



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ**  
**Programa de Pós-Graduação em Física**

**Dissertação de mestrado**

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICOS DE AGLOMERADOS ABERTOS  
ATRAVÉS DA ANÁLISE DE DIAGRAMAS COR - MAGNITUDE MULTIBANDA**

**CLEITON CARILLO DE SOUZA**

**Sob orientação do**  
**Prof. Dr. LEANDRO DE OLIVEIRA KERBER**

**Ilhéus, BA - Brasil**  
**Novembro - 2014**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ**

**Programa de Pós-Graduação em Física**

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICOS DE AGLOMERADOS ABERTOS  
ATRAVÉS DA ANÁLISE DE DIAGRAMAS COR - MAGNITUDE MULTIBANDA<sup>1</sup>**

**CLEITON CARILLO DE SOUZA**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós - Graduação em Física da UESC em  
preenchimento parcial dos requisitos para  
a obtenção do grau de Mestre em Física

Área de concentração: Astrofísica estelar

Orientador: Prof. Dr. Leandro Kerber

**Ilhéus  
2014**

---

<sup>1</sup>Trabalho financiado pela CAPES

S729

Souza, Cleiton Carillo de.

Determinação de parâmetros físicos de aglomerados abertos através da análise de diagramas cor – magnitude multibanda / Cleiton Carillo de Souza. – Ilhéus, BA: UESC, 2014.

xxi, 98f. : il.

Orientador: Leandro de Oliveira Kerber.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Santa Cruz. Programa de Pós-Graduação em Física.

Inclui referências.

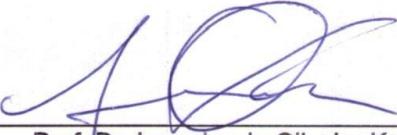
1. Estrelas – Aglomerados.
2. Estrelas – Evolução.
3. Fotometria astronômica.
4. Título.

CDD 523.8

CLEITON CARILLO DE SOUZA

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICOS DE AGLOMERADOS ABERTOS ATRAVÉS  
DE ANÁLISE DE DIAGRAMAS COR-MAGNITUDE MULTIBANDA**

Ilhéus-BA, 24 de novembro de 2014.



---

Prof. Dr. Leandro de Oliveira Kerber  
UESC - Universidade Estadual de Santa Cruz  
Orientador



---

Prof. Dr. João Francisco Coelho dos Santos Júnior  
UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais  
Examinador Externo



---

Prof. Dr. Henri Michel Pierre Plana  
UESC - Universidade Estadual de Santa Cruz  
Examinador Interno

Ilhéus-BA  
2014

*À minha família.*

# Agradecimentos

Ao longo desses anos de UESC, desde a iniciação científica na graduação até o mestrado, convivi com várias pessoas que me ajudaram a crescer tanto como pessoa quanto como profissional. A essas devo o meu sincero agradecimento e reconhecimento que me ajudaram na concretização desta dissertação de mestrado, e sem os quais não teria finalizado. Em especial gostaria de agradecer:

Ao meu orientador, Leandro Kerber pela orientação, compreensão e apoio que me prestou durante boa parte da minha presente vida acadêmica. Sempre servindo de exemplo de bom profissional e sempre me mostrando um dos caminhos possíveis nas minhas atividades de pesquisa. Meu muito obrigado pelas oportunidades e pela preocupação em realizar um bom trabalho.

À Débora, minha melhor amiga e namorada. Obrigado pelo seu apoio, preocupação, amor e carinho, principalmente quando eu mais precisava.

Ao peruano Elmer Fidel e à William, pela amizade e discussões fundamentais objetivando o aperfeiçoamento e a finalização deste trabalho.

Ao Jules, pela agradável convivência diária, ajuda e pelos momentos de confraternização ocorridos principalmente durante a época da graduação.

À todos os amigos e colegas do mestrado que mesmo nas horas de alegria, loucura, entusiasmo e desespero, sempre estiveram do meu lado. Foi bom saber que estava em volta de uma diversidade de pessoas que possuía uma mesma essência de vida, que é de se tornar um bom pesquisador nas suas respectivas áreas de interesse. Fazem parte desta turma as seguintes pessoas: Leandro Cebola, Audilúcio Calouro, Poliane, Jamille, Fidel, Luis Alex, Maiara, Vitor, Enesson e Elcimar, não se esquecendo do pessoal que continuam na graduação.

À Uálace e Ariana, pelas discussões filosóficas ocorridas principalmente durante as noites e madrugadas de estudo. Obrigado por escutarem, perguntarem e discutirem sobre meu trabalho, bem como sobre os mais variados temas.

À todos do Observatório Astronômico da UESC, pela ajuda, companhia e pelo ambiente de descontração.

À todo o corpo docente da Física, com os quais convivi ao longo de todos estes anos de graduação e pós- graduação e que tanto aprendi.

Aos meus familiares e todos os amigos que tenho fora da universidade, por incentivarem o meu trabalho, “entenderem” a minha ausência e pelas palavras de incentivos.

Agradeço a CAPES pelo auxílio financeiro.

Finalmente, quero expressar minha eterna gratidão à minha família, que me ensinaram as coisas essenciais sobre a vida. Obrigado por sempre confiarem em mim, compreendendo ou não as minhas escolhas.

*”Nós tornamos o nosso mundo significativo pela coragem de nossas perguntas e profundidade de nossas respostas. Embarcamos em nossa jornada para as estrelas com uma pergunta feita pela primeira vez na infância de nossa espécie e feita de novo em cada geração com assombro renovado. O que são as estrelas?”*

Carl Sagan (1934 - 1996), *Cosmos - A Espinha Dorsal da Noite*

# Resumo

Aglomerados abertos são peças fundamentais para calibração de modelos de evolução estelar e para a compreensão da evolução química da Galáxia. Embora sejam sistemas bem conhecidos e estudados há muito tempo, existe ainda uma lacuna em relação a determinações auto-consistentes de seus parâmetros físicos. Nesta dissertação de mestrado investigamos a dependência nestas determinações com a janela espectral e o modelo de evolução estelar adotados. Analisamos os aglomerados abertos da Galáxia NGC 188, NGC 2099, NGC 2477, NGC 2506, NGC 2682 e NGC 6939 escolhidos por se tratarem de sistemas com uma boa estatística estelar, presença de estrelas evoluídas, fotometria multi-banda com qualidade disponível via web, e determinações de metalicidade via espectroscopia e de probabilidade de pertinência via movimento próprio. A obtenção dos parâmetros físicos é feita a partir de ajustes de isócronas de quatro diferentes modelos de evolução estelar (Padova, PARSEC, BASTI e YY) em diagramas cor-magnitude (CMDs) multi-banda, utilizando dados no óptico (BVI) e no infravermelho próximo ( $JHK_s$ ). Para este propósito, aplicamos um método numérico-estatístico que alia geração de CMDs sintéticos a estatística de *likelihood*, permitindo assim determinações objetivas dos parâmetros e de suas incertezas. Nossos resultados indicam que existem diferenças sistemáticas nos valores de idade e  $[Fe/H]$  de acordo com a escolha de modelos de evolução estelar. Além disso, os nossos ajustes de isócrona sugerem que as idades encontradas nos catálogos WEBDA e DAML02 estão provavelmente subestimados por um fator entre 0.1 e 0.2 em  $\log(\text{age})$ , enquanto que os valores de avermelhamento presentes nestes catálogos estariam sistematicamente superestimados. Uma análise de consistência dos 12 ajustes para os aglomerados NCG 188, NGC 2506, NGC 2682 e NGC 6939 revelou que os resultados possuem uma boa acurácia, diferentemente das determinações de idade e metalicidade para NGC 2099 e das determinações de idade, distância e avermelhamento para NGC 2477, cujos resultados não podem ser ditos como consistentes. As comparações das nossas determinações de metalicidade com as provenientes da espectroscopia sugere que o método utilizado para o ajuste de isócrona é capaz de recuperar corretamente o valor de  $[Fe/H]$  dentro de uma incerteza da ordem de 0.1 dex, adicionando confiabilidade aos nossos resultados.

# Abstract

Open clusters are fundamental pieces for calibration of stellar evolutionary models and for understanding the chemical evolution of the Galaxy. Although a significant number of open clusters currently can be considered as well-known systems since they have been studied for a long time, there is a lack of self-consistent determinations of their physical parameters. In this Master's dissertation we investigated the dependence on these determinations with the adopted photometric band and stellar evolutionary model. We investigated the galactic open clusters NGC 188, NGC 2099, NGC 2477, NGC 2506, NGC 2682 and NGC 6939. They were chosen because they are systems with a good stellar statistic, presence of evolved stars, public data availability of good quality multi-band photometric data, spectroscopic metallicity, and proper motion membership probability. The physical parameters were obtained by means of isochrone fitting using four different stellar evolutionary models (Padova, PARSEC, BASTI and YY) in multiband color-magnitude diagrams (CMDs), from optical (BVI) to near-infrared ( $JHK_s$ ). For this purpose we applied a numerical-statistical method to find the best solution based on synthetic CMDs and likelihood statistics. Our results indicated that there are systematic differences in the values of age and [Fe/H] according to the choice of stellar evolutionary models. Furthermore, our isochrone fittings suggest that ages found in DAML02 and WEBDA catalogs are probably underestimated by a factor between 0.1 and 0.2 in log (age), while the reddening values present in these catalogs are systematically overestimated. A consistency analysis of the 12 fittings for the clusters NCG 188, NGC 2506, NGC 2682 and NGC 6939 revealed that the results have a good accuracy, unlike the determinations of age and metallicity for NGC 2099 and the determinations age, distance and reddening for NGC 2477. Comparisons of the our determinations of metallicity with those from spectroscopy suggests that our numerical - statistical method to fit isochrones is able to correctly recover [Fe/H] values within an uncertainty of about 0.1 dex, adding reliability to our results.

# Notação

No presente trabalho é adotado a notação norte-americana para a separação de casas decimais, na qual se utiliza um ponto para separar a parte inteira dos números. As seguintes siglas, grandezas e unidades são amplamente utilizadas neste trabalho.

## SIGLAS

AGB - Ramo Assintótico de Gigantes (*Assymptotic Giant Branch*)

CMD - Diagrama Cor-Magnitude (*Color Magnitude Diagram*)

GC - Aglomerado Globular (*Globular Cluster*)

MS - Sequência principal (*Main Sequence*)

NIR - Infravermelho próximo (*Near Infrared*)

OC - Aglomerado Aberto (*Open Cluster*)

RC - *Clump* de Gigantes Vermelhas (*Red Clump*)

RDP - Perfil de Densidade Radial (*Radial Density Profile*)

RGB - Ramo de Gigantes Vermelhas (*Red Giant Branch*)

SGB - Ramo de Subgiantes (*Subgiant Branch*)

TO - Ponto de guinada (*turn-off*)

2MASS - *The Two Micron All Sky Survey*

## GRANDEZAS

$(\alpha, \delta)$ - Coordenadas equatoriais (ascensão reta e declinação)

$(b, l)$  - Coordenadas galácticas (Latitude galáctica e Longitude galáctica)

$\tau$  - Idade

Z - Fração em massa correspondente a elementos mais pesados que o He

E(B - V) - Avermelhamento

$(m - M)_o$  - Módulo de distância intrínseco

$[\text{Fe} / \text{H}] = \log(\text{Fe} / \text{Fe}_\odot) - \log(\text{H} / \text{H}_\odot) \sim \log(\text{Z} / \text{Z}_\odot)$  - Índice de ferro

## **UNIDADES**

yr - ano

Myr -  $10^6$  anos

Gyr -  $10^9$  anos

$M_{\odot}$  - Massa solar

pc - parsec

# **Lista de Figuras**

1	Exemplos típicos de aglomerados estelares da Gálaxia. À esquerda é apresentado o aglomerado aberto M 7 e à direita o aglomerado globular $\omega$ Cen. Credito: <a href="http://apod.nasa.gov/apod">http://apod.nasa.gov/apod</a> . . . . .	3
2	Diagrama Cor - Magnitude [ $M_V$ vs. $(B - V)_0$ ] de dois aglomerados abertos da Galáxia, Pleiades (M 45) e NGC 2682 (M 67) e do aglomerado globular M3, também situado na Galáxia. . . . .	7
3	Curvas de transmissão dos sistemas fotométricos Johnson - Cousins (UBVRI) e 2MASS (JHK <sub>s</sub> ). Figura adaptada de Bessell 2005. . . . .	14
4	Distribuição no plano do céu das estrelas do aglomerado NGC 188, considerando os catálogos no NIR (pontos pretos) e nas bandas BVI (pontos azuis). À esquerda: Estrelas que possuem determinações de fotometria nas bandas J e BVI. À direita: Distribuição das estrelas resultantes do cruzamento dos dois catálogos fotométricos (pontos vermelhos), bem como com o catálogo com a informação de probabilidade de pertinência considerando-se apenas estrelas com probabilidade acima de 60% de pertencer ao aglomerado (pontos verdes). . . . .	18
5	Distribuição espacial das estrelas do aglomerado NGC 2099 ilustrando o cruzamento de catálogos. Idem à legenda da figura 4. . . . .	19
6	Distribuição espacial das estrelas do aglomerado NGC 2477 ilustrando o cruzamento de catálogos para este objeto. Idem à legenda da figura 4. . . . .	20
7	Distribuição espacial das estrelas do aglomerado NGC 2506, ilustrando o cruzamento de catálogos para este objeto. Idem à legenda da figura 4. . . . .	20
8	Distribuição no plano do céu das estrelas do aglomerado NGC 2682, ilustrando o cruzamento de catálogos deste objeto. Idem à legenda da figura 4. . . . .	22
9	Distribuição espacial das estrelas do aglomerado NGC 6939, ilustrando o cruzamento de catálogos para este objeto. Idem à legenda da figura 4. . . . .	22
10	CMDs finais observados para NGC 188. As isócronas representam os modelos de evolução estelar de Padova (vermelho), PARSEC (azul), BaSTI (verde) e YY (cinza), com os respectivos valores de idade, índice de ferro, módulo de distância e avermelhamento retirados do catálogo DAML02. . . . .	26

11	CMDs finais observados para NGC 2099. Idem à legenda da figura 10. . . . .	27
12	CMDs finais observados para NGC 2477. Idem à legenda da figura 10. . . . .	28
13	CMDs finais observados para NGC 2506. Idem à legenda da figura 10. . . . .	29
14	CMDs finais observados para NGC 2682. Idem à legenda da figura 10. . . . .	30
15	CMDs finais observados para NGC 6939. Idem à legenda da figura 10. . . . .	31
16	Perfil de densidade radial das estrelas, obtido com dados do 2MASS, tomada na direção dos aglomerados em estudo (linha contínua de cor azul). Em adição, é mostrado a distribuição radial das estrelas da nossa amostra (linha contínua de cor marron). As barras representam os erros poissônicos. . . . .	33
17	Isócronas de Padova, PARSEC, BaSTI e YY de metalicidade solar com diferentes valores em idades. . . . .	35
18	Exemplo ilustrativo da geração de um CMD sintético. O Painel (a) mostra a isócrona adotada no plano do CMD: idade, Z, $(m - M)_o$ e E(B - V). No Painel (b) as estrelas estão distribuídas de acordo com a escolha da inclinação da função de massa ( $\alpha = -2.35$ ) e da fração de binárias (fbin). O CMD sintético após a introdução das incertezas fotométricas é exibido no painel (c). No painel (d) é apresentado o mesmo CMD anterior, mas com os pontos codificados de acordo com a densidade de pontos. . . . .	39
19	Diagramas cor-magnitude ((V vs. B - V), (V vs. V - I) e (J vs. J - H)) para NGC 188 mostrando os melhores ajustes obtidos com os diferentes modelos de evolução estelar. As isócronas de cor vermelha representam o grupo de Padova, as isócronas de cor azul representam o grupo de PARSEC, de cor verde o grupo de BaSTI e as isócronas de cor cinza representam o grupo de YY. . . . .	48
20	CMD observado ( <i>À esquerda</i> ) e o CMD sintético ( <i>À direita</i> ) do OC NGC 188. O CMD sintético foi gerado por meio do modelo de Padova (isócrona em vermelho) com os resultados da Tab.12. Em adição, os melhores ajustes para este CMD observado com os modelos de PARSEC (isócrona azul), BaSTI (isócrona verde) e YY (isócrona cinza) também são representados na figura. . . . .	50

21	(À esquerda) Diagrama confrontando os valores do módulo de distância intrínseco com os valores em avermelhamento $E(B - V)$ obtidos para NGC 188. (À direita) Diagrama representando o confronto de valores entre o logaritmo da idade (em anos) e o índice de Ferro para este mesmo aglomerado. As cores vermelha, azul, verde e cinza representam os modelos de evolução estelar de Padova, PARSEC, BaSTI e YY respectivamente. Já o padrão de símbolos se referem as bandas utilizadas para a obtenção dos respectivos resultados: os quadrados se referem aos resultados obtidos com o CMD [V vs. (B - V)], os círculos aos resultados obtidos com o CMD [V vs. (V - I)] e os triângulos à análise do CMD [J vs. (J - H)]. As linhas tracejadas representam os valores dos parâmetros encontrados nos catálogos <i>WEBDA</i> (laranja) e <i>DAML02</i> (marrom), e as linhas pontinhas simbolizam as incertezas nos parâmetros referentes ao catálogo <i>DAML02</i> . . . . .	50
22	Diagrama cor-magnitude [V vs. (B - V)] e [J vs. (J - H)] para NGC 2099 mostrando os melhores ajustes obtidos com os diferentes modelos de evolução estelar. Idem à legenda da figura 19. . . . .	52
23	CMD observado (à esquerda) e o CMD sintético (à direita) do OC NGC 2099. Idem à legenda da figura 20 . . . . .	54
24	Diagramas confrontando valores de parâmetros físicos do aglomerado NGC 2099. Idem à legenda da figura 21 . . . . .	54
25	Diagrama cor-magnitude [V vs. (B - V)] e [J vs. (J - H)] para NGC 2477 mostrando os melhores ajustes obtidos com os diferentes modelos de evolução estelar. Idem à legenda da figura 19. . . . .	56
26	CMD observado (à esquerda) e o CMD sintético (à direita) do OC NGC 2477. Idem à legenda da figura 20 . . . . .	58
27	Diagramas confrontando valores de parâmetros físicos do aglomerado NGC 2477. Idem à legenda da figura 21 . . . . .	58
28	Diagrama cor-magnitude ((V vs. B - V), (V vs. V - I) e (J vs. J - H)) para NGC 2506 mostrando os melhores ajustes obtidos com os diferentes modelos de evolução estelar. Idem à legenda da figura 19. . . . .	60

29	CMD observado ( <i>à esquerda</i> ) e o CMD sintético ( <i>à direita</i> ) do OC NGC 2506. Idem à legenda da figura 20. . . . .	62
30	Diagramas confrontando valores de parâmetros físicos do aglomerado NGC 2506. Idem à legenda da figura 21. . . . .	62
31	Diagrama cor-magnitude ((V vs. B-V), (V vs. V-I) e (J vs. J-H)) para NGC 2682 mostrando os melhores ajustes obtidos com os diferentes modelos de evolução estelar. Idem à legenda da figura 19. . . . .	64
32	CMD observado ( <i>à esquerda</i> ) e o CMD sintético ( <i>à direita</i> ) do OC NGC 2682. Idem à legenda da figura 20 . . . . .	66
33	Diagramas confrontando valores de parâmetros físicos do aglomerado NGC 2682. Idem à legenda da figura 21 . . . . .	66
34	Diagrama cor-magnitude ((V vs. B-V), (V vs. V-I) e (J vs. J-H)) para NGC 6939 mostrando os melhores ajustes obtidos com os diferentes modelos de evolução estelar. Idem à legenda da figura 19. . . . .	68
35	CMD observado ( <i>à esquerda</i> ) e o CMD sintético ( <i>à direita</i> ) do OC NGC 6939. Idem à legenda da figura 20 . . . . .	70
36	Diagramas confrontando valores de parâmetros físicos do aglomerado NGC 6939. Idem à legenda da figura 21 . . . . .	70
37	Diagrama cor-magnitude [ $M_V$ vs. $(B-V)_0$ ] de todos os aglomerados abertos em estudo, juntamente com o melhor ajuste de isócrona (obtido por meio do modelo de Padova) encontrado para cada aglomerado. Enquanto que no painel esquerdo é apresentado o CMD dos OCs NGC 188, NGC 2099, NGC 2477, NGC 2682 e NGC 6939, no painel direito é dado um destaque especial ao CMD do OC NGC 2506. . . . .	71

38	Distribuição dos valores obtidos dos parâmetros físicos dos aglomerados NGC 188, NGC 2506, NGC 2682 e NGC 6939 de acordo com a banda espectral adotada. A abscissa representa os valores encontrados por meio dos CMDs [V vs. (B - V)] e a ordenada representa a diferença entre os valores obtidos com as bandas VI e BV. O padrão de símbolos se referem aos objetos estudados simultaneamente com as bandas BVI: O quadrado representa o aglomerado NGC 188, o círculo representa o aglomerado NGC 2682, o quadrado de cor não sólida representa NGC 6939 e o círculo de cor não sólida representa o objeto NGC 2506. . . . .	74
39	Distribuição dos valores obtidos dos parâmetros físicos de todos os aglomerados em estudo de acordo com a banda espectral adotada. A abscissa representa os valores encontrados por meio dos CMDs [V vs. (B - V)] e a ordenada representa a diferença entre os valores obtidos com as bandas JH e BV. O padrão de símbolos se referem aos objetos em estudo: O quadrado representa o aglomerado NGC 188, o círculo representa o aglomerado NGC 2682, o triângulo equivale ao objeto NGC 2477 e o losango, quadrado de cor não sólida e o círculo de cor não sólida representam os objetos NGC 2099, NGC 6939 e NGC 2506 respectivamente. . . . .	75
40	Distribuição dos valores obtidos dos parâmetros físicos de todos os aglomerados em estudo de acordo com o modelo de evolução estelar. A abscissa representa os valores encontrados por meio do modelo de Padova e a ordenada representa a diferença entre os valores obtidos com os modelos de PARSEC e Padova. O padrão de símbolos se referem aos objetos em estudo: O quadrado representa o aglomerado NGC 188, o círculo representa o aglomerado NGC 2682, o triângulo equivale ao objeto NGC 2477 e o losango, quadrado de cor não sólida e o círculo de cor não sólida representam os objetos NGC 2099, NGC 6939 e NGC 2506 respectivamente. . . . .	77
41	Distribuição dos valores obtidos dos parâmetros físicos de todos os aglomerados em estudo de acordo com o modelo de evolução estelar. A abscissa representa os valores encontrados por meio do modelo de Padova e a ordenada representa a diferença entre os valores obtidos com os modelos de BaSTI e Padova. Idem à legenda da figura 40 . . .	78

42	Distribuição dos valores obtidos dos parâmetros físicos de todos os aglomerados em estudo de acordo com o modelo de evolução estelar. A abscissa representa os valores encontrados por meio do modelo de Padova e a ordenada representa a diferença entre os valores obtidos com os modelos de YY e Padova. Idem à legenda da figura 40 . . . .	79
43	Valor mediano do logaritmo da idade e índice de ferro para todos os aglomerados estudados. Este valor é aquele encontrado considerando todas as determinações obtidas, ou seja, independente do modelo de evolução estelar e da banda fotométrica. As barras de erro de cor preta representam o desvio padrão das determinações em torno da mediana, e as barras de erro de cor cinza representam a incerteza do valor mediano. Os pontos de cor azul representam a diferença entre os nossos valores com aqueles encontrados em: Pauzen & Netopil (2006) para a idade, e Heiter <i>et al.</i> (2014) no caso da metalicidade. . .	89
44	Valor mediano do módulo de distância e avermelhamento para todos os aglomerados estudados. Os pontos de cor azul representam a diferença entre os nossos valores com aqueles encontrados em Pauzen & Netopil (2006). Idem à legenda da figura 43. . . . .	90
45	Análise da consistência dos resultados a partir das incertezas em função dos parâmetros físicos de cada aglomerado. $\sigma$ é a incerteza total obtida a partir da soma em quadratura da incerteza estatística e a incerteza sistemática ( $\sigma^2 = \sigma_{sist.}^2 + \sigma_{est.}^2$ ). . . . . . .	91

# Lista de Tabelas

1	Fontes dos dados e as respectivas coordenadas galácticas ( $b, l$ ) e equatoriais ( $\alpha, \delta$ ) dos aglomerados abertos da nossa amostra. . . . .	21
2	Valores dos parâmetros físicos dos aglomerados abertos da nossa amostra extraídos dos catálogos <i>WEBDA</i> e <i>DAML02</i> . . . . .	23
3	Valores dos parâmetros físicos dos aglomerados abertos da nossa amostra extraídos do catálogo COCD, Pauzen & Netopil (2006) e Heiter <i>et al.</i> (2014). . . . .	24
4	Algumas características físicas dos modelos selecionados. <sup>a</sup> Iglesias & Rogers (1996), <sup>b</sup> Alexander & Ferguson (1994), <sup>c</sup> Marigo & Aringer (2009), <sup>d</sup> Kippenhahn, Thomas & Weigert (1965), <sup>e</sup> Mihalas <i>et al.</i> , (1990). As siglas significam: J - C = Johnson - Cousins, IR = Infravermelho, SS = Mistura na escala solar. . . . .	37
5	Comprimento de onda efetivo de cada banda e extinção em relação à banda V . . . . .	39
6	Valores finais dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 188, juntamente com suas respectivas incertezas estatísticas $\sigma_{est.}$ , obtidos a partir da análise de diferentes diagramas cor-magnitude ((V vs. B - V), (V vs. V - I) e (J vs. J - H)) empregando-se diferentes modelos de evolução e interior estelar (Padova, PARSEC, BaSTI e YY). . . . .	49
7	Valores finais dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2099, juntamente com suas respectivas incertezas estatísticas $\sigma_{est.}$ , obtidos a partir da análise dos diagramas cor-magnitude [V vs. (B - V)] e [J vs. (J - H)] empregando-se diferentes modelos de evolução e interior estelar (Padova, PARSEC, BaSTI e YY). . . . .	53
8	Valores finais dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2477. Idem à legenda da Tab. 7. . . . .	57
9	Valores finais dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2506. Idem à legenda da Tab. 6. . . . .	61
10	Valores finais dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2682. Idem à legenda da Tab. 6. . . . .	65
11	Valores finais dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 6939. Idem à legenda da Tab. 6. . . . .	69

12	Valores medianos dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 188. Estes valores são aqueles encontrados considerando inicialmente os modelos de evolução estelar, e posteriormente, considerando as bandas fotométricas. Em seguida, é apresentado o valor mediano encontrado considerando todas as determinações obtidas. As incertezas representam: o desvio padrão das determinações em torno da mediana $\sigma_{sist.}$ , e a incerteza estatística do valor mediano de cada parâmetro $\sigma_{est.}$ . . . . .	83
13	Valores medianos dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2099. Idem à legenda da Tab. 12. . . . .	83
14	Valores medianos dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2477. Idem à legenda da Tab. 12. . . . .	84
15	Valores medianos dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2506. Idem à legenda da Tab. 12. . . . .	84
16	Valores medianos dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2682. Idem à legenda da Tab. 12. . . . .	85
17	Valores medianos dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 6939. Idem à legenda da Tab. 12. . . . .	85

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	O presente Trabalho . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Seleção de objetos e cruzamento de catálogos</b>	<b>12</b>
2.1	Fotometria empregada . . . . .	13
2.2	<i>VizieR &amp; 2MASS</i> . . . . .	15
2.3	Apresentação dos dados . . . . .	17
2.4	Catálogos de aglomerados abertos . . . . .	23
2.5	CMDs observados . . . . .	25
2.6	Perfil de densidade . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Método numérico - estatístico de ajuste de isócronas</b>	<b>34</b>
3.1	Modelos de Evolução e Interior Estelar . . . . .	34
3.2	Geração dos CMDs Sintéticos . . . . .	38
3.3	Análise Estatística . . . . .	40
3.4	Grade de Parâmetros . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>45</b>
4.1	Resultados para NGC 188 . . . . .	46
4.2	Resultados para NGC 2099 (M 37) . . . . .	51
4.3	Resultados para NGC 2477 . . . . .	55
4.4	Resultados para NGC 2506 . . . . .	59
4.5	Resultados para NGC 2682 (M 67) . . . . .	63
4.6	Resultados para NGC 6939 . . . . .	67
4.7	Discussões . . . . .	71
4.7.1	Resultados conforme a banda utilizada . . . . .	72
4.7.2	Resultados conforme o modelo estelar utilizado . . . . .	76
4.7.3	Parâmetros físicos finais . . . . .	80

<b>5 Comentários finais</b>	<b>92</b>
5.1 Conclusões . . . . .	92
5.2 Perspectivas . . . . .	94



# 1 Introdução

Desde épocas muito remotas as pessoas olhavam para o céu e ficavam fascinadas ao visualizar a grande faixa de luz fraca e difusa que atravessa a esfera celeste, sempre se perguntando o que são as estrelas, as nebulosas, e os "astros errantes". Este fascínio do ser humano pelo céu o levou a dar origem a uma das áreas da ciência mais antigas, a astronomia. Embora a nossa compreensão acerca da formação e evolução dos astros, em especial das estrelas, tenham recebido um grande impulso desde o advento do telescópio e da ciência moderna, até hoje ainda há várias questões em aberto. Questões estas que sempre despertam a curiosidade e instigam mentes.

Ao observarmos o céu com o uso de algum instrumento óptico em uma noite sem Lua e em um local com pouca poluição luminosa, além de contemplarmos a luz das estrelas e dos planetas, notaremos a presença de certos objetos que apresentam uma aparência difusa e que emitem uma luz fraca. Hoje em dia, sabemos que a maioria destes objetos possuem uma natureza variada: regiões de formação estelar, aglomerados de estrelas, remanescentes de supernova, nebulosas planetárias e até mesmo outras galáxias. Esta compreensão atual deve-se a uma combinação de fatores, entre eles o aumento do poder dos telescópios, a interpretação da luz por meio da física (por sua vez, em constante evolução), ao avanço das técnicas de registro de imagens (em particular a invenção do CCD), ao emprego de computadores, e a exploração de diferentes faixas do espectro eletromagnético.

Em particular, os aglomerados estelares são considerados importantes laboratórios astrofísicos graças à uniformidade das propriedades físicas das estrelas dentro de cada um destes sistemas. Segundo o modelo padrão, as estrelas pertencentes a um determinado aglomerado estelar se originariam a partir de uma mesma nuvem de gás e poeira, em um único surto de formação estelar. Em outras palavras, um aglomerado pode ser considerado como sendo composto por estrelas que possuem não apenas a mesma metalicidade, mas também, a mesma idade <sup>2</sup>. Além disso, como as distâncias relativas entre as estrelas

---

<sup>2</sup>Embora esta seja a concepção histórica sobre a natureza dos aglomerados estelares, há cerca de uma

membro do aglomerado são muito pequenas em comparação com a distância que nos separa delas, podemos considerar que todos os membros do aglomerado estão a uma mesma distância de nós. A principal diferença entre os membros de um aglomerado estelar seria então a massa inicial, que segundo a teoria de evolução estelar é o principal parâmetro físico que governa a evolução e o destino de uma estrela.

Em todas as componentes estruturais da Galáxia (disco fino, disco espesso, bojo e halo) encontram-se aglomerados estelares, porém distribuídos de forma não homogênea. Dependendo do número de estrelas do aglomerado, da cinemática, idade, estrutura e distribuição espacial em relação a Via-Láctea, os aglomerados estelares podem ser comumente classificados como: aglomerados globulares (*Globular cluster - GC*) e aglomerados abertos (*open cluster – OC*). A Fig. 1 mostra exemplos destas duas categorias.

Os aglomerados globulares são grupos densos de estrelas que apresentam uma distribuição aproximadamente esférica. Com idades maiores que 10 Gyr e apresentando uma metalicidade subsolar, cada aglomerado globular contém de dezenas a centenas de milhares de estrelas, cuja densidade de membros cresce em direção ao centro. Situados no halo e bojo da Galáxia, os GCs serviram como base para determinar o centro da nossa galáxia, estabelecendo a existência de um halo cuja estrutura é esferoidal. Uma vez que estes objetos não estão sendo formados atualmente na Via-Láctea, estudos empíricos diretos dos seus processos de formação não são possíveis, a não ser em sistemas extragalácticos e em distâncias cosmológicas.

Em oposição, os aglomerados abertos são grupos de estrelas escassamente povoados cujos membros são fracamente ligados gravitacionalmente. Contendo de poucas dezenas a alguns milhares de estrelas, os OCs são na grande maioria jovens, mas podem ser encontrados em uma larga faixa de idades (poucos milhões a poucos bilhões de anos de idade) possuindo uma metalicidade tipicamente solar e tendo se formado preferencialmente no disco fino da Galáxia, região rica em gás e poeira. Deste modo, os OCs são objetos comumente associados com regiões de formação estelar, onde eles são formados continuamente.

---

década este paradigma está sendo alterado para poder comportar as múltiplas populações de estrelas observadas em aglomerados globulares da Galáxia e aglomerados populosos nas Nuvens de Magalhães (Piotto 2009)

Assim, o amplo espectro em idade e a privilegiada localização torna os OCs importantes traçadores da formação estelar e da estrutura espiral do disco Galáctico.

Para melhor compreender a formação e a evolução dos aglomerados estelares, é necessário saber interpretar fisicamente as informações trazidas pela luz das estrelas que os constituem. Um avanço da maior importância neste sentido foi realizado a partir da análise e interpretação de diagramas cor - magnitude (*Color Magnitude Diagram – CMD*), o que só é possível graças as previsões de modelos de interiores e evolução estelar.



Figura 1: Exemplos típicos de aglomerados estelares da Gálaxia. À esquerda é apresentado o aglomerado aberto M 7 e à direita o aglomerado globular  $\omega$  Cen. Credito: <http://apod.nasa.gov/apod>.

O CMD é a contrapartida observacional do diagrama Hertzsprung-Russell (HR), um plano teórico que confronta os valores previstos por modelos de evolução e interiores estelares para a temperatura efetiva e luminosidade de uma estrela ao longo de toda a sua vida. Esta contrapartida se dá graças à correspondência existente entre parâmetros teóricos e observacionais, ou seja, entre a temperatura efetiva de uma estrela e a sua respectiva cor, e entre a sua luminosidade e a magnitude absoluta. Desta forma, é possível estudar a evolução de um sistema estelar por meio da observação das magnitudes e cores das estrelas que o constituem, permitindo desvendar de forma clara as diversas fases evolutivas que as estrelas atravessam, desde o seu nascimento até a sua morte.

A construção dos CMDs se dá através da medida do fluxo de luz de estrelas individuais – técnica conhecida como fotometria resolvida – em imagens obtidas com a utilização de diferentes filtros espectrais, como por exemplo, os de banda larga do sistema Johnson-Cousius (UBVRI), cobrindo o ultravioleta (U), óptico (BVR) e o infravermelho

próximo (I), ou mais recentemente, do 2MASS ( $JHK_s$ ), exclusivamente no infravermelho próximo (Skrutskie *et al.* 2006). A utilização da fotometria multibanda permite a investigação detalhada da natureza física não apenas de aglomerados estelares, mas de populações estelares em geral cujos constituintes básicos são resolvidos espacialmente.

O CMD de um aglomerado estelar constitui-se portanto como um importante instrumento para a obtenção de parâmetros físicos fundamentais, tais como: Idade ( $\tau$ ), metalicidade ( $Z$ ), módulo de distância ( $(m - M)$ ) e avermelhamento ( $E(B - V)$ ). Concomitantemente, a análise de CMDs possibilita a compreensão dos processos que sustentam o equilíbrio das mais diferentes estrelas ao longo dos seus diferentes estágios evolutivos. Ao analisarmos o CMD de um aglomerado estelar, verificamos que os seus membros não se distribuem uniformemente ao longo do plano, mas seguem algumas sequências preferenciais (ou sequências evolutivas), tais como: Sequência Principal (*Main Sequence* - MS), Ramo de Subgigantes (*Subgiant Branch* - SGB), Ramo de Gigantes Vermelhas (*Red Giant Branch* - RGB), Clump de Gigantes Vermelhas (*Red Clump* - RC), Ramo Asintótico de Gigantes (*Asymptotic Giant Branch* - AGB) e Ramo Horizontal (*Horizontal Branch* - HB).

Se constituindo como a região mais populosa, a Sequência Principal é a fase onde as estrelas passam a maior parte de suas vidas. Esta região do CMD abriga estrelas que possuem propriedades importantes para a determinação de parâmetros físicos de aglomerados de estrelas. Entre estas propriedades podemos citar o fato da massa das estrelas na MS crescer no mesmo sentido que a luminosidade ( $L \propto M^n$ , com  $n \sim 3$ ) e a temperatura efetiva. Embora as estrelas massivas tenham uma maior reserva de energia ( $\propto M$ ), elas estarão gastando energia a taxas mais altas por terem um maior brilho. Consequentemente consumirão mais rapidamente a sua reserva de hidrogênio (H), sobrevivendo portanto menos tempo nesta fase evolutiva ( $t_{MS} \propto M^{1-n} \sim M^{-2}$ ). Em outras palavras, as estrelas mais quentes e mais luminosas, situadas na alta sequência principal, logo deixarão esta região para ocupar outras regiões do CMD.

