualmente esses quatro parâmetros são estimados por inspeção visual e determinados por minimização da diferença entre as isócronas e o conjunto de estrelas pertencentes aos dados.

O ajuste por inspeção visual normalmente é feito comparando o ponto de saída da sequência principal das estrelas do aglomerado globular com o das isócronas, mas [Bolte e Hogan \(1995\)](#) determinaram que a cor do ponto de saída da sequência principal não era um estimador preciso de idade. Bolte e Hogan também estimaram uma incerteza de 25% na determinação da distância do aglomerado, o que leva a uma incerteza de 22% na idade.

Outra grande fonte de incerteza no ajuste na determinação de parâmetros físicos de aglomerados globulares é devido às incertezas dos modelos de evolução estelar.

Uma fonte de incerteza nos modelos de evolução estelar está na teoria de transporte de energia em regiões convectivas da estrela, que é determinante para a boa descrição de estrelas gigantes vermelhas, já que elas possuem envelopes convectivos profundos. Os parâmetros livres dessa teoria são calibrados para a metalicidade solar, mas essa possui diversas determinações que diferem até 30% entre si.

As teorias de perda de massa utilizadas nos modelos de evolução estelar geralmente são construídas a partir de parametrizações para que possam reproduzir algumas estrelas nas quais se pode medir a perda de massa. Normalmente é necessário assumir uma teoria de perda de massa pois existem poucas determinações de perda de massa e como ela depende dos parâmetros físicos.

1.5 Anãs Brancas em Aglomerados Globulares

As anãs brancas são o estágio final de cerca de 97% das estrelas ([Fontaine; Brassard; Bergeron, 2001](#)), são objetos quentes e pouco luminosos. Anãs brancas normais possuem massas aproximadamente entre 0.5 e 1.39 M_{\odot} ([Mazzali et al., 2007](#)) e sua evolução é muito simples, sendo apenas resfriar com pouca variação em seu raio.

Devido ao tempo necessário para uma estrela se tornar anã branca ser proporcional à sua massa, as anãs brancas são ótimas traçadoras da idade de aglomerados globulares.

As anãs brancas possuem atmosferas muito simples, facilitando a sua modelagem em comparação com estrelas gigantes ou de sequência principal. Devido à alta força gravitacional, a difusão leva os metais da atmosfera para o núcleo da anã branca em menos

de um milhão de anos, fazendo com que sua atmosfera seja composta só por hidrogênio ou hélio e possua linhas espectrais alargadas pela enorme pressão, facilitando a determinação da temperatura e gravidade superficial. Na figura 1.8 vemos o espectro de uma anã branca do tipo DA, com a atmosfera composta apenas por hidrogênio.

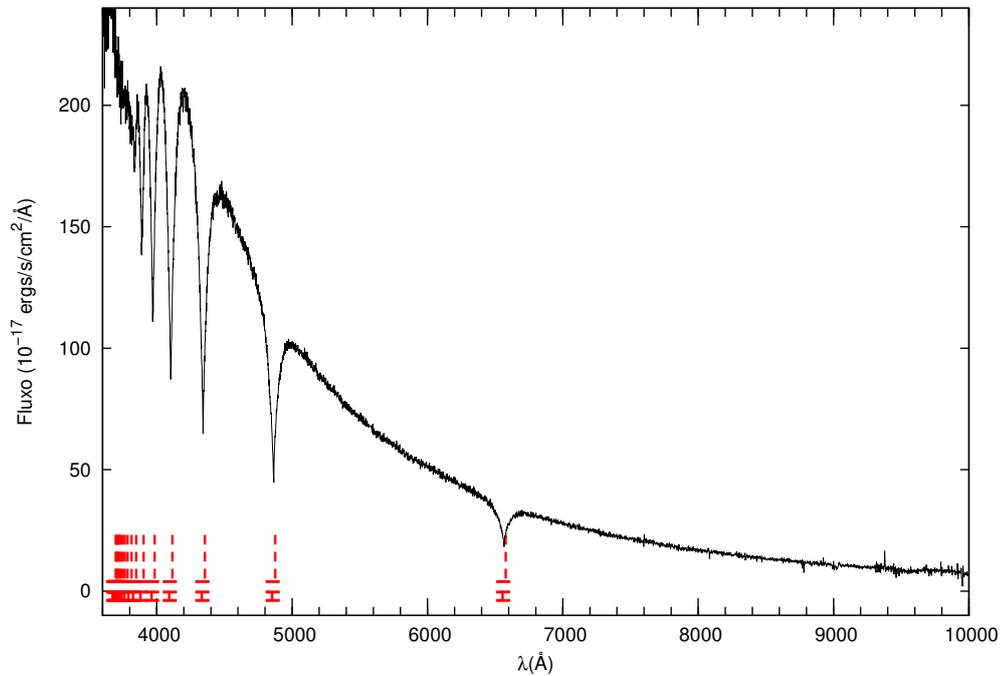


Figura 1.8 – Espectro da anã branca *SDSS J074804.82+440632.3* obtido pelo *Sloan Digital Sky Survey*.

Um problema de se utilizar anãs brancas para estudar aglomerados globulares é que elas são pouco luminosas, exigindo observações muito profundas. Atualmente com o telescópio espacial Hubble se tornou possível observar até as anãs brancas mais frias dos aglomerados globulares mais próximos. Porém, o estudo espectroscópico de anãs brancas muito frias, com temperatura efetiva abaixo de 8000K não é viável na região de comprimentos de onda do visível pois o hidrogênio e o hélio se tornam invisíveis a essas temperaturas. A figura 1.9 mostra a fração de átomos de hidrogênio no nível atômico $n = 2$, responsáveis pelas linhas de absorção de hidrogênio em comprimentos de onda do visível, em comparação ao total de átomos de hidrogênio na atmosfera estelar para diferentes temperaturas.

1.6 Módulo de Distância

O módulo de distância, μ é definido como a diferença entre a magnitude aparente, m , e a magnitude absoluta, M , de um objeto astronômico. Já a magnitude absoluta é definida como a magnitude aparente de um objeto caso ele estivesse a 10 parsecs do seu observador. Devido à dependência da magnitude aparente com a distância, podemos

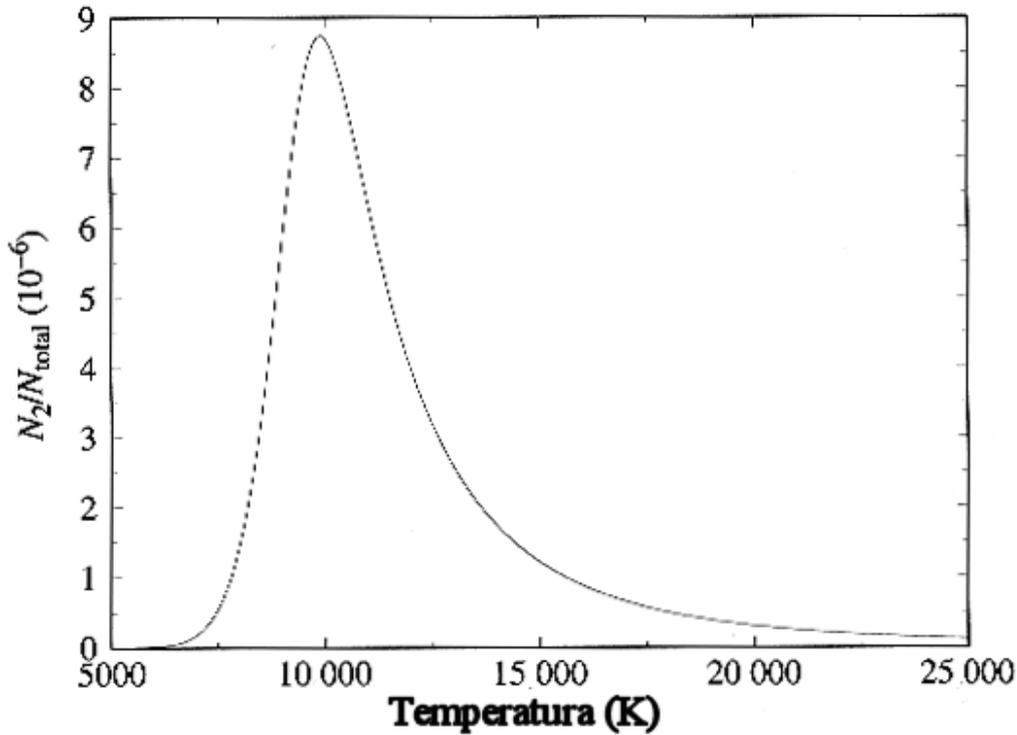


Figura 1.9 – Fração de átomos de hidrogênio no nível atômico $n = 2$ em comparação ao total de átomos de hidrogênio na atmosfera estelar para diferentes temperaturas. Figura de <<http://astro.if.ufrgs.br/rad/espec/hidro.gif>> (acessado em 07/11/2016)

determinar a distância, d , de objetos astronômicos sabendo apenas seu módulo de distância. Porém, como a poeira interestelar absorve com diferentes intensidades em comprimentos de ondas distintos, a distância determinada pelo módulo de distância aparente depende do filtro fotométrico no qual a observação foi feita. A equação 1.1 mostra o cálculo da distância em um filtro qualquer, λ , utilizando o módulo de distância.

$$d_{\lambda} = 10^{\frac{\mu_{\lambda} + 5}{5}} \quad (1.1)$$

Definimos como *módulo de distância verdadeiro*, μ_0 , o módulo de distância corrigido pela extinção em um dado filtro λ , A_{λ} , como mostra a equação 1.2

$$\mu_0 = \mu_{\lambda} - A_{\lambda} \quad (1.2)$$

1.7 NGC 6397

O aglomerado NGC 6397 está situado na constelação de Ara e sua magnitude aparente na banda V está em torno de 6.68 (Dalessandro et al., 2012). Este aglome-

rado é o segundo aglomerado mais próximo da Terra e possui seu núcleo de estrelas colapsado (Martinazzi et al., 2014).

Sua ascensão reta (RA) e declinação (DEC) são $17^{\text{h}} 40^{\text{m}} 40.09^{\text{s}}$ e $-53^{\circ} 40' 27.6''$, respectivamente (Goldsbury et al., 2010). Na figura 1.10 temos uma imagem nos filtros RGB do aglomerado NGC 6397 obtida pelo telescópio ASA 12'' RC no observatório de IRIDA.



Figura 1.10 – Imagem nos filtros RGB do aglomerado NGC 6397 obtida pelo telescópio ASA 12'' RC no observatório de IRIDA. Figura adaptada de http://www.irida-observatory.org/Namibia-Tivoli/NGC6397/NGC6397_RGB_1100px.jpg (acessado em 07/11/2016).

Ao longo dos anos, diversos valores de idade e módulo de distância foram determinados para o aglomerado NGC 6397. As determinações desses parâmetros feitas desde 2010 podem ser vistas nas tabelas 1.1 e 1.2.

Tabela 1.1 – Determinações de idade para o aglomerado NGC 6397.

Idade (Bilhões anos)	Referência
$12.48^{+0.34}_{-0.26}$	(Campos et al., 2016)
$12.80^{+0.50}_{-0.75}$	(Torres et al., 2015)
12.0 ± 0.50	(Martinazzi et al., 2014)
11.7	(Richer et al., 2013)
13.0 ± 0.25	(VandenBerg et al., 2013)

Tabela 1.2 – Determinações de módulo de distância para o aglomerado NGC 6397.

μ_0 (mag)	Referência
11.85 ± 0.04	(Campos et al., 2016)
$11.74^{+0.11}_{-0.20}$	(Torres et al., 2015)
12.00 ± 0.06	(Heinke et al., 2014)
12.04 ± 0.01	(Martinazzi et al., 2014)
12.07 ± 0.06	(Richer et al., 2013)
11.53 ± 0.20	(Guillot et al., 2013)
$11.71^{+0.44}_{-0.83}$	(Heyl et al., 2012)
11.69 ± 0.05	(di Criscienzo; D’Antona; Ventura, 2010)

As distâncias apresentadas nessa tabela foram corrigidas por extinção por mim assumindo $R_V = 3.1$ (Cardelli; Clayton; Mathis, 1989).

