

Bernardo Kappaun de Oliveira

Estudo da dinâmica interna de aglomerados estelares com dados Gaia

Porto Alegre, Brasil

2024

Bernardo Kappaun de Oliveira

Estudo da dinâmica interna de aglomerados estelares com dados Gaia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Física com ênfase em Astrofísica.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Instituto de Física

Departamento de Astronomia

Orientador: Prof. Dr. Charles José Bonatto

Porto Alegre, Brasil

2024

Agradecimentos

Agradeço, de forma geral, a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Agradecimentos especiais são destinados:

Aos meus pais, Oiran e Luciane, pela excelente criação que me proporcionaram. Agradeço pela confiança que vocês depositam em mim, permitindo que eu possa realizar meus sonhos. À minha avó, Maria Leonita, por todo o carinho, companheirismo e acolhimento, em especial nos anos de pandemia. Sou grato a todo amor que recebo de vocês.

Às minhas irmãs, Marla e Júlia, por serem minha fonte de inspiração e encorajamento, tanto nos estudos quanto na vida de maneira geral. Pela parceria e amor que temos e o apoio que vocês me dão, tornando tudo sempre menos complicado.

Ao meu orientador, Prof. Charles, pelo aprendizado, suporte e excelente orientação fornecidos, mesmo durante esse breve período de trabalho. Aos membros da banca, por aceitarem o convite de avaliação deste trabalho e pelas sugestões que ajudaram a complementar esta monografia.

Por fim, aos meus amigos, tanto os que fiz durante o período da faculdade quanto os que preservo de minha cidade natal, Encruzilhada do Sul, pelos momentos de descontração, pelas risadas compartilhadas e pelo apoio nos momentos mais desafiadores.

Resumo

A ideia central deste projeto é estabelecer uma análise sistemática da distribuição radial de parâmetros cinéticos em diversos aglomerados estelares, com foco particular em aglomerados abertos. A investigação visa correlacionar tais parâmetros com propriedades fundamentais desses objetos estelares, como idade e massa estelar, conduzida por meio da análise de dados obtidos a partir de observações fotométricas e de movimento próprio, provenientes do satélite Gaia. Essas grandezas astrofísicas são amplamente empregadas para investigar as características universais da Via Láctea mediante fenômenos estelares em escala reduzida. Sabendo que a dispersão de velocidades é determinada pela gravidade do aglomerado, bem como pela energia térmica e cinética dos membros individuais desse objeto, infere-se que a sua idade, assim como a massa, devido a sua relação com a força gravitacional própria, podem afetar sua distribuição de velocidade radial. A idade do aglomerado desempenha um papel crucial nesse aspecto, uma vez que aglomerados mais antigos tiveram um período de evolução mais longo, o que permitiu que fossem submetidos a processos dinâmicos, como colisões e interações estelares, além de interações com o ambiente Galáctico, que puderam alterar sua estrutura e dinâmica. Dentro desse contexto, diagramas cor-magnitude (CMD) podem ser utilizados como contrapartidas observacionais de uma população estelar, uma vez que sua morfologia encapsula propriedades fundamentais associadas ao próprio aglomerado. Para alcançar tal objetivo, empregam-se aplicações computacionais, tais como o *software fitCMD*, que possibilita a obtenção dessas propriedades, além de outros programas que auxiliam no processo de descontaminação por estrelas de campo, com o intuito de realçar a morfologia intrínseca dos CMDs, conferindo maior precisão aos resultados obtidos. Ademais, parâmetros estruturais são derivados a partir da construção e análise dos perfis de densidade radial (RDP) e de dispersão de velocidade radial (VDP). Finalmente, a discussão individual de quatro aglomerados abertos em faixas de idade específicas junto a um aglomerado globular, NGC 6121, é realizada para fins de comparação. De maneira geral, aglomerados abertos jovens carecem de equilíbrio dinâmico, enquanto os mais antigos tendem ao relaxamento.

Palavras-chave: levantamento de dados — aglomerados abertos. evolução dinâmica. parâmetros astrofísicos.

Abstract

The central idea of this project is to establish a systematic analysis of the radial distribution of kinetic parameters in various star clusters, with a particular focus on open clusters. The investigation aims to correlate these parameters with fundamental properties of these stellar objects, such as age and stellar mass, conducted through the analysis of data obtained from photometric observations and proper motion derived from the Gaia satellite. These astrophysical quantities are widely used to investigate the universal characteristics of the Milky Way through stellar phenomena on a reduced scale. Knowing that the velocity dispersion is determined by the gravity of the cluster as well as by the thermal and kinetic energy of the individual members of this object, it is inferred that its age, as well as its mass, due to its relationship with its own gravitational force, can affect its radial velocity distribution. The age of the cluster plays a crucial role in this aspect, since older clusters had a longer evolution period, which allowed them to be subjected to dynamic processes such as collisions and stellar interactions, in addition to interactions with the galactic environment, which could alter their structure and dynamics. Within this context, color-magnitude diagrams (CMD) can be used as observational counterparts of a stellar population, since their morphology encapsulates fundamental properties associated with the cluster itself. To achieve this goal, computational applications are employed, such as the software fitCMD, which enables the obtaining of these properties, in addition to other programs that assist in the process of field star decontamination, with the aim of enhancing the intrinsic morphology of the CMDs and conferring greater precision to the results obtained. Furthermore, structural parameters are derived from the construction and analysis of radial density profiles (RDP) and radial velocity dispersion profiles (VDP). Finally, the individual discussion of four open clusters in specific age ranges along with a globular cluster, NGC 6121, is carried out for comparison purposes. In general, young open clusters lack dynamic equilibrium, while the older ones tend to relax.

Keywords: surveys — open clusters. dynamical evolution. astrophysical parameters.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama cor-magnitude para 20.546 estrelas próximas	12
Figura 2 – Exemplos de aglomerados separados e unidos às estrelas de campo . . .	21
Figura 3 – Exemplo de filtragem de um <i>melted cluster</i>	22
Figura 4 – Diagramas de ponto vetorial de movimento próprio em ascensão reta e declinação para aglomerados nas faixas de idade de 10, 50, 100 e 1000 Myr respectivamente	28
Figura 5 – VDPs para aglomerados na faixa de idade de 10 Myr	29
Figura 6 – VDPs para aglomerados na faixa de idade de 50 Myr	29
Figura 7 – VDPs para aglomerados na faixa de idade de 100 Myr	30
Figura 8 – VDPs para aglomerados na faixa de idade de 1000 Myr	30
Figura 9 – Diagramas cor-magnitude com ajuste de isócronas para aglomerados na faixa de idade de 10 Myr	31
Figura 10 – Diagramas cor-magnitude com ajuste de isócronas para aglomerados na faixa de idade de 50 Myr	32
Figura 11 – Diagramas cor-magnitude com ajuste de isócronas para aglomerados na faixa de idade de 100 Myr	33
Figura 12 – Diagramas cor-magnitude com ajuste de isócronas para aglomerados na faixa de idade de 1000 Myr	34
Figura 13 – Massa estelar dinâmica contra massa estelar fotométrica para os aglomerados abertos	35
Figura 14 – Diagrama cor-magnitude com ajuste de isócrona para Collinder 69 . . .	37
Figura 15 – Funções de luminosidade de Collinder 69	37
Figura 16 – Perfil de densidade radial de Collinder 69	38
Figura 17 – Perfil de dispersão de velocidade de Collinder 69	38
Figura 18 – Diagrama cor-magnitude com ajuste de isócrona para Blanco 1	39
Figura 19 – Funções de luminosidade de Blanco 1	39
Figura 20 – Perfil de densidade radial de Blanco 1	39
Figura 21 – Perfil de dispersão de velocidade de Blanco 1	39
Figura 22 – Diagrama cor-magnitude com ajuste de isócrona para NGC 2281	40
Figura 23 – Funções de luminosidade de NGC 2281	40
Figura 24 – Perfil de densidade radial de NGC 2281	41
Figura 25 – Perfil de dispersão de velocidade de NGC 2281	41
Figura 26 – Perfil de densidade radial de NGC 2204	41
Figura 27 – Perfil de dispersão de velocidade de NGC 2204	41
Figura 28 – Diagrama cor-magnitude com ajuste de isócrona para NGC 2204	42
Figura 29 – Funções de luminosidade de NGC 2204	42