Em um aglomerado aberto, o fato das estrelas massivas sobreviverem menos tempo na MS tem implicações importantes para o entendimento dos seus parâmetros: A posição

da estrela mais massiva dentro da MS pode ser usada para determinar a sua idade (e consequentemente a idade do aglomerado). Este ponto, que marca a saída da estrela mais massiva da MS, é denominado ponto de guinada (*turn-off* - TO).

Com um núcleo interno formado unicamente de hélio (He), a estrela que acaba de sair da MS deixa de realizar processos de fusão no núcleo para realizá-las em uma camada logo acima (queima de H em He). Para estrelas de baixa massa, da ordem da massa solar, esse processo de fusão em uma região sobre o núcleo aquece as camadas vizinhas, levando a um aumento do raio estelar e uma diminuição da temperatura superficial da estrela (Ramo das subgigantes). Nesta fase, enormes quantidades de energia são levadas do centro para a superfície da estrela por meio da convecção, causando um rápido aumento na luminosidade, porém sem grandes variações na temperatura, estando a estrela agora na região do RGB.

Em um determinado momento, a temperatura central dessas estrelas de baixa massa atinge um valor suficiente para iniciar o processo de queima do He (*flash* do Hélio). Nesta fase da estrela, devido a matéria degenerada, a temperatura central aumenta mas a densidade não varia ( $\rho$  não depende de  $T$ ). Quanto à luminosidade, ela pode atingir centenas de bilhões em escala de luminosidade solar mas somente durante um curto período de tempo. No entanto, quase nada disto atinge a superfície pois esta energia é absorvida na expansão das camadas não degeneradas acima do núcleo. Depois do *flash* do Hélio o processo de fusão é feita em matéria não degenerada e a estrela passa para a região do HB. Em particular, se a estrela não for pobre em metais ela ficará localizada em uma subestrutura do HB conhecida como RC, comum em aglomerados abertos mais velhos que  $\sim 1$  Gyr.

Cerca de milhões de anos depois da queima de Hélio no núcleo, este fica sendo composto principalmente de Carbono (C), seguido de: Uma camada de He queimando; Uma outra onde acontece a queima de Hidrogênio; e por fim, uma camada mais externa de H que não se encontra em processo de fusão. Nesta fase de supergigante vermelha, a estrela sofre com um crescente aumento da luminosidade e também da temperatura superficial, ocasionado principalmente devido à instabilidade da produção de energia com

a temperatura. Essa fase de instabilidade termina na forma de um vento estelar intenso e a ejeção das camadas superficiais da estrela na forma de uma nebulosa planetária, restando apenas uma estrela remanescente muito quente e brilhante que vai gradualmente se esfriando (perdendo luminosidade) até atingir o estágio de anã branca, situado no lado inferior esquerdo do CMD.

Em relação à uma estrela de massa muito maior que a massa solar ( $5M_{\odot}$  por exemplo) ao chegar na fase de gigante vermelha, a temperatura do seu núcleo (que até então estava inerte) sofre um continuo aumento até atingir uma temperatura da ordem de centenas de milhões de Kelvin, iniciando assim, o processo de queima de He. A partir daí, a estrela passa por um processo gradual de contrações, seguido de uma nova queima de He em camadas e queima de C no núcleo, encontrando-se agora na região das supergigantes. A partir deste momento, as fases posteriores de evolução dependem fortemente da massa da estrela, podendo dar origem a estrelas de nêutrons ou até mesmo buracos negros.

Para ilustrar esta discussão, apresentamos na Fig. 2 os CMDs [ $M_V$  vs.  $(B - V)_0$ ] de três aglomerados estelares da Galáxia bastante conhecidos: dois abertos e um globular. No painel à esquerda temos o CMD das Plêiades (M 45) construído com dados de Schilbach *et al.* (1995), um aglomerado situado a uma distância de  $\sim 130$  parsec<sup>3</sup>. Nele podemos observar que as estrelas estão localizadas preferencialmente na MS, em particular no RC, sugerindo se tratar de um aglomerado jovem. No painel central observamos o CMD do aglomerado aberto NGC 2682 (M 67), obtido por meio dos dados provenientes de Yadav *et al.* (2008). Nele notamos estrelas na MS menos brilhantes (e portanto menos massivas) em relação ao aglomerado anterior e a presença de estrelas gigantes localizadas à direita superior da MS, sugerindo ser este um aglomerado significativamente mais velho do que as Plêiades. No painel à direita apresentamos o CMD do aglomerado globular M 3 construído com dados de Rey *et al.* (2001). Nele podemos notar a forte presença de estrelas em regiões pós sequência principal, tais como: SGB, RGB, HB e AGB, acusando ser este um aglomerado velho.

As sequências evolutivas de um aglomerado de estrelas podem ser ajustadas por

---

<sup>3</sup>1 parsec por definição a distância na qual a paralaxe de um objeto é de 1 segundo de arco

uma isócrona, que é um produto dos modelos de evolução e interiores estelares para uma sequência em massa de estrelas com a mesma idade e mesma composição química, localizadas a uma mesma distância e sofrendo de um mesmo avermelhamento pela poeira interestelar. Em outras palavras, as isócronas são ótimos modelos para aglomerados estelares, possibilitando a determinação de seus parâmetros físicos por meio de um método de ajuste sobre o CMD.

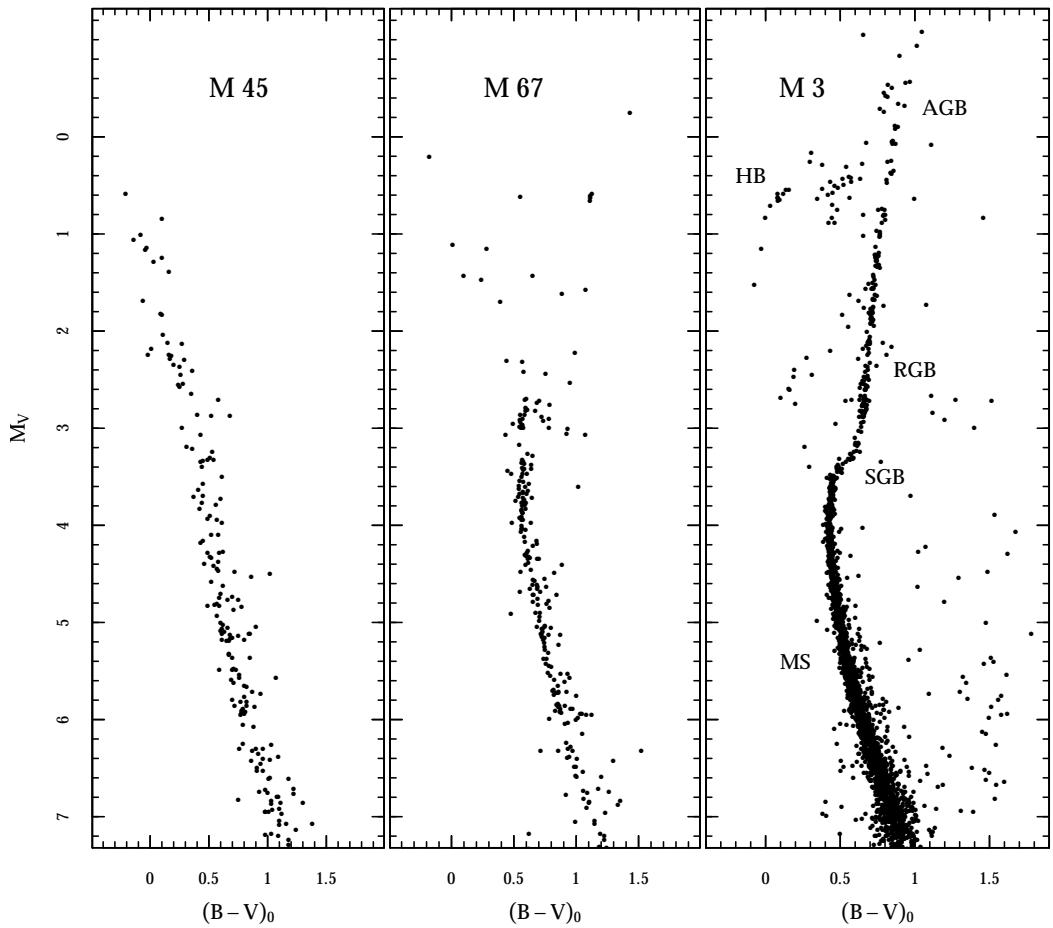


Figura 2: Diagrama Cor - Magnitude [ $M_V$  vs.  $(B - V)_0$ ] de dois aglomerados abertos da Galáxia, Pleiades (M 45) e NGC 2682 (M 67) e do aglomerado globular M3, também situado na Galáxia.

Existem vários grupos de pesquisadores que disponibilizam isócronas, geradas a partir de diferentes modelos de evolução e interiores estelares, que por sua vez podem ser empregadas para a análise de CMDs de aglomerados estelares. Entre eles temos: as isócronas de BaSTI (Pietrinferni *et al.* 2004), de Dartmouth (Dotter *et al.* 2008), de

Padova (Girardi *et al.* 2002), as de PARSEC (Bressan *et al.* 2012) e as de Y<sup>2</sup> (Demarque *et al.* 2004). Cada um destes grupos apresenta isócronas que se justam visualmente bem a MS de aglomerados estelares, cobrindo um amplo domínio de idades, metalicidades, massas estelares, bandas espectrais, etc.

O método mais amplamente utilizado de ajuste de isócronas em um CMD é o chamado ”ajuste visual”. Este método teve um papel importante no desenvolvimento da teoria de evolução estelar, permitindo as primeiras determinações de parâmetros físicos dos aglomerados estelares. Apesar da grande facilidade de ser um método simples de se obter os parâmetros globais de um sistema e da sua importância histórica no estudo de OCs, o método de ajuste visual peca no fato de ser um método subjetivo, não possuindo critérios estatísticos que permitam a determinação da qualidade do ajuste bem como das incertezas associadas aos parâmetros físicos.

Uma forma mais sofisticada e confiável para se obter os parâmetros globais [ $\tau$ , Z, E(B - V) e  $(m - M)_o$ ] pode ser feita através do emprego de simulação numérica de CMDs (Kerber *et al.* 2002, 2005, 2007). Esta técnica numérico-estatística alia a geração de diagramas sintéticos a estatísticas de comparação entre modelo e observação, objetivando reproduzir e discriminar os CMDs modelados que melhor reproduzem as características de um dado CMD observado. Este método já vem sendo empregado para a determinação dos parâmetros físicos de aglomerados abertos observados no infravermelho próximo (Alves *et al.* 2012) e de aglomerados estelares da Pequena Nuvem de Magalhães imageados nas bandas B e V (Dias, B. *et al.* 2014). Exemplos de outros trabalhos de emprego de técnicas de ajuste de isocrónas com métodos objetivos podem ser vistos em Naylor & Jeffries (2006), Kalirai *et al.* (2004) e Monteiro *et al.* (2010).

Dado o desenvolvimento histórico da astrofísica, tradicionalmente os CMDs analisados foram construídos a partir de imagens obtidas em bandas espectrais no óptico. Entretanto, nas últimas décadas houve o desenvolvimento da astronomia no infravermelho, em particular no infravermelho próximo (NIR). Isso tem provocado uma revolução em termos científicos uma vez que o NIR sofre muito menos com a extinção causada pela poeira, tornando possível o estudo de objetos e regiões no Universo proibidos para

observações no óptico.

Tendo em vista este cenário atual, onde há a possibilidade do emprego de fotometria multibanda, a obtenção de parâmetros físicos de populações estelares utilizando dados cruzados no óptico com o infravermelho próximo nos proporciona resultados que potencialmente são mais confiáveis do que aqueles obtidos com apenas duas bandas fotométricas.

Apesar do grande número de trabalhos devotados a aglomerados abertos, cabe ressaltar que os resultados de parâmetros físicos encontrados na literatura são altamente inhomogêneos em relação ao conjunto de dados, à instrumentação, às calibrações utilizadas e às técnicas de análise. Perante este fato, atualmente há vários esforços de homogeneização destes valores, como por exemplo os apresentados por Paunzen & Netopil (2006). Neste trabalho estes autores discutem a heterogeneização dos resultados de idade, avermelhamento e distância de OCs encontrados na literatura, apresentando valores medios obtidos a partir de distintas publicações. Por fim, eles estabelecem uma lista de 72 aglomerados abertos com parâmetros acurados.

A inhomogeneização nos valores de parâmetros físicos de aglomerados abertos também é uma consequência direta da escolha de bandas fotométricas e do emprego de grades de isócronas. Em um artigo de revisão, (Gallart *et al.* 2005) demonstra como diferentes modelos de evolução estelar produzem isócronas que são sensivelmente distintas mesmo considerando-se parâmetros físicos idênticos. Já Grocholski & Sarajedini (2003) tiveram o interesse de testar distintos modelos de evolução estelar sobrepondo isócronas em CMDs de diferentes índice de cor para seis aglomerados abertos da Galáxia. Estes autores concluem que nenhum modelo teórico testado reproduz os dados observacionais de maneira satisfatoriamente consistente.

Se constituindo como uma peça chave para entender a composição química de um dado aglomerado, a metalicidade é um dos parâmetros físicos mais importantes e a sua correta determinação afeta diretamente as características fundamentais do sistema estelar. A grande variedade de métodos fotométricos e espectroscópicos usados para a determinação deste parâmetro em aglomerados abertos resulta em valores com diferenças

significativas encontradas na literatura. Neste contexto Paunzen *et al.* (2010) e Heiter *et al.* (2014) investigaram a situação atual dos valores em metalicidades encontrados na literatura, para aglomerados abertos, que foram derivados a partir de uma variedade de métodos fotométricos e espectroscópicos.

Podemos assim, formular uma série de questões a serem respondidas em relação à ajustes de isócronas em CMDs de aglomerados abertos:

- Qual(is) a(s) dependência(s) que os parâmetros de idade, metalicidade, módulo de distância e avermelhamento possuem com a escolha das bandas espectrais utilizadas?
- E em relação aos modelos de evolução estelar adotados?
- Se existem discrepâncias ou tendências, como explicá-las?
- Em particular, pode-se confiar no método de ajuste de isócrona para se obter a metalicidade de um aglomerado aberto?

## 1.1 O presente Trabalho

Na presente dissertação de mestrado buscamos jogar luz sobre as questões previamente colocadas por meio de ajustes de isócronas em CMDs multibanda de uma amostra de seis aglomerados abertos da Galáxia com idades entre 0.5 e 6 Gyr. Por uma série de características em comum, escolhemos analisar os seguintes aglomerados: NGC 188, NGC 2099, NGC 2477, NGC 2506, NGC 2682 e NGC 6939. Valendo-se do banco de dados *VizieR* obtivemos para estes objetos fotometria multibanda ( $BVIJHK_S$ ) do óptico ao NIR, assim como valores de probabilidade de pertinência (*membership*) via movimento próprio. Através de um método numérico estatístico de ajustes de isócrona (Kerber *et al.* 2002, 2005, 2007), determinamos de forma auto-consistente valores de idade, metalicidade, módulo de distância e avermelhamento para diferentes escolhas de bandas espectrais e diferentes modelos de evolução estelar (BaSTI, Padova, PARSEC e YY), nos permitindo assim investigar as dependências dos resultados em relação às nossas escolhas de bandas espectrais e modelos de evolução. Além disso, verificamos a coerência dos nossos resultados com os valores encontrados na literatura, em particular com os valores presentes nos catálogos DAML02 e WEBDA.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: No Cap. 2 apresentamos como foi feita a seleção dos aglomerados, o cruzamento de catálogos fotométricos e dados de *membership*, assim como os CMDs finais de cada aglomerado; No Cap. 3 introduzimos o método de ajuste de isócrona, apresentamos os modelos de evolução estelar utilizados, assim como a grade de parâmetros explorada; No Cap. 4 inicialmente apresentamos os resultados de cada aglomerado, para depois investigar conjuntamente as possíveis dependências que existem com as escolhas realizadas; por fim, no Cap. 5 trazemos as conclusões do trabalho e as perspectivas para a sua continuidade.

## 2 Seleção de objetos e cruzamento de catálogos

Com o objetivo de analisarmos CMDs de aglomerados abertos da Galáxia construídos com fotometria multibanda, extraímos dados fotométricos nas bandas BVI no óptico (diversos autores) e  $JHK_s$  no infravermelho próximo (2MASS), através do banco de dados *VizieR*<sup>4</sup>. Os aglomerados abertos estudados foram: NGC 188, NGC 2099, NGC 2477, NGC 2506, NGC 2682 e NGC 6939 selecionados essencialmente por cumprirem com os seguintes requisitos:

- (I) possuírem fotometria com qualidade em todas as bandas para cerca de 2 magnitudes ao longo da Seqüência Principal;
- (II) serem aglomerados abertos com uma boa estatística estelar ( $> 200$  estrelas)
- (III) possuírem determinações de probabilidade de pertinência de seus membros (*membership probability*) obtida por meio de análise de movimento próprio;
- (IV) possuírem determinações de metalicidade via espectroscopia de estrelas individuais;
- (V) possuírem estrelas evoluídas, permitindo um vínculo maior para os ajustes de isócronas;
- (VI) estarem situados em regiões com pouca contaminação por estrelas de campo e baixo avermelhamento;
- (VII) e por cobrirem um amplo intervalo de idades entre  $\sim 0.3$  e  $6$  Gyr.

Para identificar as estrelas no catálogo 2MASS contidas nos catálogos onde obtemos dados fotométricos no óptico, comparamos as coordenadas de cada aglomerado através de um algoritmo (*match*) escrito na linguagem Fortran 77 e desenvolvido por mim e pelo Dr. Leandro Kerber. Em síntese, este algoritmo calcula as diferenças nas posições para todas as fontes encontradas nos catálogos, considerando como estrelas coincidentes as fontes pontuais que tiverem a menor distância entre si, respeitando uma tolerância de 1 segundo de arco.

---

<sup>4</sup><http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>

Após fazermos o processo de cruzamento entre os catálogos (catálogos no óptico *vs.* 2MASS) para cada aglomerado, o próximo passo foi fazer uma outra seleção de membros para cada objeto, desta vez utilizando o valor atribuído a probabilidade de pertinência individual de cada estrela ao aglomerado. A exemplo dos dados fotométricos, estes valores também foram extraídos a partir da plataforma de dados *VizieR*. No presente trabalho, consideramos pertencentes ao aglomerado somente estrelas com uma probabilidade de pertinência individual acima de 60%.

## 2.1 Fotometria empregada

Fotometria é a medida da luz proveniente de um objeto. Para este fim mede-se o brilho, ou seja, a quantidade de energia luminosa que atravessa uma unidade de área orientada perpendicularmente à direção de propagação da luz por unidade de tempo. No estudo de aglomerados estelares, a fotometria assume um papel de extrema importância, servindo como técnica para obter parâmetros físicos de um dado sistema, tais como: idade, metalicidade, distância e avermelhamento. Além disso, a fotometria nos fornece informações a cerca de posições, e potencialmente sobre cinemática, desde que exista observações em diferentes épocas separadas por uma boa base de tempo.

Para a medição do brilho de qualquer estrela é preciso adotar um conjunto de filtros com o objetivo de restringir o intervalo de comprimento de onda do espectro de radiação eletromagnética que incide sobre o detector em uso na medição. Para este propósito foram criados os sistemas fotométricos (Bessell 2005), que tem entre outras funções a padronização do procedimento de medida do fluxo de luz. No presente trabalho, extraímos dados fotométricos para a nossa amostra obtidos no domínio de dois sistemas fotométricos: o sistema Johnson - Cousins e o sistema 2MASS.

O sistema fotométrico Johnson - Cousins utiliza um conjunto de cinco bandas fotométricas, deixando passar radiação em intervalos específicos do espectro eletromagnético

(Bessell 1990). São elas: ultravioleta (U), azul (B) e visível (V) do sistema Johnson, e as bandas correspondente ao vermelho (R) e infravermelho (I) do sistema Cousins. Já o sistema fotométrico na faixa do infravermelho próximo 2MASS (Skrutskie *et al.* 2006), compreende as bandas JHK<sub>s</sub> centrados nos comprimentos de onda de 1.25  $\mu\text{m}$ , 1.65  $\mu\text{m}$  e 2.16  $\mu\text{m}$ , respectivamente. A Fig. 3 mostra as curvas de transmissão destes dois sistemas.

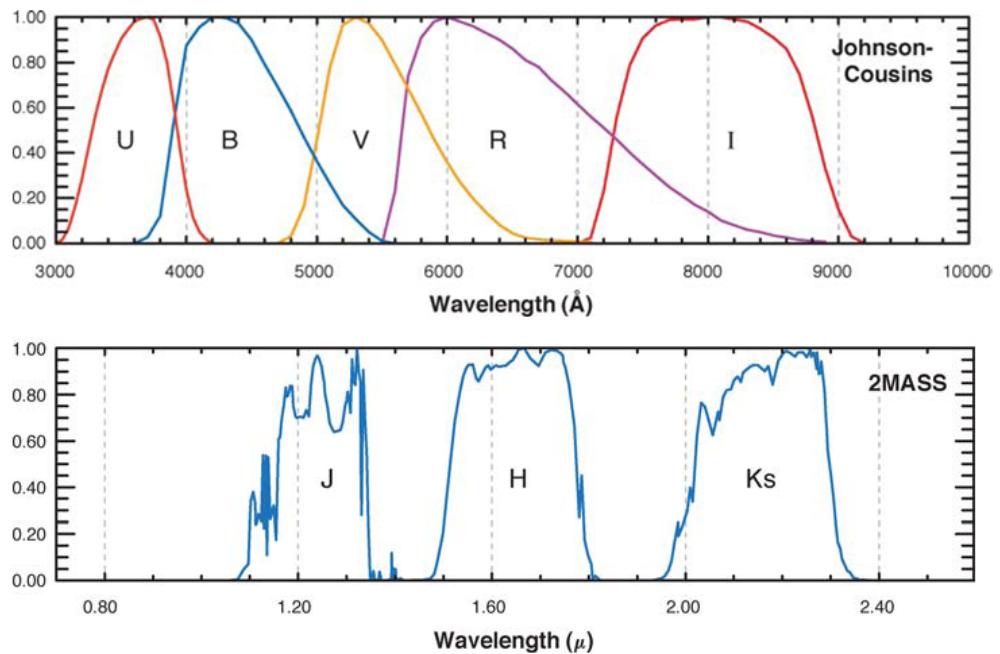


Figura 3: Curvas de transmissão dos sistemas fotométricos Johnson - Cousins (UBVRI) e 2MASS (JHK<sub>s</sub>). Figura adaptada de Bessell 2005.

## 2.2 *VizieR & 2MASS*

A astronomia é em sua essência uma ciéncia baseada na interpretação da luz em busca de respostas aos fenômenos físicos que ocorrem fora da Terra bem como a evolução e propriedades físicas e químicas de todos os objetos que podem ser observados no céu. Por conta desta característica observational, a astronomia ao longo de sua história, sempre primou pela qualidade e quantidade de dados observacionais, como também pela necessidade de encontrar métodos eficientes de armazenamentos e análise de dados. Nas últimas décadas, com o crescimento do número de telescópios equipados com CCDs e detectores sensíveis a diferentes faixas espectrais (que vão dos raios gama até as ondas de rádio, passando pelo UV, óptico e infravermelho) e a ampla cobertura espacial (cobrindo em alguns casos todo o plano do céu, como no caso do 2MASS), a astronomia se tornou uma ciéncia geradora de um imenso fluxo de dados complexos e de qualidade.

Esses dados são disponíveis em sistemas de banco de dados espalhados por todo o planeta, tendo como objetivo permitir e facilitar o uso integrado dessa grande demanda de dados, permitindo aos astrônomos a extração do seu enorme conteúdo científico. Como exemplo de um sistema de banco de dados amplamente utilizado por astrônomos temos o *Centre de Donnees astronomiques de Strasbourg* (CDS), que além de conter um banco de dados astronômico (SIMBAD), possui também um software interativo relacionado à visualização e análise de imagens astronômicas (*Aladin*) e um centro relacionado a catálogos astronômicos (*VizieR*).

O *VizieR* é um serviço que permite acesso direto à varios catálogos astronômicos (Ochsenbein *et al.* 2000). Sob atual responsabilidade do CDS, o *VizieR* foi criado no ano de 1993 a partir da colaboração entre o *European Space Information System* (ESIS) e o CDS, e se constitui hoje como um dos mais importantes centros de referência à busca por dados astronômicos.

Nos valendo destas facilidades, utilizamos as ferramentas do *VizieR* para extrair dados fotométricos de seis aglomerados abertos nas bandas da faixa do óptico (sistema Johnson - Cousins) e nas bandas  $JHK_s$  do sistema 2MASS.

O 2MASS<sup>5</sup> (*The Two Micron All Sky Survey*) foi um projeto oriundo do desejo de se obter dados fotométricos na faixa do infravermelho próximo por todo o céu, de maneira completa e confiável, para comprimentos de onda da ordem de  $2.0\text{ }\mu\text{m}$ . Projeto desenvolvido em parceria entre a *University of Massachusetts* e o Centro de Processamento e Análise no Infravermelho (IPAC), o *survey* 2MASS contou com dois telescópios automatizados de 1.3 m de diâmetro, um situado no hemisfério norte e o outro no hemisfério sul. Aquele situado no hemisferio norte está localizado no Monte Hopkins, Arizona - EUA iniciando sua coleta de dados em junho de 1997 e finalizando no inicio do ano de 2001. O telescópio no Hemisferio sul está localizado no Cerro Tolodo Inter - American Observatory, Chile e teve o seu funcionamento entre os anos de 1998 à 2001. Cada telescópio foi equipado com uma câmera de três canais, consistindo cada canal em detectores de HgCdTe de 256 x 256 píxeis com capacidade de obter imagens brutas por meio do sistema fotométrico J ( $1.25\text{ }\mu\text{m}$ ), H ( $1.65\text{ }\mu\text{m}$ ) e K<sub>s</sub> ( $2.17\text{ }\mu\text{m}$ ), todas no infravermelho próximo (Fig. 3).

Se constituindo como um dos mais importantes *surveys* na obtenção de dados astronômicos na faixa do infravermelho, o 2MASS deixou um legado sem precedentes de ótimos dados da nossa Galáxia quase livre de efeitos de nuvens e poeira interestelar. Promoveu também uma base estatística para a procura de objetos astrofísicos raros, porém de extrema importância para um maior entendimento da teoria de evolução e interiores estelares, que são as estrelas de muito baixa luminosidade e anãs marrons, objetos de difícil detecção quando se pensa em observações no óptico.

O 2MASS produziu um catálogo de Fontes Pontuais (*Point Source Catalog* - PSC) contendo mais de 500 milhões de estrelas e galáxias com incertezas fotométricas associadas a cada banda, um catálogo de fontes extensas (*Extended Source Catalog* - XSC) com cerca de 1.6 milhões de fontes (galáxias e outras nebulosas), e também um atlas digital de imagens (*Atlas image*). Estes dados podem ser obtidos a partir do banco de dados *Vizier*.

---

<sup>5</sup><http://www.ipac.caltech.edu/2mass/>

## 2.3 Apresentação dos dados

A seguir são apresentadas as informações básicas sobre os seis aglomerados abertos que compõem a nossa amostra. Estas informações estão resumidas na Tab. 1, onde são apresentadas as coordenadas equatoriais e galácticas de cada objeto, assim como as referências associadas à fotometria e à probabilidade de pertinência (*membership*). Como discutido anteriormente, a fotometria do sistema Johnson - Cousins para todos os aglomerados foi extraída de diversos autores, e a fotometria com bandas na faixa do infravermelho próximo foi obtida do 2MASS.

### NGC 188

NGC 188 é um aglomerado aberto de estrelas situado na constelação de Cepheus. Localizado em uma latitude galáctica razoavelmente alta ( $b = 22.384^\circ$ ), o que lhe garante uma baixa contaminação por estrelas de campo e uma baixa extinção pela poeira do disco, este objeto se constitui como um dos mais antigos aglomerados abertos da Galáxia, tendo uma idade estimada em  $\sim 4.3$  Gyr (Mermilliod 1996). Tendo como coordenadas equatoriais  $\alpha(\text{J2000}) = 00^h48^m28^s$  e  $\delta(\text{J2000}) = +85^\circ15'18''$  este objeto possui um número total de estrelas estimado em cerca de  $\sim 620$  membros. A Tab. 2 apresenta estimativas dos valores de alguns parâmetros físicos de NGC 188 e dos demais aglomerados abertos de nossa amostra, todas retiradas dos catálogos WEBDA e DAML02.

A amostra de dados fotométricos nas bandas BVI foram extraídos de Stetson *et al.* (2004). A escolha por Stetson *et al.* (2004) se deve ao fato deste possuir um sistema fotométrico compatível com o objetivo do presente trabalho e também pelo fato de possuir determinações de probabilidade via movimento próprio, nos fornecendo assim todas as informações para se construir um CMD corrigido da contaminação por estrelas de campo.

Na Fig. 4 é mostrado a distribuição no plano do céu ( $\delta$  vs.  $\alpha$ ) dos membros deste aglomerado segundo os catálogos utilizados, ou seja, o catálogo 2MASS (pontos em cor preta) e o catálogo de estrelas obtido em Stetson *et al.* (2004) (pontos em cor azul). O

painel à esquerda mostra a distribuição espacial das estrelas que possuem determinações de fotometria nas bandas J e aquelas bandas do óptico. Na direita é apresentado o conjunto de estrelas resultante do cruzamento de catálogos (pontos em cor vermelha), considerando-se uma probabilidade de pertinência mínima de 60% (pontos em cor verde).

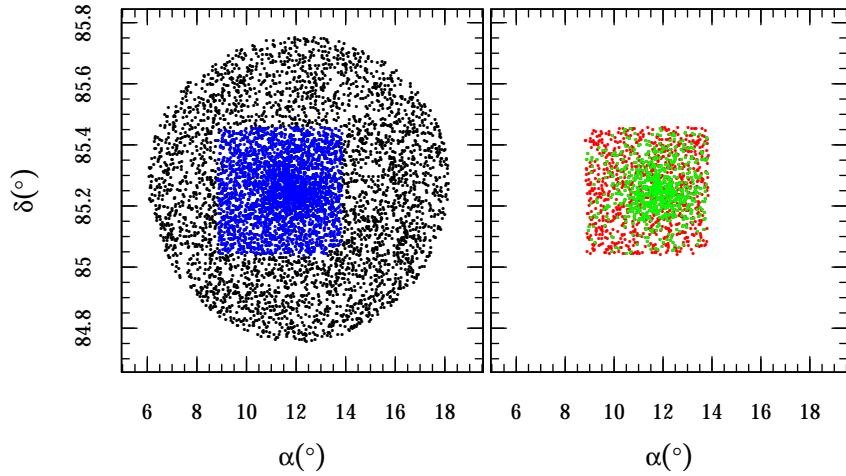


Figura 4: Distribuição no plano do céu das estrelas do aglomerado NGC 188, considerando os catálogos no NIR (pontos pretos) e nas bandas BVI (pontos azuis). À esquerda: Estrelas que possuem determinações de fotometria nas bandas J e BVI. À direita: Distribuição das estrelas resultantes do cruzamento dos dois catálogos fotométricos (pontos vermelhos), bem como com o catálogo com a informação de probabilidade de pertinência considerando-se apenas estrelas com probabilidade acima de 60% de pertencer ao aglomerado (pontos verdes).

## NGC 2099

Situado na constelação de Auriga, o aglomerado aberto NGC 2099 (também denominado de M 37) possui um valor de ascensão reta  $\alpha = 05^h 52^m 18^s$  e declinação  $\delta = +32^\circ 33' 12''$ . Embora este aglomerado esteja localizado quase sobre o plano galáctico ( $b \sim 3.0^\circ$ ), ele está praticamente na direção do anticentro da Galáxia ( $l \sim 178^\circ$ ), o que reduz os efeitos de extinção pela poeira e contaminação por estrelas de campo. Se constituindo como um dos objetos mais jovens da nossa amostra, este aglomerado possui uma idade inferior a 1 Gyr.

Para este OC apenas analisamos dados nas bandas BV extraídos de Zacharias *et al.* (2012) pois não encontramos, no banco de dados *VisieR*, dados na banda I do sistema Johnson - Cousins para este objeto. No que diz respeito as informações de probabilidade de

pertinência, retiramos estes valores do catálogo DAML02 (Dias, W. *et al.* 2014) (Tab.2).

A Fig. 5 representa o cruzamento de catálogos para NGC 2099, ilustrando a distribuição de estrelas no plano do céu ( $\delta$  vs.  $\alpha$ ).

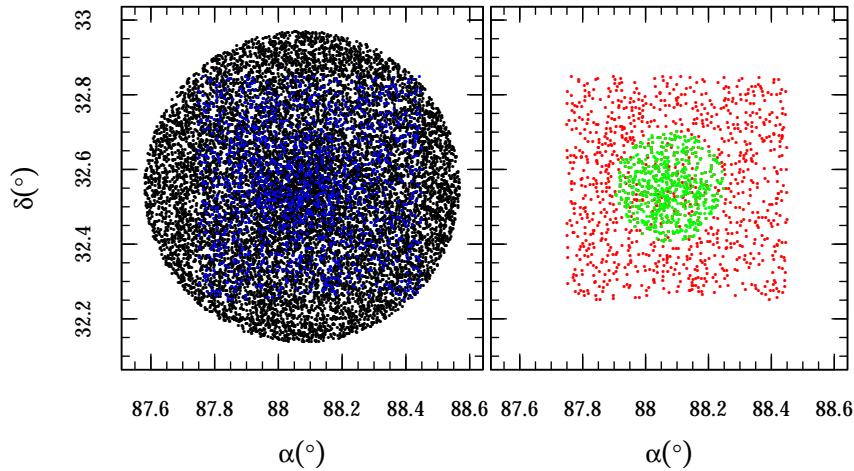


Figura 5: Distribuição espacial das estrelas do aglomerado NGC 2099 ilustrando o cruzamento de catálogos. Idem à legenda da figura 4.

### NGC 2477

Considerado como um dos maiores aglomerados abertos no céu, o OC NGC 2477 está situado na constelação de Puppis. Com uma ascensão reta  $\alpha = 07^h52^m10^s$  e declinação  $\delta = -38^{\circ}31'48''$  este aglomerado possui uma metalicidade um pouco superior a metalicidade solar e uma idade inferior a 1 Gyr, se constituindo, portanto, como um dos mais jovens da nossa amostra. Assim como para NGC 2099, apenas analisamos para NGC 2477 dados nas bandas BV extraídos de Zacharias *et al.* (2012) pois não encontramos, no banco de dados *VisieR*, dados na banda I do sistema Johnson - Cousins para este objeto. Quanto as informações de probabilidade de pertinência, retiramos de Dias, W. *et al.* (2014).

A Fig. 6 representa a distribuição no plano do céu das estrelas membros deste aglomerado em relação aos catálogos utilizados.

## NGC 2506

Situado na direção da constelação de Monoceros, este aglomerado possui como coordenadas equatoriais:  $\alpha = 08^h 00^m 01^s$  e  $\delta = -10^\circ 46' 12''$ , e galácticas:  $b = 9.935^\circ$  e  $l = 230.564^\circ$ . Para este objeto extraímos dados fotométricos BVI de Marconi *et al.* (1997) e informação de probabilidade de pertinência de Dias, W. *et al.* (2014). Na Fig. 7 apresentamos a distribuição espacial das estrelas pertencentes a NGC 2506, dando destaque especial àquelas que possuem uma probabilidade de pertinência acima de 60%.

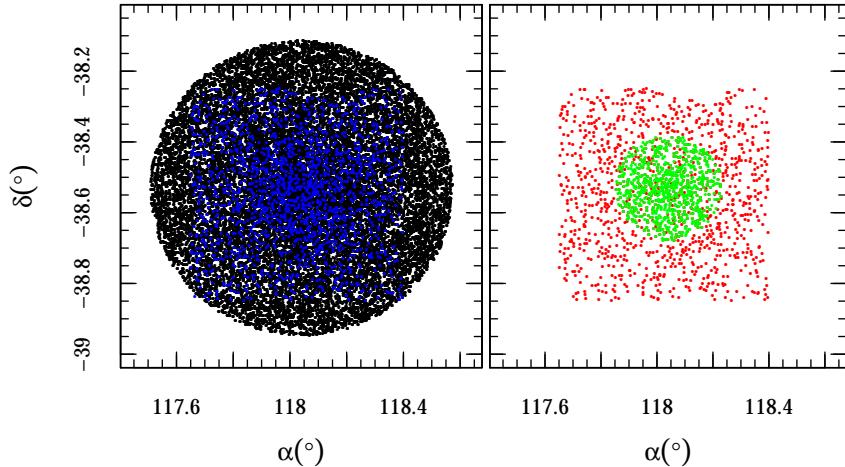


Figura 6: Distribuição espacial das estrelas do aglomerado NGC 2477 ilustrando o cruzamento de catálogos para este objeto. Idem à legenda da figura 4.