1.8 47 Tucanae

O aglomerado 47 Tucanae está situado na constelação de Tucana e sua magnitude aparente na banda V está em torno de 4.09 (Dalessandro et al., 2012), podendo ser visto a olho nu no hemisfério sul. Foi determinado como o segundo aglomerado globular mais brilhante do céu, sendo menos brilhante que o Omega Centauri apenas.

Sua ascensão reta (RA) e declinação (DEC) são $00^{\text{h}} 24^{\text{m}} 05.359^{\text{s}}$ e $-72^{\circ} 04' 53.20''$, respectivamente (Skrutskie et al., 2006). Na figura 1.11 temos uma imagem em falsa cor do aglomerado 47 Tucanae obtida pelo telescópio VISTA do ESO.

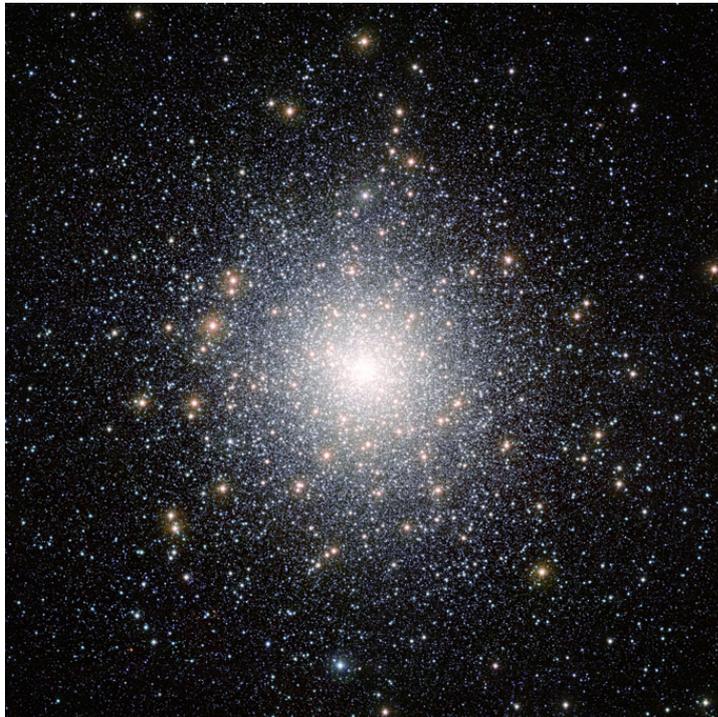


Figura 1.11 – Imagem em falsa cor do aglomerado 47 Tucanae obtida pelo telescópio VISTA do ESO. Figura de <<http://www.universetoday.com/wp-content/uploads/2013/01/eso1302a.jpg>> (acessado em 07/11/2016).

Ao longo dos anos, diversos valores de idade e módulo de distância foram determinados para o aglomerado 47 Tucanae. Algumas dessas determinações recentes podem ser vistas nas tabelas 1.3 e 1.4.

Tabela 1.3 – Determinações de idade para o aglomerado 47 Tucanae.

Idade (Bilhões anos)	Referência
12.0	(Marino et al., 2016)
$10.95^{+0.21}_{-0.15}$	(Campos et al., 2016)
13.0	(Richer et al., 2013)
11.25 ± 0.21	(Thompson et al., 2010)

Tabela 1.4 – Determinações de módulo de distância para o aglomerado 47 Tucanae.

μ_0 (mag)	Referência
13.34	(Marino et al., 2016)
$13.28^{+0.06}_{-0.03}$	(Torres et al., 2015)
13.30 ± 0.08	(Richer et al., 2013)
13.09 ± 0.04	(Bianchini et al., 2013)
13.10 ± 0.08	(Thompson et al., 2010)
13.02 ± 0.19	(McLaughlin et al., 2006)

As distâncias apresentadas nessa tabela foram corrigidas por extinção por mim assumindo $R_V = 3.1$ (Cardelli; Clayton; Mathis, 1989).

2 Dados fotométricos

Neste trabalho foram utilizados dados fotométricos dos aglomerados globulares *NGC 6397* e *47 Tucanae* obtidos pelo *Hubble Space Telescope (HST)* com a *Advanced Camera for Surveys (ACS)*. Foram escolhidos esses aglomerados por possuírem dados fotométricos profundos o bastante para que um grande número de anãs brancas pudessem ser observadas e por serem velhos e pouco metálicos, já tendo alcançado seu estado de equilíbrio a vários bilhões de anos. As observações analisadas de ambos aglomerados foram feitas nos filtros F606 e F814, tendo seus comprimentos de onda de referência em, respectivamente, 6 060 Å e 8 140 Å e suas curvas de transmissão podem ser vistas na figura 2.1.

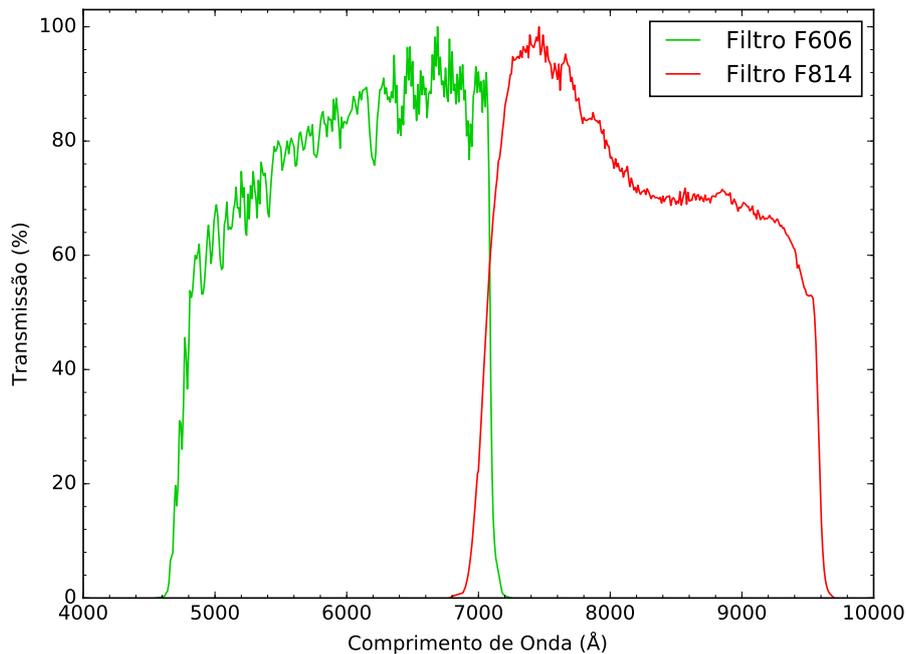


Figura 2.1 – Curvas de transmissão para os filtros F606 (curva verde) e F814 (curva vermelha).

Na figura 2.2 podemos ver o diagrama cor-magnitude construído com as observações do telescópio espacial Hubble para o aglomerado *NGC 6397* destacando a sequência de resfriamento das anãs brancas, principal região de estudo nesse trabalho.

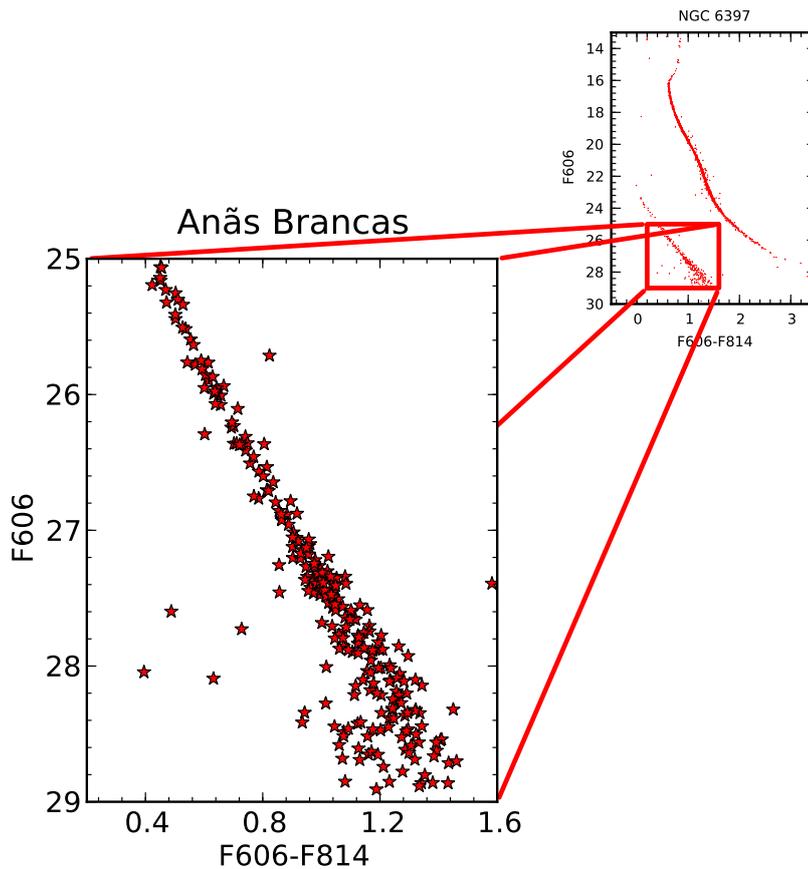


Figura 2.2 – Diagrama cor-magnitude do aglomerado NGC 6397, tendo destacado sua sequência de resfriamento das anãs brancas, principal região de estudo nesse trabalho.

2.1 NGC 6397

A fotometria para o aglomerado *NGC 6397* foi obtida por [Richer et al. \(2006\)](#) como parte do programa de observação *HST Cycle 13* (GO-10424, PI; H. Richer) totalizando 126 órbitas. Os dados são compostos por um conjunto de 256 exposições (aproximadamente 2 dias) no filtro F814W e 126 exposições (aproximadamente 1 dia) no filtro F606W a 5 minutos de arco do centro do aglomerado. Após obter as imagens, [Richer et al. \(2006\)](#) as compararam com as imagens do *Wide-Field Planetary Camera 2 (WFPC2)* obtidas em 1994 e 1997 para determinar o movimento próprio dos objetos do aglomerado. Como os objetos de um aglomerado globular devem ter o mesmo movimento próprio, foram consideradas pertencentes ao aglomerado apenas objetos com menos de 2σ de diferença da média do aglomerado ([Anderson et al., 2008](#)). Na figura 2.3 vemos a posição do campo observado pelo HST e algumas anãs brancas observadas.

Na figura 2.4 pode-se ver o diagrama cor-magnitude feito com os filtros F606 e F814 para as 1 295 anãs brancas observadas do aglomerado NGC 6397.

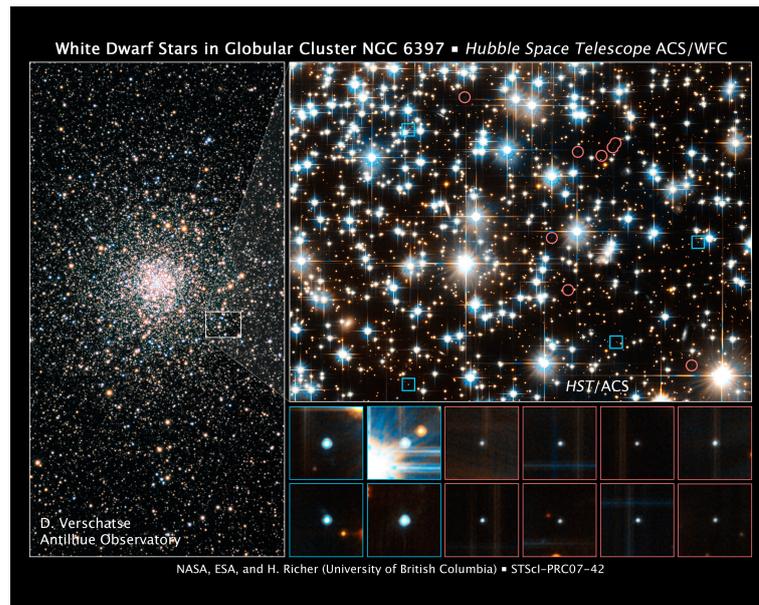


Figura 2.3 – Campo observado pelo telescópio espacial Hubble do aglomerado NGC 6397. As estrelas destacadas com borda azul e vermelha são, respectivamente, anãs brancas de baixa massa e de alta massa pertencentes ao aglomerado. Figura de <http://www.nasa.gov/images/content/203835main_hstimg_20071204_HI.jpg> (acessado em 07/11/2016).