Figura 30 – Diagrama cor-magnitude com ajuste de isócrona para NGC 6121	43
Figura 31 – Funções de luminosidade de NGC 6121	43
Figura 32 – Perfil de densidade radial de NGC 6121	43
Figura 33 – Perfil de dispersão de velocidade de NGC 6121	43

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros e coordenadas (equatoriais e galácticas) para os aglomerados abertos selecionados nas faixas de idade de 7 e 7.7 log anos a partir do catálogo WEBDA	19
Tabela 2 – Parâmetros e coordenadas (equatoriais e galácticas) para os aglomerados abertos selecionados nas faixas de idade de 8 e 9 log anos a partir do catálogo WEBDA	20
Tabela 3 – Parâmetros fundamentais obtidos para aglomerados abertos nas faixas de idade de 10 Myr e 50 Myr a partir do programa <i>fitCMD</i>	26
Tabela 4 – Parâmetros fundamentais obtidos para aglomerados abertos nas faixas de idade de 100 Myr e 1 Gyr a partir do programa <i>fitCMD</i>	27

Lista de abreviaturas e siglas

CMD	Diagrama cor-magnitude
GC	Aglomerado globular
GMC	Nuvem molecular gigante
Gyr	Bilhões de anos
IMF	Função de massa inicial
LF	Função de luminosidade
MS	Sequência principal
Myr	Milhões de anos
OC	Aglomerado aberto
RDP	Perfil de densidade radial
RGB	Ramo das gigantes vermelhas
VDP	Perfil de dispersão de velocidade
VPD	Diagrama de ponto vetorial

Sumário

I	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
1	INTRODUÇÃO	11
1.1	A vida de uma estrela conforme observada em um diagrama cor-magnitude	11
1.2	Aglomerados estelares	13
1.3	Dinâmica estelar	14
1.4	Isócronas e a obtenção de parâmetros fundamentais	15
1.5	A missão Gaia	15
II	PREPARAÇÃO DA PESQUISA	17
2	METODOLOGIA	18
2.1	Seleção dos objetos	18
2.2	Filtragem por movimento próprio	21
2.3	Determinação de parâmetros fundamentais	22
2.4	Funções de Luminosidade — LFs	23
2.5	Perfil de Densidade Radial — RDP	23
2.6	Perfil de dispersão de velocidade — VDP	24
III	RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
3	RESULTADOS GERAIS	26
4	DISCUSSÕES	37
4.1	Collinder 69	37
4.2	Blanco 1	38
4.3	NGC 2281	40
4.4	NGC 2204	41
4.5	O aglomerado globular NGC 6121	42
4.6	Observações suplementares	44
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
	REFERÊNCIAS	46

Parte I

Revisão Bibliográfica

1 Introdução

No ano de 1610, Galileu Galilei publicava o livreto *Sidereus Nuncius*, dando a conhecer as novidades que descobrira com a utilização de seu telescópio, anunciado como um novo e revolucionário instrumento científico. Dentro desse trabalho, ele relata:

... as seis estrelas do Touro chamadas Plêiades (digo seis porque a sétima quase nunca aparece) contidas nos céus entre limites muito estreitos. Perto destas encontram-se mais de quarenta outras estrelas invisíveis, nenhuma das quais afastada das seis antes mencionadas mais do que meio grau (GALILEI; LEITAO, 2010, p. 175).

e infere que “a Galáxia não é outra coisa senão um aglomerado de incontáveis estrelas reunidas em grupo” (GALILEI; LEITAO, 2010, p. 177).

Depois de quatro séculos desde as primeiras observações de Galileu, os aglomerados estelares permanecem misteriosos, buscando-se ainda entender a física da estrutura das estrelas e sua mudança no tempo — sua evolução. Com a rápida expansão da ciência nas últimas décadas, novos aspectos relacionados ao ciclo de vida estelar foram revelados por meio de avanços tecnológicos e observacionais (KIPPENHAHN; WEIGERT; WEISS, 2012, p. vii) e o dilema de como as estrelas se formaram está no centro de grande parte da pesquisa em astrofísica contemporânea (MCKEE; OSTRIKER, 2007).

O estudo da formação estelar pode ser dividido em duas áreas principais: a “microfísica” e a “macrofísica”. A microfísica enfoca na geração de estrelas individuais ou binárias, investigando questões como as propriedades relacionadas ao meio em que se constituem e os processos que afetam o gás durante a criação de uma protoestrela. A macrofísica, por outro lado, aborda a formação de sistemas de estrelas, como aglomerados e galáxias, concentrando-se em entender os fatores que determinam a distribuição das condições físicas em regiões de formação estelar (MCKEE; OSTRIKER, 2007).

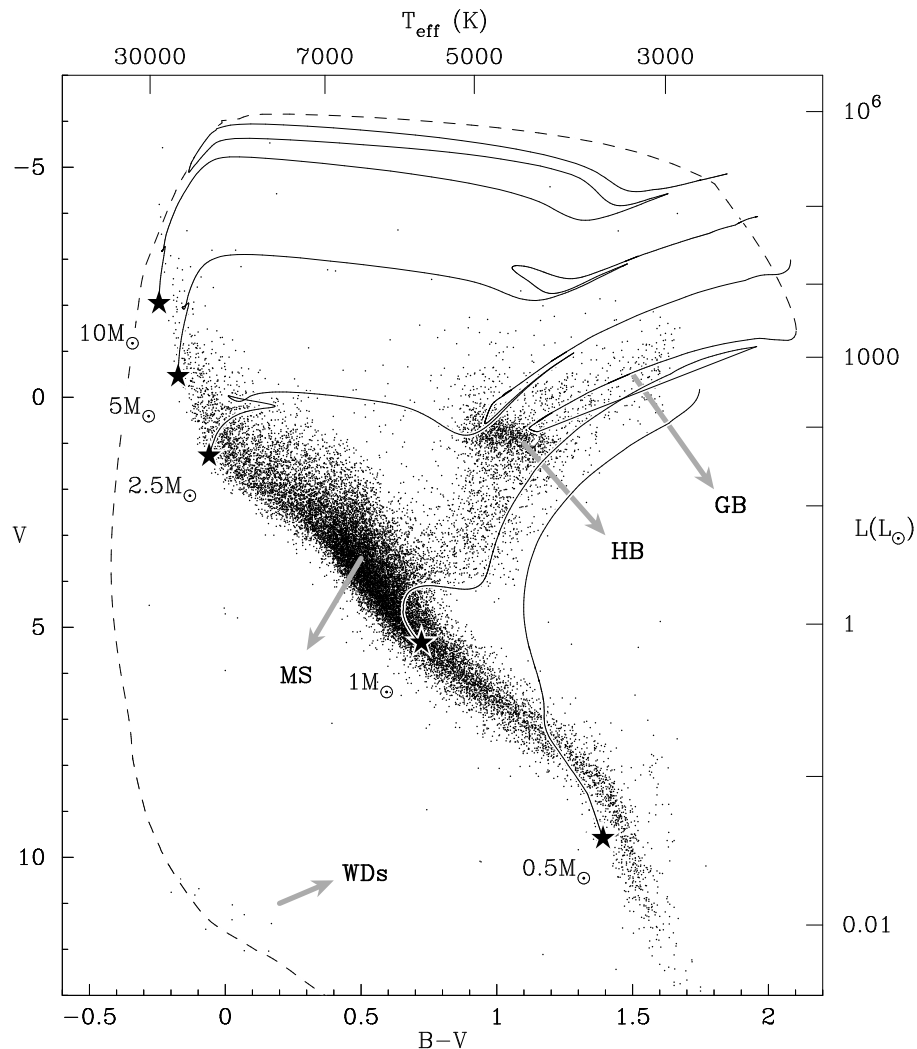
Inicialmente, proceder-se-á a realização de uma revisão no âmbito da microfísica com o propósito de compreender o fenômeno da evolução estelar mediante a utilização de recursos como o diagrama cor-magnitude, para que em seguida seja abordado o conceito de aglomerados estelares no contexto da macrofísica.