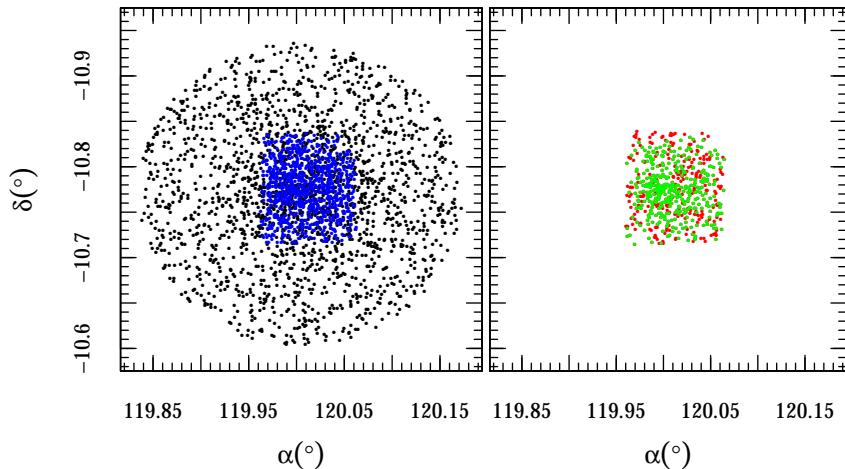


Figura 7: Distribuição espacial das estrelas do aglomerado NGC 2506, ilustrando o cruzamento de catálogos para este objeto. Idem à legenda da figura 4.

Aglomerado	$\alpha$ (J2000)	$\delta$ (J2000)	$b$	$l$	dados no NIR	dados no óptico (BVI)	Membership
NGC 188	$00^h 48^m 28^s$	$+85^\circ 15' 18''$	$22.384^\circ$	$122.843^\circ$	2MASS	Stetson <i>et al.</i> (2004)	Stetson <i>et al.</i> (2004)
NGC 2099	$05^h 52^m 18^s$	$+32^\circ 33' 12''$	$3.091^\circ$	$177.635^\circ$	2MASS	Zacharias <i>et al.</i> (2012)*	Dias, W. <i>et al.</i> (2014)
NGC 2477	$07^h 52^m 10^s$	$-38^\circ 31' 48''$	$-5.838^\circ$	$253.563^\circ$	2MASS	Zacharias <i>et al.</i> (2012)*	Dias, W. <i>et al.</i> (2014)
NGC 2506	$08^h 00^m 01^s$	$-10^\circ 46' 12''$	$9.935^\circ$	$230.564^\circ$	2MASS	Marconi <i>et al.</i> (1997)	Dias, W. <i>et al.</i> (2014)
NGC 2682	$08^h 51^m 18^s$	$+11^\circ 48' 00''$	$31.896^\circ$	$215.696^\circ$	2MASS	Yadav <i>et al.</i> (2008)	Yadav <i>et al.</i> (2008)
NGC 6939	$20^h 31^m 30^s$	$+60^\circ 39' 42''$	$12.304^\circ$	$95.903^\circ$	2MASS	Andreuzzi <i>et al.</i> (2004)	Dias, W. <i>et al.</i> (2014)

\* Dados apenas nas bandas BV

Tabela 1: Fontes dos dados e as respectivas coordenadas galácticas ( $b$ ,  $l$ ) e equatoriais ( $\alpha$ ,  $\delta$ ) dos aglomerados abertos da nossa amostra.

## NGC 2682

O aglomerado aberto NGC 2682 (também conhecido como M 67) está situado na constelação de Câncer. Com uma ascensão reta  $\alpha$ (J2000) =  $08^h 51^m 18^s$  e declinação  $\delta$ (J2000) =  $+11^\circ 48' 00''$  este aglomerado, assim como NGC 188, está na classe dos mais antigos da nossa Gálaxia possuindo uma idade da ordem de 3 Gyr (Mermilliod 1996) e um número total de estrelas de  $\sim 250$  membros. Sua latitude galáctica também garante a este sistema uma baixa contaminação por estrelas de campo e um baixo avermelhamento pela poeira do disco.

Os dados de fotometria na região do óptico foram extraídos de Yadav *et al.* (2008). Catálogo este, construído com dados do telescópio MPG/ESO de 2.2 metros e que foi utilizado por estes autores para determinar valores de astrometria, fotometria e movimentos próprios das estrelas em um campo  $34 \times 33 \text{ arcmin}^2$  centrado no aglomerado.

A Fig. 8 esquematiza em 2 painéis a distribuição no plano do céu ( $\delta$  vs.  $\alpha$ ) das estrelas membros deste aglomerado em relação aos catálogos utilizados.

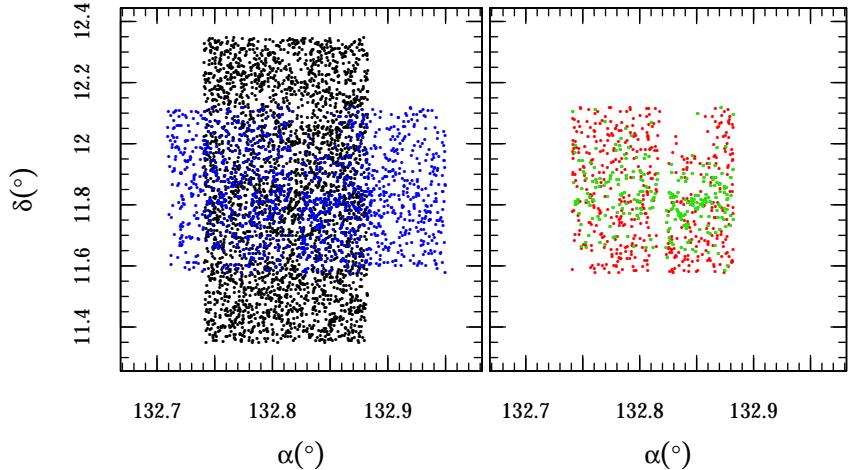


Figura 8: Distribuição no plano do céu das estrelas do aglomerado NGC 2682, ilustrando o cruzamento de catálogos deste objeto. Idem à legenda da figura 4.

### NGC 6939

Este objeto situado na direção de Cepheus, possui como coordenadas equatoriais:  $\alpha = 20^h 31^m 30^s$  e  $\delta = +60^\circ 39' 42''$  e latitude galáctica  $b = 12.304^\circ$ . Extraímos dados fotométricos nas bandas BVI oriundos de Andreuzzi *et al.* (2004) e informação sobre probabilidade de pertinência de Dias, W. *et al.* (2014).

A Fig. 9 esquematiza em 2 painéis a distribuição no plano do céu ( $\delta$  vs.  $\alpha$ ) das estrelas membros deste aglomerado em relação aos catálogos utilizados.

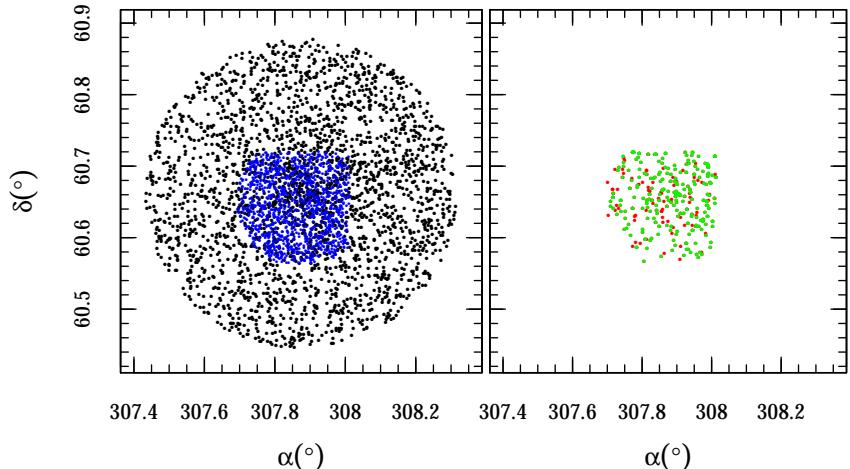


Figura 9: Distribuição espacial das estrelas do aglomerado NGC 6939, ilustrando o cruzamento de catálogos para este objeto. Idem à legenda da figura 4.

## 2.4 Catálogos de aglomerados abertos

A astronomia produz a cada ano uma quantidade cada vez maior de dados de diferentes qualidades e complexidades. Perante isto, os catálogos se consolidaram como uma solução a longo prazo para armazenar e recuperar dados e valores de parâmetros físicos de objetos estelares e galáxias. Em particular, em relação a aglomerados abertos podemos citar os catálogos WEBDA (Mermilliod 1996), DAML02 (Dias, W. *et al.* 2014) e COCD (Kharchenko *et al.* 2005).

WEBDA				DAML02				
$\tau$ (Gyr)	Distância (pc)	[Fe/H]	E(B - V)	$\tau$ (Gyr)	Distância (pc)	[Fe/H]	E(B - V)	
NGC 188	4.28	2047	- 0.02	0.082	4.28	2047	- 0.03 $\pm$ 0.04	0.082
NGC 2099	0.35	1383	+ 0.08	0.302	0.35	1383	+ 0.09 $\pm$ 0.15	0.302
NGC 2477	0.70	1222	+ 0.01	0.279	0.71	1341	+ 0.07 $\pm$ 0.03	0.310
NGC 2506	1.11	3460	- 0.37	0.081	1.00	3750	- 0.20 $\pm$ 0.02	0.100
NGC 2682	2.56	908	NA	0.059	2.82	808	+ 0.03 $\pm$ 0.02	0.030
NGC 6939	2.22	1185	+ 0.02	0.320	1.58	1800	+ 0.00 $\pm$ 0.10	0.330

Tabela 2: Valores dos parâmetros físicos dos aglomerados abertos da nossa amostra extraídos dos catálogos *WEBDA* e *DAML02*.

Na Tab. 2 são apresentados os valores de idade, metalicidade, distância e avermelhamento dos aglomerados abertos da nossa amostra encontrados nos catálogos *WEBDA* e *DAML02*. Convém ressaltar que estes valores são compilações de resultados utilizando-se diferentes técnicas e diferentes observações. Em geral os valores de idade, distância e avermelhamento provém de ajustes de isócronas em CMDs no óptico, enquanto que os valores de metalicidade são obtidos através de espectroscopia de estrelas individuais.

O *WEBDA* é um catálogo de aglomerados estelares da Galáxia e das Nuvens de Magalhães, destinado a fornecer dados e/ou parâmetros confiáveis para a comunidade astronômica. Se constituindo como uma versão *on line* do catálogo BDA (Mermilliod

1996), o *WEBDA* nos fornece dados astrométricos (coordenadas, posições no plano do céu e movimento próprio), fotométricos (obtidos em várias bandas espectrais) e também dados espectroscópicos de aglomerados abertos, tais como velocidade radial, velocidade rotacional e classe espectral, nos fornecendo ainda valores de probabilidade de pertinência e um conjunto de referências bibliográficas. O catálogo DAML02 se caracteriza por ser um catálogo de aglomerados abertos mais completo e com referências mais atualizadas, nos fornecendo valores de parâmetros fundamentais e cinemáticos. Na versão atual do catálogo são listados 2168 objetos, dos quais 2003 (92,4%) possuem estimativas de idade, distância e avermelhamento e 284 (13,8%) possuem valores de abundâncias químicas.

Por outro lado os respectivos valores de parâmetros físicos encontrados no catálogo COCD são mostrados na Tab. 3. Estes valores são oriundos de ajustes de isócronas em CMDs [V vs. (B - V)] de aglomerados com informação de probabilidade de pertinência via movimento próprio, assumindo-se uma metalicidade solar para todos os aglomerados. Como é possível perceber por esta tabela, os aglomerados NGC 188 e NGC 6939 não estão presentes no catálogo COCD. Além disso, nesta tabela também apresentamos os respectivos valores de idade, distância e avermelhamento encontrados em Pauzen & Netopil (2006) e de metalicidade encontrado em Heiter *et al.* (2014).

	COCD				Pauzen & Netopil (2006)			Heiter <i>et al.</i> (2014)
	$\tau$ (Gyr)	Dist. (pc)	[Fe/H]	E(B - V)	$\tau$ (Gyr)	Dist. (pc)	E(B - V)	[Fe/H]
NGC 188	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	+0.11 ± 0.04
NGC 2099	0.35	1383	0.0	0.300	NA	NA	NA	+0.02 ± 0.05
NGC 2477	0.41	1222	0.0	0.280	0.88 ± 0.24	1227 ± 166	0.26 ± 0.08	+0.07 ± 0.03
NGC 2506	1.12	3460	0.0	0.080	1.65 ± 0.48	3315 ± 219	0.06 ± 0.04	-0.23 ± 0.05
NGC 2682	2.57	908	0.0	0.060	4.09 ± 0.96	820 ± 047	0.05 ± 0.02	+0.00 ± 0.06
NGC 6939	NA	NA	NA	NA	1.64 ± 0.45	1321 ± 274	0.45 ± 0.08	+0.13

Tabela 3: Valores dos parâmetros físicos dos aglomerados abertos da nossa amostra extraídos do catálogo COCD, Pauzen & Netopil (2006) e Heiter *et al.* (2014).

## 2.5 CMDs observados

Os CMDs finais na direção dos aglomerados, obtidos após o processo de cruzamento de catálogos (*match*) e a respectiva seleção de membros por meio do valor atribuído a probabilidade de pertinência individual de cada estrela ao aglomerado, são apresentados nas Figs. 10 - 15. Enquanto que as Figs. 10, 13, 14 e 15 apresentam três CMDs cada, construídos com as bandas BVI do óptico e JH do NIR, as Figs 11 (NGC 2099) e 12 (NGC 2477) apresentam apenas os diagramas [V vs. (B - V)] e [J vs. (J - H)]. Em adição, em cada figura é mostrado as isócronas dos modelos de Padova (vermelho), PARSEC (azul), BaSTI (verde) e YY (cinza), com os respectivos valores de idade, metalicidade, módulo de distância e avermelhamento retirados do catálogo DAML02 (Tab. 2).

Podemos notar claramente nos CMDs a presença da MS do respectivo aglomerado, bem como do SGB e RGB. Além disso, podemos notar a forte presença de estrelas situadas logo acima do ponto de TO da MS. Estas estrelas massivas e azuis, conhecidas como *blue stragglers*, são, segundo a hipótese mais aceita, estrelas binárias que se fundiram através da transferência de massa de uma para a outra, ou até mesmo através da colisão das duas.

Para NGC 188, o número de membros que sobreviveram ao processo de *match* e ao corte via probabilidade de pertinência foi equivalente à 1624 estrelas, de modo que 479 estrelas possuem uma magnitude igual e/ou inferior à  $V = 17$  mag. Neste CMD fica clara a presença de estrelas no RC. No que diz respeito aos dois aglomerados abertos mais jovens, o número de estrelas final que restaram de NGC 2477, depois dos cortes efetuados na amostragem inicial foi de 772 estrelas membro. Destas, apenas 158 possuem uma magnitude na banda V menor e/ou igual à 15 mag. Quanto à NGC 2099, a nossa amostra final de estrelas foi de 564 membros, com apenas 137 estrelas com  $V \leq 13$  mag. Quanto à NGC 2682, a nossa amostra final de estrelas foi de 737 membros, com somente 197 estrelas com uma magnitude  $V \leq 16$  mag. Em relação à NGC 2506, o número de membros que sobreviveram ao processo de *match* e ao corte via probabilidade de pertinência foi equivalente à 623, de modo que apenas 286 estrelas possuem uma magnitude  $\leq 17$ . Quanto ao objeto NGC 6939, a nossa amostra final de estrelas foi de 305 membros, com somente 156 com uma magnitude  $\leq 15.5$ .

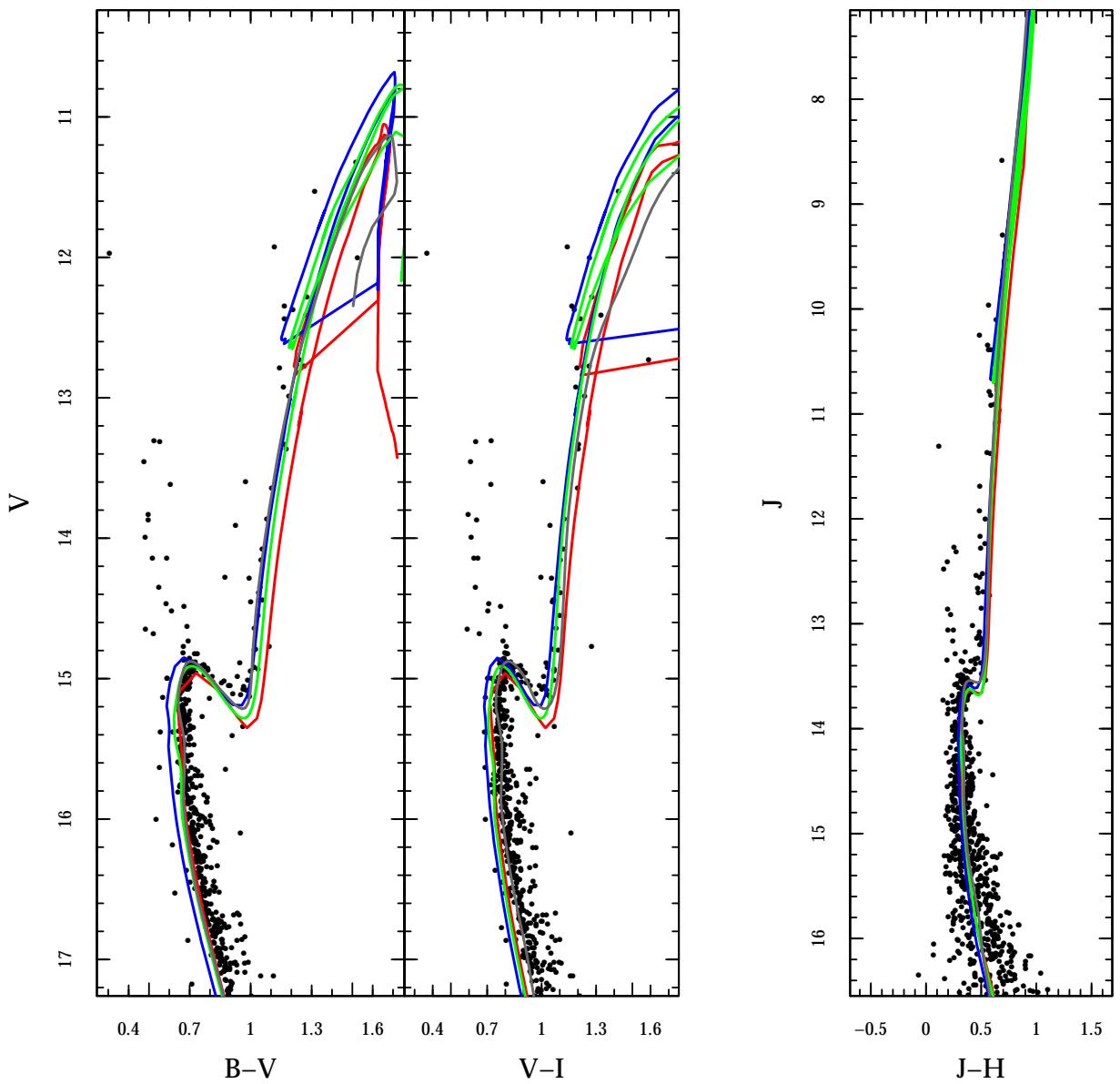


Figura 10: CMDs finais observados para NGC 188. As isócronas representam os modelos de evolução estelar de Padova (vermelho), PARSEC (azul), BaSTI (verde) e YY (cinza), com os respectivos valores de idade, índice de ferro, módulo de distância e avermelhamento retirados do catálogo DAML02.

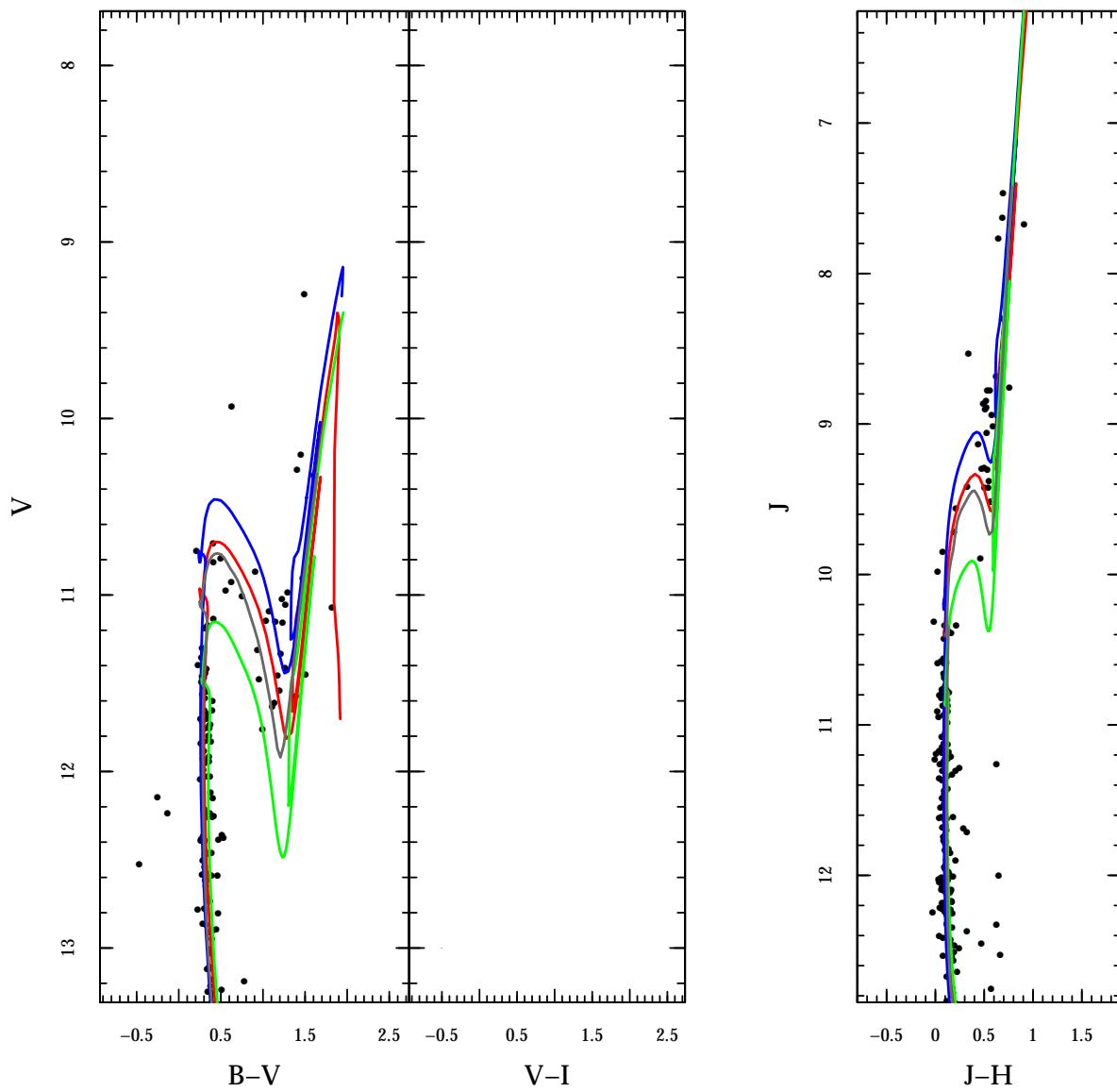


Figura 11: CMDs finais observados para NGC 2099. Idem à legenda da figura 10.

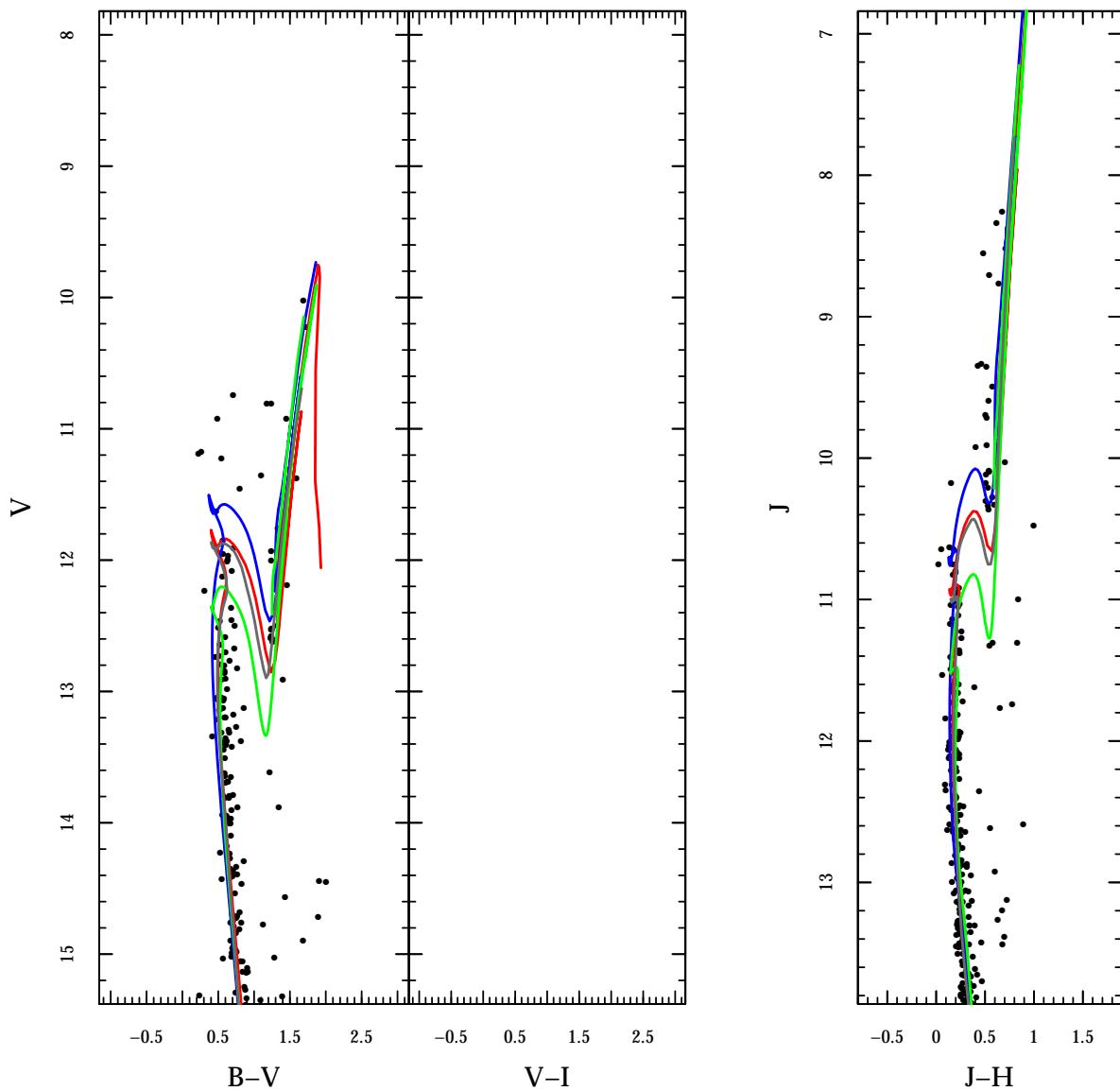


Figura 12: CMDs finais observados para NGC 2477. Idem à legenda da figura 10.

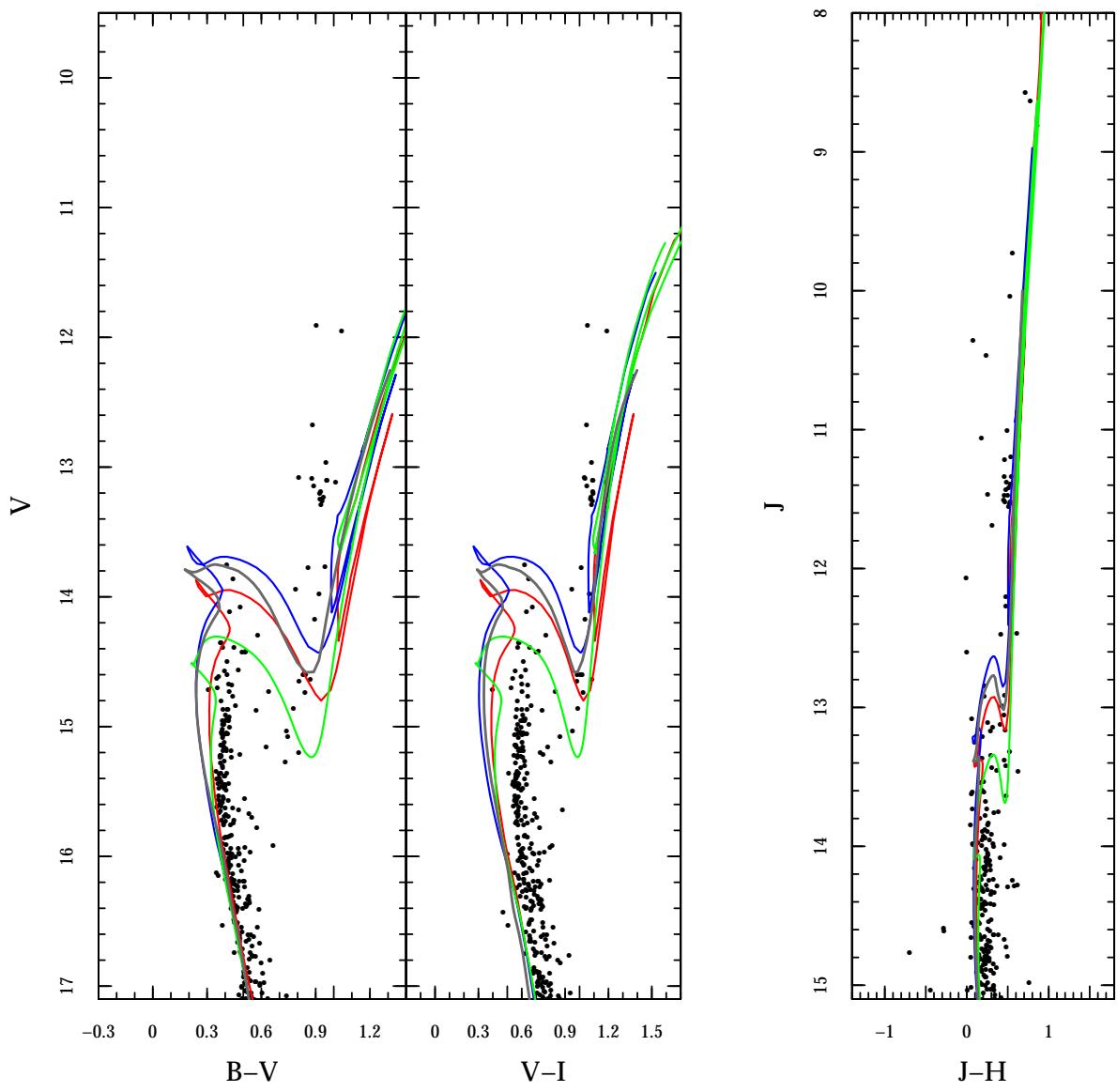


Figura 13: CMDs finais observados para NGC 2506. Idem à legenda da figura 10.

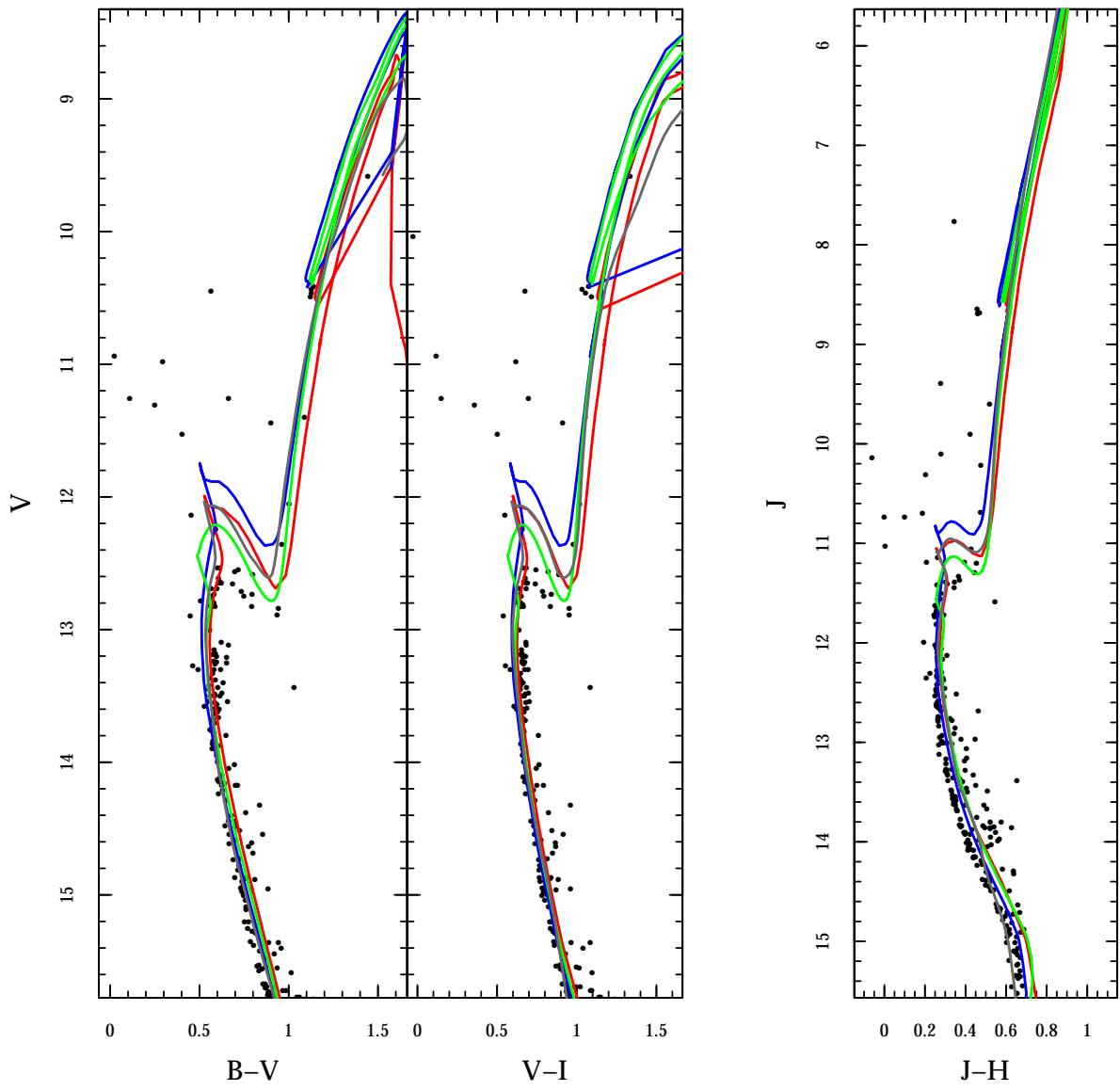


Figura 14: CMDs finais observados para NGC 2682. Idem à legenda da figura 10.

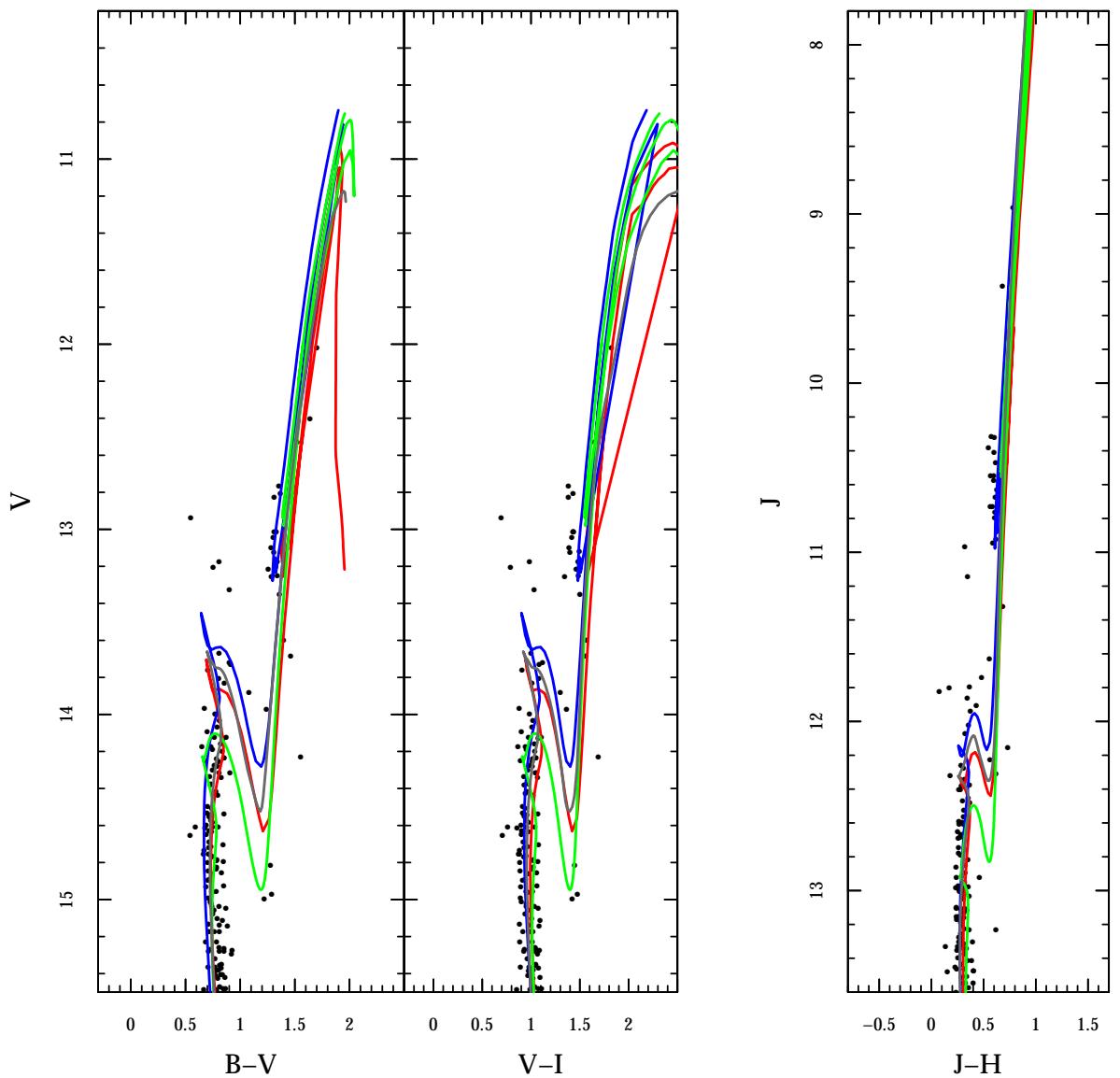


Figura 15: CMDs finais observados para NGC 6939. Idem à legenda da figura 10.