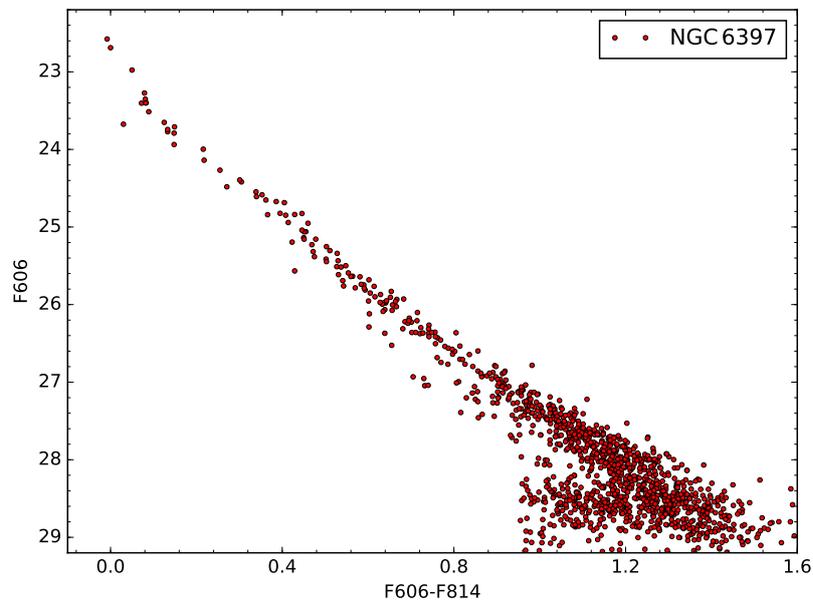


Figura 2.4 – Diagrama cor-magnitude para a sequência de resfriamento das anãs brancas do NGC 6397.

2.2 47 Tucanae

A fotometria para o aglomerado *47 Tucanae* foi obtida no programa de observação *HST Cycle 17* (GO-11677, PI; H. Richer) totalizando 121 órbitas. Foram feitas 117 exposições no filtro F606W (aproximadamente 2 dias) e 125 exposições no filtro F814W (aproximadamente 2 dias) (Kalirai et al., 2012). As observações foram feitas a 6.7 minutos de arco do centro do aglomerado (figura 2.5), onde já havia sido observado pelo *ACS* antes, permitindo ser feito o corte por movimento próprio como foi feito por Anderson et al. (2008) para o aglomerado *NGC 6397*.

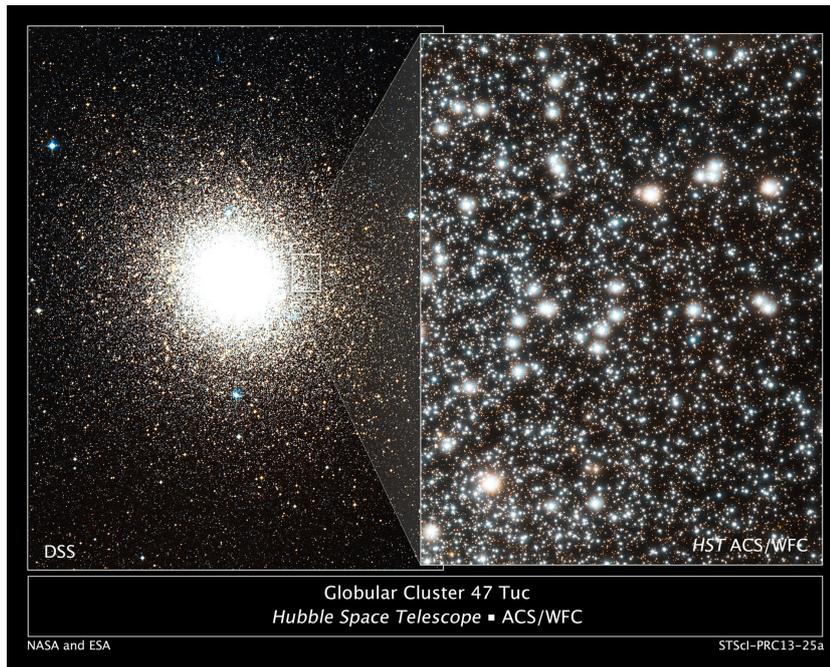


Figura 2.5 – Campo observado pelo telescópio espacial Hubble do aglomerado 47 Tucanae. Figura de <http://scitechdaily.com/images/Hubble-Views-Globular-Cluster-47-Tucanae.jpg> (acessado em 07/11/2016).

Na figura 2.6 pode-se ver o diagrama cor-magnitude feito com os filtros F606 e F814 para as 1 754 anãs brancas observadas do aglomerado 47 Tucanae.

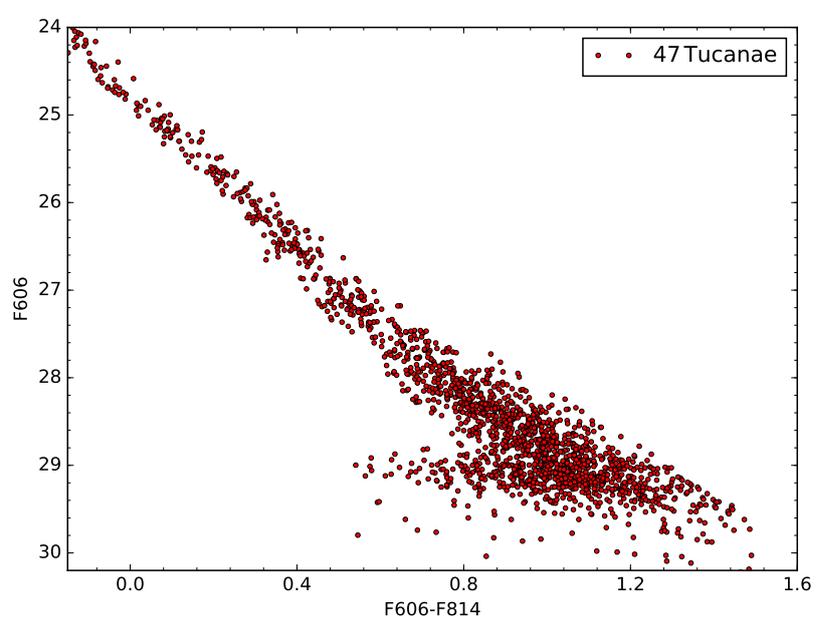


Figura 2.6 – Diagrama cor-magnitude para a sequência de resfriamento das anãs brancas do 47 Tucanae.

3 Determinação de parâmetros físicos

A maneira convencional de determinar-se parâmetros físicos de aglomerados globulares é o ajuste de isócrona, que seleciona pelo método de mínimos-quadrados uma isócrona associada a uma idade, metalicidade, distância e avermelhamento que melhor se ajusta aos dados do aglomerado, isto é, a que minimiza a distância quadrática de cada objeto do aglomerado com a isócrona. Porém, o ajuste de isócrona não leva em conta o acúmulo de estrelas em uma mesma região do diagrama cor-magnitude devido a diferentes durações de cada processo evolutivo. Para minimizar esse problema, proponho um método que se baseia em reconstruir o aglomerado com simulações de *Monte Carlo*, levando em conta a densidade de estrelas em cada região do diagrama cor-magnitude, e comparar as simulações com os dados reais para determinar seus parâmetros físicos.

O método proposto neste trabalho para a determinação de parâmetros físicos de aglomerados pode ser separado em quatro seções distintas: a construção das isócronas (3.1), a construção das matrizes de dispersão (3.2), simulações de aglomerados (3.3) e comparação das simulações com os dados reais (3.4).

Neste trabalho em particular, o método que desenvolvi e apliquei para determinar parâmetros físicos de aglomerados globulares foi utilizando suas anãs brancas, mas ele também é válido para outras regiões do diagrama cor-magnitude.

3.1 Construção das Isócronas

Como já foi descrito previamente, para construir isócronas é necessário possuir um conjunto de modelos de evolução estelar de diferentes massas iniciais e determinar para todas a temperatura e luminosidade em uma dada etapa da evolução.

A metalicidade dos aglomerados NGC 6397 e 47 Tucanae foi espectroscopicamente determinada em torno de, respectivamente, $Z = 0.0001 Z_{\odot}$ (Korn et al., 2007) e $Z = 0.004$ (Koch; McWilliam, 2008), nos permitindo construir isócronas utilizando modelos de evolução estelar calculados para essas metalicidades publicados por Romero, Campos e Kepler (2015). A figura 3.1 esquematiza o processo de construção de isócronas a partir de um conjunto de modelos de evolução estelar de diferentes massas.

Para converter do espaço de temperatura efetiva e luminosidade para a magnitude nos filtros a serem utilizados pelo telescópio, utilizei as cores sintéticas dos modelos de atmosfera para anãs brancas publicados por Holberg e Bergeron (2006).

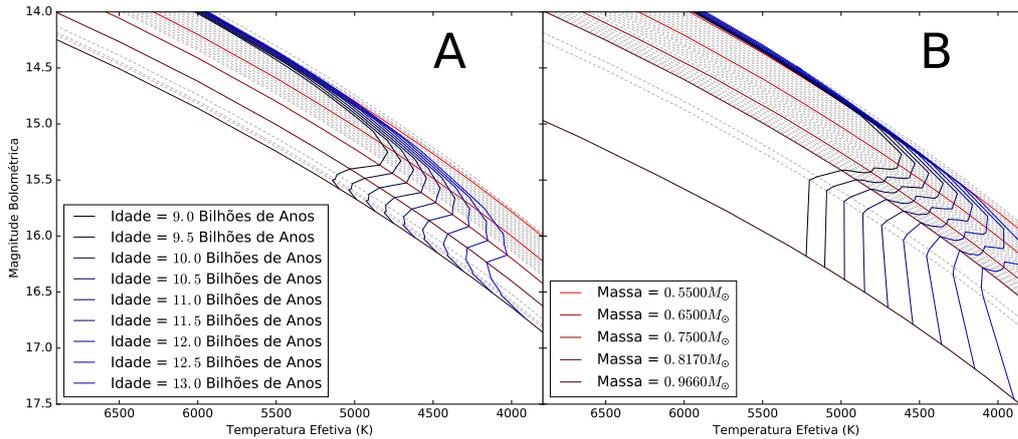


Figura 3.1 – Método para a construção de isócronas a partir de modelos de evolução estelar. Cada ponto da isócrona passa por diversos modelos de evolução estelar de massas diferentes com a mesma idade. A figura **A** representa um conjunto de modelos evolucionários com metalicidade inicial $Z \approx 0.0001$, já a figura **B**, metalicidade inicial $Z \approx 0.004$.

3.2 Construção das Matrizes de Dispersão

As matrizes de dispersão fotométrica representam a distribuição de probabilidade das incertezas fotométricas e a completeza associada a probabilidade de não-detecção do objeto para cada intervalo magnitude.

Para serem construídas, é necessário adicionar manualmente um conjunto de estrelas artificiais com magnitudes pré-definidas aos dados e refazer a fotometria para determinar as magnitudes observadas para essas estrelas artificiais. Com as magnitudes das estrelas artificiais determinadas, comparamos as medidas com os valores pré-definidos de cada objeto e com isso estimamos a média, a dispersão fotométrica dos dados (Kalirai et al., 2013). Ao ser refeita a fotometria, algumas estrelas não são recuperadas por estarem muito próximas a estrelas mais brilhantes ou sobrepostas. Essa fração de estrelas não recuperadas em comparação com as recuperadas resulta em uma estimativa de completeza para cada magnitude. As matrizes de dispersão calculadas nesse trabalho partiram das estrelas artificiais simuladas por Hansen et al. (2007, 2013), para os aglomerados *NGC 6397* e *47 Tucanae*. Na figura 3.2 podemos ver que a dispersão em torno da magnitude determinada para as estrelas artificiais cresce para magnitudes mais altas e que a distribuição em torno da média se torna assimétrica e na figura 3.3 podemos ver a dependência da completeza em função da magnitude para os filtros F606 e F814 para ambos os aglomerados.