1.1 A vida de uma estrela conforme observada em um diagrama cor-magnitude

O diagrama cor-magnitude (CMD) é uma representação gráfica da magnitude absoluta em relação à cor da estrela, sendo uma contrapartida observacional do diagrama

Hertzsprung-Russell (HERTZSPRUNG, 1911; RUSSELL, 1914) em que o tipo espectral é utilizado ao invés da cor. Como essa está intrinsecamente ligada à temperatura efetiva, cada ponto presente nesse diagrama corresponde a uma luminosidade única, temperatura efetiva e raio estelar, todos determinados a partir da aplicação da lei de Stefan-Boltzmann (BINNEY; TREMAINE, 2011, p. 6) com a modelagem de estrelas como corpos ideais — os chamados corpos negros. A distribuição de estrelas em um CMD, como representado pela Figura 13, está intrinsecamente relacionada à massa, idade e composição química da amostra representada, visto que a evolução estelar, fortemente dependente da massa, muda a cor e a magnitude de cada estrela, levando a variações na morfologia das sequências evolutivas (BONATTO, 2018).

Figura 1 – Diagrama cor-magnitude para 20.546 estrelas próximas



A figura apresenta a fase de sequência principal (MS), ramo horizontal (HB) e ramo das gigantes vermelhas (GB) além das anãs brancas (WDs). As linhas são traços evolutivos de modelos estelares de 0.5, 1.0, 2.5, 5 e 10 M_{\odot} .

Fonte: Marc van der Sluys¹/ CC BY-SA 3.0.

¹ Disponível em: <<http://hemel.waarnemen.com/Informatie/Sterren/hoofdstuk6.html#cmd>>. Acesso em 24 ago. 2023.

Uma protoestrela será, de maneira inicial, luminosamente fraca e “fria”, residindo no canto inferior direito de um CMD (STAHLER; SHU; TAAM, 1980). É na fase de sequência principal (MS) que a estrela produz energia a partir da fusão nuclear de hidrogênio em hélio. Ao longo desse período, a estrela permanece em equilíbrio hidrostático e sua estrutura só sofre mudanças graduais na composição química como resultado das reações nucleares. Por conta disso, essa é a parte mais longa da vida de uma estrela. Quando o suprimento de hidrogênio no núcleo estelar se esgota, a fase de sequência principal é encerrada e a estrela “desloca-se” para fora da localização da MS, indo em direção ao canto superior direito do diagrama. Essa região é conhecida como ramo das gigantes vermelhas (RGB) e corresponde aos estágios iniciais da queima de hélio. O ponto de intersecção entre as fases MS e RGB é denominado *turn-off point* (BINNEY; TREMAINE, 2011, p. 10).

1.2 Aglomerados estelares

O nascimento de estrelas no universo se dá de maneira conjunta em nuvens moleculares — conhecidas também como nebulosas, principalmente em nuvens moleculares gigantes (GMCs) as quais, sob ação de sua própria gravidade associada a alguma perturbação externa, iniciam um processo de contração que leva à fragmentação em regiões que, por sua vez, dão origem a protoestrelas (LADA; LADA, 2003; KRAUSE et al., 2020). Essas nuvens possuem temperaturas entre 10–30 K e a maioria de seus átomos de gás estão ligados como moléculas, sendo o hidrogênio molecular a principal componente (KARTTUNEN et al., 2007, p. 317). Devido a esse nascimento coletivo, as estrelas de um aglomerado acabam possuindo algumas características semelhantes entre si, como idades aproximadas e composição química inicial (BLAND-HAWTHORN; KRUMHOLZ; FREEMAN, 2010). Esses aglomerados podem ser categorizados em dois tipos distintos: aglomerados abertos e aglomerados globulares.

Os aglomerados abertos (OCs) são sistemas irregulares compostos geralmente por algumas dezenas a algumas centenas de estrelas. No disco Galáctico, novos aglomerados desse tipo são constantemente gerados, tendo, portanto, a maioria deles idade inferior a 10 milhões de anos. Por conta disso possibilitam, em princípio, estudos diretos dos processos físicos envolvidos em sua formação. Aglomerados mais antigos desse tipo são menos comuns, uma vez que a maioria foi desfeita devido, possivelmente, a interações gravitacionais decorrentes do encontro com nuvens de gás interestelar, à rotação diferencial da Via Láctea ou por conta da energia cinética dos membros do aglomerado (BINNEY; TREMAINE, 2011, p. 29).

Em contraste, aglomerados globulares (GCs) são sistemas estelares muito mais massivos, contendo acima de cem mil estrelas em uma distribuição aproximadamente esférica, não contendo gás, poeira ou estrelas jovens, implicando também no fato de que

são muito antigos. Na Via Láctea estima-se que há entre 150 a 200 desses aglomerados (BINNEY; TREMAINE, 2011; KARTTUNEN et al., 2007, p. 29 e p. 339–344).

1.3 Dinâmica estelar

Brevemente, um sistema de estrelas se comporta como um fluido, mas com propriedades não usuais. Em um fluido as interações entre corpos são essenciais em sua dinâmica, entretanto, em sistemas estelares, encontros entre estrelas são extremamente raros. A modelagem de sistemas astrofísicos pode ser muito bem aproximada pela familiar [Equação 1.1](#) de Newton para sistemas gravitacionais de N -corpos, visto que, em escalas cósmicas, a força gravitacional domina e outras forças, como a gerada pela pressão do gás, somente são importantes em pequena escala (HEGGIE; HUT, 2003, p. 3).

$$\ddot{\mathbf{r}}_i = -G \sum_{j \neq i}^N m_j \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3} \quad (1.1)$$

em que \mathbf{r}_j é a posição vetorial do j -ésimo corpo no tempo t , m_j é a sua massa, G é a constante gravitacional universal e os índices ponto representam a notação de Newton, na qual o termo $\ddot{\mathbf{r}}_i$ é definido como a aceleração, ou a segunda derivada em relação ao tempo de \mathbf{r}_j .