## 2.6 Perfil de densidade

De posse dos valores centrais de declinação e ascensão reta dos respectivos aglomerados da nossa amostra extraídos do WEBDA, decidimos dividir a região dos objetos em anéis concêntricos com o intuito de encontrar os respectivos perfis radiais de densidade (*Radial Density Profile - RDP*) de estrelas. O perfil de densidade de um determinado aglomerado aberto é caracterizado como sendo a distribuição do número de estrelas em cada anel por unidade de área na linha de visada do objeto em estudo, nos fornecendo assim uma visão geral da estrutura deste.

Na Fig. 16 é apresentado o perfil de densidade radial ( $\log(\sigma)$  vs.  $R$ ) de estrelas, obtido com dados do 2MASS, tomada na direção de cada aglomerado da amostra (linha contínua de cor azul). Construídos assim, com uma fotometria homogênea ( $JHK_s$ ), as RDPs foram feitas com um raio máximo de até 15' centrada nas coordenadas provenientes do WEBDA. Em adição, apresentamos a distribuição radial das estrelas de cada objeto analisadas neste trabalho (linha contínua de cor marron). As estrelas utilizadas para a elaboração desta distribuição foram aquelas que satisfizeram as condições impostas pelo processo de *match* e que possuem uma probabilidade de pertinência acima de 60%, sendo portanto um subconjunto da amostra anterior porém descontaminado do campo. Analisando esta figura podemos notar que as distribuições radiais das estrelas da nossa amostra seguem o perfil de densidade das regiões centrais de cada aglomerado, onde se concentram as estrelas com alta probabilidade de pertinência. A exceção a esta regra é NGC 2682, cuja densidade central das estrelas do *match* é muito baixa. Isso ocorre devido ao *gap* entre os CCDs das imagens de Yadav *et al.* (2008) (Fig. 8), infelizmente localizado na região central do aglomerado.

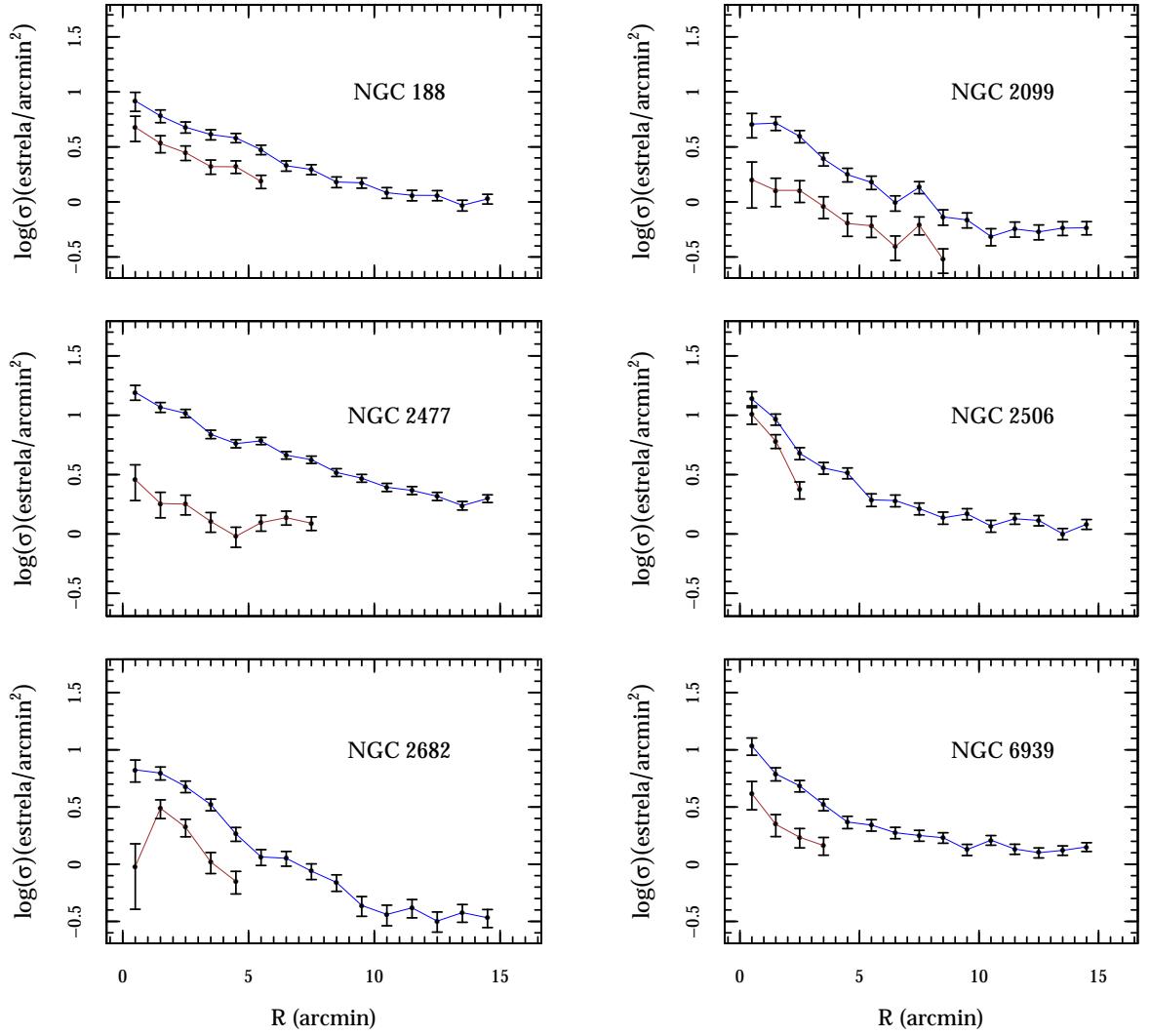


Figura 16: Perfil de densidade radial das estrelas, obtido com dados do 2MASS, tomada na direção dos aglomerados em estudo (linha contínua de cor azul). Em adição, é mostrado a distribuição radial das estrelas da nossa amostra (linha contínua de cor marrom). As barras representam os erros poissônicos.

### **3 Método numérico - estatístico de ajuste de isócronas**

Após o cruzamento de catálogos com fotometria  $BVIJHK_s$  e de probabilidade de pertinência, obtivemos finalmente uma base de dados com fotometria multibanda des-contaminada de estrelas de campo, o que nos oferece a oportunidade de determinar os parâmetros físicos dos aglomerados de nossa amostra por meio da aplicação de um método numérico-estatístico de análise de CMDs (Kerber *et al.* 2002; Kerber *et al.* 2005; Kerber *et al.* 2007; Alves *et al.* 2012; Dias, B. *et al.* 2014).

Tal método é capaz de reproduzir e discriminar, de forma objetiva, um CMD modelado que melhor reproduz as características de um CMD observado, utilizando para isso uma estatística de comparação de distribuição de pontos em um plano. Este modelamento é criado por um algoritmo que gera estrelas artificiais a partir da hipótese inicial de que todos os membros de um determinado aglomerado possam ser considerados como pertencentes a uma população estelar simples (*Simple Stellar Population* - SSP), caracterizada por um único valor de idade, metalicidade, distância e avermelhamento.

#### **3.1 Modelos de Evolução e Interior Estelar**

A principal ferramenta para a determinação de parâmetros físicos de aglomerados estelares, e em particular dos aglomerados abertos de estrelas, é o Diagrama Cor-Magnitude. Se constituindo como um plano observacional que confronta os valores de magnitude absoluta e cor das estrelas membro, a interpretação dos CMDs é feita por meio do ajuste de isócronas. No presente trabalho, com o intuito de verificarmos a dependência dos resultados com os modelos de evolução estelar, fizemos uso de quatro conjuntos diferentes de isócronas: Padova (Girardi *et al.* 2002), PARSEC (Bressan *et al.* 2012), BaSTI (Pietrinferni *et al.* 2004) e YY (Demarque *et al.* 2004), todas elas obtidas por meio das

suas respectivas páginas eletrônicas e escolhidas por estarem atualmente entre as mais usadas para o estudo de populações estelares simples. Na Fig. 17 é mostrado uma comparação entre os modelos de Padova, PARSEC, BaSTI e YY para metalicidade solar e diferentes idades (0.30, 1.0, 5.0 Gyr).

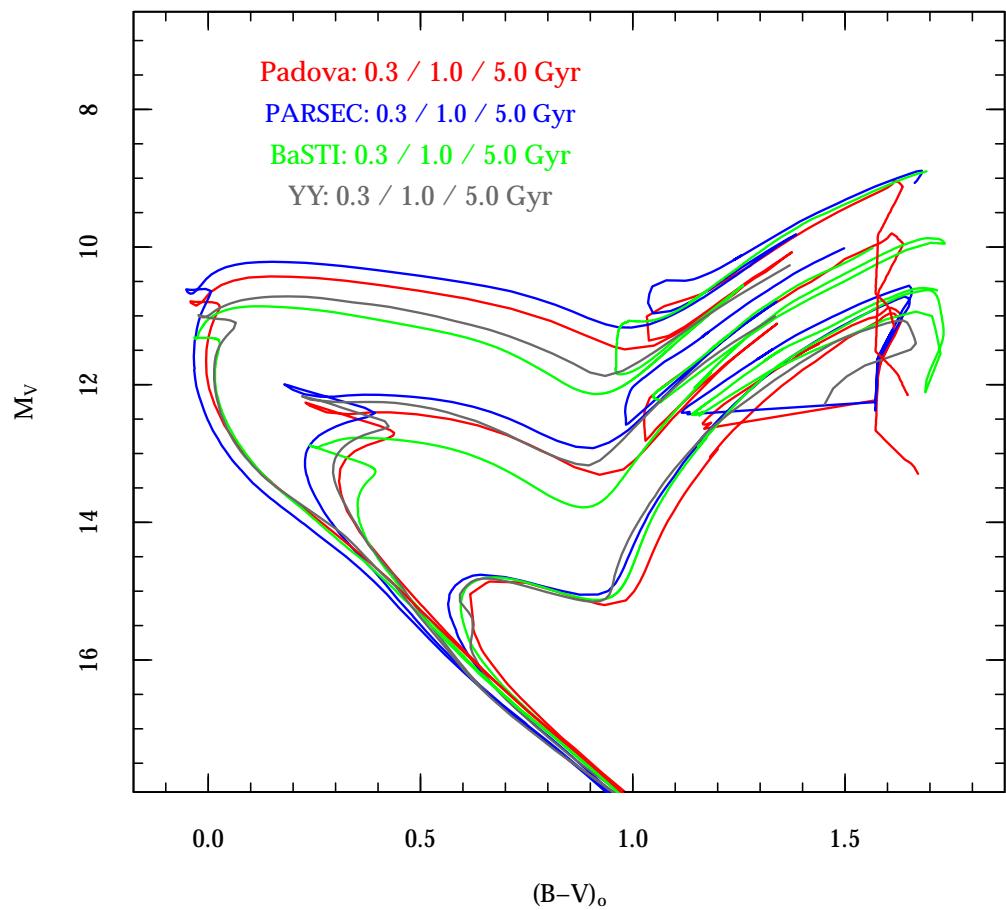


Figura 17: Isócronas de Padova, PARSEC, BaSTI e YY de metalicidade solar com diferentes valores em idades.

Na Tab. 4 são apresentadas algumas características físicas dos modelos teóricos que serão testados na presente dissertação. Os pontos fortes e fracos destas características afetam diretamente a confiabilidade das conclusões feitas a partir da análise do dado CMD em questão, diminuindo ou aumentando a credibilidade de cada modelo (Gallart *et al.* 2005). Como exemplo, podemos citar as complicações referentes à convecção (Kupka *et al.* 2004), em particular, as complicações relacionadas ao *overshooting* (Canuto 1999, 2000, 2011).

Se constituindo como um fenômeno que ocorre na borda superior das zonas de convecção, o *overshooting* acontece devido a aceleração de alguns elementos que excedem a borda, tendo como consequência o aumento da extensão da camada convectiva e a ida de material (elementos leves) de camadas mais altas em direção ao centro (*overshooting nuclear*), misturando a matéria de diferente composição química numa extremidade além da prevista. Nas estrelas com  $M > 1.5M_{\odot}$  onde encontramos um interior convectivo e transporte radiativo nas camadas externas, o *overshooting* complica a determinação da idade da estrela em questão, aumentando o seu tempo de vida.

Analizando a Tab. 4 podemos notar, além de claras similaridades, algumas diferenças entre os parâmetros dos modelos de isócronas. Com respeito a opacidade, vemos que todos os modelos usam a versão OPAL (Iglesias & Rogers 1996) para o vínculo relacionado às altas temperaturas, e a versão AF1994 (Alexander & Ferguson 1994) para o vínculo relacionado às baixas temperaturas. Apenas PARSEC utiliza uma versão diferente para a opacidade no domínio de baixas temperaturas (Marigo & Aringer 2009). Além disso, podemos ver também que todos os modelos utilizam versões diferentes para a equação de estado. Com relação ao tratamento do *overshooting nuclear* notamos que os modelos de Padova, BaSTI e YY possuem valores similares, estando PARSEC com o valor de  $\Lambda_c = 0.5$  para  $M > 1.5M_{\odot}$ .

Através da Tab. 4 pode-se perceber também discrepâncias significativas entre os valores do parâmetro de *mixing lenght* ( $\alpha_{MLT}$ ), nos valores de abundância de hélio solar e inclusive nos valores de metalicidade solar. Outra diferença perceptível está no valor da abundância primordial de hélio. Por fim, a tabela também mostra os valores de

metalicidade utilizados por nós. Nos caso das isócronas de Padova e PARSEC nos valemos da plataforma web para obtermos uma grade mais fina em Z do que para os demais modelos de evolução estelar. Infelizmente BaSTI e YY não disponibilizam uma ferramenta semelhante.

<b>Modelos</b>	<b>Padova</b>	<b>PARSEC</b>	<b>BaSTI</b>	<b>YY</b>
Opacidade				
Altas Temp.	OPAL(1996) <sup>a</sup>	OPAL(1996) <sup>a</sup>	OPAL(1996) <sup>a</sup>	OPAL(1996) <sup>a</sup>
Baixas Temp.	AF1994 <sup>b</sup>	AESOPUS(2009) <sup>c</sup>	AF1994 <sup>b</sup>	AF1994 <sup>b</sup>
Eq. de estado	T > 10 <sup>7</sup> : Kippenhahn <sup>d</sup> T < 10 <sup>7</sup> : MHD <sup>e</sup>	FreeEOS <sup>f</sup>	Irwin <i>et al.</i> (2004)	OPAL(1996) <sup>a</sup>
Core Overshoot	0.25H <sub>p</sub> para M ≤ 1.5M <sub>⊙</sub>	Λ <sub>c</sub> = 0 para M ≤ M <sub>⊙</sub> Λ <sub>c</sub> = 0.5 para M > 1.5M <sub>⊙</sub>	0.0 & 0.20H <sub>p</sub>	0.2H <sub>p</sub> para τ ≤ 2Gry
α <sub>MLT</sub> = l/H <sub>p</sub>	1.68	1.74	1.913	1.7432
Y <sub>⊙</sub> , Z <sub>⊙</sub>	0.273, 0.019	0.248, 0.015	0.2734, 0.0198	0.267, 0.0181
Abundancia de He	Y <sub>P</sub> = 0.23	Y <sub>P</sub> = 0.2485	Y <sub>Solar</sub> = 0.244	Y <sub>P</sub> = 0.23
Z mistura	SS	SS	SS	SS
Bandas Fot.	J - C, IR	J - C, IR	J - C, IR	J - C, IR
Valores em Z	0.002, 0.004, 0.006, 0.008, 0.012, 0.014, 0.016, 0.019, 0.020, 0.022, 0.024, 0.030	0.002, 0.004, 0.006, 0.008, 0.010, 0.012, 0.014, 0.015, 0.016, 0.018, 0.020, 0.022,	0.0001, 0.0003, 0.0006, 0.001, 0.002, 0.004, 0.008, 0.010, 0.0198, 0.030, 0.040	0.001, 0.004, 0.007, 0.010, 0.020, 0.040, 0.060, 0.080
		0.024, 0.026, 0.028, 0.030		

Tabela 4: Algumas características físicas dos modelos selecionados. <sup>a</sup>Iglesias & Rogers (1996), <sup>b</sup>Alexander & Ferguson (1994), <sup>c</sup>Marigo & Aringer (2009), <sup>d</sup>Kippenhahn, Thomas & Weigert (1965), <sup>e</sup>Mihalas *et al.*, (1990). As siglas significam: J - C = Johnson - Cousins, IR = Infravermelho, SS = Mistura na escala solar.

### 3.2 Geração dos CMDs Sintéticos

Para modelar estatisticamente um CMD que reproduza as características de um CMD observado, precisamos inicialmente adotar uma isócrona construída a partir de um modelo de evolução estelar, que define no plano do CMD as posições das estrelas com as suas respectivas massas, caracterizada por um valor de idade, metalicidade, magnitude absoluta  $M_V$  e índice de cor intrinseco  $(M_B - M_V)_o$ .

Aplicando-se o módulo de distância  $(V - M_V)_o$  e o avermelhamento  $E(B - V)$  passamos do plano teórico para o plano observacional e restringimos os valores de  $M_V$  e  $(M_B - M_V)$  para estarem dentro dos limites de detecção e saturação do aglomerado.

Esta passagem é feita respeitando-se as seguintes equações :

$$(V - M_V) = (V - M_V)_o + A_V \quad -> \quad V = M_V + (V - M_V)_o + A_V \quad (1)$$

$$(B - V) = M_B + A_B - (M_V + A_V) = M_B - M_V + E(B - V), \quad (2)$$

onde o avermelhamento é dado pela subtração entre os dois fatores de extinção ( $A_B$  e  $A_V$ ), e a sua relação com  $A_V$  é dada por:

$$A_V = 3.1E(B - V) \quad (3)$$

Estas expressões são válidas para as outras bandas fotométricas (Cardelli *et al.* 1989; O'Donnell 1994), exceto pelo fato da constante de proporcionalidade entre o fator de extinção e o avermelhamento variar de acordo com cada banda (Tab. 5).

Após a obtenção da isócrona e a respectiva aplicação dos valores de  $(V - M_V)_o$  e  $E(B - V)$ , o próximo passo é adotar a função de distribuição de massa do presente (*Present Day Mass Function* - PDMF). Para o presente trabalho, adotamos como inclinação da PDMF aquele obtido por Salpeter (1955)  $\xi(M) = \xi_o M^{-2.35}$  para a função de massa inicial (*Initial Mass Function* - IMF) de estrelas situadas na vizinhança solar.

Filtro	B	V	I	J	H	K
$\lambda_{eff}(\text{\AA})$	4460.62	5501.70	8036.57	12314.46	16369.53	21937.19
$A_\lambda/A_V$	1.29719	1.00600	0.60329	0.29100	0.18372	0.11471

Tabela 5: Comprimento de onda efetivo de cada banda e extinção em relação à banda V

Posteriormente, é incorporado o efeito de espalhamento sobre o CMD devido as incertezas fotométricas e as binárias não resolvidas.

A Fig. 18 retirada de Dias, B. *et al.* (2014) ilustra os processos de geração de CMDs sintéticos.

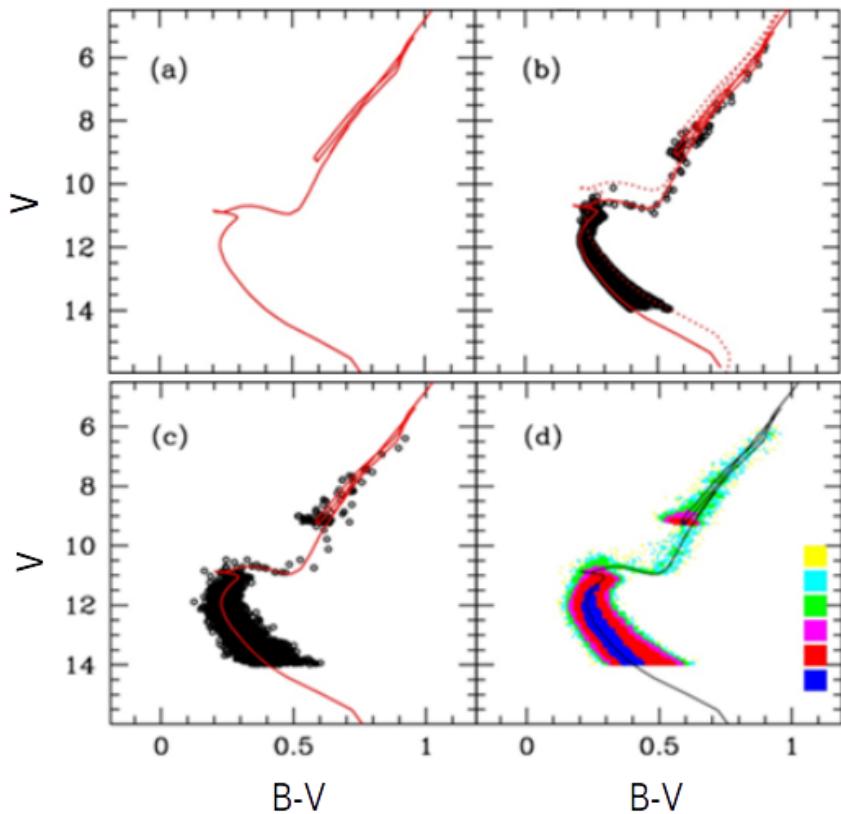


Figura 18: Exemplo ilustrativo da geração de um CMD sintético. O Painel (a) mostra a isócrona adotada no plano do CMD: idade, Z,  $(m - M)_o$  e E(B - V). No Painel (b) as estrelas estão distribuídas de acordo com a escolha da inclinação da função de massa ( $\alpha = -2.35$ ) e da fração de binárias (fbin). O CMD sintético após a introdução das incertezas fotométricas é exibido no painel (c). No painel (d) é apresentado o mesmo CMD anterior, mas com os pontos codificados de acordo com a densidade de pontos.

### 3.3 Análise Estatística

Após a geração de um CMD sintético, baseada em uma escolha de parâmetros físicos e seguindo os passos descritos anteriormente, o próximo procedimento é fazer a comparação estatística entre este CMD e aquele observado para o aglomerado em estudo. Para isso, foi adotada a estatística de verossimilhança (*likelihood* - L) que se baseia em comparações entre contagens de estrelas em caixas no plano do CMD (Kerber *et al.* 2002, 2005, 2007). A verossimilhança é uma estatística consolidada no contexto de estudo de aglomerados estelares, sendo capaz de discriminar os CMDs que melhor reproduzem as características de um CMD observado (Naylor & Jeffries 2006). Estes CMDs são justamente aqueles que maximizam o valor da verossimilhança.

O valor da estatística é calculado considerando-se que a probabilidade da i-esima estrela observada ser descrita corretamente pelo modelo é proporcional ao número de estrelas modeladas na i-esima caixa no CMD localizada justamente na posição desta estrela. Assim, a probabilidade de um modelo descrever corretamente a observação é proporcional ao produtório destas probabilidades.

Em escala logarítmica, a definição de verossimilhança se torna um somatório, tal como descrito na seguinte expressão:

$$\log(L) \propto \sum_{i=1}^{N_{obs}} \log(\text{prob}_{\text{member},i}) \times N_i \quad (4)$$

Onde  $\text{prob}_{\text{member},i}$  e  $N_i$  são os valores de probabilidade de pertinência da i-esima estrela e o número de estrelas modeladas em sua posição no CMD, respectivamente.

Calculando-se o valor de L para uma grade regular de modelos pode-se encontrar aqueles que maximizam a estatística. O valor final dos parâmetros globais, bem como suas incertezas, serão dados pela média e pelo desvio padrão nos valores dos parâmetros utilizados para a geração deste conjunto de melhores modelos.

### 3.4 Grade de Parâmetros

O algoritmo que gera os CMDs modelados nos permite percorrer um amplo domínio de valores em relação aos parâmetros de entrada. No presente trabalho, os valores centrais destes domínios foram aqueles encontrados no catálogo de aglomerados abertos DAML02 (Dias, W. *et al.* 2014). A partir destes valores centrais, exploramos tipicamente uma grade de modelos com 15 valores em  $E(B-V)$ , 17 valores em  $(m-M)$  e 17 valores em  $\log(\tau/\text{yr})$ . Quanto à metalicidade, em cada grade de modelos exploramos em media 5 valores, buscando centraliza-los no valor proveniente da espectroscopia. Com isso, um total de cerca de 22.000 CMDs sintéticos foram gerados para cada CMD de cada um dos aglomerados analisados. O tempo de CPU (com um processador *core i7*, HD de 1TB e 8GB de memória) da geração de cada uma destas grades é em torno de seis horas. Como já foi dito, enquanto que para os aglomerados NGC 188, NGC 2506, NGC 2682 e NGC 6939 foram analisados três CMDs com diferentes escolhas de bandas fotométricas [(V vs. (B - V); V vs. (V - I); J vs. (J - H)], para os objetos NGC 2099 e NGC 2477 apenas foram apresentados os diagramas [V vs. (B - V)] e [J vs. (J - H)]. Em adição, em todas as análises foram utilizados quatro distintos modelos de evolução estelar (Padova, PARSEC, BaSTI e YY), totalizando portanto em 64 ajustes de isócronas.

## NGC 188

O aglomerado aberto NGC 188 se constitui como um dos dois mais velhos da nossa amostra. O valor de idade encontrado no DAML02 e no WEBDA para este aglomerado foi de 4.28 Gyr. Como dito anteriormente, nestes catálogos não há informação sobre as incertezas nos parâmetros físicos, exceto pela metalicidade proveniente da espectroscopia. A partir do ajuste de isócronas de Padova em um CMD com dados do 2MASS, Bonatto *et al.* (2005) encontraram um valor de idade de  $7.0 \pm 1.0$  Gyr para este aglomerado, o que ilustra as discrepâncias neste parâmetro encontradas na literatura. Desta forma, decidimos adotar um amplo intervalo de idades, de  $2.5 \leq \tau \leq 10.0$  Gyr, abrangendo seguramente as determinações típicas encontrada na literatura.

Em relação aos valores de avermelhamento, as determinações vão de  $E(B - V) = 0.0$  (Bonatto *et al.* 2005) a  $E(B - V) = 0.082$  (DAML02 e WEBDA). Deste modo adotamos o intervalo  $0.0 \leq E(B - V) \leq 0.100$  para explorar os possíveis valores para este parâmetro. Quanto ao intervalo dos valores do módulo de distância, adotamos  $11.00 \leq (m - M)_o \leq 11.75$ , abrangindo assim os valores 11.56 e  $11.1 \pm 0.1$  encontrados no WEBDA/DAML02 e em Bonatto *et al.* (2005), respectivamente. Quanto ao valor da metalicidade, os limites explorados para o índice de ferro foram aproximadamente  $-0.15 \leq [Fe/H] \leq 0.15$ , cobrindo assim o valor proveniente da espectroscopia encontrado em Jacobson *et al.* (2011) (- 0.03  $\pm$  0.04).

## NGC 2099

Nilakshi *et al.* (2002), realizando observações CCD nas bandas BVI, derivaram os parâmetros de idade, metalicidade, módulo de distância e avermelhamento para este aglomerado, obtendo os seguintes valores:  $\tau = 0.400$  Gyr;  $Z = 0.008$ ; distância =  $1360 \pm 100$  pc; e  $E(B - V) = 0.30 \pm 0.04$ , respectivamente. Estes resultados estão de acordo com aqueles encontrados no WEBDA (Tab. 2), nos fornecendo assim valores centrais confiáveis para a nossa pesquisa. Os valores limites utilizados foram:  $0.112 \leq \tau \leq 0.891$

Gyr,  $10.20 \leq (m - M)_o \leq 11.20$ ,  $0.18 \leq E(B - V) \leq 0.34$  e  $-0.15 \leq [Fe/H] \leq 0.15$ , o que compreende os valores de metalicidade obtidos por Twarog *et al.* (1997) e Heiter *et al.* (2014),  $[Fe/H] = +0.089 \pm 0.146$  e  $[Fe/H] = +0.02 \pm 0.05$ , respectivamente.

### **NGC 2477**

Os parâmetros físicos encontrados para este aglomerado no WEBDA ( $\tau = 0.70$  Gyr,  $d = 1222$  pc,  $E(B - V) = 0.279$  e  $[Fe/H] = +0.01$ ), possuem uma certa concordância com aqueles valores encontrados em Paunzen & Netopil (2006), a saber:  $\tau = 0.875 \pm 0.238$  Gyr,  $E(B - V) = 0.26 \pm 0.08$ ,  $d = 1227 \pm 166$  pc, porém discorda com o valor de  $[Fe/H] = +0.07 \pm 0.03$  encontrado em Heiter *et al.* (2014). Deste modo, adotamos os intervalos  $0.355 \leq \tau \leq 1.122$  Gyr,  $10.20 \leq (m - M)_o \leq 11.80$  e  $0.08 \leq E(B - V) \leq 0.38$  para os nossos modelos. Quanto a metalicidade variamos entre  $-0.07 \leq [Fe/H] \leq +0.15$ , o que também abrange o valor encontrado via análise espectroscópica  $[Fe/H] = 0.07 \pm 0.03$  (Sestito *et al.* 2006).

### **NGC 2506**

Baseado na análise de CMDs construídos por meio de varias combinações de filtros UBGVRI, Marconi *et al.* (1997) derivou valores de parâmetros físicos do aglomerado NGC 2506, a saber:  $1.5 \leq \tau \leq 2.2$  Gyr,  $(m - M)_o = 12.6 \pm 0.1$  e  $0.00 \leq E(B - V) \leq 0.07$ . Estes valores são consistentes em relação aqueles encontrado em Paunzen & Netopil (2006) ( $1.16 \leq \tau \leq 2.13$ ,  $12.45 \leq (m - M)_o \leq 12.74$  e  $0.02 \leq E(B - V) \leq 0.10$ ). Assim, com o objetivo de abranger seguramente as determinações típicas encontradas na literatura, resolvemos explorar as seguintes grades de valores:  $1.00 \leq \tau \leq 5.00$  Gyr,  $11.90 \leq (m - M)_o \leq 12.90$  e  $0.00 \leq E(B - V) \leq 0.12$ . Quanto ao valor da metalicidade, os limites explorados para o índice de ferro foram aproximadamente  $-0.70 \leq [Fe/H] \leq 0.06$ , cobrindo assim os valores proveniente da espectroscopia encontrado em Heiter *et al.* 2014 ( $-0.23 \pm 0.05$ ).

## **NGC 2682**

Baseado no ajuste de isócronas de Padova em um CMD (J vs. J - H) construídos com dados 2MASS, Bonatto & Bica (2003) derivaram uma idade de  $3.2 \pm 0.4$  Gyr, uma distância de  $0.87 \pm 0.04$  kpc, um avermelhamento igual à 0.0 e uma metalicidade tipicamente solar ( $[Fe/H] = 0.0$ ) para este aglomerado. Estas determinações estão de acordo com os valores catalogados em DAML02, mas diferem significativamente dos valores no WEBDA em termos de idade ( $\tau = 2.56$  Gyr) e avermelhamento ( $E(B-V) = 0.059$ ). Deste modo, os domínios explorados para os parâmetros deste aglomerado foram:  $2.25 \leq \tau \leq 8.90$  Gyr,  $9.30 \leq (m - M)_o \leq 9.90$ ,  $0.0 \leq E(B-V) \leq 0.080$  e aproximadamente  $-0.15 \leq [Fe/H] \leq 0.15$ , o que abrange o valor de  $+0.03 \pm 0.02$  oriundo da espectroscopia (Jacobson *et al.* 2011).

## **NGC 6939**

Andreuzzi *et al.* (2004) usando uma técnica de CMDs sintéticos com o uso das bandas fotométricas UBVRI, obtiveram os seguintes valores para este aglomerado:  $1.0 \leq \tau \leq 1.3$  Gyr,  $11.3 \leq (m - M)_o \leq 11.4$  e  $0.34 \leq E(B-V) \leq 0.38$ . Estes resultados são coerentes em alguns parâmetros com aqueles encontrados em Paunzen & Netopil (2006) ( $1.19 \leq \tau \leq 2.09$  Gyr,  $10.10 \leq (m - M)_o \leq 11.01$  e  $0.37 \leq E(B-V) \leq 0.53$ ) e também no catálogo DAML02 ( $\tau = 1.585$  Gyr,  $(m - M)_o = 11.276$  e  $E(B-V) = 0.330$ ). Assim, os valores dos parâmetros físicos explorados por nós foram:  $0.700 \leq \tau \leq 3.550$ ,  $10.70 \leq (m - M)_o \leq 11.60$ , e  $0.300 \leq E(B-V) \leq 0.460$ . Quanto à metalicidade, Jacobson *et al.* (2007) obteve por meio de análise espectroscópica o valor de  $[Fe/H] = +0.00 \pm 0.10$ , o que discorda com o valor de  $[Fe/H] = +0.13$  encontrado em Heiter *et al.* (2014). Deste modo, resolvemos explorar uma grade de modelos cujo valor de metalicidade variava entre aproximadamente  $[Fe/H] = -0.40$  e  $[Fe/H] = +0.30$ .

## 4 Resultados

O presente capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos acerca dos parâmetros físicos dos seis aglomerados abertos em estudo. Através do método numérico estatístico de ajuste de isócrona apresentado anteriormente determinamos os valores de idade, distância, avermelhamento e metalicidade para estes sistemas por meio da escolha de diferentes bandas fotométricas e diferentes modelos de evolução estelar. Para os aglomerados NGC 188, NGC 2506, NGC 2682 e NGC 6939 foram elaborados e analisados dois diagramas cor-magnitude no domínio do óptico [V vs. (B - V)] e [V vs. (V - I)] e um no domínio do infravermelho próximo [J vs. (J - H)]. Enquanto isso, para os objetos NGC 2099 e NGC 2477 apenas analisamos dois CMDs com as bandas BV e JH. Os CMDs observados foram analisados com quatro modelos de evolução estelar distintos, que são os modelos de Padova, PARSEC, BaSTI e YY. Desta forma apresentamos e analisamos resultados de 64 ajustes de isócrona, sendo 12 para aqueles aglomerados que possuem dados nas bandas BVIJHK<sub>s</sub> e 8 para os aglomerados que possuem dados apenas nas bandas BV e JHK<sub>s</sub>.

Com o objetivo de verificar a consistência dos valores encontrados, iremos confrontar os nossos resultados no óptico com os respectivos valores encontrados no infravermelho próximo, e por fim confrontaremos estes valores com aqueles encontrados na literatura, em especial com os valores fornecidos pelos catálogos *WEBDA* e *DAML02* e pelas compilações oferecidas por Paunzen & Netopil (2006) e Heiter *et al.* (2014). Abaixo apresentamos os resultados aglomerado por aglomerado.

## 4.1 Resultados para NGC 188

Os CMDs observados, juntamente com os melhores ajustes de isócronas encontradas para este objeto, são apresentadas na Fig.19. Os valores finais dos parâmetros físicos são mostrados na Tab. 6. Estes mesmos valores também são representados na Fig.21, onde eles são confrontados com os valores dos catálogos *WEBDA* e *DAML02*. Na Fig. 20 é apresentado o CMD final deste aglomerado aberto [V vs. (B - V)] juntamente com o CMD sintético gerado por meio do modelo de Padova (isócrona de cor vermelha).

A Fig.19 revela que as isócronas dos diferentes modelos de evolução estelar, independentemente da escolha das bandas fotométricas, se ajustam bem a todas as sequências evolutivas dos CMDs, praticamente sobrepondo-se entre si. Entretanto, como pode ser visto pelos valores apresentados na Tab. 6 e na Fig. 21, há uma tendência em função da escolha das bandas fotométricas analisadas: a análise de CMDs no infravermelho próximo aponta para avermelhamentos, idades e metalicidades com valores mais baixos do que aqueles encontrados nos ajustes de isócrona em CMDs construídos com as bandas BVI. Em relação ao módulo de distância, esta tendência se inverte, ou seja, os resultados no NIR apontam para distâncias maiores do que as encontradas via análise de CMDs construídos na região do óptico.