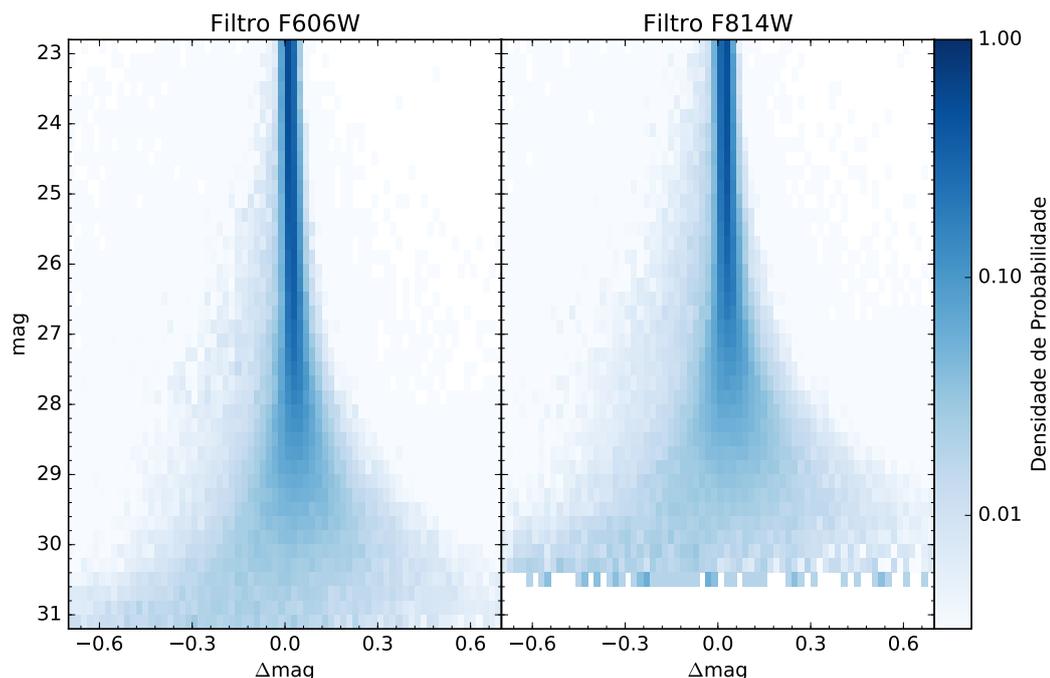


Figura 3.2 – Matrizes de dispersão tanto para o filtro F606W quanto para o F814W, construídas com estrelas simuladas por Hansen et al. (2007, 2013) para o aglomerado 47 Tucanae.

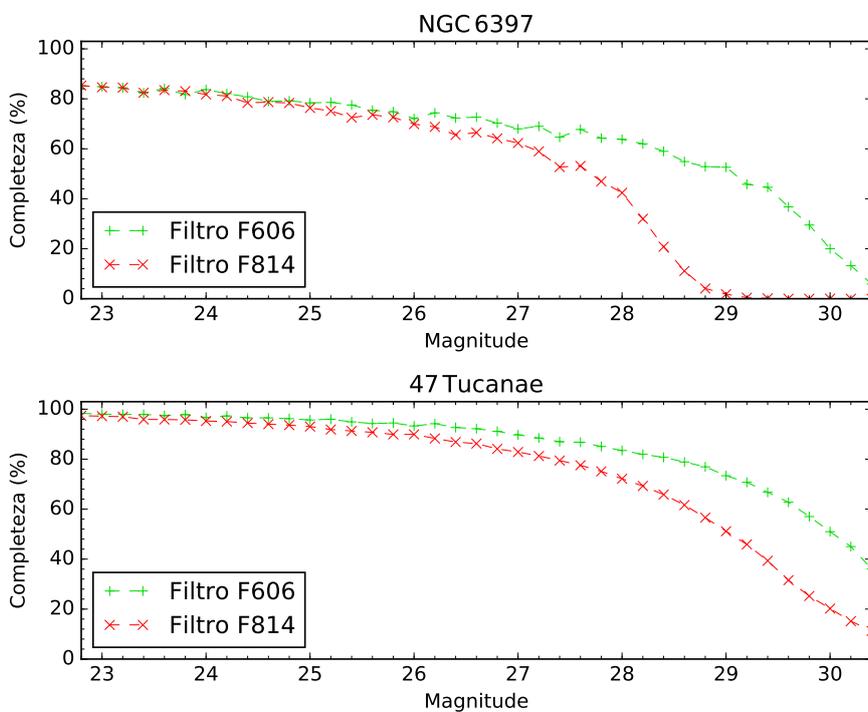


Figura 3.3 – Completeza em função da magnitude para os filtros F606 e F814 para os aglomerados NGC 6397 e 47 Tucanae

3.3 Simulação de Aglomerados

O primeiro passo para simular as estrelas de um aglomerado globular é a escolha de uma função de massa inicial.

Uma função de massa inicial descreve a fração de estrelas que se formam com massa entre m e $m + \Delta m$. Em um aglomerado a forma da função de massa inicial pode estar diretamente relacionada a sua metalicidade. Para a vizinhança solar, [Salpeter \(1955\)](#) determinou que a função de massa inicial segue a equação 3.1

$$N(m)\Delta m \propto \left(\frac{m}{M_{\odot}}\right)^{-2.35} \left(\frac{\Delta m}{M_{\odot}}\right) \quad (3.1)$$

Mais recentemente foram propostas outras funções de massa inicial, como a função de massa inicial de [Kroupa \(2001\)](#) e a de [Chabrier \(2003\)](#). Porém, como estamos estudando as anãs brancas, é necessário que suas progenitoras tenham tido tempo o suficiente para se tornar anãs brancas e estejam quentes o suficiente para estar acima do limite de detecção. Como o tempo de evolução e o tempo de resfriamento dependem da massa da progenitora, isso nos resulta em um intervalo de massas entre $0.88M_{\odot}$ e $6.5M_{\odot}$ para ambos aglomerados. Na figura 3.4 temos a comparação das funções de massa inicial de [Salpeter \(1955\)](#), [Kroupa \(2001\)](#) e [Chabrier \(2003\)](#), onde podemos ver claramente que no intervalo de massas iniciais de interesse as três funções são muito semelhantes.

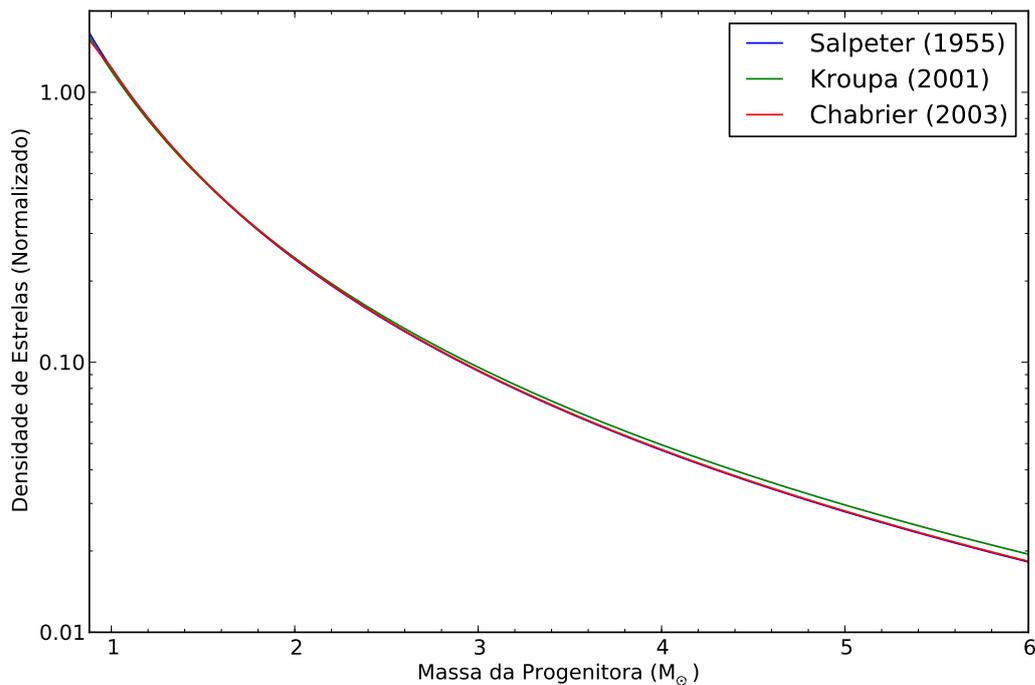


Figura 3.4 – Comparação das funções de massa inicial de [Salpeter \(1955\)](#), [Kroupa \(2001\)](#) e [Chabrier \(2003\)](#) com massas iniciais entre $0.88M_{\odot}$ e $6.5M_{\odot}$.

Como a função de massa inicial pode variar com a metalicidade e a função de Salpeter foi determinada para estrelas na vizinhança solar, isso é, para metalicidades semelhantes à do Sol, ela pode não representar bem os aglomerados a serem estudados nesse trabalho, pois eles possuem metalicidades pelo menos 4 vezes menor que a solar. As estrelas mais massivas de aglomerados globulares também se deslocam para seu centro durante sua evolução dinâmica, resultando em uma segregação de massa (Baumgardt; De Marchi; Kroupa, 2008), enquanto a difusão faz as anãs brancas mais massivas tendem a se afastar do centro devido ao relaxamento gravitacional (Heyl et al., 2015). Como a segregação de massa e a difusão fazem com que sejam observadas diferentes distribuições de massa ao longo do aglomerado globular, a função de massa inicial observada também varia espacialmente. Como nossas observações estão localizadas em pequenas regiões dos aglomerados, utilizamos uma *função de massa local atual* para descrever os dados, como mostra a equação 3.2, onde o parâmetro α deve ser determinado para cada aglomerado.

$$N(m)\Delta m \propto \left(\frac{m}{M_{\odot}}\right)^{-\alpha} \left(\frac{\Delta m}{M_{\odot}}\right) \quad (3.2)$$

Com a função de massa local atual determinada, é necessário normalizá-la para o intervalo de massas pré-determinado para atribuí-la sentido probabilístico, isso é, determinar a probabilidade de encontrar-se uma estrela com massa entre m e $m + \Delta m$ seguindo a dada distribuição. Por estarmos utilizando a função de Salpeter normalizada como distribuição de probabilidades, pode-se aplicar o *método da transformada inversa* (Press, William, 1992) para converter uma distribuição uniforme na dada distribuição, e assim gerar números pseudoaleatórios de acordo com a função de massa associado ao parâmetro α escolhido.

Caso não seja possível converter uma distribuição uniforme de números pseudoaleatórios na distribuição desejada, pode-se utilizar o processo de *Monte Carlo* para gerar números pseudoaleatórios com a dada distribuição (Press, William, 1992).

Tendo um conjunto de números pseudoaleatórios que representam as massas iniciais das progenitoras de um aglomerado artificial, podemos determinar a massa que a anã branca resultante do processo de evolução estelar terá a partir de uma *relação massa inicial-final*. Neste trabalho foram utilizadas as *relações massa inicial-final* calculadas por Romero, Campos e Kepler (2015) para as metalicidades dos aglomerados de interesse. A Figura 3.5 mostra a *relação massa inicial-final* para três metalicidades diferentes, deixando claro sua dependência.