Conforme mencionado previamente ([seção 1.2](#)) estrelas nascem conjuntamente dando origem a aglomerados abertos. A partir disso, evoluem dinamicamente por conta de processos internos (por exemplo, perda de massa durante a evolução estelar, segregação de massa e evaporação de estrelas de baixa massa) e externos (interações de maré com o disco e o bojo e colisões com GMCs) (BONATTO; BICA, 2007). Dado que a dispersão de velocidades é determinada pela gravidade do aglomerado estelar, bem como pela energia térmica e cinética dos membros individuais desse objeto, é possível supor que a idade de um aglomerado, bem como a massa, devido à sua relação com a força gravitacional própria, podem influenciar a sua distribuição de velocidade radial, uma vez que os aglomerados mais velhos evoluíram por mais tempo para sofrer processos dinâmicos, como colisões estelares, interações estelares e interações com o ambiente Galáctico, o que permitiu alterar sua estrutura e dinâmica.

Gieles, Sana e Zwart (2010) denotam que, a partir da dispersão de velocidade radial nos aglomerados, é possível estimar valores para sua massa baseado no teorema do virial em sua forma escalar, dado pela [Equação 1.2](#).

$$2K + W = 0 \quad (1.2)$$

em que $W = \frac{GM}{r}$ é definido como a energia potencial total do sistema e $K = \frac{1}{2}M\langle v^2 \rangle$ a energia cinética total para um sistema estelar de massa M e velocidade quadrática

média das estrelas $\langle v^2 \rangle$ (BINNEY; TREMAINE, 2011, p. 360). A partir da Equação 1.2 e assumindo que o sistema, composto por estrelas únicas, esteja em equilíbrio (em um estado, em média, estável) chega-se à Equação 1.3 para a massa total do aglomerado — conhecida geralmente como massa dinâmica (M_{dyn}) quando estabelecida dessa forma — em função de parâmetros que podem ser obtidos com algumas das técnicas abordadas nesse trabalho, como o perfil de dispersão de velocidade.

$$M_{\text{dyn}} = \frac{\eta \sigma_{\text{dyn}}^2 r_{\text{eff}}}{G} \quad (1.3)$$

na qual G é a constante gravitacional, σ_{dyn} é a dispersão de velocidade radial no aglomerado, r_{eff} é o raio efetivo (i.e., raio de meia-luz) e $\eta \cong 9.75$ é uma constante que depende ligeiramente do perfil de densidade (GIELES; SANA; ZWART, 2010).

1.4 Isócronas e a obtenção de parâmetros fundamentais

Uma isócrona é uma curva representada em CMDs para uma população de estrelas que possui a mesma idade e composição química, porém com massas diferentes (KIPPENHAHN; WEIGERT; WEISS, 2012, p. 328). Mediante a observação do desvio das estrelas da sequência principal para o início da fase de gigantes vermelhas (*turn-off point*), torna-se possível estimar a idade dos aglomerados. Essa estimativa é viável, uma vez que se pode calcular a massa das estrelas que abandonaram a sequência principal, sendo sabido que essa massa exerce uma influência crítica sobre o tempo de vida das estrelas. Outra maneira de realizar tal aferição é comparando de maneira direta o valor da magnitude absoluta encontrado no *turn-off point* com isócronas. Para obtenção de outros parâmetros a partir de CMDs é possível basear-se em uma função de massa inicial (IMF) — que, segundo Chabrier (2003), pode ser dada como uma função de densidade de probabilidade — com idade, metalicidade e massa definidas deslocada a dada distância do Sol e afetada pelo avermelhamento além da dispersão e completude fotométrica — descrevendo a probabilidade de uma estrela ter uma certa massa (BONATTO, 2018).

1.5 A missão Gaia

Lançada em 2013, Gaia é uma missão da Agência Espacial Europeia (ESA) de pesquisa astrométrica, fotométrica e espectroscópica de todo o céu (PANCINO et al., 2012). A combinação única de sua localização espacial e *design* resulta em uma precisão, sensibilidade, alcance dinâmico e abrangência celeste excepcionais. Essas qualidades são praticamente inatingíveis mediante instalações terrestres projetadas para pesquisas fotométricas ou espectroscópicas de natureza científica comparável (Gaia Collaboration et al., 2016). A série de lançamentos de dados de Gaia representa um progresso notável, trazendo

uma quantidade sem precedentes, qualidade superior e uma diversidade extensa de dados astrofísicos. O Gaia *Data Release 3* (DR3), divulgado em junho de 2022, é resultado do processamento de dados brutos coletados pelos instrumentos Gaia durante os primeiros trinta e quatro meses da missão a partir do Gaia *Data Processing and Analysis Consortium* (DPAC). Se destaca por apresentar a coleção mais abrangente de espectrofotometria e de velocidades radiais cobrindo todo o céu, além de ser a maior compilação de fontes variáveis já disponibilizada (VALLENARI et al., 2023).

Parte II

Preparação da pesquisa

2 Metodologia

2.1 Seleção dos objetos

A seleção dos aglomerados a serem analisados foi realizada partindo do catálogo WEBDA¹, interface desenvolvida originalmente no antigo Instituto de Astronomia na Universidade de Lausanne (agora EPFL), Suíça, por Mermilliod (1995). Desde 1 de outubro de 2005 é mantido e aprimorado no servidor WWW da Universidade de Viena (NETOPIL; PAUNZEN; STUTZ, 2012). Foram escolhidos quarenta objetos que se encontram em distâncias inferiores a 3000 parsecs (pc), a fim de minimizar efeitos de completeza e profundidade fotométrica. Além disso, a seleção considerou faixas específicas de idade em escala logarítmica, sendo essas 7, 7.7, 8 e 9 anos (log anos), com dez aglomerados para cada grupo etário. Essa abordagem possibilitou a inclusão de estrelas em diferentes estágios de evolução, indo desde objetos jovens até aqueles com idades mais avançadas. A diversidade de idade é importante para estudar a formação e evolução estelar em várias etapas, propiciando a possibilidade de melhor entendimento dos processos físicos que as impulsionam.

Após escolher os objetos a serem analisados, as coordenadas equatoriais — ascensão reta (α) e declinação (δ) — foram extraídas do WEBDA e aplicadas no serviço TAP Vizier² com dados do satélite Gaia DR3. A partir disso, importaram-se os seguintes dados para cada estrela presente no raio de 1° (à exceção de aglomerados mais próximos, para os quais foram utilizados raios maiores, correspondentes a diâmetros angulares maiores) com centro nas coordenadas fornecidas: paralaxe (Plx), movimento próprio em ascensão reta ($\mu_\alpha \cos \delta$), movimento próprio em declinação (μ_δ), magnitude fotométrica no óptico (Gmag), magnitude fotométrica na banda B (BPmag), magnitude fotométrica na banda R (RPmag), todos com seus respectivos erros. Além disso, extraiu-se os valores para α e δ de cada estrela. Utilizou-se como filtro de qualidade a admissão de estrelas somente com erros no movimento próprio de declinação e ascensão reta menores do que 10 e erros em cada uma das magnitudes menores do que 0.2. De modo a minimizar a contaminação de estrelas de campo em primeiro plano decorrentes do bojo Galáctico, priorizou-se selecionar objetos com latitude galáctica (b) em módulo, maior do que 10, sendo importante frisar, porém, que a maioria dos aglomerados abertos jovens presentes no catálogo WEBDA estão concentrados no plano Galáctico, ou seja, com baixos valores para b . A descontaminação para estrelas remanescentes está detalhada na seção 2.2. Os quarenta aglomerados abertos escolhidos estão nas Tabelas 1 e 2.