Na comparação com os resultados da literatura, pode-se perceber claramente que os valores em módulo de distância e avermelhamento são inconsistentes com os valores dos catálogos *WEBDA* e *DAML02*, sendo significativamente menores que estes. No que diz respeito à idade e à metalicidade, nossos resultados apresentam valores sistematicamente maiores do que os encontrados nos catálogos, porém as determinações no NIR, independente da escolha de modelo de evolução estelar, estão marginalmente de acordo com estes valores. Neste caso as maiores discrepâncias encontradas em relação aos valores da literatura ocorreram para as determinações analisando-se CMDs no óptico, para modelos de evolução estelar de PARSEC e BaSTI.

Como ilustração do modelamento de CMDs, apresentamos na Fig. 20 o CMD final deste aglomerado [V vs. (B - V)] juntamente com o CMD sintético gerado por meio do mo-

delo de Padova (isócrona de cor vermelha). Comparando visualmente o CMD observado com o seu respectivo CMD modelado, podemos notar o alto grau de confiabilidade do método utilizado. Não obstante, podemos ver no CMD observado a presença de estrelas binárias (à direita da MS e no alto da MS) e de *Blue - Stragglers*. Enquanto as primeiras são muito bem reproduzidas pelo CMD sintético, as segundas não aparecem pois não são previstas em nosso modelamento.

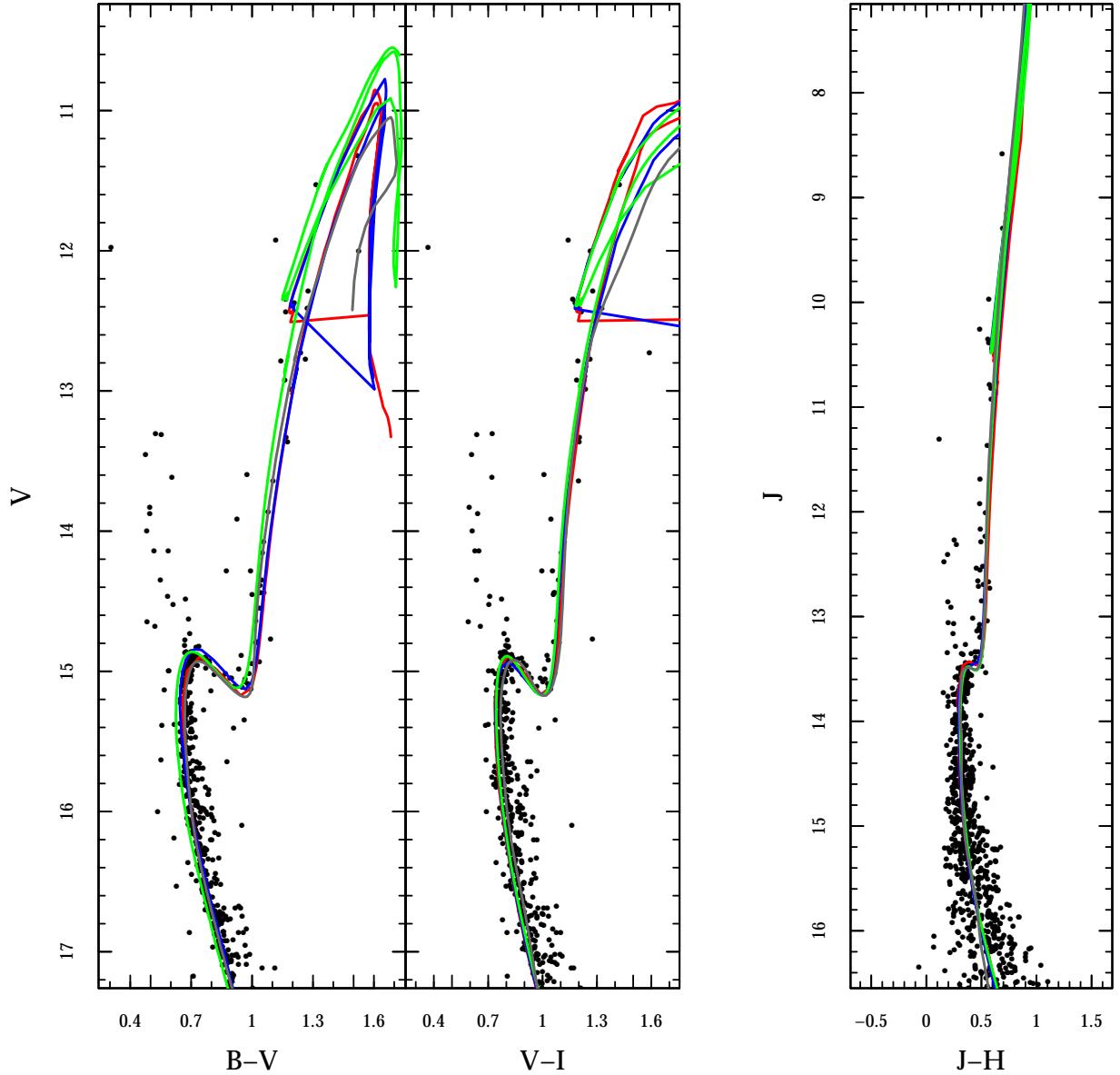


Figura 19: Diagramas cor-magnitude ((V vs. B-V), (V vs. V-I) e (J vs. J-H)) para NGC 188 mostrando os melhores ajustes obtidos com os diferentes modelos de evolução estelar. As isócronas de cor vermelha representam o grupo de Padova, as isócronas de cor azul representam o grupo de PARSEC, de cor verde o grupo de BaSTI e as isócronas de cor cinza representam o grupo de YY.

Padova			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.79 ± 0.05	9.80 ± 0.04	9.67 ± 0.04
[Fe/H]	0.03 ± 0.05	0.04 ± 0.15	0.02 ± 0.04
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	11.31 ± 0.08	11.25 ± 0.05	11.42 ± 0.07
$E(B - V)$	0.03 ± 0.02	0.05 ± 0.01	0.00 ± 0.01
PARSEC			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.77 ± 0.04	9.79 ± 0.04	9.70 ± 0.04
[Fe/H]	0.17 ± 0.05	0.16 ± 0.06	0.08 ± 0.06
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	11.34 ± 0.07	11.26 ± 0.05	11.37 ± 0.02
$E(B - V)$	0.04 ± 0.02	0.06 ± 0.01	0.03 ± 0.01
BaSTI			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.77 ± 0.04	9.79 ± 0.03	9.70 ± 0.09
[Fe/H]	0.14 ± 0.10	0.20 ± 0.11	- 0.01 ± 0.27
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	11.36 ± 0.08	11.26 ± 0.06	11.39 ± 0.11
$E(B - V)$	0.04 ± 0.03	0.05 ± 0.01	0.01 ± 0.02
YY			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.79 ± 0.04	9.70 ± 0.05	9.72 ± 0.04
[Fe/H]	0.04 ± 0.09	0.02 ± 0.08	- 0.02 ± 0.12
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	11.24 ± 0.08	11.24 ± 0.08	11.48 ± 0.08
$E(B - V)$	0.08 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.01 ± 0.01

Tabela 6: Valores finais dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 188, juntamente com suas respectivas incertezas estatísticas  $\sigma_{est.}$ , obtidos a partir da análise de diferentes diagramas cor - magnitude ((V vs. B - V), (V vs. V - I) e (J vs. J - H)) empregando-se diferentes modelos de evolução e interior estelar (Padova, PARSEC, BaSTI e YY).

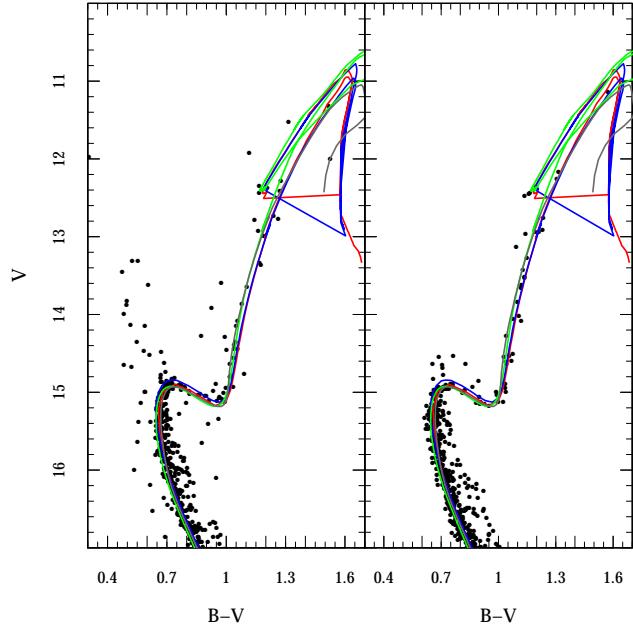


Figura 20: CMD observado (*À esquerda*) e o CMD sintético (*À direita*) do OC NGC 188. O CMD sintético foi gerado por meio do modelo de Padova (isócrona em vermelho) com os resultados da Tab.12. Em adição, os melhores ajustes para este CMD observado com os modelos de PARSEC (isócrona azul), BaSTI (isócrona verde) e YY (isócrona cinza) também são representados na figura.

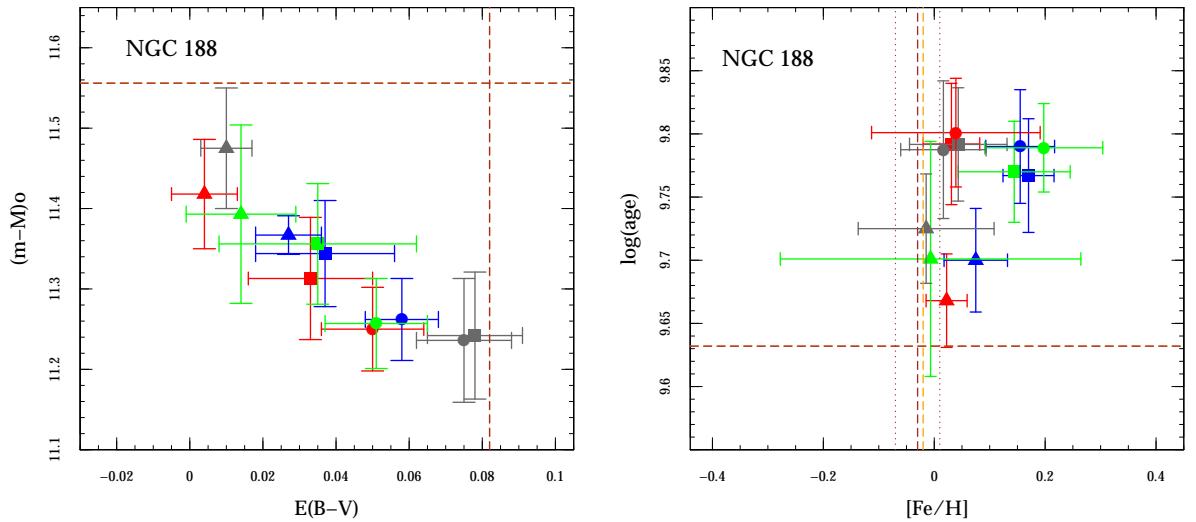


Figura 21: (*À esquerda*) Diagrama confrontando os valores do módulo de distância intrínseco com os valores em avermelhamento  $E(B - V)$  obtidos para NGC 188. (*À direita*) Diagrama representando o confronto de valores entre o logaritmo da idade (em anos) e o índice de Ferro para este mesmo aglomerado. As cores vermelha, azul, verde e cinza representam os modelos de evolução estelar de Padova, PARSEC, BaSTI e YY respectivamente. Já o padrão de símbolos se referem as bandas utilizadas para a obtenção dos respectivos resultados: os quadrados se referem aos resultados obtidos com o CMD [V vs. (B - V)], os círculos aos resultados obtidos com o CMD [V vs. (V - I)] e os triângulos à análise do CMD [J vs. (J - H)]. As linhas tracejadas representam os valores dos parâmetros encontrados nos catálogos WEBDA (laranja) e DAML02 (marrom), e as linhas pontinhas simbolizam as incertezas nos parâmetros referentes ao catálogo DAML02.

## 4.2 Resultados para NGC 2099 (M 37)

Na Fig. 22 são exibidos os dois CMDs observados do aglomerado NGC 2099, juntamente com os melhores ajustes de isócronas determinados para este sistema estelar. Tais ajustes demostram a natureza jovem deste aglomerado, com as isócronas praticamente se sobrepondo ao loci de pontos da sequência principal dos CMDs. Na Fig. 23 é apresentado o CMD [V vs. (B - V)] deste objeto juntamente com o CMD modelado por meio do modelo de Padova.

Os valores finais dos parâmetros físicos são apresentados na Tab. 7 e na Fig. 24, onde são confrontados com valores de catálogos. Analisando esta figura podemos notar uma clara dependência dos nossos resultados de  $E(B - V)$  com a escolha da banda fotométrica: Nossas determinações obtidas com dados 2MASS nos fornecem valores menores na comparação com aqueles resultados obtidos via dados BV. Em relação ao módulo de distância podemos perceber que há uma boa concordância entre os nossos resultados. Na comparação com a literatura vemos que: Enquanto que as nossas determinações em  $(m - M)_o$  são consistentes com os valores encontrados nos catálogos, nossas determinações de  $E(B - V)$  são sistematicamente menores que estes.

Na análise dos valores de idade, nossos resultados apontam para uma forte tendência nas determinações em função do modelo de evolução estelar utilizado: os valores encontrados por meio do modelo de BaSTI, próximos daquelas encontrados nos catálogos, são mais baixos do que aqueles encontrados com emprego de isócronas de Padova, PARSEC e principalmente YY. Quanto à metalicidade, nota-se que as nossas determinações estão em ótima concordância com os valores provenientes da espectroscopia catalogados no *WEBDA* e *DAML02*. Há entretanto uma exceção, que recupera um valor mais baixo em metalicidade, que é a determinação obtido via dados 2MASS e modelo de YY.

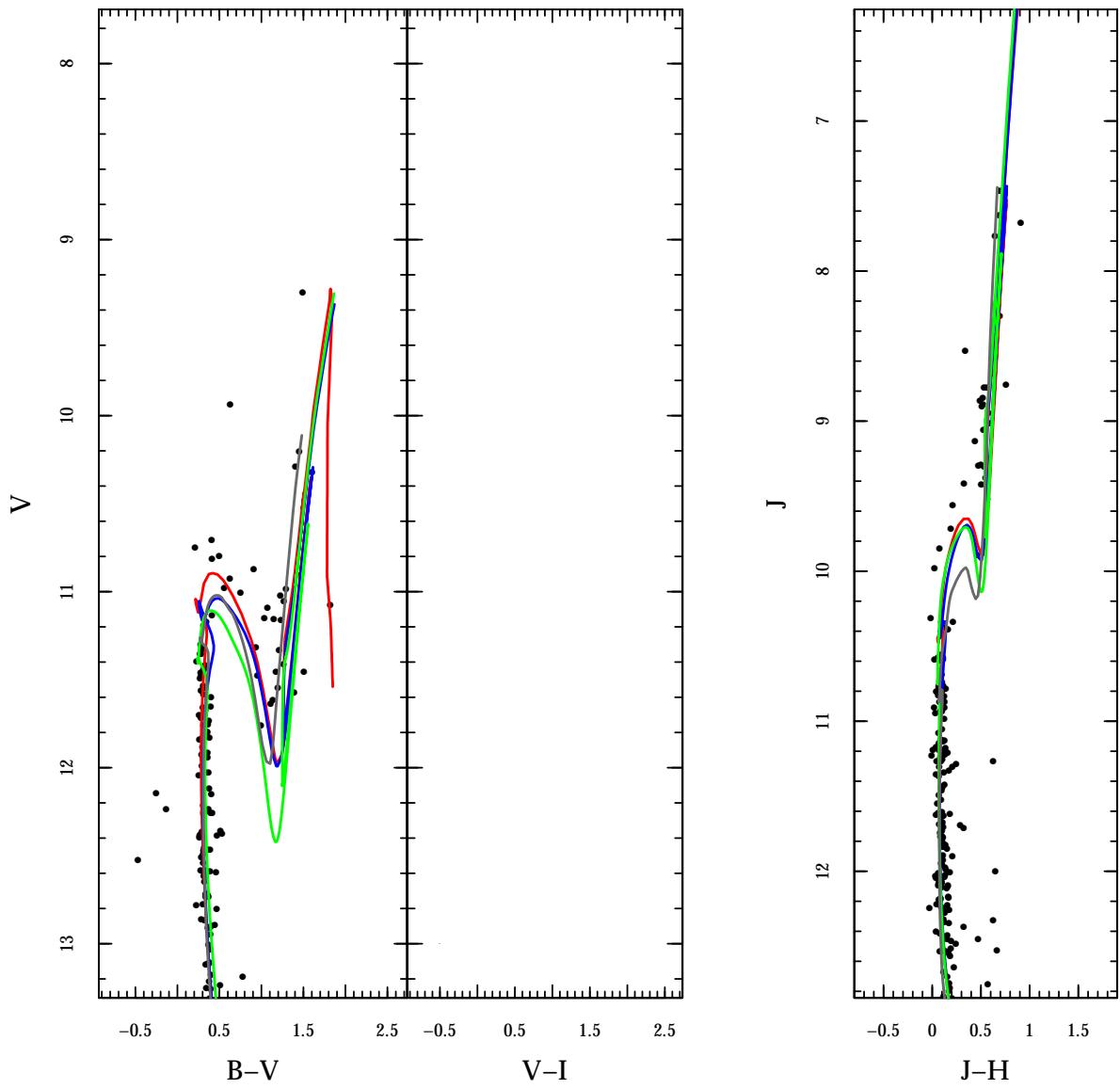


Figura 22: Diagrama cor-magnitude [V vs. (B - V)] e [J vs. (J - H)] para NGC 2099 mostrando os melhores ajustes obtidos com os diferentes modelos de evolução estelar. Idem à legenda da figura 19.

Padova			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	8.67 ± 0.07		8.71 ± 0.07
[Fe/H]	0.07 ± 0.07		0.00 ± 0.10
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	10.71 ± 0.20		10.59 ± 0.16
$E(B - V)$	0.24 ± 0.04		0.16 ± 0.05
PARSEC			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	8.74 ± 0.06		8.80 ± 0.06
[Fe/H]	0.11 ± 0.08		0.06 ± 0.08
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	10.68 ± 0.16		10.57 ± 0.15
$E(B - V)$	0.25 ± 0.03		0.16 ± 0.05
BaSTI			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	8.61 ± 0.06		8.57 ± 0.10
[Fe/H]	0.07 ± 0.17		0.08 ± 0.22
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	10.63 ± 0.17		10.61 ± 0.20
$E(B - V)$	0.24 ± 0.03		0.18 ± 0.06
YY			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	8.76 ± 0.11		8.92 ± 0.08
[Fe/H]	0.06 ± 0.37		- 0.23 ± 0.23
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	10.58 ± 0.21		10.39 ± 0.09
$E(B - V)$	0.25 ± 0.04		0.14 ± 0.04

Tabela 7: Valores finais dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2099, juntamente com suas respectivas incertezas estatísticas  $\sigma_{est.}$ , obtidos a partir da análise dos diagramas cor-magnitude [V vs. (B-V)] e [J vs. (J-H)] empregando-se diferentes modelos de evolução e interior estelar (Padova, PARSEC, BaSTI e YY).

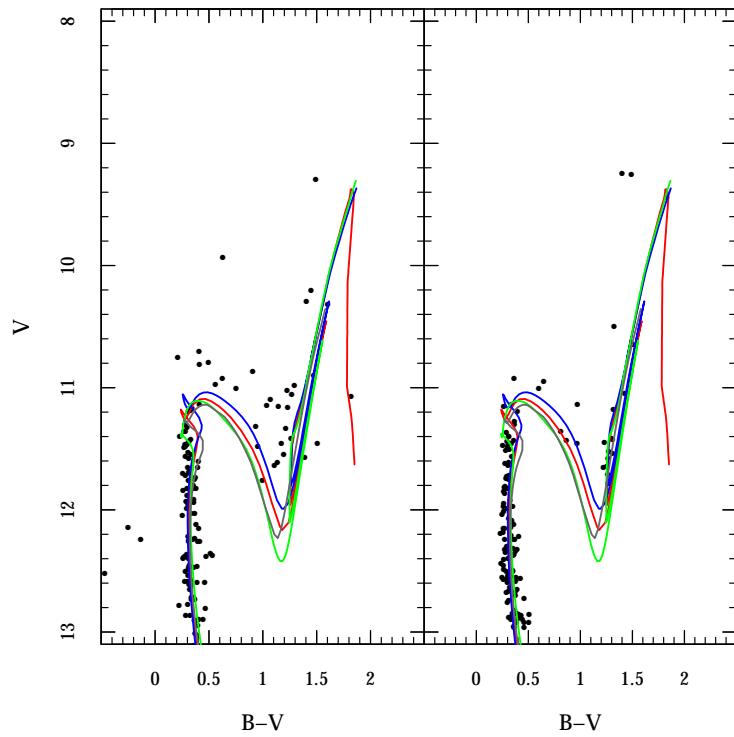


Figura 23: CMD observado (à esquerda) e o CMD sintético (à direita) do OC NGC 2099. Idem à legenda da figura 20

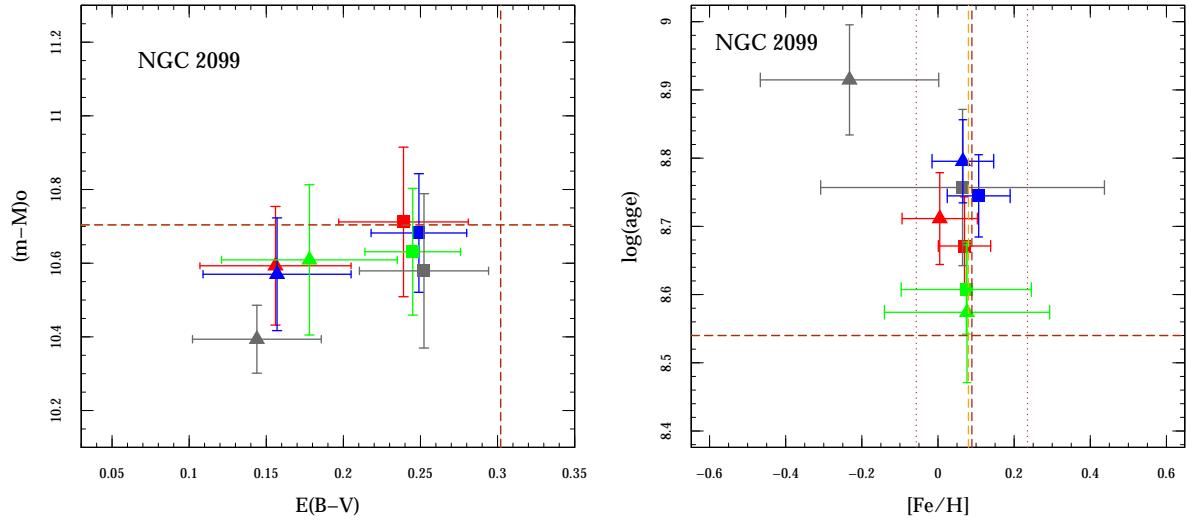


Figura 24: Diagramas confrontando valores de parâmetros físicos do aglomerado NGC 2099. Idem à legenda da figura 21

### 4.3 Resultados para NGC 2477

Na Fig. 25 apresentamos os CMDs [V vs. (B - V)] e [J vs. (J - H)] deste objeto (já que não analisamos dados na banda I), juntamente com as isócronas dos diferentes modelos de evolução estelar que melhor se ajustaram as sequências evolutivas do aglomerado. Na Tab. 8 são mostrados os valores finais de idade, distância, avermelhamento e metalicidade encontrados. Estas determinações também são representadas na Fig. 27, onde é feita uma comparação com os valores encontrados nos catálogos *WEBDA* e *DAML02*. Na Fig. 26 é apresentado o CMD [V vs. (B - V)] final deste aglomerado aberto juntamente com o CMD sintético gerado por meio do modelo de Padova (isócrona de cor vermelha).

Através da análise da Fig. 27 podemos notar uma forte dependência dos nossos resultados para  $E(B - V)$  e  $(m - M)_o$  com a escolha das bandas fotométricas, algo semelhante ao que aconteceu com os resultados de NGC 2099. Enquanto as determinações obtidas via dados BV apresentam valores mais baixos para distância e mais altos para avermelhamento, inclusive em ótima concordância com os catálogos *WEBDA* e *DAML02*, as nossas determinações encontradas com dados 2MASS apontam no sentido oposto, com exceção da determinação obtida com o modelo de YY. Convém ressaltar que as diferenças existentes entre estas determinações para as diferentes bandas fotométricas são significativas, ou seja, são maiores que as incertezas estatísticas ( $\sigma_{est.}$ ) das determinações individuais.

Na análise dos valores para idade, pode-se perceber que os resultados obtidos com os modelos de BaSTI nos fornecem valores menores do que aqueles encontrados a partir da análise com modelos de Padova, PARSEC e YY e também na comparação com os valores de catálogos. Quanto à metalicidade, nossas determinações por meio dos modelos de PARSEC e Padova possuem uma boa concordância com os valores obtidos a partir da análise de espectro de gigantes vermelhas. Os resultados provenientes de BaSTI e YY tendem a trazer um espalhamento nestes resultados, talvez como consequência de uma grade em metalicidade com valores mais espaçados.

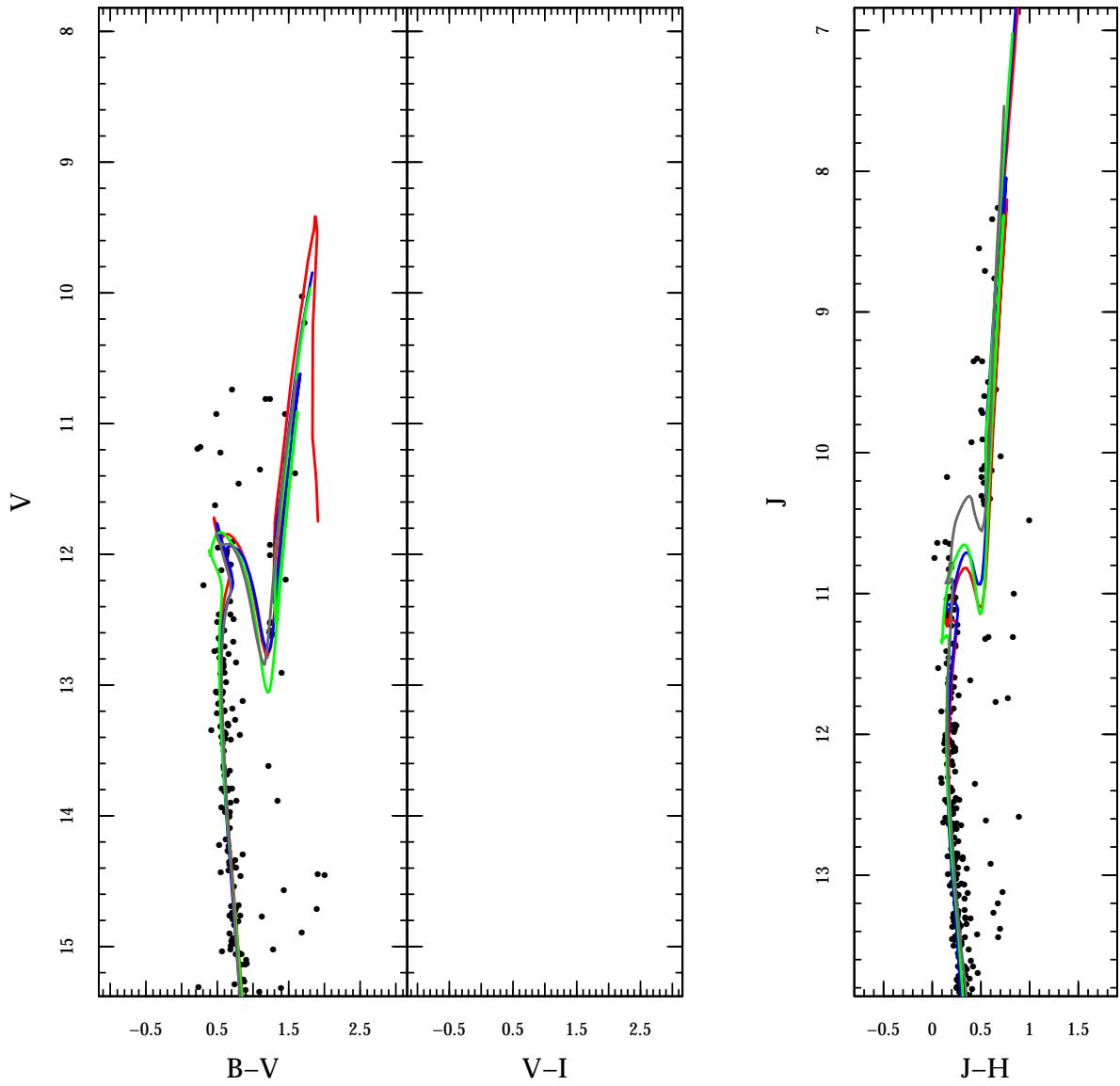


Figura 25: Diagrama cor-magnitude [V vs. (B-V)] e [J vs. (J-H)] para NGC 2477 mostrando os melhores ajustes obtidos com os diferentes modelos de evolução estelar. Idem à legenda da figura 19.

Padova			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	8.96 ± 0.05		9.03 ± 0.08
[Fe/H]	0.03 ± 0.08		0.02 ± 0.06
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	10.32 ± 0.13		10.73 ± 0.11
$E(B - V)$	0.29 ± 0.03		0.15 ± 0.05
PARSEC			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.02 ± 0.04		9.07 ± 0.04
[Fe/H]	0.13 ± 0.09		0.04 ± 0.06
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	10.41 ± 0.13		10.70 ± 0.09
$E(B - V)$	0.30 ± 0.03		0.17 ± 0.05
BaSTI			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	8.81 ± 0.04		8.80 ± 0.06
[Fe/H]	0.17 ± 0.04		0.25 ± 0.08
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	10.54 ± 0.13		10.82 ± 0.10
$E(B - V)$	0.30 ± 0.02		0.17 ± 0.06
YY			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.00 ± 0.07		9.03 ± 0.08
[Fe/H]	0.06 ± 0.17		- 0.23 ± 0.03
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	10.35 ± 0.15		10.25 ± 0.14
$E(B - V)$	0.30 ± 0.04		0.28 ± 0.04

Tabela 8: Valores finais dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2477. Idem à legenda da Tab. 7.

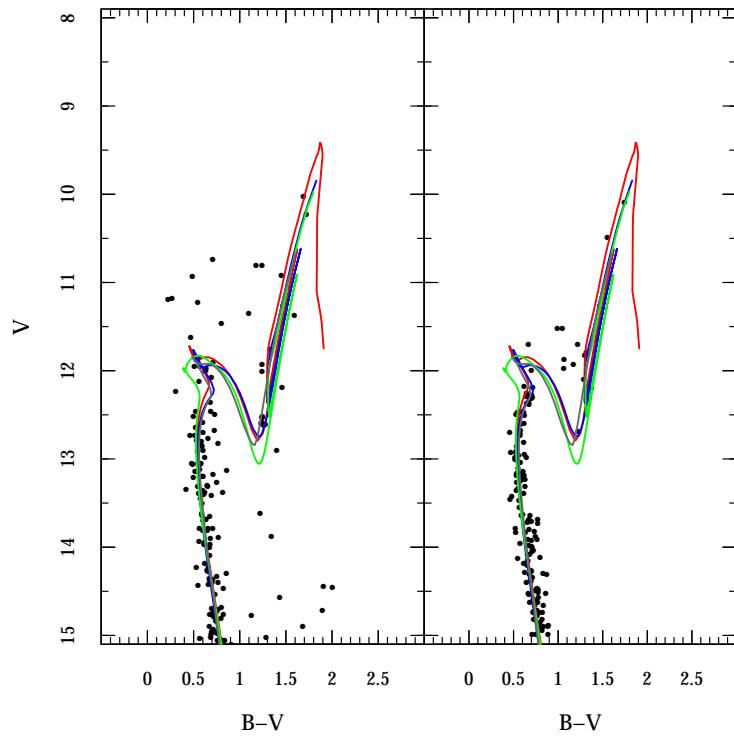


Figura 26: CMD observado (à esquerda) e o CMD sintético (à direita) do OC NGC 2477. Idem à legenda da figura 20

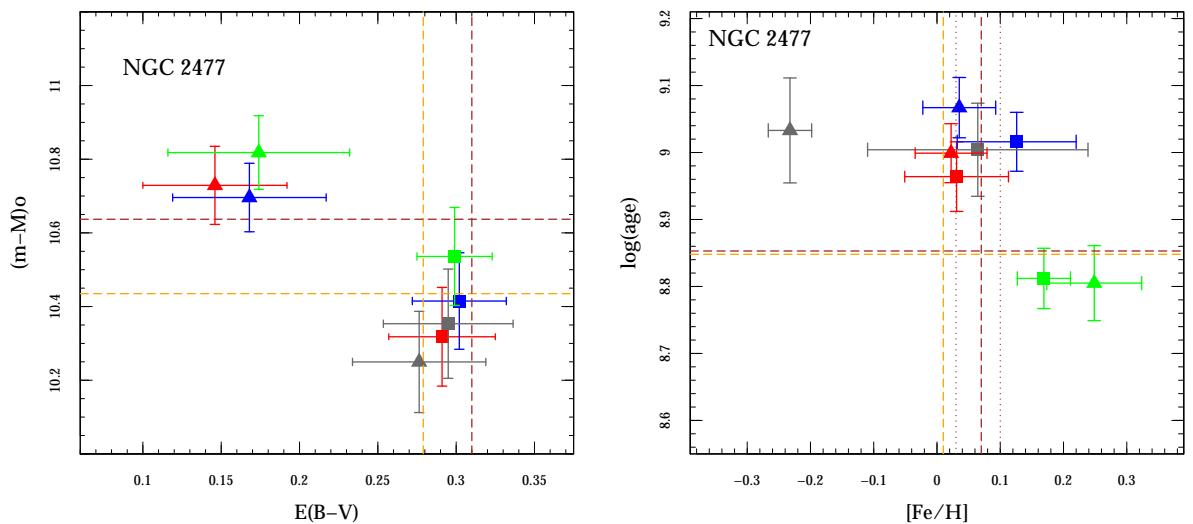


Figura 27: Diagramas confrontando valores de parâmetros físicos do aglomerado NGC 2477. Idem à legenda da figura 21

## 4.4 Resultados para NGC 2506

Apresentamos na Fig. 28 os três CMDs finais observados do aglomerado NGC 2506 assim como os ajustes de isócrona para os diferentes modelos de evolução estelar. Para ilustrar a qualidade do modelamento de CMDs, mostramos na Fig. 29 o CMD [V vs. (B-V)] deste aglomerados juntamente com um CMD sintético gerado por meio do modelo de Padova. Na Tab. 9 são apresentados os valores finais de  $\log(\text{age})$ ,  $(m - M)_o$ ,  $E(B - V)$  e  $[\text{Fe}/\text{H}]$  encontrados por nós. Estas determinações também são representadas na Fig. 30, onde é feita uma comparação com os valores encontrados em catálogos de aglomerados abertos.

Analisando os valores apresentados na Tab. 9, representados também na Fig. 30, podemos notar a consistência nas nossas determinações de idade, módulo de distância e avermelhamento. Na comparação com os resultados da literatura, pode-se perceber claramente que os nossos valores em módulo de distância e avermelhamento são inconsistentes com os valores dos catálogos WEBDA e DAML02, sendo significativamente menor em termos de  $(m - M)_o$  e marginalmente menor em termos de  $E(B - V)$ . Quanto à idade podemos notar que os nossos resultados são maiores na comparação com as determinações provenientes de catálogos, diferença esta que chega a ser de 0.3 em log da idade.

Em relação à metalicidade percebemos que existem aparentemente dois grupos de soluções: as com metalicidade mais baixa (utilizando-se as bandas BV e JH) e as com metalicidade mais alta (valendo-se das bandas VI). Curiosamente, para este aglomerado há uma discordância entre os valores catalogados no WEBDA e em DAML02, reproduzindo por exemplo, esta degenerescência dos nossos valores de metalicidade.