Após utilizar a *relação massa inicial-final* para determinar a massa das anãs brancas simuladas, pode-se determinar a sua posição no diagrama cor-magnitude partindo de uma isócrona, e, utilizando o processo de *Monte Carlo* adiciona-se uma incerteza na magnitude de acordo com as matrizes de dispersão. A Figura 3.6 mostra o diagrama cor-magnitude

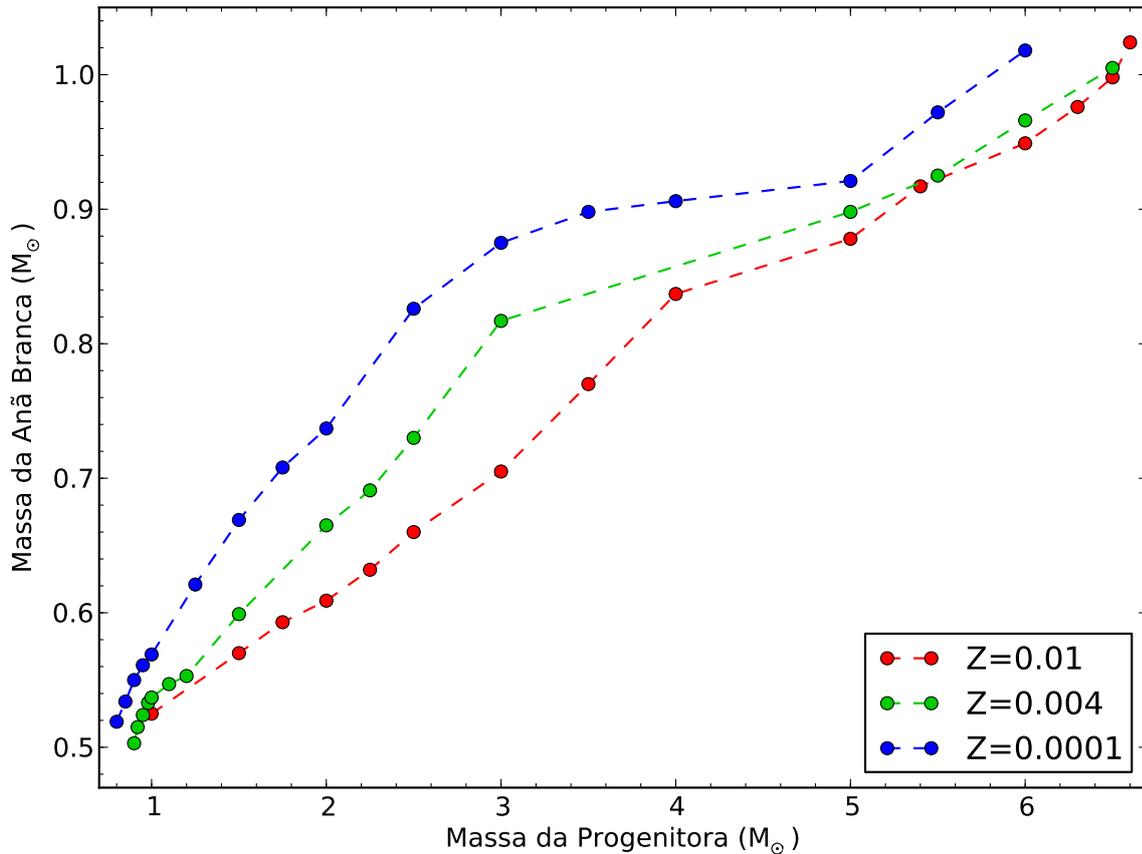


Figura 3.5 – Relação massa inicial-final para diferentes metalicidades calculadas por Romero, Campos e Kepler (2015).

para aglomerados simulados com diferentes isócronas.

3.4 Comparação das Simulações com os Dados

Neste trabalho utilizei dois métodos para a comparação dos dados reais com as simulações: Comparação de função de luminosidade no filtro F606 (3.4.1) e comparação de diagrama de Hess (3.4.2). Em ambos os casos utilizamos o método de minimização do χ^2 (3.4.3) para determinar qual simulação mais se assemelha aos dados.

3.4.1 Comparação de Função de Luminosidade

A função de luminosidade consiste em utilizar a magnitude das estrelas a serem estudadas em um único filtro e determinar o número de estrelas com magnitude entre “ mag e $mag + \Delta mag$ ”. Como foi visto na seção 3.2, nós conhecemos a dispersão fotométrica em função da magnitude, o que nos permite definir a magnitude da estrela como uma distribuição de probabilidade associada a um espaço contínuo de magnitudes.

Trabalhando em um espaço contínuo de magnitudes podemos levar em conta a

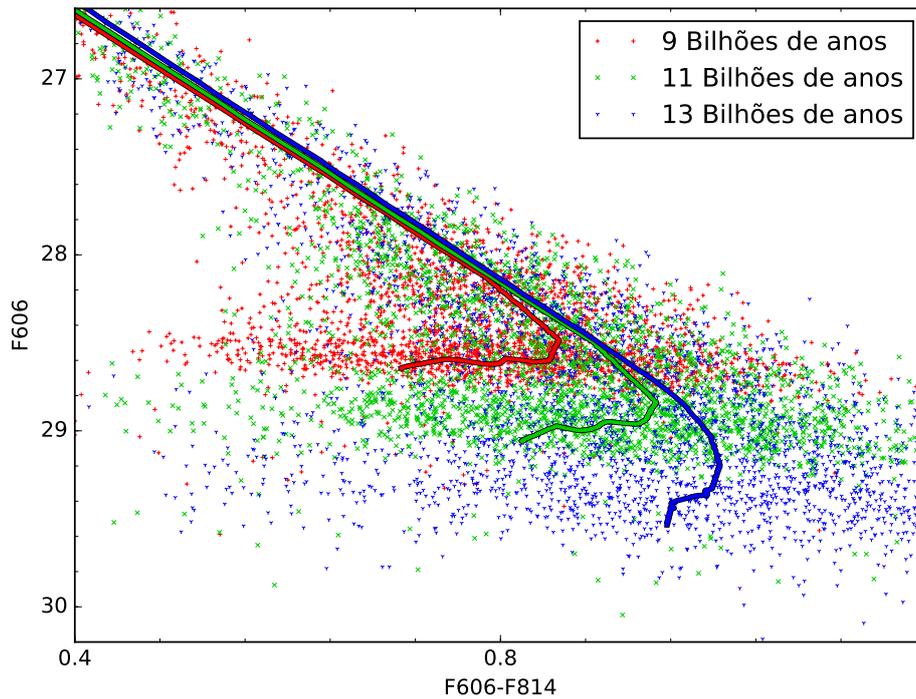


Figura 3.6 – Diagramas cor-magnitude para aglomerados simulados com diferentes isócronas. Foram simuladas 3 000 estrelas para cada aglomerado a uma distância 4.55 kpc, $A_v = 0.14 \text{ mag}$ e metalicidade $0.25 Z_\odot$.

incerteza fotométrica das estrelas, tanto as reais quanto as simuladas. Na figura 3.7 vemos a diferença entre a função de luminosidade discreta e contínua no filtro F606 para os dados do aglomerado 47 Tucanae.

Calculando a função de luminosidade para as simulações e para os dados, pode-se calcular o χ^2 e determinar qual simulação mais se assemelha aos dados.

A vantagem de se utilizar a função de luminosidade para comparar as simulações com os dados é que o número de estrelas com magnitude entre mag e $mag + \Delta mag$ é muito maior do que se utilizarmos células no espaço de cor-magnitude.

3.4.2 Comparação de Diagrama de Hess

O diagrama de Hess é construído contando o número de estrelas com magnitude entre “ mag e $mag + \Delta mag$ ” e “ cor e $cor + \Delta cor$ ”, dependendo de no mínimo dois filtros fotométricos. O diagrama de Hess também pode ser construído no espaço contínuo caso se conheça a dispersão fotométrica nos filtros fotométricos a serem utilizados, isto é, cada estrela segue uma distribuição de probabilidade de norma igual a um no diagrama cor-magnitude, onde a soma da distribuição de probabilidade de todas as estrelas resulta no diagrama de Hess. Na figura 3.8 temos a comparação do diagrama cor-magnitude usual

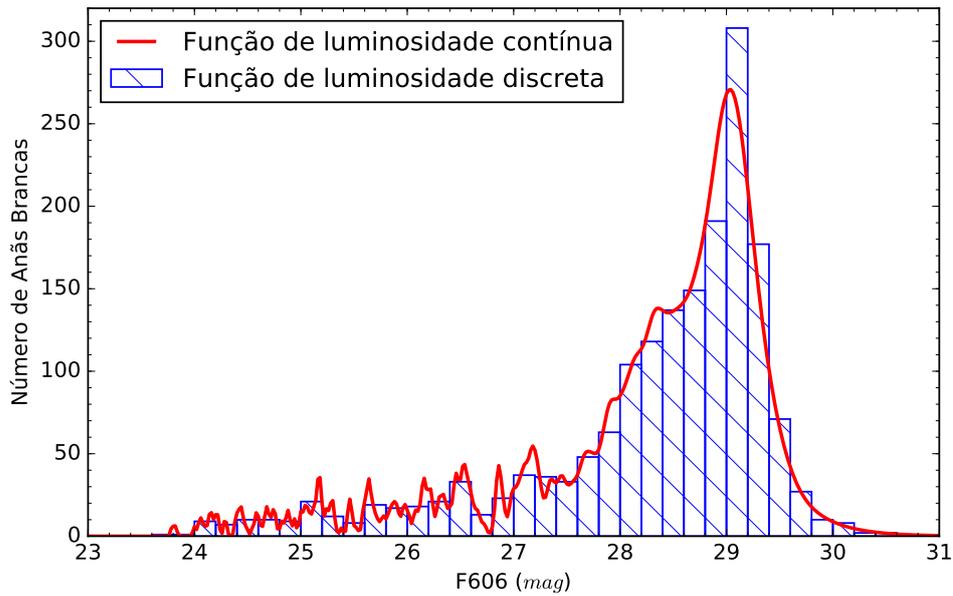


Figura 3.7 – Comparação entre a função de luminosidade contínua (linha vermelha) e a discreta (histograma azul). A função de luminosidade contínua não é adequada para as estrelas mais brilhantes devido ao baixo número de estrelas e pequenas incertezas, porém, para as estrelas menos brilhantes ela é mais adequada devido a alta dispersão fotométrica, o que não é levado em conta no caso discreto.

com o diagrama de Hess calculado com os dados do aglomerado NGC 6397 obtidos pelo *Telescópio Espacial Hubble*.

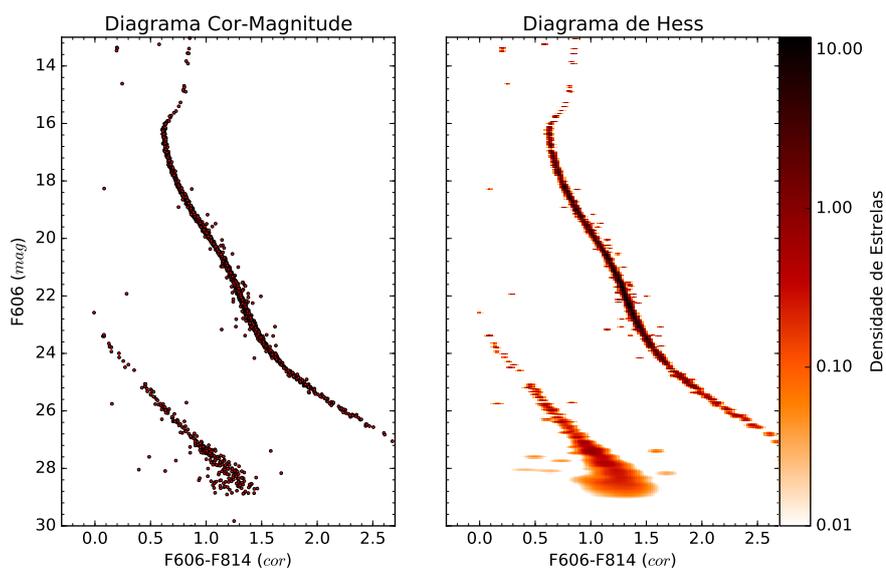


Figura 3.8 – Comparação do diagrama cor-magnitude usual com o diagrama de Hess calculado com os dados do aglomerado NGC 6397 obtidos pelo *Telescópio Espacial Hubble*.

O problema de se calcular o diagrama de Hess no espaço contínuo é que a dispersão na cor da estrela possui um termo de correlação entre os filtros que não é trivialmente determinável. Nesse trabalho desprezamos a correlação na dispersão da cor da estrela. Na figura 3.9 vemos um diagrama de Hess discreto e um contínuo para os dados nos filtros F606 e F814 do aglomerado 47 Tucanae.