¹ Disponível em: <<https://webda.physics.muni.cz/>>

² Disponível em: <<http://tapvizier.cds.unistra.fr/adql/>>

Tabela 1 – Parâmetros e coordenadas (equatoriais e galácticas) para os aglomerados abertos selecionados nas faixas de idade de 7 e 7.7 log anos a partir do catálogo WEBDA

Aglomerados	α (J200) (h m s) (1)	δ (J200) ($^{\circ}$ ' ") (2)	l ($^{\circ}$) (3)	b ($^{\circ}$) (4)	$(m - M)_V$ (mag) (5)	AV (mag) (6)	[Fe/H]	d_{\odot} (pc) (8)	$\log(t_{\text{age}}/\text{yr})$ (9)
ASCC 20	05 28 44	+01 37 47	201.67	-17.53	8.39	0.04	-	450	7.35
ASCC 33	07 03 10	-25 02 59	236.67	-8.73	9.67	0.05	-	800	7.26
ASCC 89	17 23 16	-62 38 23	329.04	-14.56	8.80	0.10	-	500	7.03
Collinder 69	05 35 06	+09 56 00	195.048	-12.003	8.54	0.103	-	441	7.050
Collinder 70	05 35 31	-01 06 00	205.03	-17.35	8.08	0.04	-	391	6.71
NGC 1502	04 07 50	+62 19 54	143.672	7.658	11.92	0.759	-	821	7.051
NGC 1976	05 35 16	-05 23 24	209.010	-19.386	8.16	0.05	-	399	7.11
NGC 2264	06 40 58	+09 53 42	202.936	2.196	9.28	0.051	-0.15	667	6.954
NGC 2362	07 18 41	-24 57 18	238.179	-5.548	11.01	0.095	-	1389	6.914
vdB-Hagen 164	14 48 14	-66 20 23	314.28	-6.07	9.10	0.13	-	550	7.14
Blanco 1	00 04 07	-29 50 00	15.572	-79.261	7.18	0.010	+0.23	269	7.796
Collinder 394	18 52 28	-20 19 00	14.883	-9.236	9.92	0.235	-	690	7.803
IC 4665	17 46 18	+05 43 00	30.619	17.082	8.27	0.174	-	352	7.634
Melotte 20	03 20 36	+48 10 00	146.568	-5.862	6.61	0.09	+0.10	185	7.854
NGC 2186	06 12 07	+05 27 30	203.545	-6.193	11.64	0.272	-	1445	7.738
NGC 2451	07 44 27	-37 40 00	252.051	-6.726	7.57	0.055	-0.45	302	7.648
NGC 2547	08 10 09	-49 12 54	264.465	-8.597	8.42	0.041	-0.16	455	7.557
Ruprecht 12	07 07 19	-28 13 11	239.97	-9.29	9.93	0.05	-	900	7.56
Ruprecht 18	07 24 39	-26 13 00	239.928	-4.941	12.29	0.700	-0.01	1056	7.648
vdB-Hagen 99	10 37 54	-59 11 00	286.558	-0.625	8.70	0.055	-	507	7.605

Nota: Col. (1) – ascensão reta; (2) – declinação; (3) – longitude galáctica; (4) – latitude galáctica; (5) – módulo de distância; (6) – avermelhamento; (7) – metalicidade; (8) – distância ao Sol; (9) – idade.

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WEBDA.

Tabela 2 – Parâmetros e coordenadas (equatoriais e galácticas) para os aglomerados abertos selecionados nas faixas de idade de 8 e 9 log anos a partir do catálogo WEBDA

Aglomerados	α (J200) (h m s) (1)	δ (J200) ($^{\circ}$, ' , ") (2)	l ($^{\circ}$) (3)	b ($^{\circ}$) (4)	$(m - M)_V$ (mag) (5)	AV (mag) (6)	[Fe/H]	d_{\odot} (pc) (8)	$\log(t_{\text{age}}/\text{yr})$ (9)
Alessi 10	20 04 44	-10 28 47	31.64	-20.98	9.23	0.22	-	513	8.71
Messier 45	03 47 00	+24 07 00	166.571	-23.521	5.97	0.030	-	150	8.131
NGC 1039	02 42 05	+42 45 42	143.658	-15.613	8.71	0.070	-0.30	499	8.249
NGC 1647	04 45 55	+19 06 54	180.337	-16.772	9.81	0.370	-	540	8.158
NGC 1817	05 12 15	+16 41 24	186.156	-13.096	12.51	0.334	-0.26	1972	8.612
NGC 2215	06 20 49	-07 17 00	215.993	-10.102	11.49	0.300	-	1293	8.369
NGC 2281	06 48 17	+41 04 42	174.901	16.881	8.93	0.063	+0.13	558	8.554
NGC 2516	07 58 04	-60 45 12	273.816	-15.856	8.37	0.101	+0.06	409	8.052
NGC 2539	08 10 37	-12 49 06	233.705	11.112	10.93	0.082	+0.13	1363	8.570
NGC 6124	16 25 20	-40 39 12	340.741	6.016	10.87	0.750	-	512	8.147
Melotte 25	04 26 54	+15 52 00	180.064	-22.343	3.30	0.010	+0.17	45	8.896
NGC 188	00 47 28	+85 15 18	122.843	22.384	11.81	0.082	-0.02	2047	9.632
NGC 752	01 57 41	+37 47 06	137.125	-23.254	8.40	0.034	-0.08	457	9.050
NGC 2112	05 53 45	+00 24 36	205.872	-12.615	11.60	0.63	-0.11	850	9.301
NGC 2126	06 02 32	+49 52 00	163.237	13.129	11.02	0.20	-	1200	9.10
NGC 2204	06 15 33	-18 39 54	226.014	-16.107	12.36	0.085	-0.33	2629	8.896
NGC 2355	07 16 59	+13 45 00	203.390	11.803	12.08	0.12	-0.07	2200	8.85
NGC 2632	08 40 24	+19 40 00	205.920	32.484	6.39	0.009	+0.14	187	8.863
NGC 2682	08 51 18	+11 48 00	215.696	31.896	9.97	0.059	-	908	9.409
NGC 6819	19 41 18	+40 11 12	73.978	8.481	12.60	0.238	+0.07	2360	9.174

Nota: Col. (1) – ascensão reta; (2) – declinação; (3) – longitude galáctica; (4) – latitude galáctica; (5) – módulo de distância; (6) – avermelhamento; (7) – metalicidade; (8) – distância ao Sol; (9) – idade.