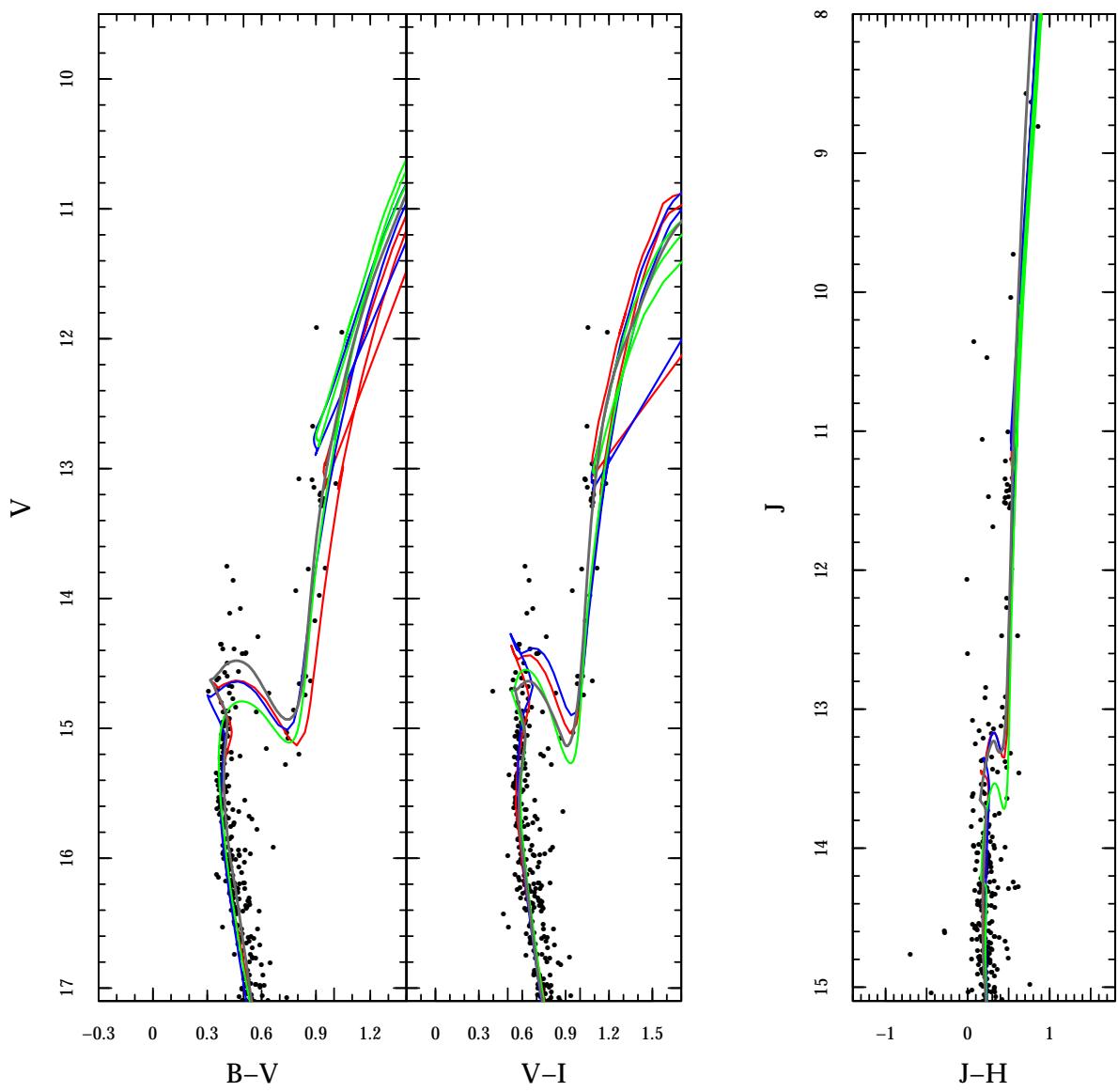


Figura 28: Diagrama cor-magnitude ( $(V$  vs.  $B-V$ ),  $(V$  vs.  $V-I$ ) e  $(J$  vs.  $J-H$ )) para NGC 2506 mostrando os melhores ajustes obtidos com os diferentes modelos de evolução estelar. Idem à legenda da figura 19.

Padova			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.40 ± 0.08	9.42 ± 0.08	9.31 ± 0.10
[Fe/H]	- 0.56 ± 0.12	- 0.20 ± 0.20	- 0.38 ± 0.27
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	12.38 ± 0.14	12.14 ± 0.16	12.27 ± 0.18
$E(B - V)$	0.05 ± 0.03	0.04 ± 0.03	0.04 ± 0.03
PARSEC			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.45 ± 0.09	9.46 ± 0.11	9.40 ± 0.13
[Fe/H]	- 0.45 ± 0.16	- 0.17 ± 0.18	- 0.34 ± 0.30
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	12.32 ± 0.17	12.12 ± 0.18	12.14 ± 0.20
$E(B - V)$	0.04 ± 0.03	0.05 ± 0.03	0.04 ± 0.03
BaSTI			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.24 ± 0.10	9.30 ± 0.10	9.26 ± 0.15
[Fe/H]	- 0.36 ± 0.09	0.05 ± 0.19	- 0.29 ± 0.51
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	12.46 ± 0.16	12.22 ± 0.18	12.27 ± 0.28
$E(B - V)$	0.03 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.04 ± 0.03
YY			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.41 ± 0.07	9.48 ± 0.08	9.44 ± 0.08
[Fe/H]	- 0.48 ± 0.15	- 0.23 ± 0.24	- 0.47 ± 0.17
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	12.32 ± 0.14	12.05 ± 0.12	12.06 ± 0.13
$E(B - V)$	0.05 ± 0.03	0.06 ± 0.03	0.04 ± 0.03

Tabela 9: Valores finais dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2506. Idem à legenda da Tab. 6.

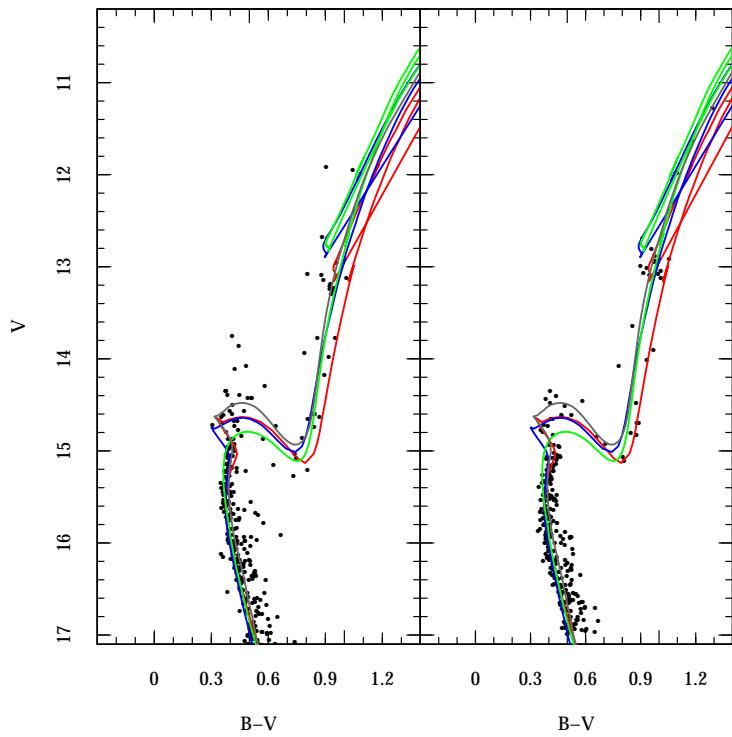


Figura 29: CMD observado (à esquerda) e o CMD sintético (à direita) do OC NGC 2506. Idem à legenda da figura 20.

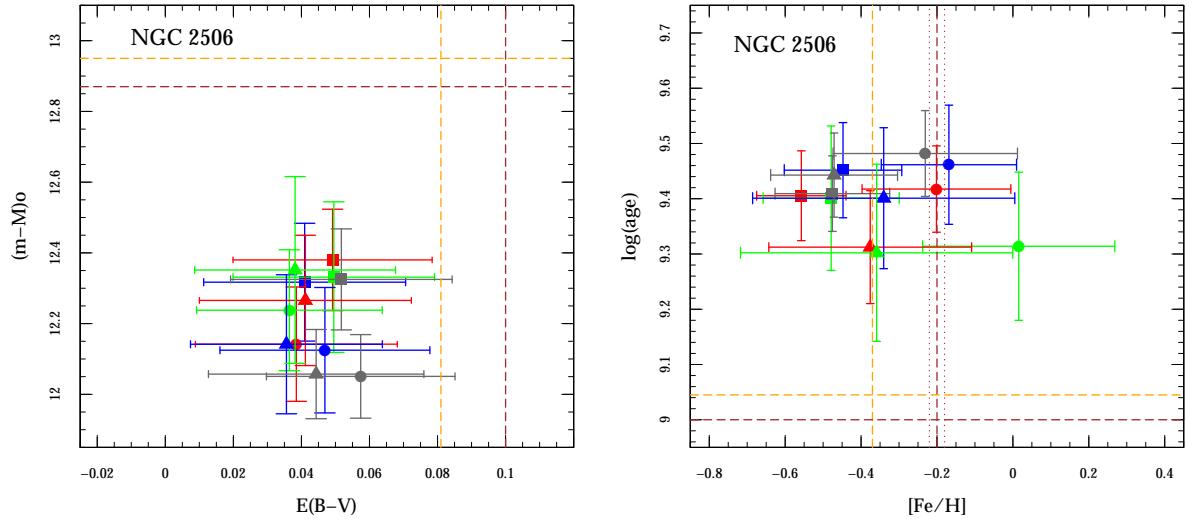


Figura 30: Diagramas confrontando valores de parâmetros físicos do aglomerado NGC 2506. Idem à legenda da figura 21.

## 4.5 Resultados para NGC 2682 (M 67)

Fazendo para NGC 2682 os mesmos procedimentos que foram feitos para os aglomerados anteriores, vemos que as isócronas obtidas a partir do método numérico - estatístico se ajustam satisfatoriamente bem ao loci de pontos dos CMDs no óptico (Fig. 31). Contudo, embora as isócronas dos diferentes modelos de evolução estelar se ajustem bem à sequência principal dos CMDs construídos com as bandas JH (Fig. 31), o mesmo não pode ser dito em relação ao conjunto de pontos representado pelas estrelas do *red clump*.

Analizando os valores apresentados na Tab. 10, representados também na Fig. 33, podemos notar que não há variações significativas nos valores de módulo de distância e avermelhamento para as diferentes escolhas de bandas fotométricas e modelos de evolução estelar. Em particular, percebemos uma boa consistência nas determinações para as diferentes escolhas de bandas fotométricas e modelos de evolução estelar. Isso pode ser visto pelo agrupamento de pontos nesta figura, cujo espalhamento é da ordem das incertezas em cada determinação.

Na comparação com os resultados da literatura, podemos notar primeiramente que os nossos valores de avermelhamento e módulo de distância são sistematicamente menores que aqueles valores encontrados no WEBDA. Já na comparação com os valores do catálogo DAML02, nossos resultados para o avermelhamento, independentemente do modelo de evolução estelar, estão de acordo com os valores deste catálogo. Em relação ao módulo de distância, nossos resultados apontam para valores um pouco mais altos do que aqueles encontrado no DAML02, estando os valores obtidos por meio do modelo de YY na faixa do óptico fugindo desta regra. No que diz respeito à idade, pode-se dizer que os nossos resultados apontam para valores mais altos do que aqueles encontrados nos dois catálogos. Já em relação à metalicidade, nossos resultados apresentam uma boa concordância com os valores provenientes da espectroscopia, muito embora sejam ligeiramente mais baixos, especialmente os obtidos com a análise de CMDs no NIR utilizando-se isócronas de Padova e BaSTI, como também aquele encontrado ao analisar o CMD [V vs. (V-I)] por meio de uma isócrona do modelo de YY.

A exemplo do que fizemos com os aglomerados NGC 188, NGC 2099, NGC 2477 e NGC 2506 apresentamos na Fig. 32 o CMD final de NGC 2682 [V vs. (B - V)] juntamente com o CMD sintético gerado por meio do modelo de Padova (isócrona de cor vermelha). Novamente a comparação entre modelo e observação revela a qualidade do método utilizado.

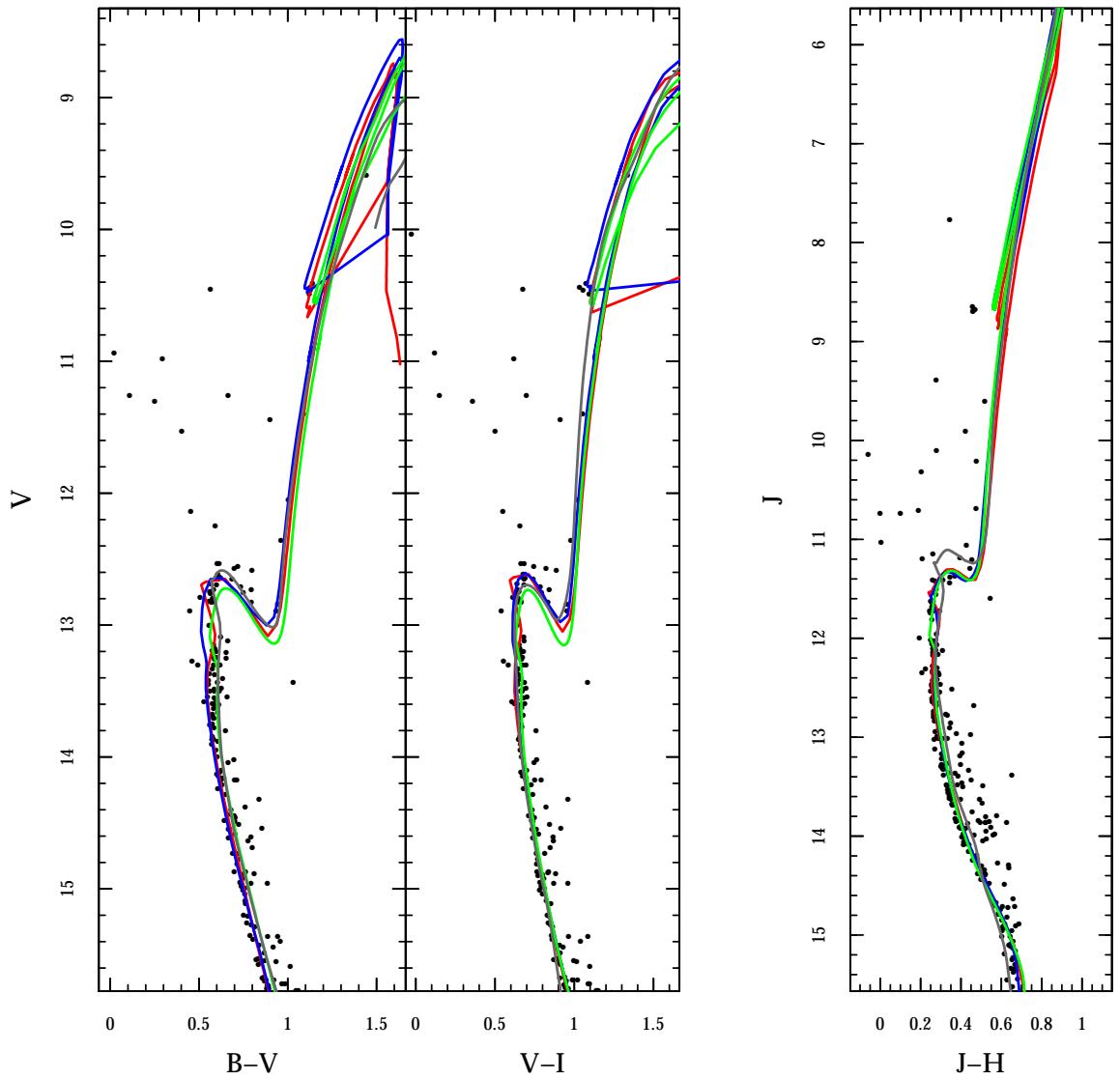


Figura 31: Diagrama cor-magnitude ((V vs. B-V), (V vs. V-I) e (J vs. J-H)) para NGC 2682 mostrando os melhores ajustes obtidos com os diferentes modelos de evolução estelar. Idem à legenda da figura 19.

Padova			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.60 ± 0.08	9.58 ± 0.10	9.48 ± 0.09
[Fe/H]	- 0.06 ± 0.07	- 0.02 ± 0.09	- 0.11 ± 0.18
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	9.67 ± 0.12	9.62 ± 0.12	9.73 ± 0.12
$E(B - V)$	0.01 ± 0.01	0.02 ± 0.02	0.03 ± 0.03
PARSEC			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.63 ± 0.08	9.62 ± 0.09	9.54 ± 0.07
[Fe/H]	0.00 ± 0.08	0.02 ± 0.08	- 0.05 ± 0.11
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	9.62 ± 0.12	9.56 ± 0.11	9.63 ± 0.08
$E(B - V)$	0.02 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.02 ± 0.02
BaSTI			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.62 ± 0.11	9.61 ± 0.12	9.50 ± 0.08
[Fe/H]	- 0.14 ± 0.21	- 0.03 ± 0.26	- 0.23 ± 0.28
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	9.62 ± 0.15	9.63 ± 0.14	9.68 ± 0.10
$E(B - V)$	0.04 ± 0.03	0.04 ± 0.02	0.03 ± 0.02
YY			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.64 ± 0.09	9.70 ± 0.12	9.46 ± 0.13
[Fe/H]	- 0.05 ± 0.14	- 0.16 ± 0.32	0.03 ± 0.42
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	9.50 ± 0.16	9.50 ± 0.16	9.67 ± 0.18
$E(B - V)$	0.05 ± 0.03	0.04 ± 0.03	0.06 ± 0.03

Tabela 10: Valores finais dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2682. Idem à legenda da Tab. 6.

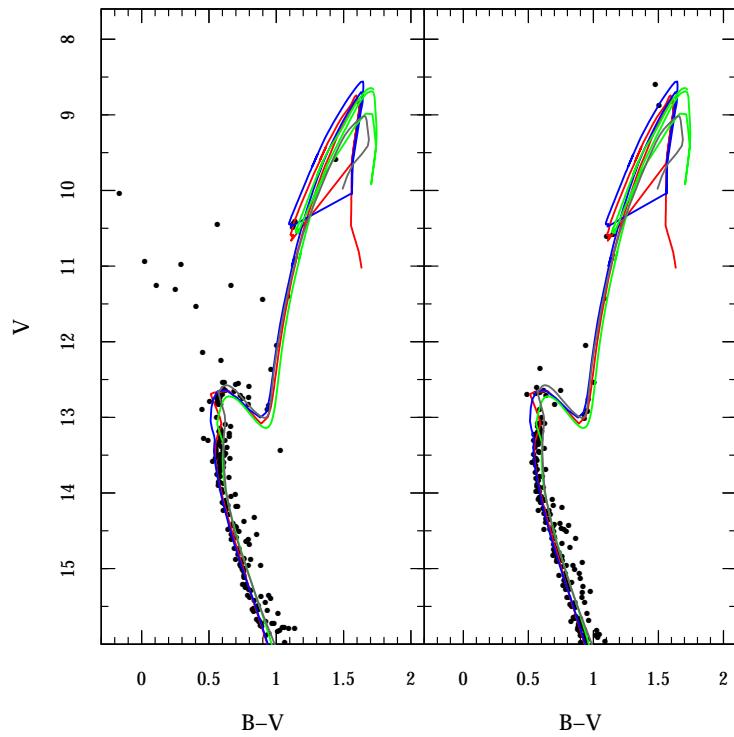


Figura 32: CMD observado (à esquerda) e o CMD sintético (à direita) do OC NGC 2682. Idem à legenda da figura 20

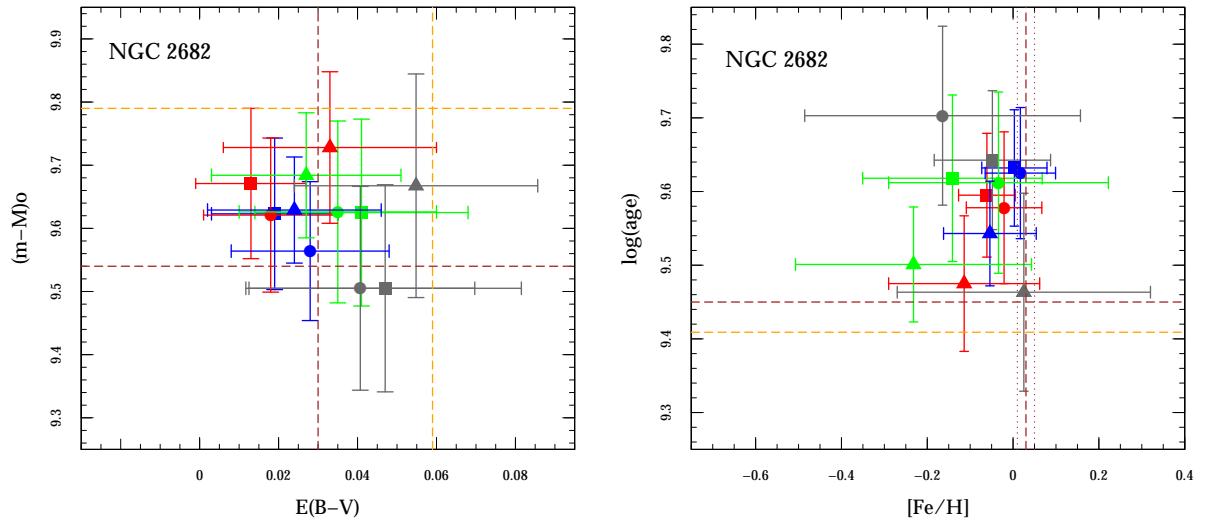


Figura 33: Diagramas confrontando valores de parâmetros físicos do aglomerado NGC 2682. Idem à legenda da figura 21

## 4.6 Resultados para NGC 6939

Ao analisar os CMDs da Fig. 34, vemos que as isócronas se ajustam bem ao conjunto de pontos que constitui a MS. Contudo, podemos notar que o mesmo não pode ser dito em relação ao ajuste no *Red Clump*, sugerindo que nenhum modelo que maximiza a verossimilhança foi capaz de ajustar uma isócrona simultaneamente à MS e à região do RC. Como exemplo da geração de diagramas sintéticos, a Fig. 35 apresenta o CMD observado [V vs. (B - V)] de NGC 6939, juntamente com o CMD modelado gerado por meio do modelo de Padova (ísocrona de cor vermelha). Os melhores ajustes de isócronas encontradas para este CMD por meio dos outros modelos de evolução estelar também são apresentados.

Na Tab. 11 são apresentados os nossos valores encontrados para NGC 6939, valores estes que também são apresentados graficamente na Fig. 36. Esta figura confronta os valores finais de distância (módulo de distância) com os de avermelhamento, e também os valores de idade (logaritmo da idade) contra os valores finais de metalicidade do objeto NGC 6939. Além disso, é feita uma comparação destes valores com aqueles encontrados em catálogos. O painel esquerdo desta figura revela uma boa concordância entre os valores de módulo de distância e avermelhamento para as diferentes opções de isócronas e bandas fotométricas. Na comparação com os catálogos, podemos perceber que nossos valores de avermelhamento são sistematicamente maiores, enquanto que para módulo de distância os valores dos catálogos coincidem com os nossos resultados que estão no limite superior.

Ao observarmos o painel direito da Fig. 36 podemos notar que as determinações feitas por meio do modelo YY nos fornecem valores significativamente maiores em idade e menores em metalicidade na comparação com os valores encontrados pelos demais modelos de evolução estelar. Além disso, na comparação com os resultados do catálogo DAML02, esses valores oriundos do modelo YY são ligeiramente maiores em idade e menores em metalicidade. Esta tendência é diretamente oposta àquela encontrada pelas determinações obtidas por meio das isócronas dos demais grupos, cujo valor central em metalicidade está de acordo com o resultado da espectroscopia.

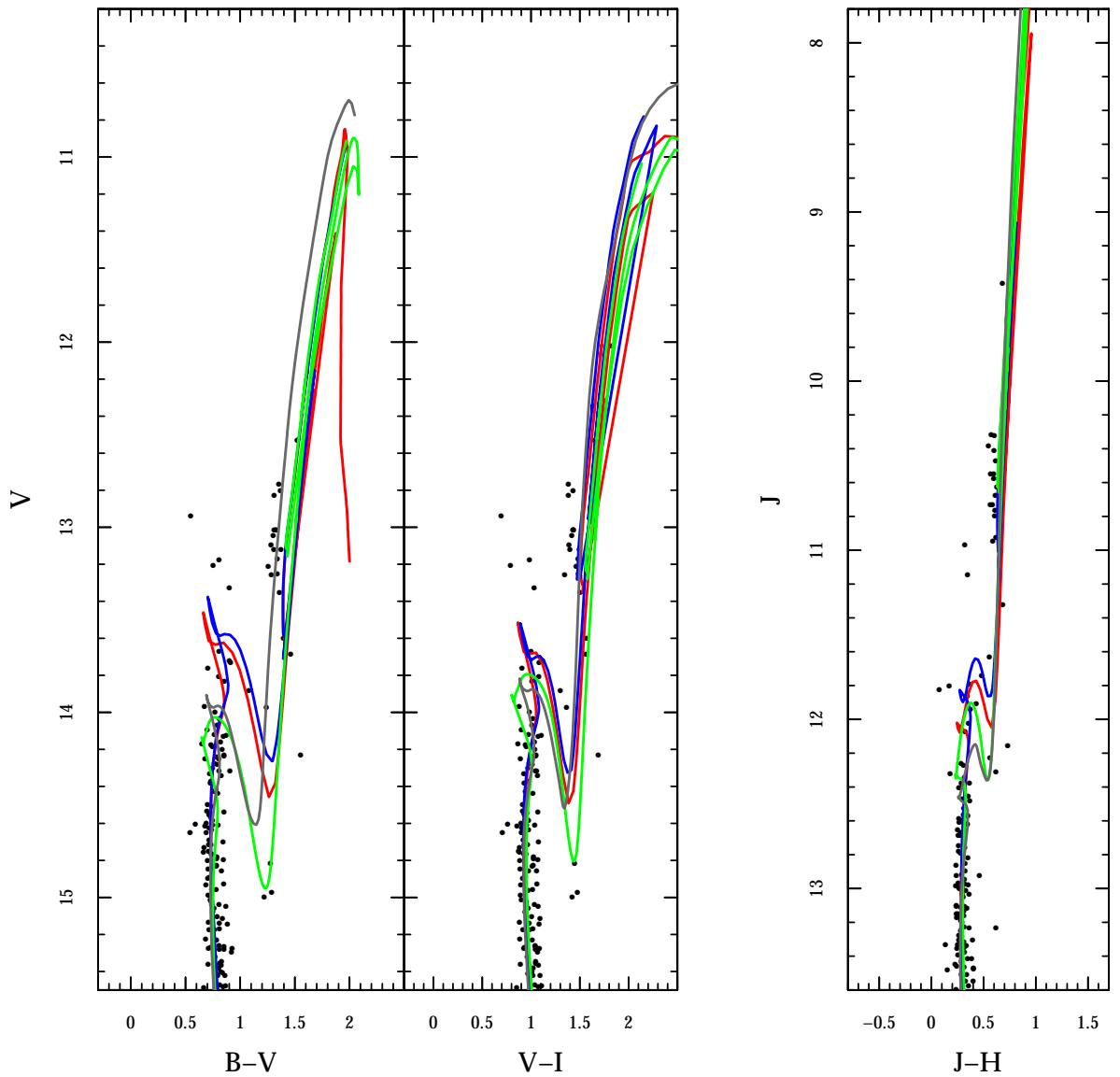


Figura 34: Diagrama cor-magnitude (( $V$  vs.  $B-V$ ), ( $V$  vs.  $V-I$ ) e ( $J$  vs.  $J-H$ )) para NGC 6939 mostrando os melhores ajustes obtidos com os diferentes modelos de evolução estelar. Idem à legenda da figura 19.

Padova			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.11 ± 0.07	9.08 ± 0.05	9.09 ± 0.06
[Fe/H]	0.03 ± 0.11	- 0.02 ± 0.13	0.03 ± 0.10
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	11.26 ± 0.16	11.43 ± 0.11	11.16 ± 0.16
$E(B - V)$	0.38 ± 0.04	0.36 ± 0.04	0.36 ± 0.04
PARSEC			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.15 ± 0.04	9.14 ± 0.05	9.15 ± 0.05
[Fe/H]	0.09 ± 0.09	0.08 ± 0.11	0.11 ± 0.09
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	11.19 ± 0.14	11.43 ± 0.11	11.10 ± 0.13
$E(B - V)$	0.39 ± 0.03	0.35 ± 0.03	0.37 ± 0.04
BaSTI			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.07 ± 0.13	9.14 ± 0.18	9.03 ± 0.16
[Fe/H]	0.09 ± 0.18	- 0.04 ± 0.24	0.12 ± 0.22
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	11.34 ± 0.19	11.33 ± 0.23	11.20 ± 0.19
$E(B - V)$	0.37 ± 0.04	0.35 ± 0.03	0.36 ± 0.04
YY			
.	V vs. B - V	V vs. V - I	J vs. J - H
log(age)	9.27 ± 0.08	9.28 ± 0.10	9.30 ± 0.09
[Fe/H]	- 0.15 ± 0.22	- 0.30 ± 0.26	- 0.18 ± 0.33
( $m - M$ ) <sub>o</sub>	11.09 ± 0.15	11.14 ± 0.18	11.04 ± 0.13
$E(B - V)$	0.38 ± 0.05	0.37 ± 0.04	0.36 ± 0.04

Tabela 11: Valores finais dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 6939. Idem à legenda da Tab. 6.

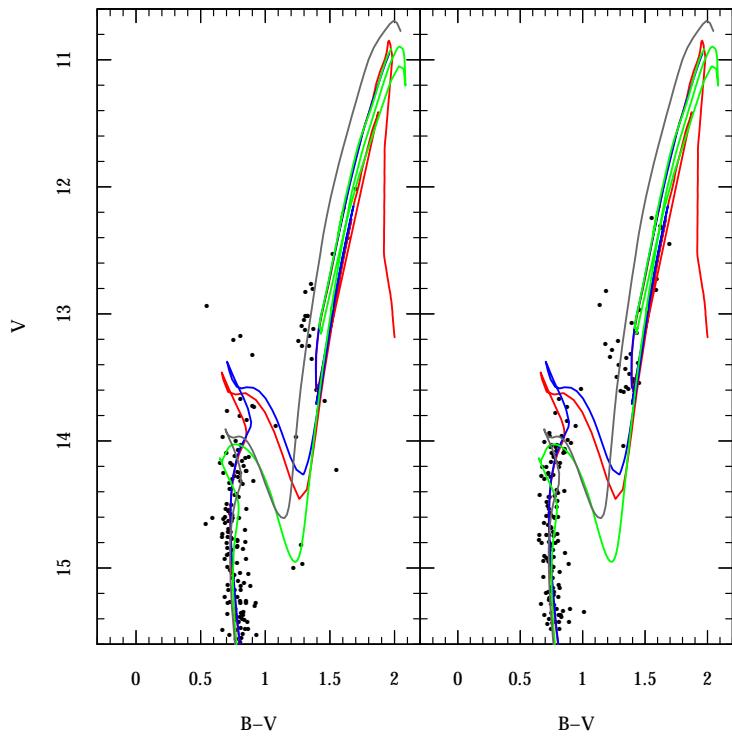


Figura 35: CMD observado (à esquerda) e o CMD sintético (à direita) do OC NGC 6939. Idem à legenda da figura 20

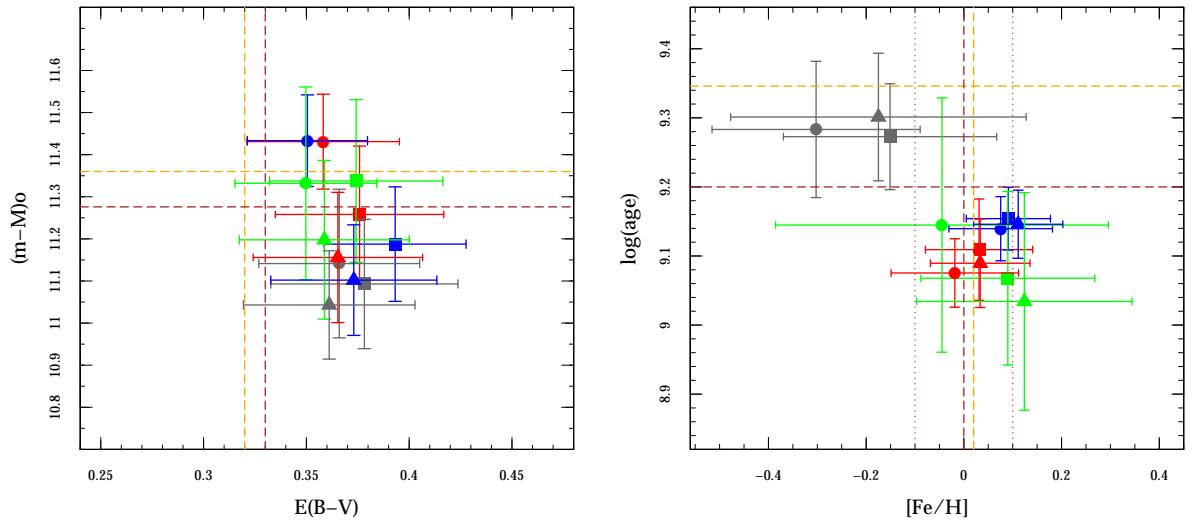


Figura 36: Diagramas confrontando valores de parâmetros físicos do aglomerado NGC 6939. Idem à legenda da figura 21

## 4.7 Discussões

O objetivo desta seção é fazer uma análise global dos nossos resultados analisando simultaneamente as determinações para os seis aglomerados estudados. Para isso obedecemos a três recortes distintos: (1) análise dos resultados de acordo com a banda fotométrica utilizada; (2) análise dos resultados de acordo com o modelo de evolução estelar adotado; (3) e análise de todas as nossas determinações, independente das escolhas envolvendo bandas fotométricas e modelos de evolução estelar. Em cada análise apresentamos determinações medianas de cada parâmetro para cada aglomerado, assim como incertezas associadas às escolhas implícitas (Tabs.12-17).

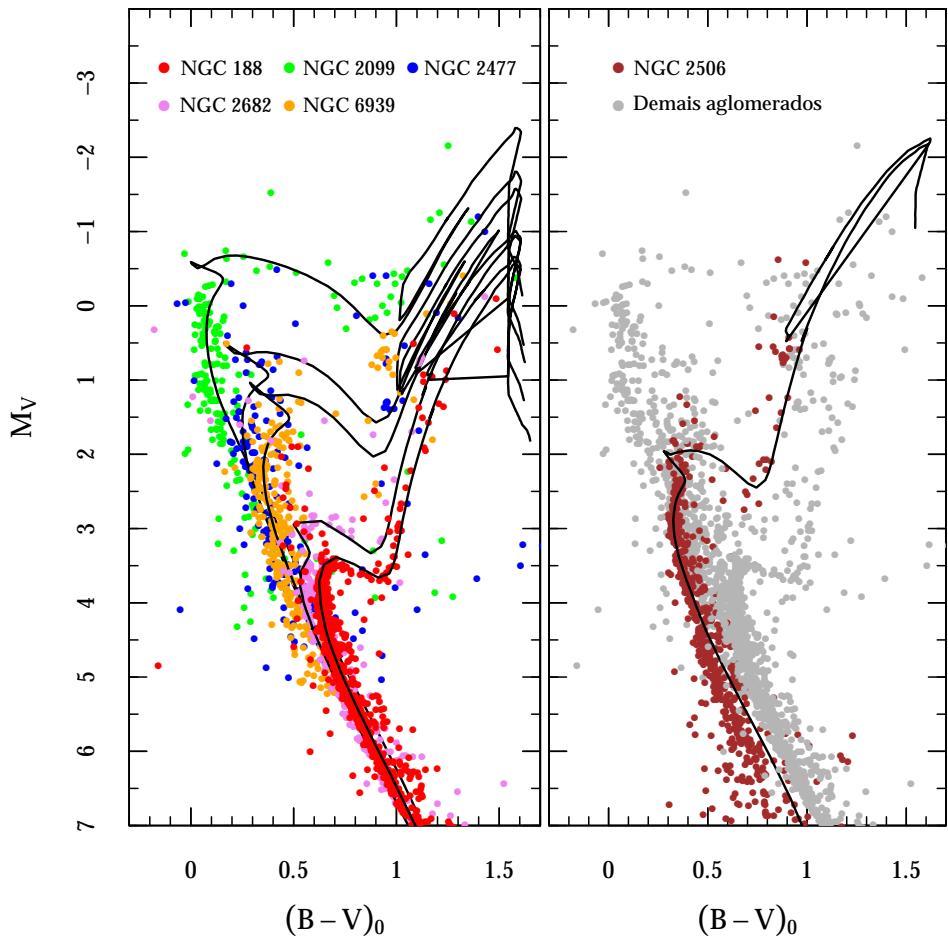


Figura 37: Diagrama cor-magnitude [ $M_V$  vs.  $(B - V)_0$ ] de todos os aglomerados abertos em estudo, juntamente com o melhor ajuste de isócrona (obtido por meio do modelo de Padova) encontrado para cada aglomerado. Enquanto que no painel esquerdo é apresentado o CMD dos OCs NGC 188, NGC 2099, NGC 2477, NGC 2682 e NGC 6939, no painel direito é dado um destaque especial ao CMD do OC NGC 2506.

Por fim iremos comparar os nossos resultados finais com aqueles encontrados em outros trabalhos na literatura, analisando em seguida as diferentes incertezas envolvidas (estatísticas e sistemáticas). Nesta dissertação, entendemos como incerteza estatística aquela obtida a partir do desvio padrão em torno da média encontrada entre os modelos que maximizaram o valor da *likelihood* para um dado ajuste de isócrona. Refere-se portanto a incerteza formal do método para obter cada um dos parâmetros, associada, por exemplo, a estatística de pontos presentes no CMD. Por outro lado, entendemos como incerteza sistemática aquela encontrada a partir do desvio padrão em torno da mediana obtida para os diferentes ajustes de isócrona de um mesmo objeto, levando-se em conta as diferentes opções de bandas espectrais e modelos de evolução estelar.