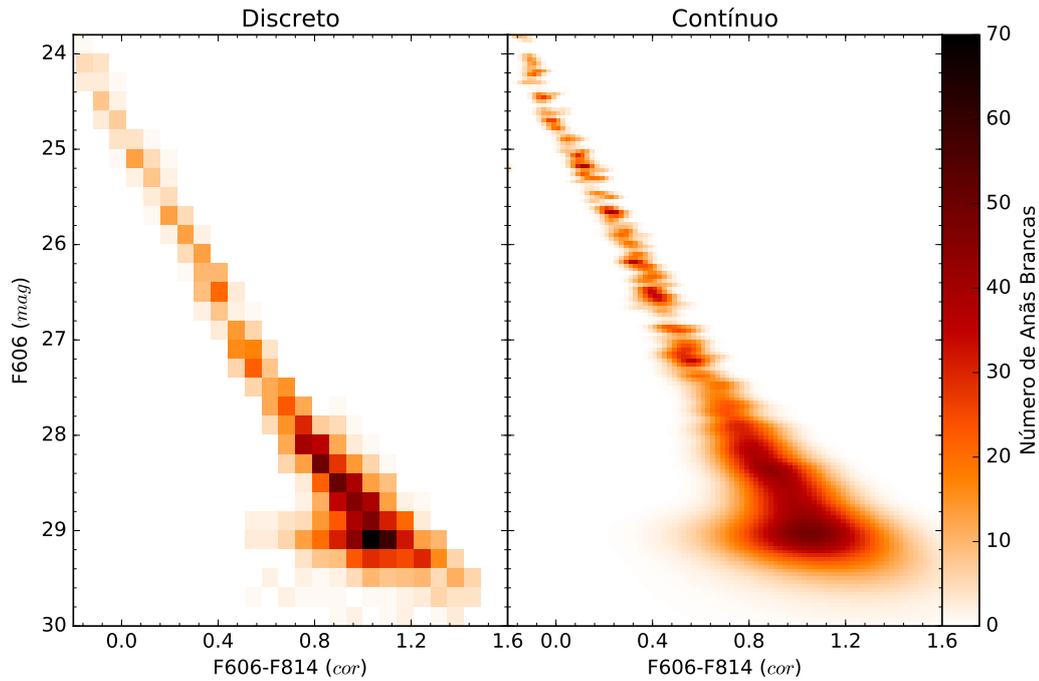


Figura 3.9 – Comparação entre o diagrama de Hess contínuo (gráfico da direita) e o discreto (gráfico da esquerda). O diagrama de Hess contínuo possui as mesmas desvantagens para as estrelas mais brilhantes e vantagens para as estrelas pouco brilhantes que a função de luminosidade.

Calculando o diagrama de Hess para as simulações e para os dados, pode-se calcular o χ^2 ambos e determinar qual simulação mais se assemelha aos dados.

As vantagens de se utilizar o diagrama de Hess é que, por levar em consideração a cor da estrela, os efeitos de avermelhamento ou de estrelas em estágios evolutivos diferentes com a mesma luminosidade não são ignorados.

3.4.3 Cálculo de χ^2

Ambos métodos resultam em uma distribuição, contínua ou discreta, de número ou densidade de estrelas. Para comparar os dados com as simulações, calculamos o χ^2 entre a distribuição construída para os dados e a distribuição construída para as simulações, como

mostra a equação 3.3.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_{\text{células}}} \frac{(N_i^{(\text{Dados})} - N_i^{(\text{Simulação})})^2}{\sigma_{N_i}^2} \quad (3.3)$$

No caso contínuo o somatório deve ser substituído por uma integral no espaço de magnitudes para funções de luminosidade ou por integrais no espaço de magnitudes e cores para diagramas de Hess.

Como o número de estrelas dos dados contidas na maioria das células é maior que 30, sua distribuição de incerteza segue aproximadamente uma distribuição normal, nos permitindo assumir que $\sigma_{N_i} = \sqrt{N_i^{(\text{Dados})}}$. Para as células com menos de 30 objetos sua significância estatística é tão pequena que optamos por não levá-las em conta no cálculo do χ^2 . Para o caso do diagrama de Hess, onde temos um espaço bidimensional, o número de estrelas por célula é menor que para a função de luminosidade, então optamos por aceitar apenas células com mais de 10 objetos e manter a aproximação para σ_{N_i} .

4 Resultados

Nesse trabalho aplicamos os métodos descritos na seção anterior para determinar simultaneamente a idade e o módulo de distância verdadeiro, μ_0 , para cada aglomerado fixando a extinção no filtro V, A_V , de acordo com o que foi determinado no artigo publicado por Campos et al. (2016) e o parâmetro $\alpha = 2.35$ como foi determinado por Salpeter (1955) para a vizinhança solar. Optamos também por fazer um segundo ajuste, dessa vez fixando μ_0 e A_V de acordo com o determinado por Campos et al. (2016) e mantendo a idade e o parâmetro α livres, para verificarmos se existe efeito de difusão estelar nos aglomerados.

Optamos também por utilizar a descrição discreta para o cálculo de funções de luminosidade para podermos comparar as estrelas mais brilhantes dos dados com as das simulações, e a descrição contínua para o diagrama de Hess para mantermos a informação da dispersão fotométrica nas estrelas menos brilhantes. Para evitar incertezas aleatórias geradas no processo de *Monte Carlo*, foram geradas acima de 20 000 estrelas por simulação.

Para podermos determinar o intervalo de confiança das nossas medidas, normalizamos as nossas medidas de χ^2 pelo menor valor obtido e tomamos com 68% de confiança a elipse de $\chi^2 = 2.30$, 95% a elipse de $\chi^2 = 6.17$ e 99% a elipse de $\chi^2 = 11.80$ (Press, William, 1992).

4.1 NGC 6397

Para ajustar os dados do aglomerado NGC 6397, fixamos A_V em 0.64 (Campos et al., 2016) e a metalicidade em $Z = 0.0001$ (Korn et al., 2007) e variamos a idade e o módulo de distância verdadeiro das estrelas simuladas.

4.1.1 Determinação de Idade e Módulo de Distância Verdadeiro

Para a determinação de idade e o módulo de distância verdadeiro foram simulados modelos com idades entre 11.0 e 15.0 bilhões de anos e μ_0 entre 11.0 e 12.8, com o parâmetro α igual a 2.35. A escolha desses intervalos foi feita para conter determinações desses parâmetros existentes na literatura. O mapa de χ^2 normalizado pode ser visto na figura 4.1.

O valor determinado para a idade e μ_0 utilizando a função de luminosidade foram 12.84 ± 0.75 bilhões de anos e 11.88 ± 0.18 . Utilizando o diagrama de Hess o valor para a idade e μ_0 foram 13.78 ± 1.28 bilhões de anos e 11.71 ± 0.10 . Pode-se ver que o valor de μ_0 obtido com a função de luminosidade e com o diagrama de Hess concordam entre si dentro das incertezas. As grandes incertezas ocorrem porque os modelos de atmosfera estelar para

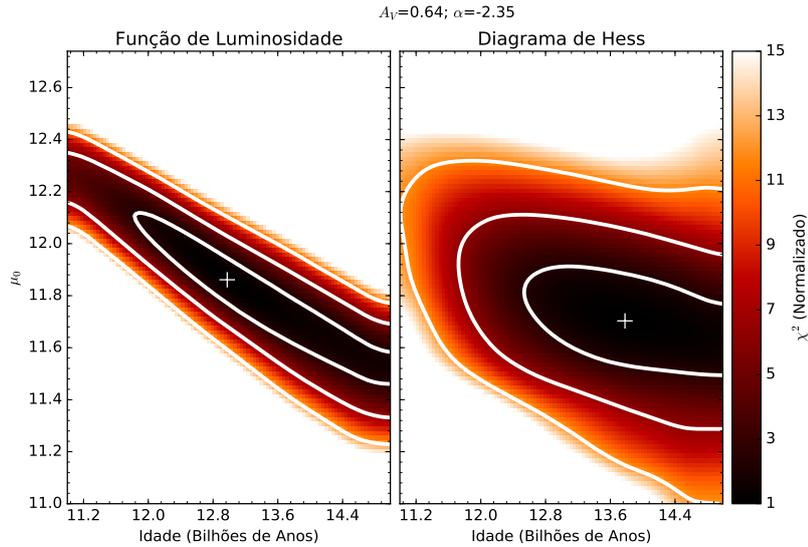


Figura 4.1 – Mapa de χ^2 normalizado para a determinação simultânea de idade e μ_0 para o aglomerado NGC 6397. A figura da esquerda foi feita com dados χ^2 normalizado obtido da função de luminosidade enquanto o da direita foi obtido do diagrama de Hess. A cruz marcada nos mapas representa a solução de menor χ^2 normalizado e as elipses em torno dela representam os intervalos de confiança de, respectivamente, 68%, 95% e 99%.

as estrelas muito frias ainda não estão bem calibrados, já que a espectroscopia das estrelas mais frias ainda não é viável. Já a grande diferença entre as duas medidas ocorre porque todos os modelos de evolução estelar atuais reproduzem estrelas mais quentes do que as observadas, efeito que é pouco significativo na função de luminosidade, já que depende apenas de um filtro.

Na figura 4.2 temos a comparação do diagrama cor-magnitude construído com as estrelas do aglomerado e o construído com 1 295 das estrelas simuladas utilizando os parâmetros fornecidos pelo ajuste por função de luminosidade. Pode-se ver claramente que a simulação não é capaz de reproduzir a forma do diagrama cor-magnitude para as estrelas mais frias, o que pode estar associado a incerteza na determinação de opacidades moleculares (Bertelli et al., 1994) e no efeito de absorção induzida por colisão, que ainda não foi bem determinado (Borysow, 2002).

4.1.2 Determinação de Idade e Parâmetro α

Para a determinação de idade e parâmetro α foram simulados modelos com idades entre 12.0 e 14.0 bilhões de anos e α entre 1.0 e 3.5 com μ_0 igual a 11.85. O mapa de χ^2 normalizado pode ser visto na figura 4.3.

O valor determinado para a idade e α utilizando a função de luminosidade foram 12.86 ± 0.25 bilhões de anos e 2.17 ± 0.29 . Utilizando o diagrama de Hess o valor para a idade e α foram 13.3 bilhões de anos e 2.40 porém suas incertezas estão acima da nossa grade

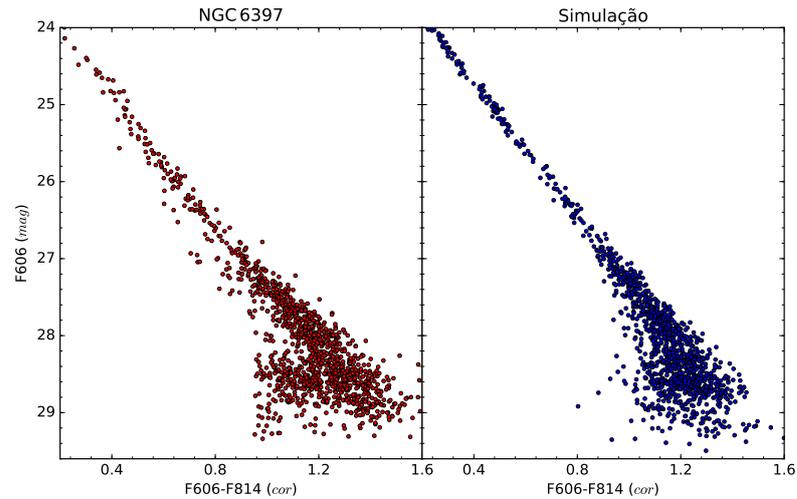


Figura 4.2 – Comparação das estrelas do aglomerado NGC 6397 com as estrelas simuladas com idade 12.84 bilhões de anos e μ_0 igual a 13.58.