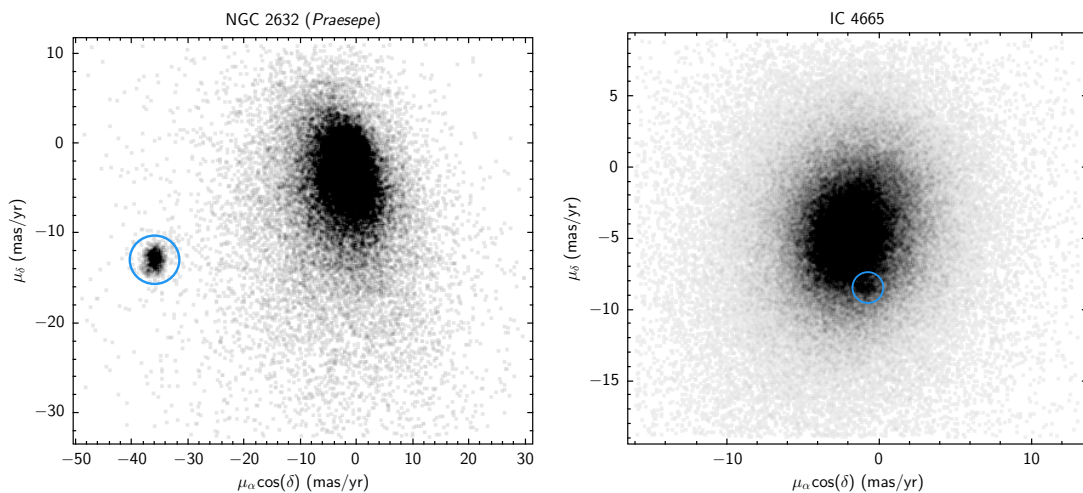
Fonte: Elaboração própria a partir de dados do WEBDA.

2.2 Filtragem por movimento próprio

Com base nos dados fotométricos de aglomerados obtidos aplicando valores de α e δ , é natural que várias outras estrelas não relacionadas a esses objetos estejam incluídas no campo de observação. Nesse cenário, é de fundamental importância a diferenciação entre sistema físico e estrelas de campo. Sabendo que aglomerados — devido à interação gravitacional — são objetos com movimento próprio em ascensão reta e declinação semelhantes, é factível realizar uma filtragem a partir da seleção de regiões de alta densidade de estrelas em um gráfico $\mu_\alpha \cos \delta \times \mu_\delta$, que pode ser denominado como diagrama de ponto vetorial (VPD). Para tal utiliza-se o *software* TOPCAT³, um visualizador gráfico interativo que permite efetuar determinado procedimento. Realiza-se, após, a validação da filtragem plotando um diagrama CMD ($[B_{\text{mag}} - R_{\text{Pmag}}] \times G_{\text{mag}}$), visto que, para aglomerados abertos, o formato diagonal representado principalmente pela sequência principal, como observado na Figura 13, é esperado.

Dentro desse processo, dois casos distintos predominaram. No primeiro, os movimentos próprios dos aglomerados estão totalmente separados das estrelas de campo. Esse tipo de situação é facilmente identificável em VPDs e o processo de seleção do objeto se dá de maneira mais fácil e precisa. Já no segundo caso, as estrelas do aglomerado parecem estar unidas às estrelas de fundo e é mais difícil identificar seus membros, aglomerados desse tipo são denominados por Badawy et al. (2022) como *melted clusters*. A Figura 2 exemplifica essas duas situações.

Figura 2 – Exemplos de aglomerados separados e unidos às estrelas de campo



A figura à esquerda exemplifica um aglomerado, nesse caso NGC 2632, separado das estrelas de campo, destacado pelo círculo azul. Da mesma forma, a figura à direita evidencia o IC 4665 como um *melted cluster*, estando suas estrelas fundidas às de fundo.

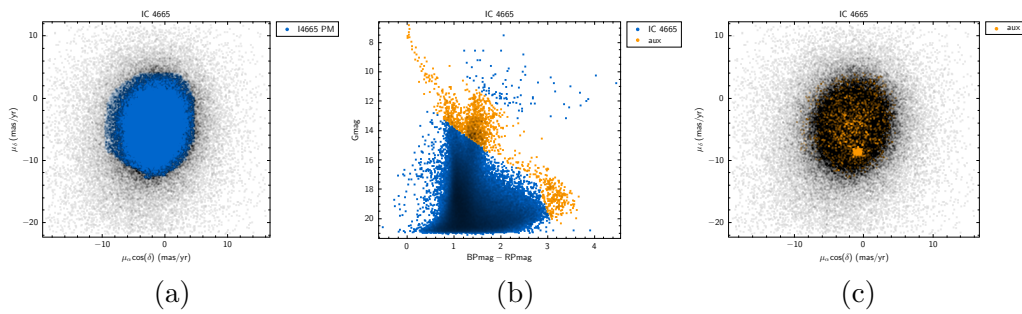
Fonte: O autor.

³ Disponível em: <<https://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>>

No caso de aglomerados separados, em geral, a primeira seleção no VPD já é suficiente para a obtenção de um CMD limpo, representando todas as estrelas do objeto e algumas poucas estrelas de campo, que podem ser retiradas posteriormente.

Já em se tratando de *melted clusters*, é necessário realizar uma análise adicional nos CMDs após selecionar toda a área de movimento próprio. Para isso, no diagrama cor-magnitude, seleciona-se apenas as estrelas que seguem a forma diagonal esperada da MS, para que finalmente, no VPD, consiga-se realizar a distinção entre estrelas do aglomerado e estrelas de fundo. Esses passos estão exemplificados pela Figura 3 para o mesmo aglomerado IC 4665.

Figura 3 – Exemplo de filtragem de um *melted cluster*



A Figura 3a mais à esquerda representa a seleção inicial por movimento próprio. Na Figura 3b, uma seleção auxiliar é realizada eliminando estrelas que não fazem parte das sequências evolutivas. Por fim, na Figura 3c tem-se a representação da seleção auxiliar com clara visualização das estrelas pertencentes ao aglomerado.

Fonte: O autor.

2.3 Determinação de parâmetros fundamentais

Com os dados filtrados, opera-se com o programa *fitCMD* (BONATTO, 2018), que possui como finalidade a extração de parâmetros fundamentais — como massa do objeto (M_{cl}), idade (t_{age}), módulo de distância aparente (DM), avermelhamento (ou excesso de cor, CE) e metalicidade global (Z) — de aglomerados estelares a partir da reprodução de um CMD artificial, obtido junto à busca por diversas isócronas presentes nos modelos PARSEC⁴ v1.2S + COLIBRI PR16/NBC (BRESSAN et al., 2012; CHEN et al., 2014; CHEN et al., 2015; FU et al., 2018; MARIGO et al., 2017). Essas isócronas fornecem uma ampla gama de parâmetros físicos fundamentais para cada massa estelar, desde o início da queima de hidrogênio até a massa correspondente a estrelas em estágios altamente evoluídos, mas ainda observáveis em CMDs (BONATTO; CHIES-SANTOS, 2020).

O primeiro passo pré-execução do programa consiste em definir as faixas de busca de cada parâmetro livre (M_{cl} , t_{age} , DM , CE , Z) a fim de otimizar a busca pelo CMD

⁴ Disponível em: <http://stev.oapd.inaf.it/PARSEC/tracks_v12s.html>

“ideal” diminuindo o número de isócronas a serem tratadas. Além disso, é necessário escolher a função de massa inicial, estando entre as selecionáveis a de [Salpeter \(1955\)](#) ou a distribuição segmentada de [Kroupa \(2001\)](#). Neste trabalho a distribuição de Kroupa é utilizada, pois se adequa melhor a uma ampla faixa de massas estelares.