Para fins de demonstração, apresentamos na Fig. 37 o CMD [ $M_V$  vs.  $(B - V)_0$ ] de todos os aglomerados abertos estudados juntamente com o melhor ajuste de isócrona encontrado por meio do modelo de Padova para cada aglomerado. No painel esquerdo é apresentado o CMD dos aglomerados NGC 188 (pontos de cor vermelha), NGC 2099 (verde), NGC 2477 (azul), NGC 2682 (violeta) e NGC 2682 (laranja). Já no painel direito, além de apresentar o CMD dos aglomerados anteriores (pontos de cor cinza), é dado um destaque especial ao CMD do aglomerado NGC 2506 (marron) mostrando que o nosso resultado (obtido por meio do modelo de padova) conseguiu recuperar o baixo valor de metalicidade deste aglomerado.

#### 4.7.1 Resultados conforme a banda utilizada

Na Fig. 38 é apresentada a comparação dos valores obtidos com as bandas VI em relação aquelas com as bandas BV. Nesta figura notamos primeiramente que as determinações na idade para as diferentes bandas no óptico estão de acordo dentro de um espalhamento de  $\sim 0.1$  em logaritmo da idade. Quanto à metalicidade, aquelas determinações obtidas com dados VI tendem a superestimar [Fe/H] em aglomerados pobres

em metais e subestimar o [Fe/H] em aglomerados com metalicidade acima da solar. Curiosamente, o espalhamento mais grosso é aquele encontrado para NGC 2506 com uma diferença de  $\sim 0.3$  na comparação com a determinação via dados BV em relação aquela obtida via dados VI.

Analizando as duas determinações de módulo de distância e avermelhamento obtidos por meio dos CMDs [V vs. (B - V)] e [V vs. (V - I)] para cada um dos quatro aglomerados estudados simultaneamente com as bandas BVI (NGC 188, NGC 2506, NGC 2682 e NGC 6939) podemos notar que estas determinações são consistentes entre si. As únicas exceções são: O valor de  $(m - M)_o$  encontrado para o aglomerado NGC 2506 e o valor de E(B - V) obtido para NGC 6939 encontrados com dados VI recuperaram valores menores na comparação com aqueles encontrados com dados BV.

Na Fig. 39 é apresentada a comparação dos valores obtidos no NIR com aqueles obtidos com as bandas BV. Esta figura nos revela que para os aglomerados mais velhos (NGC 188 e M 67), a análise de CMDs [J vs. (J-H)] tende a recuperar idades mais jovens em comparação com os valores obtidos via análise dos CMDs [V vs. (B-V)], por um fator  $\sim 0.1$  em log(age). No que diz respeito ao módulo de distância, vemos que há uma boa concordância nos valores dentro de um espalhamento de  $\sim 0.3$ .

Em relação aos CMDs construídos com dados BV, CMDs [J vs. (J-H)] tendem a superestimar o valor do [Fe/H] em aglomerados pobres em metais e a subestimar [Fe/H] em aglomerados com metalicidade acima da solar (tal como ocorrido com os CMDs [V vs. V-I]), atingindo um espalhamento em torno de 0.1. Quanto ao avermelhamento, vemos a discrepância notada anteriormente na Fig.38 para este parâmetro se repetir na Fig. 39.

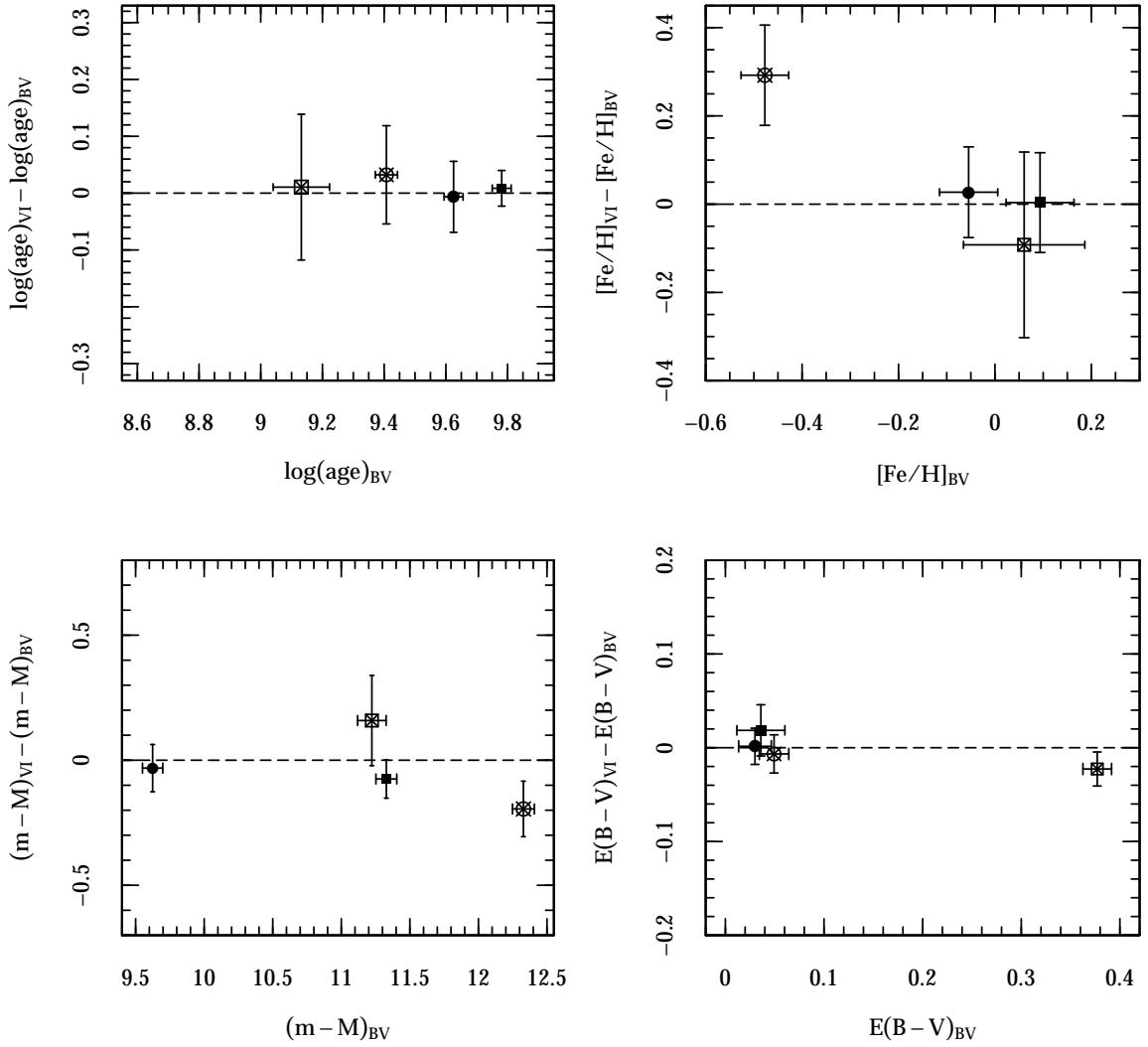


Figura 38: Distribuição dos valores obtidos dos parâmetros físicos dos aglomerados NGC 188, NGC 2506, NGC 2682 e NGC 6939 de acordo com a banda espectral adotada. A abscissa representa os valores encontrados por meio dos CMDs [V vs. (B - V)] e a ordenada representa a diferença entre os valores obtidos com as bandas VI e BV. O padrão de símbolos se referem aos objetos estudados simultaneamente com as bandas BVI: O quadrado representa o aglomerado NGC 188, o círculo representa o aglomerado NGC 2682, o quadrado de cor não sólida representa NGC 6939 e o círculo de cor não sólida representa o objeto NGC 2506.

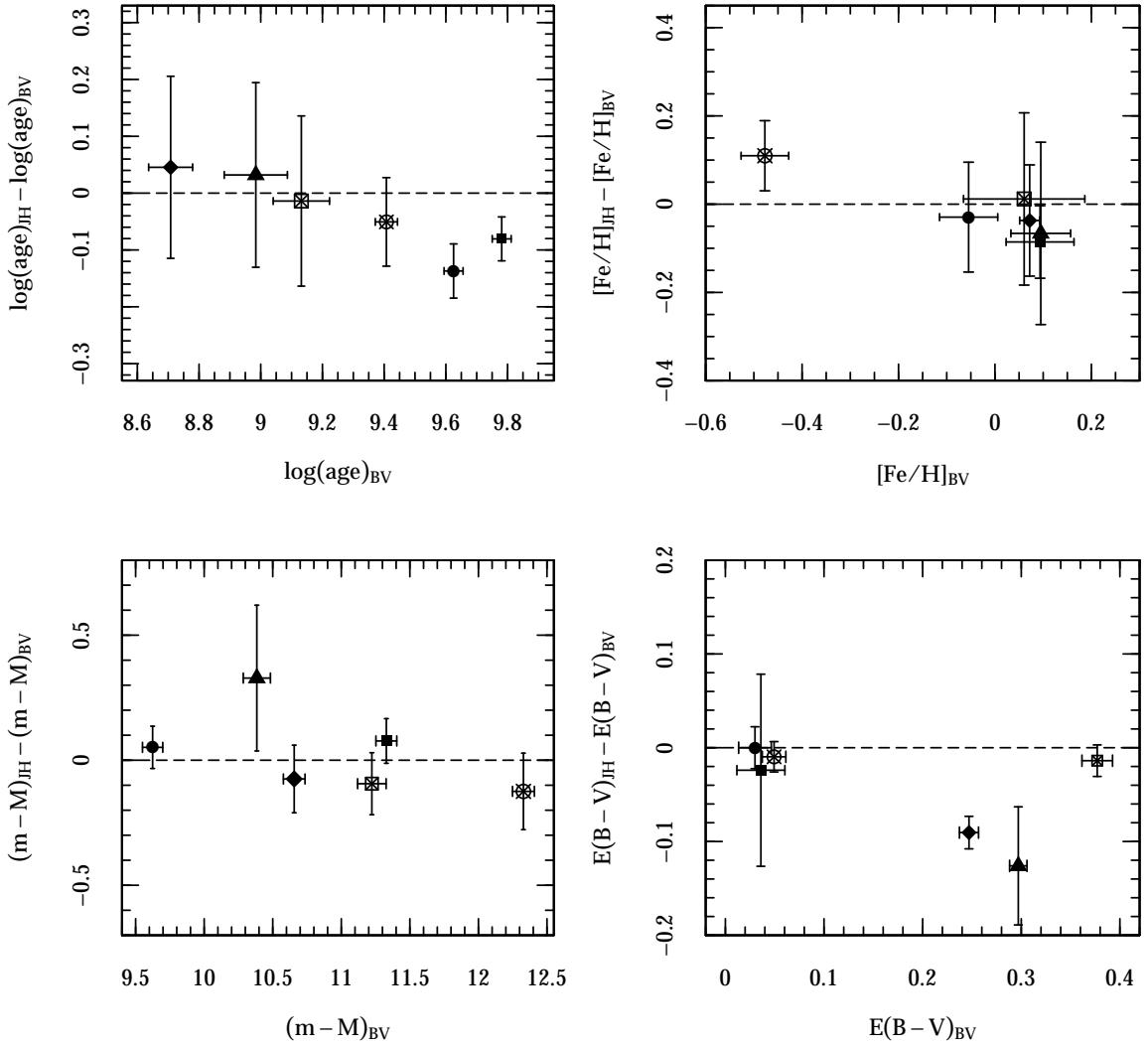


Figura 39: Distribuição dos valores obtidos dos parâmetros físicos de todos os aglomerados em estudo de acordo com a banda espectral adotada. A abscissa representa os valores encontrados por meio dos CMDs [V vs. (B - V)] e a ordenada representa a diferença entre os valores obtidos com as bandas JH e BV. O padrão de símbolos se referem aos objetos em estudo: O quadrado representa o aglomerado NGC 188, o círculo representa o aglomerado NGC 2682, o triângulo equivale ao objeto NGC 2477 e o losango, quadrado de cor não sólida e o círculo de cor não sólida representam os objetos NGC 2099, NGC 6939 e NGC 2506 respectivamente.

#### 4.7.2 Resultados conforme o modelo estelar utilizado

Apresentamos nas Fig. 40, 41 e 42 as comparações entre os valores obtidos nos parâmetros físicos de todos os aglomerados em estudo de acordo com o modelo de evolução estelar, tendo como referência as isócronas de Padova. Na Fig. 40 são analisados aqueles resultados encontrados por meio dos modelos de Padova e PARSEC. Nela podemos notar que os resultados de PARSEC superestimam os valores de  $\log(\text{age})$  e  $[\text{Fe}/\text{H}]$  por  $\sim 0.05$  em relação as determinações utilizando-se isócronas de Padova. Quanto ao  $(m - M)_o$  e  $E(B - V)$  vemos que há uma boa concordância entre os resultados obtidos pelos dois modelos de evolução estelar.

Analizando a Fig. 41 que representa os resultados encontrados por meio dos modelos de Padova e BaSTI, percebemos que BaSTI tem uma tendência em recuperar idades menores, sendo possível perceber que há um grande espalhamento nas comparações de idade, chegando a uma diferença de aproximadamente 0.15 em  $\log(\text{age})$ . Quanto à metalicidade vemos que, assim como aconteceu com as isócronas de PARSEC, os resultados obtidos via BaSTI também recuperaram valores maiores de índice de Ferro na comparação com às determinações provenientes do modelo de Padova, mas por um fator de  $\sim 0.1$  dex. Curiosamente, com um espalhamento em torno de 0.1, o aglomerado NGC 2682 não segue esta tendência, estando o resultado de BaSTI subestimando a determinação de Padova. Em relação ao módulo de distância e avermelhamento notamos que há uma boa concordância entre as determinações de BaSTI e Padova.

Os valores finais dos parâmetros físicos de todos os aglomerados obtidos via modelos de Padova e YY são apresentados na Fig. 42. Na análise desta figura podemos notar que os resultados de YY superestimam os valores do logaritmo da idade em até  $\sim 0.2$  em relação as determinações via Padova. Analisando a metalicidade, com exceção dos aglomerados mais velhos (NGC 188 e NGC 2682), vemos que há uma grande diferença entre as determinações obtidas pelos dois modelos, com as determinações de YY recuperando valores menores em relação as determinações obtidas com Padova por até  $\sim 0.2$  dex.

O Painel inferior esquerdo da Fig. 42 nos revela que os resultados encontrados por

meio do modelo YY possuem uma leve tendência de subestimar os valores de  $(m - M)_o$  em  $\sim 0.2$ , e a superestimar o avermelhamento por um fator  $\sim 0.12$  na comparação com os valores obtidos via Padova.

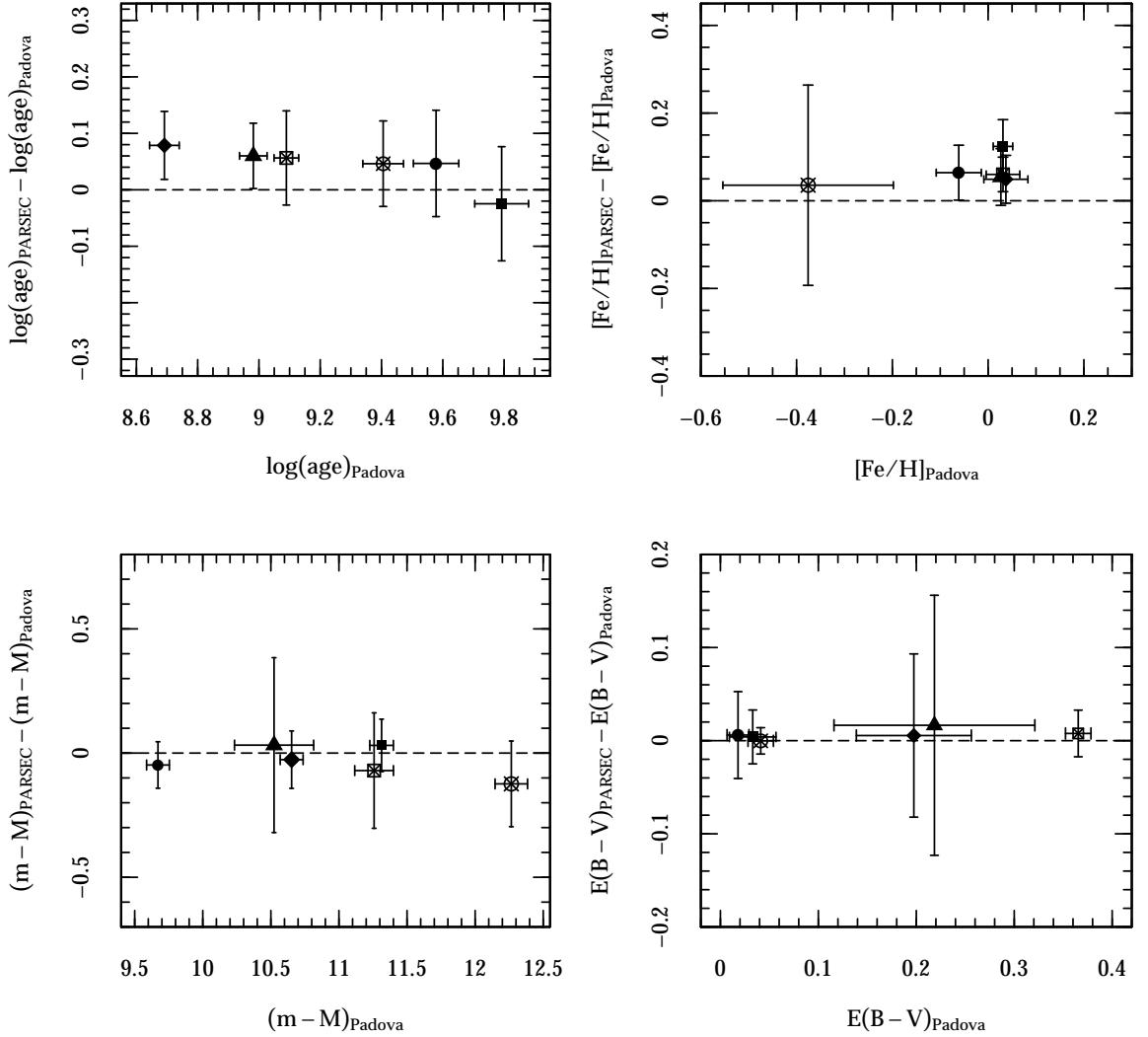


Figura 40: Distribuição dos valores obtidos dos parâmetros físicos de todos os aglomerados em estudo de acordo com o modelo de evolução estelar. A abscissa representa os valores encontrados por meio do modelo de Padova e a ordenada representa a diferença entre os valores obtidos com os modelos de PARSEC e Padova. O padrão de símbolos se referem aos objetos em estudo: O quadrado representa o aglomerado NGC 188, o círculo representa o aglomerado NGC 2682, o triângulo equivale ao objeto NGC 2477 e o losango, quadrado de cor não sólida e o círculo de cor não sólida representam os objetos NGC 2099, NGC 6939 e NGC 2506 respectivamente.

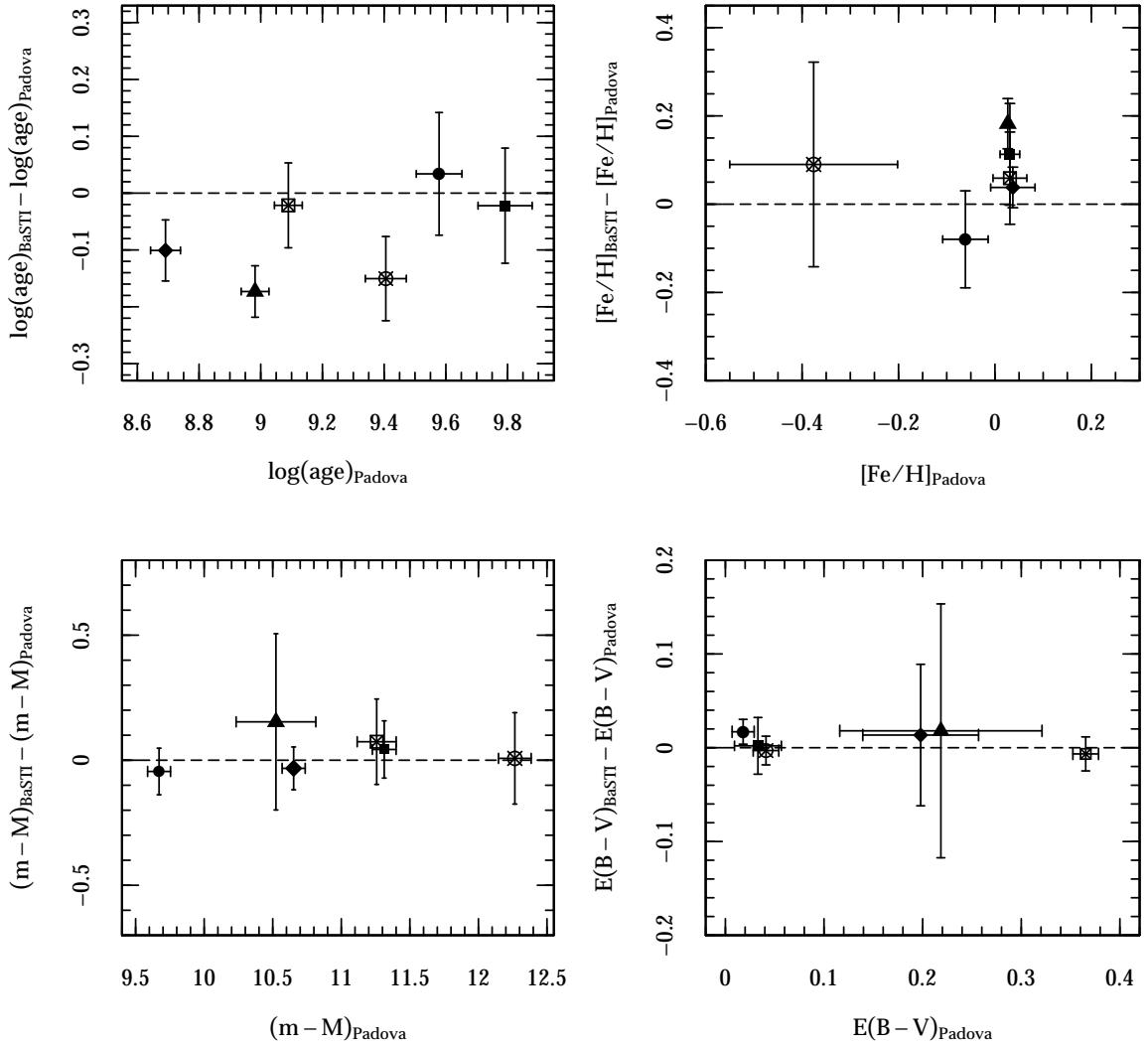


Figura 41: Distribuição dos valores obtidos dos parâmetros físicos de todos os aglomerados em estudo de acordo com o modelo de evolução estelar. A abscissa representa os valores encontrados por meio do modelo de Padova e a ordenada representa a diferença entre os valores obtidos com os modelos de BaSTI e Padova. Idem à legenda da figura 40

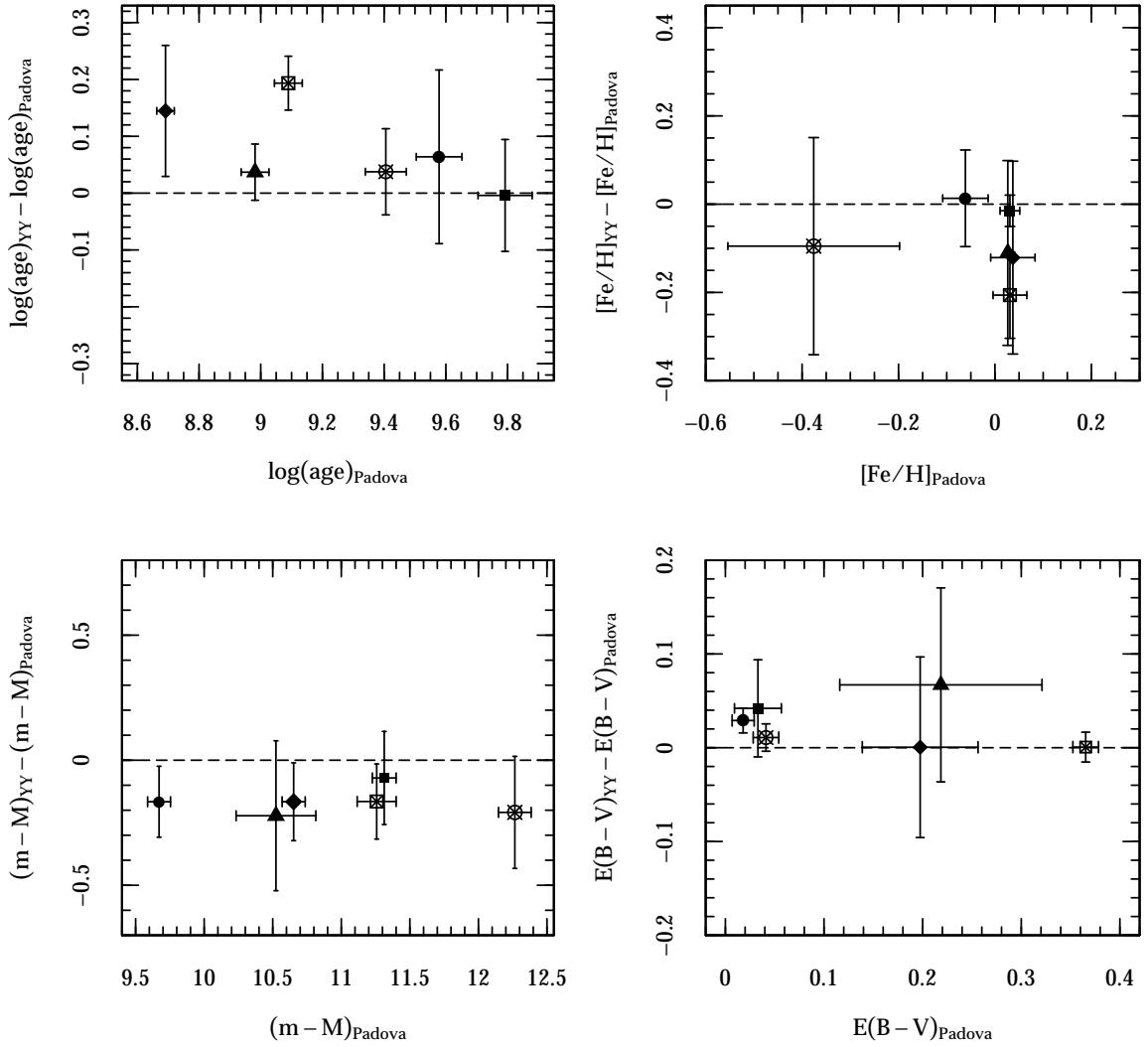


Figura 42: Distribuição dos valores obtidos dos parâmetros físicos de todos os aglomerados em estudo de acordo com o modelo de evolução estelar. A abscissa representa os valores encontrados por meio do modelo de Padova e a ordenada representa a diferença entre os valores obtidos com os modelos de YY e Padova. Idem à legenda da figura 40

#### 4.7.3 Parâmetros físicos finais

Os valores finais dos parâmetros físicos de cada aglomerado foram calculados como a mediana nas diferentes determinações envolvendo todas as combinações exploradas entre modelos de evolução estelar e bandas fotométricas. Estes resultados são apresentados nas Tabelas 12 a 17, e representados graficamente nas figuras 43 e 44, onde são confrontados com os valores encontrados no catálogo DAML02, Pauzen & Netopil (2006), Heiter *et al.* (2014) e em outros trabalhos encontrados na literatura. Adicionalmente apresentamos duas incertezas: a incerteza estatística do valor mediano de cada parâmetro (associada ao número de estrelas nos CMDs e ao método de ajuste de isócrona), e a incerteza sistemática, que representa o desvio padrão das determinações em torno da mediana, ou seja, está associada com o espalhamento de pontos de todos os ajustes de isócrona.

Na Fig. 43 construímos em dois painéis a distribuição dos valores medianos em  $\log(\text{age})$  e  $[\text{Fe}/\text{H}]$  de todos os objetos em estudo. Estes valores são aqueles onde consideramos todas as determinações obtidas para cada parâmetro por aglomerado (12 determinações para os aglomerados NGC 188, NGC 2506, NGC 2682, NGC 6939, e 8 determinações para os aglomerados NGC 2099 e NGC 2477). Analisando o painel superior podemos notar que o nosso trabalho tende a recuperar sistematicamente idades mais velhas em comparação com os valores encontrados em DAML02. No entanto, a nossa determinação para o aglomerado NGC 6939 foge deste padrão, tendo um valor marginalmente inferior em relação àquele encontrado no catálogo. Estas discrepâncias tendem a ser reduzidas quando a comparação é feita com valores médios da compilação de resultados presente em Paunzen & Netopil (2006) (pontos azuis). Quanto aos valores em metalicidade (painel inferior) vemos que os nossos resultados estão de acordo com as determinações encontradas em DAML02 ou em Heiter *et al.* (2014). É importante salientar que estes valores de  $[\text{Fe}/\text{H}]$  situados no catálogo Dias são provenientes de trabalhos espectroscópicos. A saber: NGC 188 - Jacobson *et al.* (2011), NGC 2682 - Randich *et al.* (2006), NGC 2477 - Sestito *et al.* (2006), NGC 2099 - Twarog *et al.* (1997), NGC 6939 -

Jacobson *et al.* (2007), NGC 2506 - Carretta *et al.* (2004). Por outro lado, no trabalho de Heiter *et al.* (2014) são feitas médias entre diferentes trabalhos espectroscópicos.

Na Fig. 44 é feito o mesmo gráfico que o anterior, porém com os valores medianos em  $(m - M)_o$  e  $E(B - V)$ . Analisando o painel superior referente as determinações de módulo de distância, vemos que os nossos resultados para NGC 2099, NGC 2477, NGC 2682 e NGC 6939 estão de acordo com aqueles encontrados em catálogos. No entanto, as nossas determinações para NGC 188 e principalmente para NGC 2506 são sistematicamente menores na comparação com aqueles, tendo um espalhamento que chega a  $\sim 0.6$ . Em relação aos valores em avermelhamento (painel inferior), notamos que os valores no catálogo DAML02 são sistematicamente maiores do que os valores encontrados nas nossas determinações medianas para os aglomerados NGC 188, NGC 2099, NGC 2477 e NGC 2506.

Na Fig. 45 apresentamos a comparação dos dois tipos de incertezas (estatística e sistemática) em função das respectivas determinações medianas finais dos parâmetros físicos de cada aglomerado. Analisando esta figura podemos verificar que existe uma consistência entre os nossos resultados sempre que a incerteza sistemática for dominada pela incerteza estatística. Em outras palavras, se a incerteza estatística superar a sistemática isso significa que todas as determinações obtidas estão agrupadas, e portanto o espalhamento devido às diferentes escolhas de bandas fotométricas e modelos de evolução estelar não supera a incerteza associada a uma única determinação.

No caso dos aglomerados NGC 188, NGC 2506, NGC 2682 e NGC 6939, as 12 determinações para cada um dos quatro parâmetros físicos se mostraram consistentes entre si. Por outro lado, os valores de idade, módulo de distância e avermelhamento de NGC 2477 apresentam incertezas sistemáticas que superam as aleatórias, e desta forma não se pode dizer que são consistentes entre si. O mesmo também pode ser dito em relação ao valor de metalicidade de NGC 2099.

A seguir iremos comparar as nossas determinações, de cada aglomerado, com aquelas encontradas na literatura:

## **NGC 188**

Com uma idade estimada por nós de  $\log(\text{age}) = 9.77 \pm 0.05$ , este objeto se constitui como o aglomerado aberto mais velho da nossa amostra. Esta determinação é consistente com o valor de  $\tau = 7.0 \pm 1.0$  Gyr encontrada por Bonatto *et al.* (2005). Entretanto, com um valor de avermelhamento estimado em  $E(B-V) = 0.0$ , e módulo de distância ( $m-M$ ) =  $11.1 \pm 0.1$ , vemos que este trabalho feito com dados do 2MASS tende a recuperar valores mais baixos nestes dois parâmetros em comparação com as nossas determinações medianas. Quanto à metalicidade, o nosso resultado mediano recupera os valores provenientes da análise espectroscópica determinadas por Heiter *et al.* (2014) ( $+0.11 \pm 0.04$ ) e Jacobson *et al.* (2011) ( $-0.03 \pm 0.04$ ).

## **NGC 2099**

Com uma determinação mediana para a metalicidade estimada em  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.04 \pm 0.14$ , este valor consegui agregar resultados provenientes da espectroscopia, tais como:  $+0.02 \pm 0.05$  (Heiter *et al.* 2014) e  $+0.089 \pm 0.146$  (Twarog *et al.* 1997). Na comparação com os resultados encontrados em Nilakshi *et al.* (2002) notamos que o nosso valor de ( $m-M$ ) é consistente com aquele determinado por eles ( $d_\odot = 1360 \pm 100$  pc). No entanto, as nossas determinações de idade e avermelhamento são inconsistentes, estando eles determinando um valor menor para a idade ( $\tau = 0.40$  Gyr) e maior para o avermelhamento ( $E(B-V) = 0.30 \pm 0.04$ ).

NGC 188					
.	log(age)	[Fe/H]	$(m - M)_o$	$E(B - V)$	
Padova	$9.79 \pm 0.09$	$0.03 \pm 0.01$	$11.31 \pm 0.09$	$0.03 \pm 0.02$	
PARSEC	$9.77 \pm 0.05$	$0.16 \pm 0.06$	$11.34 \pm 0.06$	$0.04 \pm 0.02$	
BaSTI	$9.77 \pm 0.05$	$0.14 \pm 0.11$	$11.36 \pm 0.08$	$0.04 \pm 0.02$	
YY	$9.79 \pm 0.04$	$0.02 \pm 0.03$	$11.24 \pm 0.16$	$0.08 \pm 0.05$	
[V vs. (B - V)]	$9.78 \pm 0.01$	$0.09 \pm 0.07$	$11.33 \pm 0.05$	$0.04 \pm 0.02$	
[V vs. (V - I)]	$9.79 \pm 0.01$	$0.10 \pm 0.09$	$11.25 \pm 0.01$	$0.05 \pm 0.01$	
[J vs. (J - H)]	$9.70 \pm 0.02$	$0.01 \pm 0.04$	$11.41 \pm 0.05$	$0.01 \pm 0.01$	
	$\sigma_{sist.}$	$\sigma_{est.}$	$\sigma_{sist.}$	$\sigma_{est.}$	$\sigma_{sist.}$
Todos	$9.77 \pm 0.05 \pm 0.06$	$0.09 \pm 0.07 \pm 0.18$	$11.33 \pm 0.08 \pm 0.10$	$0.04 \pm 0.02 \pm 0.03$	

Tabela 12: Valores medianos dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 188. Estes valores são aqueles encontrados considerando inicialmente os modelos de evolução estelar, e posteriormente, considerando as bandas fotométricas. Em seguida, é apresentado o valor mediano encontrado considerando todas as determinações obtidas. As incertezas representam: o desvio padrão das determinações em torno da mediana  $\sigma_{sist.}$ , e a incerteza estatística do valor mediano de cada parâmetro  $\sigma_{est.}$ .

NGC 2099					
.	log(age)	[Fe/H]	$(m - M)_o$	$E(B - V)$	
Padova	$8.69 \pm 0.03$	$0.04 \pm 0.05$	$10.65 \pm 0.08$	$0.20 \pm 0.06$	
PARSEC	$8.77 \pm 0.04$	$0.09 \pm 0.03$	$10.63 \pm 0.08$	$0.20 \pm 0.07$	
BaSTI	$8.59 \pm 0.02$	$0.08 \pm 0.02$	$10.62 \pm 0.02$	$0.21 \pm 0.05$	
YY	$8.84 \pm 0.11$	$-0.08 \pm 0.21$	$10.49 \pm 0.13$	$0.20 \pm 0.08$	
[V vs. (B - V)]	$8.71 \pm 0.07$	$0.07 \pm 0.02$	$10.66 \pm 0.06$	$0.25 \pm 0.01$	
[J vs. (J - H)]	$8.75 \pm 0.14$	$0.04 \pm 0.12$	$10.58 \pm 0.11$	$0.16 \pm 0.01$	
	$\sigma_{sist.}$	$\sigma_{est.}$	$\sigma_{sist.}$	$\sigma_{est.}$	$\sigma_{sist.}$
Todos	$8.73 \pm 0.11 \pm 0.09$	$0.07 \pm 0.12 \pm 0.11$	$10.60 \pm 0.10 \pm 0.18$	$0.21 \pm 0.05 \pm 0.06$	

Tabela 13: Valores medianos dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2099. Idem à legenda da Tab. 12.

NGC 2477					
.	log(age)	[Fe/H]	$(m - M)_o$	$E(B - V)$	
Padova	8.98 ± 0.02	0.03 ± 0.01	10.52 ± 0.29	0.22 ± 0.10	
PARSEC	9.04 ± 0.04	0.08 ± 0.06	10.56 ± 0.20	0.24 ± 0.09	
BaSTI	8.81 ± 0.01	0.21 ± 0.06	10.68 ± 0.20	0.24 ± 0.09	
YY	9.02 ± 0.02	- 0.08 ± 0.21	10.30 ± 0.07	0.28 ± 0.01	
[V vs. (B - V)]	8.98 ± 0.10	0.10 ± 0.06	10.38 ± 0.10	0.30 ± 0.01	
[J vs. (J - H)]	9.02 ± 0.13	0.03 ± 0.20	10.71 ± 0.27	0.17 ± 0.06	
		$\sigma_{sist.}$	$\sigma_{est.}$	$\sigma_{sist.}$	$\sigma_{est.}$
Todos	9.00 ± 0.11 ± 0.08	0.05 ± 0.14 ± 0.18	10.48 ± 0.23 ± 0.19	0.28 ± 0.08 ± 0.05	

Tabela 14: Valores medianos dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2477. Idem à legenda da Tab. 12.