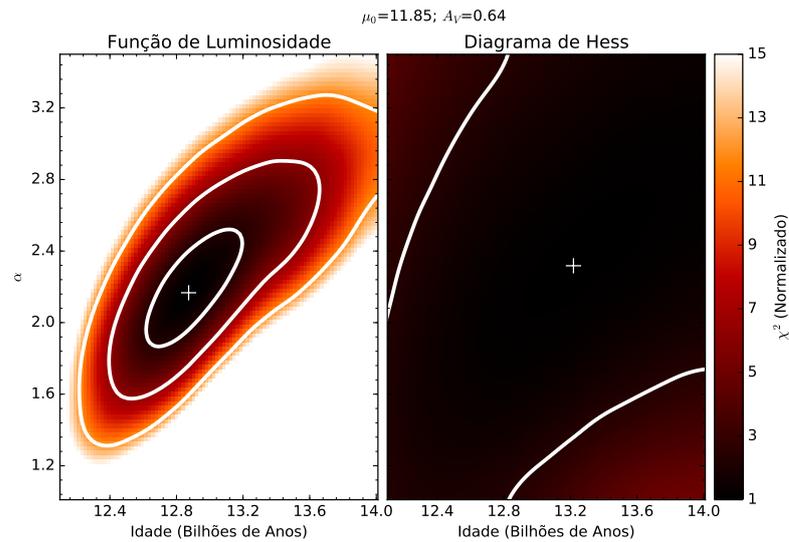


Figura 4.3 – Mapa de χ^2 normalizado para a determinação simultânea de idade e α para o aglomerado NGC 6397. A figura da esquerda foi feita com dados χ^2 normalizado obtido da função de luminosidade enquanto o da direita foi obtido do diagrama de Hess. Pode-se ver claramente que o ajuste por diagrama de Hess não possui resolução suficiente para se determinar sua incerteza.

de parâmetros. Pode-se ver que determinação idade do aglomerado mantendo a distância constante possui uma incerteza muito menor. Isso ocorre por que aglomerados tanto mais velhos quanto mais distantes são menos brilhantes, levando a grande degenerescência de soluções.

O parâmetro α ser menor que 2.35 (Salpeter, 1955) indica que esta região do aglomerado possui estrelas que se formaram preferencialmente com alta massa, o que é

consistente com o fato de que para baixas metalicidades a fragmentação da nuvem cessa em massas maiores (Kippenhahn, Rudolf, 2013).

Na figura 4.4 temos a comparação do diagrama cor-magnitude construído com as estrelas do aglomerado e o construído com 1 295 das estrelas simuladas utilizando os parâmetros fornecidos pelo ajuste por função de luminosidade.

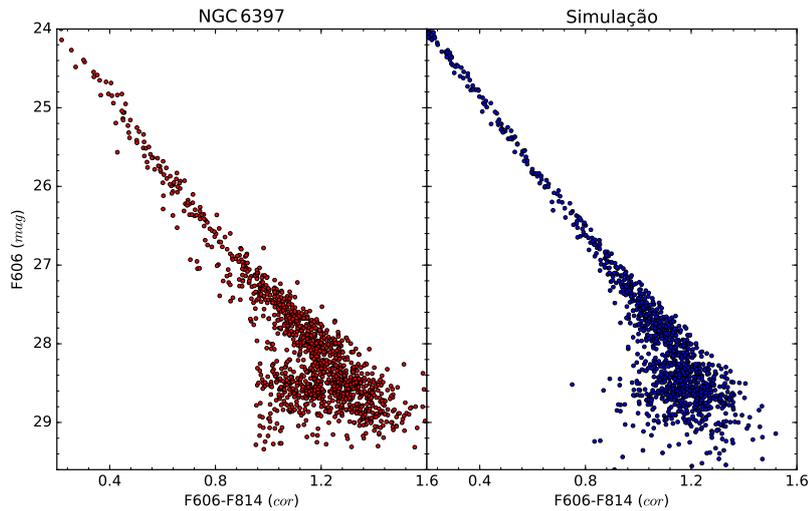


Figura 4.4 – Comparação das estrelas do aglomerado NGC 6397 com as estrelas simuladas com idade 12.86 bilhões de anos e parâmetro α igual a 2.17.

4.2 47 Tucanae

Para ajustar os dados do aglomerado 47 Tucanae, fixamos A_V em 0.14 (Campos et al., 2016) e a metalicidade em $Z = 0.004$ (Koch; McWilliam, 2008) e variamos a idade e o parâmetro μ_0 das estrelas simuladas.

4.2.1 Determinação de Idade e Módulo de Distância Verdadeiro

Para a determinação de idade e módulo de distância verdadeiro foram simulados modelos com idades entre 11.0 e 15.0 bilhões de anos e μ_0 entre 12.0 e 14.7 com o parâmetro α igual a 2.35. O mapa de χ^2 normalizado pode ser visto na figura 4.5.

O valor determinado para a idade e μ_0 utilizando a função de luminosidade foram 12.74 ± 1.74 bilhões de anos e 13.13 ± 0.24 . Utilizando o diagrama de Hess o valor para a idade e μ_0 foram 12.76 ± 1.26 bilhões de anos e 13.14 ± 0.08 .

Na figura 4.6 temos a comparação do diagrama cor-magnitude construído com as estrelas do aglomerado e o construído com 1 754 das estrelas simuladas utilizando os parâmetros fornecidos pelo ajuste por diagrama de Hess.

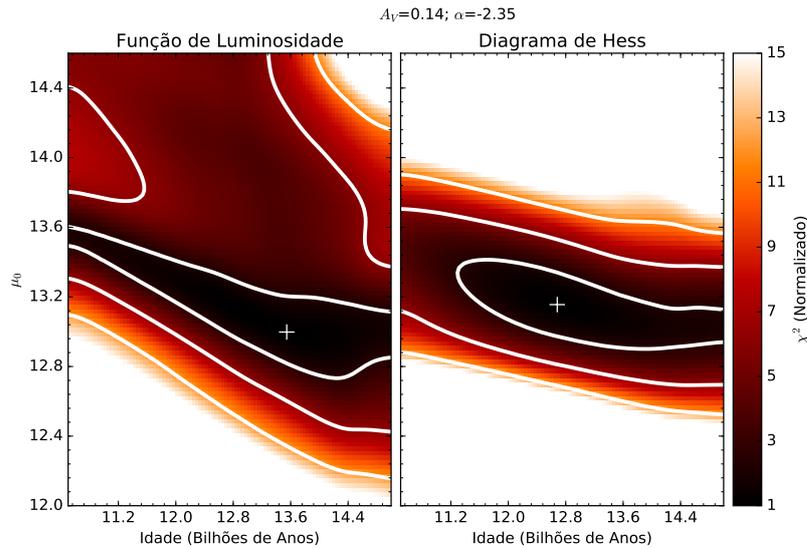


Figura 4.5 – Mapa de χ^2 normalizado para a determinação simultânea de idade e μ_0 para o aglomerado 47 Tucanae. A figura da esquerda foi feita com dados χ^2 normalizado obtido da função de luminosidade enquanto o da direita foi obtido do diagrama de Hess.

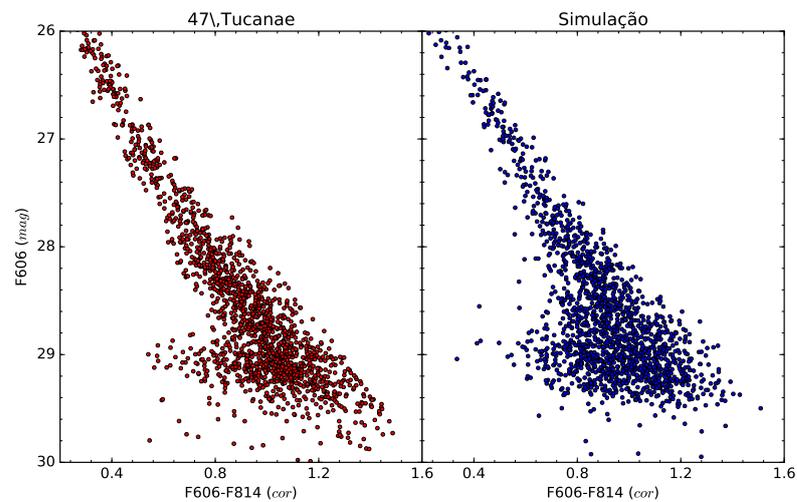


Figura 4.6 – Comparação das estrelas do aglomerado 47 Tucanae com as estrelas simuladas com idade igual a 12.76 bilhões de anos e μ_0 igual a 13.14.

4.2.2 Determinação de Idade e Parâmetro α

Para a determinação de idade e parâmetro α foram simulados modelos com idades entre 11.0 e 15.0 bilhões anos de e α entre 1.5 e 5.0 com μ_0 igual a 13.28. O mapa de χ^2 normalizado pode ser visto na figura 4.7.

O valor determinado para a idade e α utilizando a função de luminosidade foram 12.40 ± 0.40 bilhões de anos e 3.05 ± 0.69 . Utilizando o diagrama de Hess o valor para a idade e α foram 12.7 bilhões de anos e 3.29 porém suas incertezas estão acima da nossa

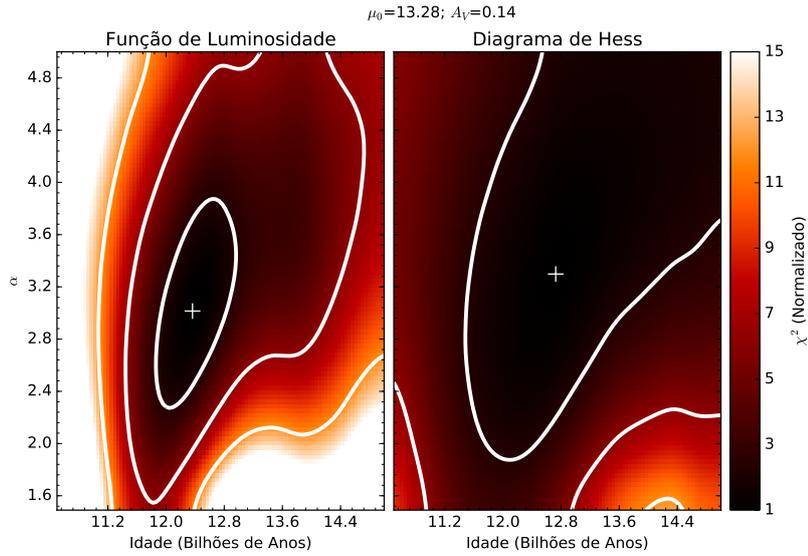


Figura 4.7 – Mapa de χ^2 normalizado para a determinação simultânea de idade e α para o aglomerado 47 Tucanae. A figura da esquerda foi feita com dados χ^2 normalizado obtido da função de luminosidade enquanto o da direita foi obtido do diagrama de Hess.

grade de parâmetros.

O parâmetro α ser maior que 2.35 indica que esta região do aglomerado possui estrelas que se formaram preferencialmente com baixa massa, o que pode estar relacionado a difusão causada pelo relaxamento gravitacional, como já foi observado por [Heyl et al. \(2015\)](#) nesse aglomerado.

Na figura 4.8 temos a comparação do diagrama cor-magnitude construído com as estrelas do aglomerado e o construído com 1 754 das estrelas simuladas utilizando os parâmetros fornecidos pelo ajuste por função de luminosidade.

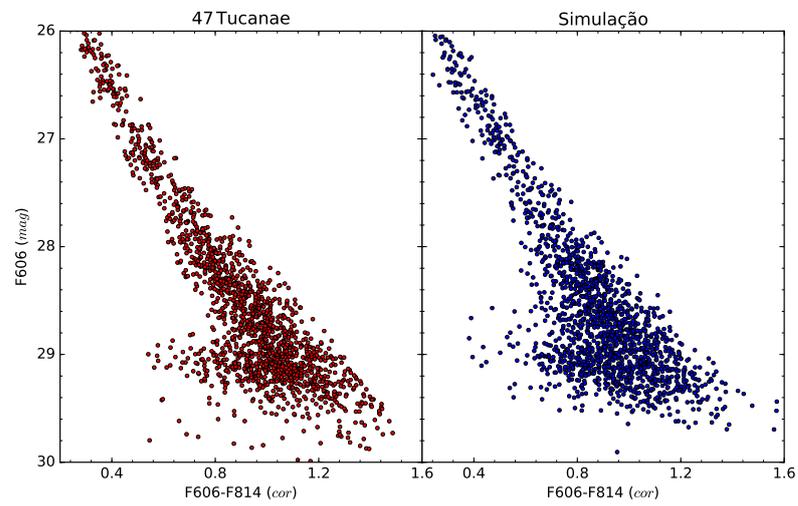


Figura 4.8 – Comparação das estrelas do aglomerado 47 Tucanae com as estrelas simuladas com idade 12.40 bilhões de anos e parâmetro α igual a 3.05.

5 Conclusões

O avanço das técnicas para determinar parâmetros de aglomerados globulares é essencial para a melhor compreensão dos fenômenos físicos envolvidos em sua formação e evolução. O ajuste de isócrona usualmente feito para se determinar parâmetros físicos de aglomerados globulares não leva em consideração a duração de estágios evolutivos, informação essencial para determinar quais regiões do diagrama cor-magnitude devem ser mais consideradas no ajuste.