A partir disso, o programa inicia buscando os parâmetros que produzem o CMD que melhor reproduz o observado. Para tal, utiliza-se de uma abordagem semi-analítica (ASA_{min} ⁵) que minimiza a raiz quadrada média residual entre ambos diagramas cor-magnitude, observados e simulados, variando os parâmetros ao longo da direção de menor discrepância, dessa forma o valor obtido para o resíduo serve como critério de qualidade em adição a análise observacional realizada nos diagramas resultantes ([BONATTO, 2018](#)).

2.4 Funções de Luminosidade — LFs

A função de luminosidade (LF) representa o número de estrelas por categoria de magnitude em um determinado aglomerado. LFs são construídas integrando a densidade estelar ao longo do eixo da magnitude. Isso implica que alguma contribuição de estrelas contaminantes pode estar presente nas LFs observadas. Para uma visualização mais simples, os limites de 1σ podem ser evidenciados. O *software fitCMD* reproduz as LFs observadas, em geral, dentro das incertezas, mesmo no extremo fraco onde a completude é mais importante ([BONATTO, 2018](#)). Por último, o perfil de funções de luminosidade está condicionado às características inerentes de uma população estelar, como sua função de massa inicial, idade e trajetória de formação estelar, além dos processos dinâmicos resultantes na evaporação progressiva das estrelas de menor massa na população ([ŽERJAL et al., 2023](#)).

2.5 Perfil de Densidade Radial — RDP

Os perfis de densidade radial (RDPs) são uma medida da densidade estelar em relação à distância radial do centro de um aglomerado ([BONATTO; BICA, 2008](#)). Eles fornecem uma visão geral da estrutura do objeto, assumindo, por simplicidade, simetria esférica na distribuição radial de estrelas, sendo uma importante ferramenta para o estudo da estrutura interna de aglomerados estelares, permitindo, além disso, a determinação de parâmetros estruturais como o raio central, o raio de meia-luz, o raio de meia-massa e o raio de meia-contagem de estrelas. Os RDPs são construídos por meio de um algoritmo

⁵ ASA, acrônimo para *Adaptive Simulated Annealing*, é um método global de otimização que utiliza o módulo de distância aparente, avermelhamento do primeiro plano, massa do aglomerado, idade, propagação da formação estelar (SFS), fração binária e avermelhamento diferencial (DR) como parâmetros livres ([BONATTO; LIMA; BICA, 2012](#)).

computacional, havendo a contagem de estrelas em anéis concêntricos cuja largura aumenta com a distância ao centro.

2.6 Perfil de dispersão de velocidade — VDP

De maneira análoga, VDPs, acrônimo para perfis de dispersão de velocidade radial, podem ser criados via um algoritmo computacional. Nesse perfil, anéis concêntricos — que da mesma forma se alargam à medida que se afastam do centro — fracionam grupos de estrelas, trazendo consigo um valor para a dispersão de velocidade naquela região. Junto a isso, o raio de meia-luz e o raio de meia-massa são determinados em conjunto com a massa dinâmica do objeto, estabelecida a partir da [Equação 1.3](#). Considerando os processos de evolução já citados ([seção 1.3](#)) que um aglomerado pode atravessar, os VDPs são um importante aparato para a análise da dinâmica estelar desses objetos.

Parte III

Resultados e Discussões

3 Resultados Gerais

Os parâmetros fundamentais adquiridos por meio do *fitCMD* para os quarenta aglomerados selecionados após as descontaminações de campo estão listados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Parâmetros fundamentais obtidos para aglomerados abertos nas faixas de idade de 10 Myr e 50 Myr a partir do programa *fitCMD*

Aglomerado	M_{cl} ($10^2 M_{\odot}$) (1)	M_{CMD} ($10^2 M_{\odot}$) (2)	$(m - M)_V$ (mag) (3)	$E(B - V)$ (mag) (4)	Z/Z_{\odot} (5)	d_{\odot} (pc) (6)	t_{age} (Myr) (7)
Collinder 69	$9.5^{+3.1}_{-2.8}$	5.9	$8.38^{+0.07}_{-0.03}$	$0.13^{+0.01}_{-0.02}$	$0.72^{+0.13}_{-0.03}$	404^{+13}_{-6}	5 ± 1
NGC 2264	$6.3^{+1.9}_{-1.8}$	5.2	8.93 ± 0.10	$0.07^{+0.04}_{-0.03}$	$0.33^{+0.07}_{-0.03}$	560^{+29}_{-27}	6 ± 1
NGC 1976	$5.6^{+1.6}_{-1.4}$	4.8	$7.59^{+0.07}_{-0.03}$	0.04 ± 0.01	$0.46^{+0.07}_{-0.03}$	315^{+11}_{-4}	7 ± 1
Collinder 70	$3.6^{+1.5}_{-1.3}$	2.4	$8.19^{+0.06}_{-0.04}$	0.11 ± 0.01	0.79 ± 0.20	379^{+11}_{-7}	10 ± 1
NGC 2362	14 ± 4	10	10.62 ± 0.05	$0.11^{+0.03}_{-0.02}$	$0.72^{+0.06}_{-0.13}$	1168 ± 30	10 ± 1
NGC 1502	13 ± 4	8.5	$11.28^{+0.19}_{-0.10}$	$0.72^{+0.01}_{-0.04}$	$0.46^{+0.13}_{-0.20}$	760^{+68}_{-40}	14^{+2}_{-1}
ASCC 20	$6.4^{+2.5}_{-2.2}$	2.7	$7.72^{+0.05}_{-0.10}$	0.03 ± 0.01	$0.79^{+0.06}_{-0.03}$	337^{+8}_{-15}	25 ± 2
ASCC 33	$5.9^{+2.3}_{-2.0}$	3.9	$9.31^{+0.09}_{-0.11}$	$0.00^{+0.03}_{-0.01}$	$1.32^{+0.06}_{-0.03}$	723^{+31}_{-37}	35^{+2}_{-5}
vdB-Hagen 164	$4.6^{+1.7}_{-1.5}$	3.5	$8.52^{+0.08}_{-0.02}$	0.12 ± 0.01	$1.18^{+0.13}_{-0.06}$	437^{+16}_{-5}	35 ± 2
ASCC 89	$5.3^{+2.0}_{-1.8}$	3.5	$9.35^{+0.02}_{-0.08}$	0.17 ± 0.01	$1.05^{+0.13}_{-0.03}$	608^{+7}_{-22}	40 ± 2
Ruprecht 12	$7.0^{+2.4}_{-2.1}$	4.8	9.93 ± 0.05	$0.06^{+0.03}_{-0.01}$	$1.18^{+0.06}_{-0.03}$	898^{+24}_{-21}	20^{+2}_{-1}
Ruprecht 18	$9.1^{+3.0}_{-2.7}$	4.5	$10.65^{+0.02}_{-0.08}$	0.00 ± 0.01	$1.97^{+0.03}_{-0.13}$	1350^{+13}_{-50}	30 ± 2
IC 4665	12^{+5}_{-4}	3.1	$8.45^{+0.17}_{-0.13}$	0.21 ± 0.01	1.71 ± 0.13	381^{+29}_{-23}	40 ± 2
NGC 2451	$5.1^{+1.6}_{-1.5}$	3.1	$8.39^{+0.01}_{-0.09}$	$0.11^{+0.03}_{-0.01}$	$1.78^{+0.06}_{-0.03}$	417^{+6}_{-17}	40 ± 2
NGC 2547	$5.1^{+1.7}_{-1.5}$	3.7	$8.08^{+0.10}_{-0.01}$	$0.05^{+0.03}_{-0.01}$	$1.32^{+0.06}_{-0.07}$	390^{+18}_{-3}	40 ± 2
Melotte 20	$6.6^{+2.2}_{-1.9}$	5.0	$6.59^{+0.10}_{-0.01}$	$0.07^{+0.03}_{-0.01}$	$1.84^{+0.06}_{-0.03}$	190^{+9}_{-1}	60 ± 5
vdB-Hagen 99	$6.7^{+2.0}_{-1.9}$	5.4	$8.50^{+0.03}_{-0.07}$	$0.04^{+0.03}_{-0.01}$	$1.58^{+0.06}_{-0.03}$	474^{+9}_{-15}	60^{+5}_{-10}
Blanco 1	$4.9^{+1.5}_{-1.4}$	4.1	$7.18^{+0.05}_{-0.04}$	0.05 ± 0.01	$1.05^{+0.13}_{-0.03}$	256^{+7}_{-5}	100^{+12}_{-5}
Collinder 394	17^{+5}_{-4}	10	$10.08^{+0.04}_{-0.06}$	$0.23^{+0.02}_{-0.01}$	$1.71^{+0.06}_{-0.13}$	782^{+19}_{-21}	100^{+12}_{-5}
NGC 2186	14 ± 4	7.5	$13.04^{+0.05}_{-0.15}$	$0.41^{+0.02}_{-0.01}$	$0.33^{+0.07}_{-0.03}$	2490^{+64}_{-173}	100^{+12}_{-10}