NGC 2506					
.	log(age)	[Fe/H]	$(m - M)_o$	$E(B - V)$	
Padova	9.40 ± 0.07	- 0.38 ± 0.18	12.27 ± 0.12	0.04 ± 0.01	
PARSEC	9.45 ± 0.04	- 0.34 ± 0.14	12.14 ± 0.12	0.04 ± 0.01	
BaSTI	9.26 ± 0.03	- 0.29 ± 0.25	12.27 ± 0.14	0.04 ± 0.01	
YY	9.44 ± 0.04	- 0.47 ± 0.17	12.06 ± 0.19	0.05 ± 0.01	
[V vs. (B - V)]	9.41 ± 0.03	- 0.48 ± 0.05	12.33 ± 0.03	0.05 ± 0.01	
[V vs. (V - I)]	9.44 ± 0.08	- 0.18 ± 0.10	12.13 ± 0.08	0.04 ± 0.01	
[J vs. (J - H)]	9.36 ± 0.07	- 0.37 ± 0.06	12.20 ± 0.13	0.04 ± 0.01	
		$\sigma_{sist.}$	$\sigma_{est.}$	$\sigma_{sist.}$	$\sigma_{est.}$
Todos	9.41 ± 0.07 ± 0.11	- 0.37 ± 0.15 ± 0.18	12.25 ± 0.12 ± 0.25	0.04 ± 0.01 ± 0.04	

Tabela 15: Valores medianos dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2506. Idem à legenda da Tab. 12.

NGC 2682					
.	log(age)	[Fe/H]	$(m - M)_o$	$E(B - V)$	
Padova	$9.58 \pm 0.07$	$-0.06 \pm 0.05$	$9.67 \pm 0.05$	$0.02 \pm 0.01$	
PARSEC	$9.62 \pm 0.06$	$0.00 \pm 0.04$	$9.62 \pm 0.04$	$0.02 \pm 0.04$	
BaSTI	$9.61 \pm 0.08$	$-0.14 \pm 0.10$	$9.63 \pm 0.04$	$0.04 \pm 0.01$	
YY	$9.64 \pm 0.13$	$-0.05 \pm 0.10$	$9.50 \pm 0.11$	$0.05 \pm 0.01$	
[V vs. (B - V)]	$9.62 \pm 0.02$	$-0.06 \pm 0.06$	$9.62 \pm 0.07$	$0.03 \pm 0.02$	
[V vs. (V - I)]	$9.62 \pm 0.05$	$-0.03 \pm 0.08$	$9.59 \pm 0.06$	$0.03 \pm 0.01$	
[J vs. (J - H)]	$9.49 \pm 0.04$	$-0.08 \pm 0.11$	$9.68 \pm 0.04$	$0.03 \pm 0.02$	
	$\sigma_{sist.}$	$\sigma_{est.}$	$\sigma_{sist.}$	$\sigma_{est.}$	$\sigma_{sist.}$
Todos	$9.60 \pm 0.08 \pm 0.12$	$-0.05 \pm 0.08 \pm 0.17$	$9.63 \pm 0.07 \pm 0.21$	$0.03 \pm 0.01 \pm 0.04$	
.					

Tabela 16: Valores medianos dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 2682. Idem à legenda da Tab. 12.

NGC 6939					
.	log(age)	[Fe/H]	$(m - M)_o$	$E(B - V)$	
Padova	$9.09 \pm 0.02$	$0.03 \pm 0.04$	$11.26 \pm 0.14$	$0.36 \pm 0.01$	
PARSEC	$9.15 \pm 0.07$	$0.09 \pm 0.02$	$11.19 \pm 0.18$	$0.37 \pm 0.02$	
BaSTI	$9.07 \pm 0.06$	$0.09 \pm 0.10$	$11.33 \pm 0.10$	$0.36 \pm 0.01$	
YY	$9.28 \pm 0.01$	$-0.18 \pm 0.09$	$11.09 \pm 0.05$	$0.37 \pm 0.01$	
[V vs. (B - V)]	$9.13 \pm 0.09$	$0.06 \pm 0.13$	$11.22 \pm 0.10$	$0.38 \pm 0.01$	
[V vs. (V - I)]	$9.14 \pm 0.09$	$-0.03 \pm 0.17$	$11.38 \pm 0.15$	$0.35 \pm 0.01$	
[J vs. (J - H)]	$9.12 \pm 0.12$	$0.07 \pm 0.15$	$11.13 \pm 0.07$	$0.36 \pm 0.01$	
	$\sigma_{sist.}$	$\sigma_{est.}$	$\sigma_{sist.}$	$\sigma_{est.}$	$\sigma_{sist.}$
Todos	$9.14 \pm 0.09 \pm 0.16$	$0.03 \pm 0.14 \pm 0.15$	$11.19 \pm 0.14 \pm 0.23$	$0.37 \pm 0.01 \pm 0.06$	
.					

Tabela 17: Valores medianos dos parâmetros físicos para o aglomerado NGC 6939. Idem à legenda da Tab. 12.

## NGC 2477

Para o aglomerado aberto NGC 2477 determinamos valores medianos que são consistentes com as determinações encontradas em Paunzen & Netopil (2006) ( $\tau = 0.875 \pm 0.238$  Gyr,  $d_\odot = 1227 \pm 166$  pc e  $E(B - V) = 0.26 \pm 0.08$ ) e em Oliveira *et al.* (2013) ( $\log(\text{age}) = 8.85 \pm 0.09$ ,  $d_\odot = 1341 \pm 106$  pc e  $E(B - V) = 0.31 \pm 0.03$ ). No caso deste último trabalho, vemos que a nossa determinação para o avermelhamento tende a recuperar um valor menor em relação àquele. Quanto à metalicidade, a nossa determinação mediana é equivalente ao valor proveniente da espectroscopia  $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.07 \pm 0.03$  encontrado em Heiter *et al.* (2014).

## NGC 2506

Baseado na fotometrica VI, Lee *et al.* (2012) obtiveram os seguintes valores: idade  $= 2.31 \pm 0.16$  Gyr,  $(m - M)_o = 12.47 \pm 0.08$ ,  $E(B - V) = 0.03 \pm 0.04$  e  $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.24 \pm 0.06$ . Os valores em idade, avermelhamento e metalicidade são consistentes com as nossas determinações medianas. No entanto, o valor de módulo de distância obtido por eles é marginalmente maior em comparação com a nossa. Já em relação aos valores encontrados em Paunzen & Netopil (2006), as nossas determinações medianas de  $\log(\text{age})$  e  $(m - M)_o$  são inconsistentes com os resultados deles.

Agora, ao comparar o nosso valor de metalicidade, com valores provenientes da espectroscopia, mas precisamente com o valor encontrado em Heiter *et al.* (2014) ( $-0.23 \pm 0.05$ ) e em Carretta *et al.* (2004) ( $-0.20 \pm 0.02$ ), vemos que a nossa determinação mediana é compatível com estes.

Na comparação com os resultados obtidos por Marconi *et al.* (1997) ( $1.5 \leq \tau \leq 2.2$  Gyr,  $(m - M)_o = 12.6 \pm 0.1$  e  $0.00 \leq E(B - V) \leq 0.07$ ) vemos que: enquanto que a nossa determinação final para a idade recupera um valor mais alto, no caso do módulo de distância o valor recuperado foi menor. Quanto ao valor de avermelhamento, a nossa determinação é consistente com o valor obtido por eles.

## NGC 2682

Nossas determinações medianas de  $\log(\text{age})$ ,  $(m - M)$  e  $E(B - V)$  para NGC 2682 são compatíveis com aqueles valores determinados por Bonatto & Bica (2003) obtidos com dados 2MASS e cujos valores são:  $\tau = 3.2 \pm 0.4$  Gyr,  $d_\odot = 0.87 \pm 0.04$  kpc e  $E(B - V) = 0.0$ . Na comparação com Oliveira *et al.* (2013) ( $\log(\text{age}) = 9.45 \pm 0.10$ ,  $d_\odot = 808 \pm 90$  pc e  $E(B - V) = 0.03 \pm 0.01$ ) vemos que os nossos resultados para  $(m - M)$  e  $E(B - V)$  são similares com os resultados deles, porém quando se pensa em termos de idade, a nossa determinação o superestima.

M 67 faz parte da lista de 72 aglomerados aberto cujas determinações dos parâmetros são ditos acurados. Esta lista foi criada por Paunzen & Netopil (2006) a partir da media dos valores de distintas publicações encontradas na literatura. Nesta lista os valores de  $\tau$ ,  $d_\odot$  e  $E(B - V)$  para este objeto são:  $4.09 \pm 0.96$  Gyr,  $820 \pm 47$  pc e  $0.05 \pm 0.02$  respectivamente. Assim, podemos ver que as nossas determinações medianas para M 67 estão de acordo com os resultados presente na lista. Quanto a nossa determinação mediana da metalicidade, vemos que além do valor está próximo da metalicidade solar, podemos dizer que ela está de acordo com determinações provenientes da espectroscopia. A saber: Randich *et al.* (2006) conseguiram encontrar o valor de  $+0.03 \pm 0.02$ ; Heiter *et al.* (2014) encontraram  $+0.00 \pm 0.06$ ; Pancino *et al.* (2010) determinaram  $+0.05 \pm 0.02$ .

## NGC 6939

Andreuzzi *et al.* (2004) usando uma técnica de CMDs sintéticos com o uso das bandas fotométricas UBVRI, obtiveram os seguintes valores para este aglomerado:  $1.0 \leq \tau \leq 1.3$  Gyr,  $11.3 \leq (m - M)_o \leq 11.4$  e  $0.34 \leq E(B - V) \leq 0.38$ . Estes resultados são coerentes em alguns parâmetros com aqueles encontrados em Paunzen & Netopil (2006) ( $1.19 \leq \tau \leq 2.09$  Gyr,  $10.10 \leq (m - M)_o \leq 11.01$  e  $0.37 \leq E(B - V) \leq 0.53$ ). A nossa determinação mediana de idade e avermelhamento está de acordo com ambos os

trabalhos, porém, o nosso valor em módulo de distância, apesar de conseguir agregar o valor encontrado por Andreuzzi *et al.* (2004), é inconsistente em relação aquele encontrado em Paunzen & Netopil (2006). Quanto à metalicidade, o nosso valor mediano é consistente com a determinação obtida por Heiter *et al.* (2014) por meio de técnicas espectroscópicas ( $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.13$ ).

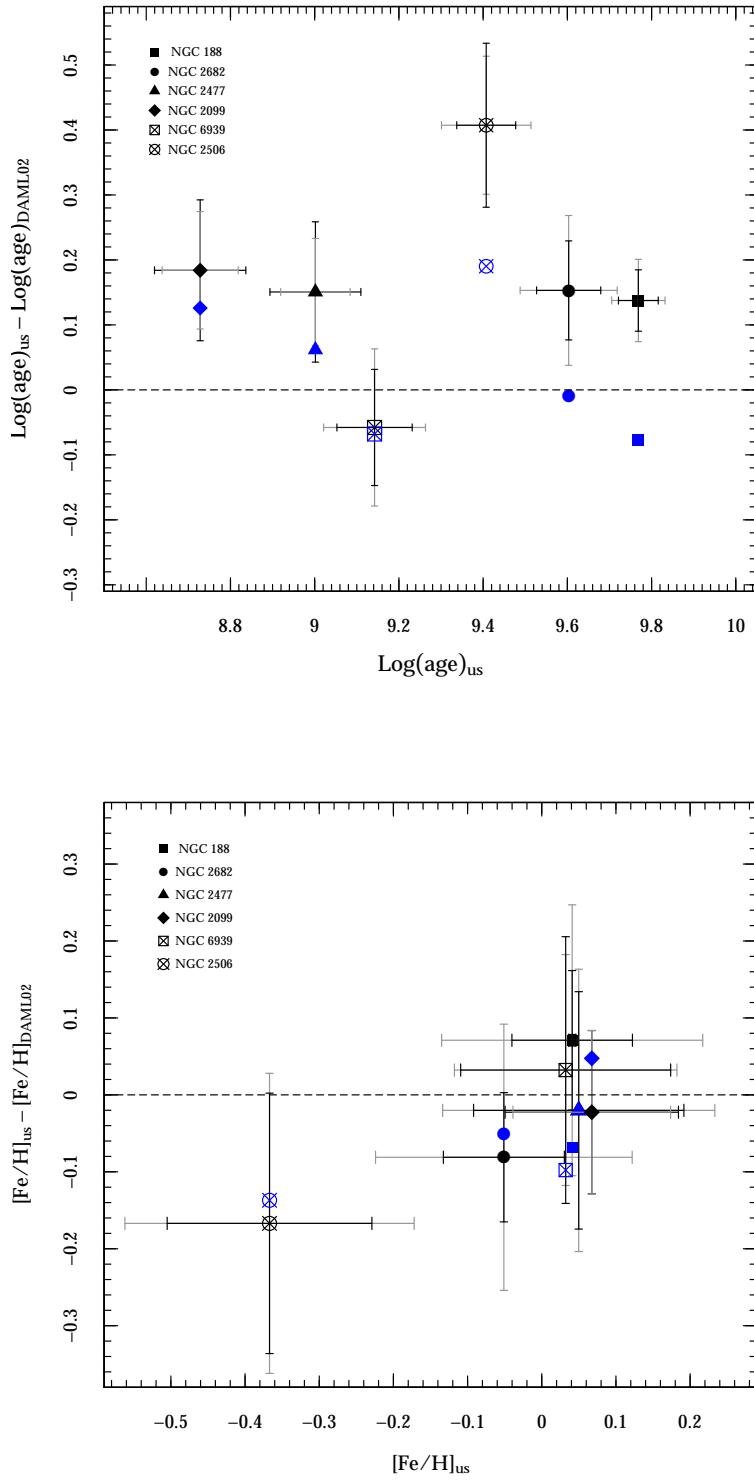


Figura 43: Valor mediano do logaritmo da idade e índice de ferro para todos os aglomerados estudados. Este valor é aquele encontrado considerando todas as determinações obtidas, ou seja, independente do modelo de evolução estelar e da banda fotométrica. As barras de erro de cor preta representam o desvio padrão das determinações em torno da mediana, e as barras de erro de cor cinza representam a incerteza do valor mediano. Os pontos de cor azul representam a diferença entre os nossos valores com aqueles encontrados em: Pauzen & Netopil (2006) para a idade, e Heiter *et al.* (2014) no caso da metalicidade.

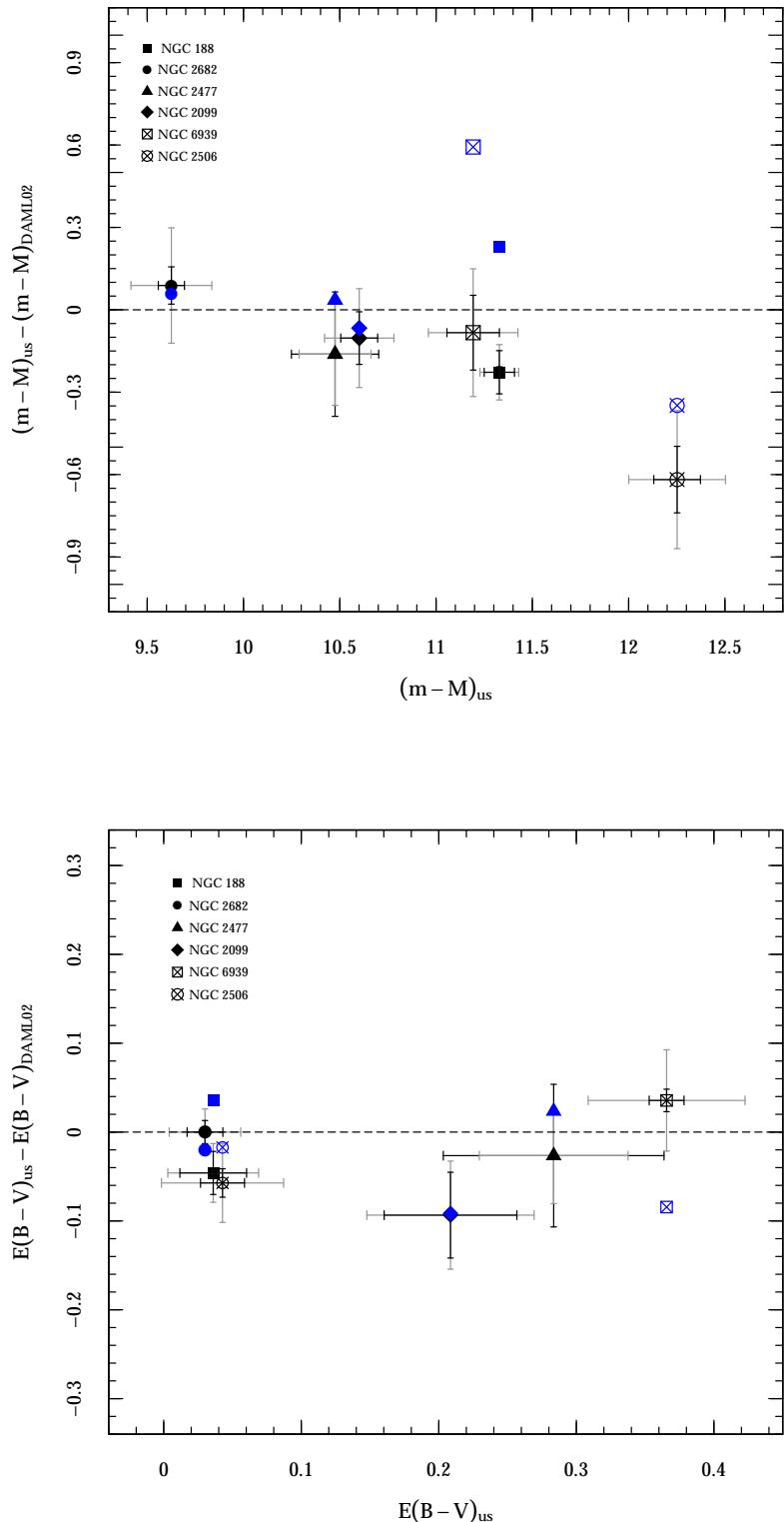


Figura 44: Valor mediano do módulo de distância e avermelhamento para todos os aglomerados estudados. Os pontos de cor azul representam a diferença entre os nossos valores com aqueles encontrados em Pauzen & Netopil (2006). Idem à legenda da figura 43.

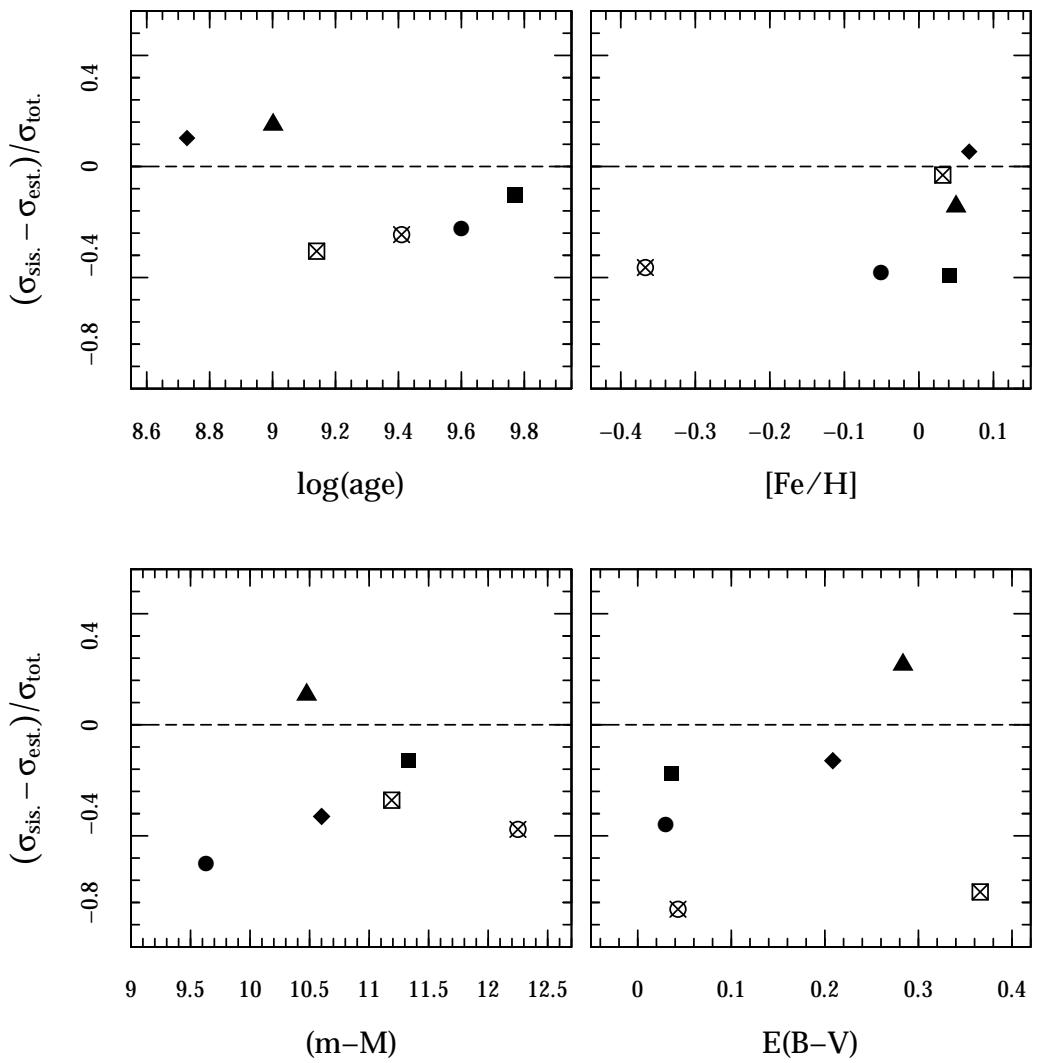


Figura 45: Análise da consistência dos resultados a partir das incertezas em função dos parâmetros físicos de cada aglomerado.  $\sigma$  é a incerteza total obtida a partir da soma em quadratura da incerteza estatística e a incerteza sistemática ( $\sigma^2 = \sigma_{\text{sist.}}^2 + \sigma_{\text{est.}}^2$ ).

## 5 Comentários finais

### 5.1 Conclusões

Na presente dissertação de mestrado foram feitas análises de dados astronômicos, provenientes do banco de dados *VisieR*, com o objetivo de obter de forma auto-consistente valores de idade, metalicidade, módulo de distância e avermelhamento dos aglomerados abertos NGC 188, NGC 2099, NGC 2477, NGC 2506, NGC 2682 e NGC 6939 situados na nossa Galáxia. A obtenção destes parâmetros foi feita através da análise de diagramas cor-magnitude em diferentes bandas espectrais (do óptico até o infravermelho próximo), bem como de diferentes modelos de evolução estelar (Padova, PARSEC, BaSTI e YY). A análise dos CMDs consistiu no ajuste de isócrona a partir de uma técnica numérico-estatística que consegue reproduzir e discriminar, de forma objetiva, CMDs modelados que melhor reproduzem as características de um dado CMD observado. Tal método se baseia na estatística de verossimilhança (*likelihood* - L), nos fornecendo valores mais precisos e com incertezas.

Após obtermos os valores dos parâmetros físicos dos seis aglomerados estudados, analisamos as possíveis dependências nestes valores com as bandas fotométricas e os modelos de evolução estelar adotados. Realizamos também uma análise da consistência dos resultados comparando as incertezas sistemáticas e as aleatórias nas nossas determinações. Adicionalmente, analisamos os valores medianos dos parâmetros de todos os objetos em estudo com os valores encontrados em catálogos e em demais trabalhos publicados na literatura.

Ao analisar os resultados obtidos conforme a banda fotométrica utilizada, percebemos que para a maioria dos aglomerados há uma boa concordância em todos os parâmetros físicos. Entretanto fogem a esta regra as seguintes determinações: (1) as idades de NGC 188 e NGC 2682 parecem ser menores no NIR do que no óptico; (2) o valor de metalicidade de NGC 2506 é maior utilizando-se as bandas VI; (3) os valores de

avermelhamento de NGC 2099 e NGC 2477 obtidos com as bandas JH apresentam claras discrepâncias em relação aos valores recuperados com as bandas BV.

Já em relação aos resultados medianos conforme o modelo de evolução, vimos que os valores de idade e [Fe/H] possuem diferenças sistemáticas significativas para todas as comparações. Por outro lado, há uma tendência de concordância nos valores de módulo de distância e avermelhamento. A exceção mais clara são as isócronas de YY, que por sua vez tendem a recuperar valores em módulo de distância mais baixos que as demais.

Nossas determinações medianas finais (considerando todas as determinações) sugerem que os valores de idade presentes nos catálogos WEBDA e DAML02 estão subestimados por um fator de aproximadamente 0.1 - 0.2 em log(age). Quanto aos valores em [Fe/H] vemos que as nossas determinações medianas são consistentes com aquelas obtidas por outros autores por meio da espectroscopia de estrelas gigantes, assegurando confiabilidade ao método apresentado por nós.

Nossas determinações finais para o módulo de distância indicam ainda uma boa concordância dos nossos resultados com os encontrados na literatura para NGC 2099, NGC 2477, NGC 2682 e NGC 6939. Entretanto os valores de módulo de distância para os aglomerados NGC 188 e NGC 2506 encontrados no catálogo DAML02 devem estar provavelmente superestimados. Em particular, esta discrepância para NGC 2506 chega a ser de 0.6 para o  $(m - M)_o$ , enquanto que na comparação com os resultados de Paunzem & Netopil (2006) ela se reduz pela metade. Em relação aos valores para o avermelhamento, notamos que as nossas determinações tendem a recuperar valores mais baixos do que os encontrados em DAML02, em particular para NGC 2099 e NGC 2477.

Analizando as incertezas estatística e sistemática das determinações medianas finais, conseguimos verificar a consistência entre os nossos resultados. No caso dos aglomerados NGC 188, NGC 2506, NGC 2682 e NGC 6939, os 12 ajustes de isócrona se mostraram consistentes entre si. Ao nosso ver isso é um ótimo atestado de acurácia, trazendo confiabilidade aos nossos resultados. Aplicando a mesma análise, agora para os aglomerados NGC 2477 e NGC 2099, podemos verificar a consistência destes resultados, porém com algumas exceções: (1) os valores de idade, módulo de distância e avermelhamento de

NGC 2477 apresentam incertezas sistemáticas que superam as aleatórias, e desta forma não se pode dizer que são consistentes entre si; (2) o mesmo também pode ser dito em relação ao valor de metalicidade de NGC 2099.

## 5.2 Perspectivas

Como perspectiva para os passos seguintes da pesquisa, iremos:

- Buscar as razões das variações/discrepâncias dos nossos resultados, objetivando verificar se elas são devido a problemas com os modelos de evolução estelar (relações cor-temperatura empregadas; eficiência no *overshooting* nuclear; etc) ou calibração fotométrica nos dados utilizados;
- Procurar em bancos de dados astronômicos dados fotométricos na banda I para os aglomerados NGC 2477 e NGC 2099, reobtendo em seguida os valores dos parâmetros físicos nas diferentes bandas e modelos;
- Obter isócronas de BaSTI e YY com menores intervalos em metalicidade;
- Estender a análise para um número maior de aglomerados abertos, como também para um número maior de modelos de evolução estelar (Dartmouth, PEL, Geneva, etc).

## Referências

- Alexander, D. R. & Ferguson J. W., Low-Temperature Rosseland opacities, The Astro. Jornal, 1994, Vol. 437, pag. 879
- Alves, V. M., Pavani, D. B., Kerber, L. O & Bica, E., On open cluster physical parameters from 2MASS data, New Astronomy, 2012, vol. 17, pag. 488
- Andreuzzi, G., Bragaglia, A., Tosi, M., Marconi, G., UBVRI photometry of the intermediate-age open cluster NGC 6939, MNRAS, 2004, vol. 348, pag. 297
- Bessell, M. S., UBVRI passbands, PASP, 1990, vol. 102, pag. 1181
- Bessell, M. S., Standard Photometric Systems, Annu. Rev. Astro. Astrophys, 2005, vol 43, pag. 293
- Bonatto, C., Bica, E. & Santos Jr, J. F. C., Spatial dependence of 2MASS luminosity and mass functions in the old open cluster NGC 188, A&A, 2005, vol. 433, pag. 917
- Bonatto, C. & Bica, E., Mass Segregation in M 67 with 2MASS, A&A, 2003, Vol. 405, pag. 525
- Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L & Salasnich, B., PARSEC: stellar tracks and isochrones with the Padova & TRiste Stellar Evolution Code, MNRAS, 2012, vol. 427, pag. 127
- Canuto, V. M., Overshooting in Stars: a New Formulation, ASP conference Series, 1999, Vol. 173, pag. 133
- Canuto, V. M., Semiconvection and Overshooting: Schwarzschild and Ledoux Criteria Revisited, ApJ, 2000, Vol. 534, pag. 113
- Canuto, V. M., Stellar mixing, A&A, 2011, Vol. 528, A80
- Cardelli, J. A., Clayton, G. C. & Mathis, J. S., The Relationship Between Infrared, optical, and ultraviolet extinction, AJ, 1989, Vol. 345, pag. 245
- Carreta, E., Bragaglia, A., Gratton, R. G. & Tosi, M., Iron abundance from high-resolution spectroscopy of the open clusters NGC 2506, NGC 6134, and IC 4651, A&A, 2004, Vol. 422, pag. 951
- Demarque, P., Woo, J-H., Kim, Y-C. and Yi, S. K., YY isochrones with an improved core overshoot treatment, ApJ, 2004, Vol. 155, pag 667
- Dias, B., Kerber, L. O., Barbuy, B., Santiago, B., Ortolani, S. & Balbinot, E., Self-consistent physical parameters for five intermediate-age SMC stellar clusters from CMD modelling, A&A, 2014, vol. 561, A106
- Dias, W. *et al.*, Proper motions of the optically visible open clusters based on the UCAC4 catalog, A&A, 2014, Vol. 564, A79

- Dotter, A., Chaboyer, B., Jevremović, D., Kostov, V., Baron, E. & Ferguson, J. W., The Dartmouth Stellar Evolution Database, The Astro. Journal Suppl. Series, 2008, Vol. 178, pag. 89
- Gallart, C., Zoccali, M., Aparicio, A., The Adequacy of Stellar Evolution Models for the Interpretation of the Color - Magnitude Diagrams of Resolved Stellar Populations, Annu. Rev. Astro. Astrophys, 2005, Vol. 43, pag. 387
- Girardi, L., Bertelli, G., Bressan, A & Chiosi, C., Theoretical isochrones in several photometric systems, A&A, 2002, vol. 391, pag. 195
- Grocholski, A. J. & Sarajedini, A., WIYN Open Cluster Study - XVI. Optical/infrared photometry and comparisons with theoretical isochrones, MNRAS, 2003, Vol. 345, pag. 1015
- Heiter, U., Soubiran, C., Netopil, M. & Paunzen, E., On the metallicity of open clusters. II Spectroscopy, A&A, 2014, vol. 561, pag. 93
- Iglesias, C. A. & Rogers F. J., Updated OPAL Opacities, The Astro. Jornal, 1996, vol. 464, pag. 943
- Jacobson, H. R., Friel, E. D. & Pilachowski, C. A., Na, Al, and O abundances of open clusters NGC 7142, NGC 6939 and IC 4756, The Astro. Journal, 2007, vol. 134, pag. 1216
- Jacobson, H. R., Pilachowski, C. A., Friel, E. D., A Chemical Abundance Study of 10 Open Clusters Based on WIYN-HYDRA Spectroscopy, ApJ, 2011, vol. 142, pag. 59
- Kalirai, J. S. & Tosi, M., Interpreting the colour-magnitude diagrams of open star clusters through numerical simulations, MNRAS, 2004, vol. 351, pag. 649
- Kerber, L. O., Santiago, B. X., Castro, R. & Valls-Gabaud, D., Analysis of colour-magnitude diagrams of rich LMC clusters: NGC1831, A&A, 2002, Vol. 390, pag. 121
- Kerber, L. O. & Santiago, B. X., Physical parameters of rich LMC clusters from modeling of deep HST colour-magnitude diagrams, A&A, 2005, vol. 435, pag. 77
- Kerber, L. O., Santiago, B. X. & Brocato, E., Physical parameters of 15 intermediate-age LMC clusters from modelling of HST colour-magnitude diagrams, A&A, 2007, vol. 462, pag. 139
- Kharchenko *et al.*, Astrophysical parameters of Galactic open clusters, A&A, 2005, Vol. 438, pag. 1163
- Kupka, F., Convection in Stars, Proceedings IAU Symposium, No. 224, 2004
- Lee, S. H., Kang, Y. W. & Ann, H. B., Deep and wide photometry of the two open clusters NGC 1245 and NGC 2506: CCD observation and physical properties, MNRAS, 2012, Vol. 425, pag. 1567
- Loktin, A. V. & Matkin, N. V., The Characteristics of open star clusters from UBV data, A&A Transactions, 1994, Vol. 4, pag. 153

- Marconi, G., Hamilton, D., Tosi, M., Bragaglia, A., UBGVRI photometry of NGC 2506, MNRAS, 1997, vol. 291, pag. 763
- Marigo P. & Aringer B., Low-Temperature gas opacity, A&A, 2009, Vol. 508, pag. 1539
- Mermilliod, J. C., The Origins Evolutions, and Destinies of Binary Stars in Clusters, ASP Conf. Ser., 1996, vol. 90, pag. 475
- Monteiro, H., Dias, W. S. & Caetano, T. C., Fitting isochrones to open cluster photometric data: A new global optimization tool, A&A, 2010, Vol. 516, A2
- Mihalas, D., Hummer, D. G., Mihalas, B. W. & Dappen, W., The equation os state for stellar envelopes. The Astro. Journal, 1990, vol. 350, pag. 300
- Naylor, T. & Jeffries, R. D., A maximum-likelihood method for fitting colour-magnitude diagrams, MNRAS, 2006, vol. 373, pag. 1251
- Nilakshi, Sagar, R., A comprehensive study oh the rich open cluster NGC 2099 based on deep BVI CCD observations, A&A, 2002, Vol. 381, pag. 65
- Ochsenbein, F., Bauer, P. & Marcout, J., The VizieR database of Astronomical Catalogues, A&A, 2000, Vol. 143, pag. 23
- O'Donnell, J. E.,  $R_v$ -Dependent optical and near-ultraviolet extinction, AJ, 1994, Vol. 442, pag. 158
- Oliveira, A. F., Monteiro, H., Dias, W.S. & Caetano, T.C., Fitting isochrones to open cluster photometric data. III Estimating metallicities from UVB photometry, A&A, 2013
- Pancino, E., Carrera, R., Rossetti, E. & Gallart, C., Chemical abundance analysis of the open clusters Cr 110, NGC 2099 (M 37), NGC 2420, NGC 7789, and M 67 (NGC 6939), A&A, 2010, Vol. 511, A56
- Paunzen, E. & Netopil, M., On the current status of open cluster parameters, MNRAS, 2006, Vol. 371, pag. 1641
- Paunzen, E., Heiter, U., Netopil, M. & Soubiran, C., On the metallicity of open clusters. I Photometry, A&A, 2010, Vol. 517, A32
- Pietrinferni, A., Cassisi, S., Salaris, M & Castelli, F., A large stellar evolution database for population synthesis studies. I scaled solar models and isochrones, ApJ, 2004, Vol. 612, pag. 168
- Piotto, G., Observations of multiple populations in star cluster, Proceedings IAU Symposium No. 258, 2009, pag. 233
- Randich, S., *et al.*, Element abundance of unevolved stars in the open cluster M67, A&A, 2006, Vol. 450, pag. 557
- Rey, S.-C., Yoon, S.-J. & Lee, Y.-W., CCD photometry of the classic second-parameter globular clusters M3 and M13, AJ, 2001, Vol. 122, pag. 3219

- Salpeter, E. E., The Luminosity function and stellar evolution, ApJ, 1955, Vol. 121, pag. 161
- Shilbach, E., Robichon, N., Souchay, J., Guibert, J., Membership probabilities in the Pleiades Field, A&A, 1995, Vol. 299, pag. 696
- Sestito *et al.*, Old open clusters as key tracers of Galactic chemical evolution, A&A, 2006, Vol. 458, pag. 121
- Skrutskie, M. F., *et al.*, The Two Micron All Sky Survey (2MASS), ApJ, 2006, vol. 131, pag. 1163
- Stetson, P. B., McClure, R. D. & Vandenberg, D. A., A Star Catalog for the Open Cluster NGC188, PASP, 2004, vol. 116, pag. 1012
- Twarog, B. A., Ashman, K. M., Anthony-Twarog, B. J., Some Revised Observational Constraints on the formation and evolution of the Galactic disk, ApJ, 1997, Vol. 114, pag. 2556
- Yadav, R. K. S., *et al.*, Ground-based CCD astrometry with wide-field imagers, A&A, 2008, vol. 484, pag. 609
- Zacharias *et al.*, The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4), ApJ, 2013, Vol. 145, pag. 44