Como foi visto nesse trabalho, a função de massa inicial pode ser essencial para a boa determinação da idade de aglomerados globulares, parâmetro que não é levado em conta no ajuste de isócrona e pode causar uma diferença de aproximadamente meio bilhão de anos na determinação de sua idade.

O método proposto nesse trabalho leva em conta tanto duração dos diferentes estágios evolutivos quanto função de massa local atual associada aos dados a serem estudados e leva em consideração a dispersão fotométrica associada aos dados, o que resulta em determinações mais confiáveis do que as obtidas por inspeção visual.

A comparação de simulações e dados por diagramas de Hess se mostrou bem consistente. Todas as determinações de idade e módulo de distância feitas nesse trabalho estão dentro do intervalo de determinações existente na literatura, apresentadas nos capítulos 1.7 e 1.8. São poucas as determinações do parâmetro α na literatura, mas [Giersz e Heggie \(2011\)](#), utilizando simulações de *Monte Carlo*, já havia observado a necessidade do parâmetro α ser maior que 2.35 para reproduzir os dados do aglomerado 47 Tucanae.

O estudo das anãs brancas de aglomerados globulares é essencial para o avanço das teorias de evolução estelar e de evolução dinâmica do aglomerado. Recentemente foi observado por [Heyl et al. \(2015\)](#) que as anãs brancas mais massivas do aglomerado 47 Tucanae se localizam longe do centro do aglomerado, oposto do que é esperado em modelos de segregação de massa. [Heyl et al.](#) propôs que anãs brancas mais massivas, por serem as primeiras a se formarem, interagirão com várias estrelas durante o processo de relaxação do aglomerado e, como as estrelas perdem cerca de 40% da sua massa após se tornarem anãs brancas, a teoria de equipartição de energia garante que as anãs brancas ganhariam energia cinética e passariam a se difundir para fora do aglomerado. O resultado obtido nesse trabalho está de acordo com a teoria proposta por [Heyl et al.](#), já que para o aglomerado 47 Tucanae, que as observações são próximas de seu centro, vemos poucas estrelas massivas, enquanto para o NGC 6397, onde as observações estão longe do centro do aglomerado, vemos um número elevado de estrelas massivas.

A excesso de estrelas massivas no aglomerado NGC 6397 também pode ser con-

sequência de sua baixa metalicidade. O tamanho mínimo para fragmentação das nuvens que formam os aglomerados é inversamente proporcional a sua metalicidade, isso é, nuvens menos metálicas cessam sua fragmentação em fragmentos mais massivos, que formarão estrelas mais massivas.

Referências

- Anderson, J. et al. Deep Advanced Camera for Surveys Imaging in the Globular Cluster NGC 6397: Reduction Methods. *AJ*, v. 135, p. 2114–2128, jun. 2008. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.
- Baumgardt, H.; De Marchi, G.; Kroupa, P. Evidence for Primordial Mass Segregation in Globular Clusters. *ApJ*, v. 685, p. 247–253, set. 2008. Citado na página 39.
- Bertelli, G. et al. Theoretical isochrones from models with new radiative opacities. *A&AS*, v. 106, ago. 1994. Citado na página 46.
- Bianchini, P. et al. Rotating Globular Clusters. *ApJ*, v. 772, p. 67, jul. 2013. Citado na página 27.
- Bica, E. et al. Globular cluster system and Milky Way properties revisited. *A&A*, v. 450, p. 105–115, abr. 2006. Citado na página 19.
- Boehle, A. et al. An Improved Distance and Mass Estimate for Sgr A* from a Multistar Orbit Analysis. *ApJ*, v. 830, p. 17, out. 2016. Citado na página 18.
- Bolte, M.; Hogan, C. J. Conflict over the age of the Universe. *Nature*, v. 376, p. 399–402, ago. 1995. Citado na página 22.
- Bonatto, C. et al. FSR1767 - a new globular cluster in the Galaxy. *MNRAS*, v. 381, p. L45–L49, out. 2007. Citado na página 19.
- Borysow, A. *Collision-induced Absorption in the infrared: A data base for modelling planetary and stellar atmospheres*. 2002. Disponível em: <<http://www.astro.ku.dk/~aborysow/programs/>>. Citado na página 46.
- Campos, F. *Estudo da evolução estelar através de aglomerados globulares galácticos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Física. Programa de Pós-Graduação em Física., 2013. Citado na página 15.
- Campos, F. et al. A comparative analysis of the observed white dwarf cooling sequence from globular clusters. *MNRAS*, v. 456, p. 3729–3742, mar. 2016. Citado 5 vezes nas páginas 25, 26, 27, 45 e 48.
- Cardelli, J. A.; Clayton, G. C.; Mathis, J. S. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction. *ApJ*, v. 345, p. 245–256, out. 1989. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- Chabrier, G. Galactic Stellar and Substellar Initial Mass Function. *PASP*, v. 115, p. 763–795, jul. 2003. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 38.
- Dalessandro, E. et al. Ultraviolet Properties of Galactic Globular Clusters with Gaia. II. Integrated Colors. *AJ*, v. 144, p. 126, nov. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- di Criscienzo, M.; D’Antona, F.; Ventura, P. A detailed study of the main sequence of the globular cluster NGC 6397: can we derive constraints on the existence of multiple populations? *A&A*, v. 511, p. A70, fev. 2010. Citado na página 26.

- Fontaine, G.; Brassard, P.; Bergeron, P. The Potential of White Dwarf Cosmochronology. *PASP*, v. 113, p. 409–435, abr. 2001. Citado na página 22.
- Fritz, T. K. et al. The Nuclear Cluster of the Milky Way: Total Mass and Luminosity. *ApJ*, v. 821, p. 44, abr. 2016. Citado na página 18.
- Giersz, M.; Heggie, D. C. Monte Carlo simulations of star clusters - VII. The globular cluster 47 Tuc. *MNRAS*, v. 410, p. 2698–2713, fev. 2011. Citado na página 53.
- Goldsbury, R. et al. The ACS Survey of Galactic Globular Clusters. X. New Determinations of Centers for 65 Clusters. *AJ*, v. 140, p. 1830–1837, dez. 2010. Citado na página 25.
- Guillot, S. et al. Measurement of the Radius of Neutron Stars with High Signal-to-noise Quiescent Low-mass X-Ray Binaries in Globular Clusters. *ApJ*, v. 772, p. 7, jul. 2013. Citado na página 26.
- Hansen, B. M. S. et al. The White Dwarf Cooling Sequence of NGC 6397. *ApJ*, v. 671, p. 380–401, dez. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- Hansen, B. M. S. et al. An age difference of two billion years between a metal-rich and a metal-poor globular cluster. *Nature*, v. 500, p. 51–53, ago. 2013. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- Harris, W. E.; Harris, G. L. H.; Alessi, M. A Catalog of Globular Cluster Systems: What Determines the Size of a Galaxy’s Globular Cluster Population? *ApJ*, v. 772, p. 82, ago. 2013. Citado na página 15.
- Heinke, C. O. et al. Improved mass and radius constraints for quiescent neutron stars in ω Cen and NGC 6397. *MNRAS*, v. 444, p. 443–456, out. 2014. Citado na página 26.
- Heyl, J. et al. A Measurement of Diffusion in 47 Tucanae. *ApJ*, v. 804, p. 53, maio 2015. Citado 3 vezes nas páginas 39, 50 e 53.
- Heyl, J. S. et al. Deep Hubble Space Telescope Imaging in NGC 6397: Stellar Dynamics. *ApJ*, v. 761, p. 51, dez. 2012. Citado na página 26.
- Holberg, J. B.; Bergeron, P. Calibration of Synthetic Photometry Using DA White Dwarfs. *AJ*, v. 132, p. 1221–1233, set. 2006. Citado na página 35.
- Jeans, J. H. The Stability of a Spherical Nebula. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, v. 199, p. 1–53, 1902. Citado na página 18.
- Kalirai, J. S. et al. Ultra-Deep Hubble Space Telescope Imaging of the Small Magellanic Cloud: The Initial Mass Function of Stars with $M < \sim 1 M_{\odot}$. *ApJ*, v. 763, p. 110, fev. 2013. Citado na página 36.
- Kalirai, J. S. et al. A Deep, Wide-field, and Panchromatic View of 47 Tuc and the SMC with HST: Observations and Data Analysis Methods. *AJ*, v. 143, p. 11, jan. 2012. Citado na página 32.
- Kippenhahn, Rudolf. *Stellar structure and evolution*. Berlin New York: Springer, 2013. ISBN 978-3-642-30304-3. Citado na página 47.

- Koch, A.; McWilliam, A. A New Abundance Scale for the Globular Cluster 47 Tuc. *AJ*, v. 135, p. 1551–1566, abr. 2008. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 48.
- Korn, A. J. et al. Atomic Diffusion and Mixing in Old Stars. I. Very Large Telescope FLAMES-UVES Observations of Stars in NGC 6397. *ApJ*, v. 671, p. 402–419, dez. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 45.
- Kroupa, P. On the variation of the initial mass function. *MNRAS*, v. 322, p. 231–246, abr. 2001. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 38.
- Malkin, Z. M. Analysis of determinations of the distance between the sun and the galactic center. *Astronomy Reports*, v. 57, p. 128–133, fev. 2013. Citado na página 18.
- Marino, A. F. et al. Chemical abundances in the multiple sub-giant branch of 47 Tucanae: insights on its faint sub-giant branch component. *MNRAS*, v. 459, p. 610–623, jun. 2016. Citado na página 27.
- Martinazzi, E. et al. Probing mass segregation in the globular cluster NGC 6397. *MNRAS*, v. 442, p. 3105–3111, ago. 2014. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25 e 26.
- Mazzali, P. A. et al. A Common Explosion Mechanism for Type Ia Supernovae. *Science*, v. 315, p. 825, fev. 2007. Citado na página 22.
- McLaughlin, D. E. et al. Hubble Space Telescope Proper Motions and Stellar Dynamics in the Core of the Globular Cluster 47 Tucanae. *ApJS*, v. 166, p. 249–297, set. 2006. Citado na página 27.
- Press, William. *Numerical recipes in C : the art of scientific computing*. Cambridge Cambridgeshire New York: Cambridge University Press, 1992. ISBN 0-521-43108-5. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 45.
- Richer, H. B. et al. Probing the Faintest Stars in a Globular Star Cluster. *Science*, v. 313, p. 936–940, ago. 2006. Citado na página 30.
- Richer, H. B. et al. Comparing the White Dwarf Cooling Sequences in 47 Tuc and NGC 6397. *ApJ*, v. 778, p. 104, dez. 2013. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 27.
- Romero, A. D.; Campos, F.; Kepler, S. O. The age-metallicity dependence for white dwarf stars. *MNRAS*, v. 450, p. 3708–3723, jul. 2015. Citado 3 vezes nas páginas 35, 39 e 40.
- Salpeter, E. E. The Luminosity Function and Stellar Evolution. *ApJ*, v. 121, p. 161, jan. 1955. Citado 4 vezes nas páginas 9, 38, 45 e 47.
- Skrutskie, M. F. et al. The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *AJ*, v. 131, p. 1163–1183, fev. 2006. Citado na página 26.
- Thompson, I. B. et al. The Cluster AgeS Experiment (CASE). IV. Analysis of the Eclipsing Binary V69 in the Globular Cluster 47 Tuc. *AJ*, v. 139, p. 329–341, fev. 2010. Citado na página 27.
- Torres, S. et al. The white dwarf population of NGC 6397. *A&A*, v. 581, p. A90, set. 2015. Citado 3 vezes nas páginas 25, 26 e 27.

VandenBerg, D. A. et al. The Ages of 55 Globular Clusters as Determined Using an Improved $\Delta V^{\text{HB_TO}}$ Method along with Color-Magnitude Diagram Constraints, and Their Implications for Broader Issues. *ApJ*, v. 775, p. 134, out. 2013. Citado na página 25.

Zinn, R. The globular cluster system of the galaxy. IV - The halo and disk subsystems. *ApJ*, v. 293, p. 424–444, jun. 1985. Citado na página 15.