Nota: A tabela está disposta em ordem crescente de idade, tendo dez aglomerados para as faixas etárias 10 Myr e 50 Myr (de acordo com a Tabela 1) respectivamente. Col. (1) – massa total do aglomerado; (2) – massa estelar presente no CMD; (3) – módulo de distância; (4) – excesso de cor; (5) – metalicidade; (6) – distância ao Sol; (7) – idade.

Fonte: O autor.

Tabela 4 – Parâmetros fundamentais obtidos para aglomerados abertos nas faixas de idade de 100 Myr e 1 Gyr a partir do programa *fitCMD*

Aglomerado	M_{cl} ($10^2 M_{\odot}$) (1)	M_{CMD} ($10^2 M_{\odot}$) (2)	$(m - M)_V$ (mag) (3)	$E(B - V)$ (mag) (4)	Z/Z_{\odot} (5)	d_{\odot} (pc) (6)	t_{age} (Myr) (7)
Messier 45	$8.5^{+2.3}_{-2.1}$	7.0	$6.09^{+0.11}_{-0.09}$	$0.06^{+0.03}_{-0.01}$	$1.51^{+0.07}_{-0.06}$	153^{+8}_{-7}	100^{+12}_{-5}
NGC 1039	13 ± 3	8.3	$8.69^{+0.09}_{-0.01}$	0.02 ± 0.01	$1.91^{+0.06}_{-0.03}$	533^{+22}_{-3}	325 ± 12
NGC 1647	13^{+4}_{-3}	7.8	$9.98^{+0.06}_{-0.14}$	$0.38^{+0.03}_{-0.01}$	$1.78^{+0.06}_{-0.20}$	624^{+18}_{-41}	325 ± 12
Alessi 10	$2.5^{+1.0}_{-0.9}$	1.7	$8.48^{+0.19}_{-0.01}$	0.06 ± 0.01	$1.91^{+0.06}_{-0.07}$	461^{+41}_{-3}	350 ± 12
NGC 2516	22 ± 5	16	$8.37^{+0.03}_{-0.07}$	0.08 ± 0.01	$1.12^{+0.06}_{-0.03}$	427^{+6}_{-14}	400 ± 12
NGC 6124	33 ± 6	17	$11.03^{+0.02}_{-0.18}$	0.71 ± 0.01	$1.45^{+0.06}_{-0.03}$	685^{+7}_{-57}	475 ± 12
NGC 2281	10 ± 3	6.7	$8.95^{+0.01}_{-0.19}$	$0.04^{+0.03}_{-0.01}$	$1.78^{+0.06}_{-0.03}$	590^{+9}_{-51}	550 ± 25
NGC 2215	$6.2^{+2.1}_{-1.9}$	3.0	$10.33^{+0.15}_{-0.05}$	0.13 ± 0.01	1.97 ± 0.03	998^{+69}_{-24}	700 ± 50
NGC 2539	21 ± 5	9.7	$10.80^{+0.04}_{-0.06}$	0.06 ± 0.01	$0.99^{+0.06}_{-0.03}$	1343^{+25}_{-39}	900 ± 25
NGC 1817	26 ± 6	9.1	$12.09^{+0.02}_{-0.08}$	0.21 ± 0.01	$1.58^{+0.06}_{-0.03}$	2029^{+26}_{-72}	950 ± 25
Melotte 25	$7.5^{+2.6}_{-2.3}$	4.4	$3.51^{+0.01}_{-0.19}$	$0.01^{+0.03}_{-0.01}$	1.71 ± 0.06	50^{+1}_{-4}	850 ± 25
NGC 2632	$9.5^{+2.6}_{-2.5}$	6.1	6.44 ± 0.05	$0.00^{+0.02}_{-0.01}$	$1.84^{+0.06}_{-0.03}$	194^{+5}_{-4}	850^{+25}_{-150}
NGC 752	$7.3^{+2.6}_{-2.3}$	2.8	$8.65^{+0.05}_{-0.10}$	0.03 ± 0.01	$1.78^{+0.06}_{-0.03}$	518^{+13}_{-24}	1250 ± 120
NGC 2355	17 ± 3	7.8	$11.79^{+0.03}_{-0.17}$	$0.16^{+0.03}_{-0.01}$	$0.59^{+0.13}_{-0.03}$	1884^{+39}_{-145}	1250 ± 120
NGC 2204	47.5 ± 9.0	7.8	13.40 ± 0.05	0.09 ± 0.01	$0.46^{+0.07}_{-0.03}$	4297^{+110}_{-92}	2000 ± 120
NGC 2112	28 ± 6	10	$11.75^{+0.01}_{-0.18}$	$0.66^{+0.02}_{-0.01}$	$0.46^{+0.13}_{-0.03}$	1010^{+15}_{-86}	2500 ± 120
NGC 2126	$5.1^{+1.6}_{-1.5}$	2.0	10.82 ± 0.05	0.24 ± 0.01	$0.20^{+0.07}_{-0.03}$	1088^{+26}_{-25}	2500 ± 120
NGC 6819	86^{+7}_{-12}	23	12.55 ± 0.05	0.22 ± 0.01	$0.53^{+0.06}_{-0.03}$	2496^{+63}_{-53}	2500 ± 120
NGC 2682	38^{+9}_{-8}	12	$9.88^{+0.01}_{-0.09}$	0.04 ± 0.01	$0.92^{+0.06}_{-0.03}$	900^{+7}_{-38}	3750 ± 120
NGC 188	87^{+7}_{-15}	11	$11.61^{+0.06}_{-0.04}$	0.09 ± 0.01	$0.92^{+0.06}_{-0.03}$	1883^{+55}_{-33}	6250 ± 120

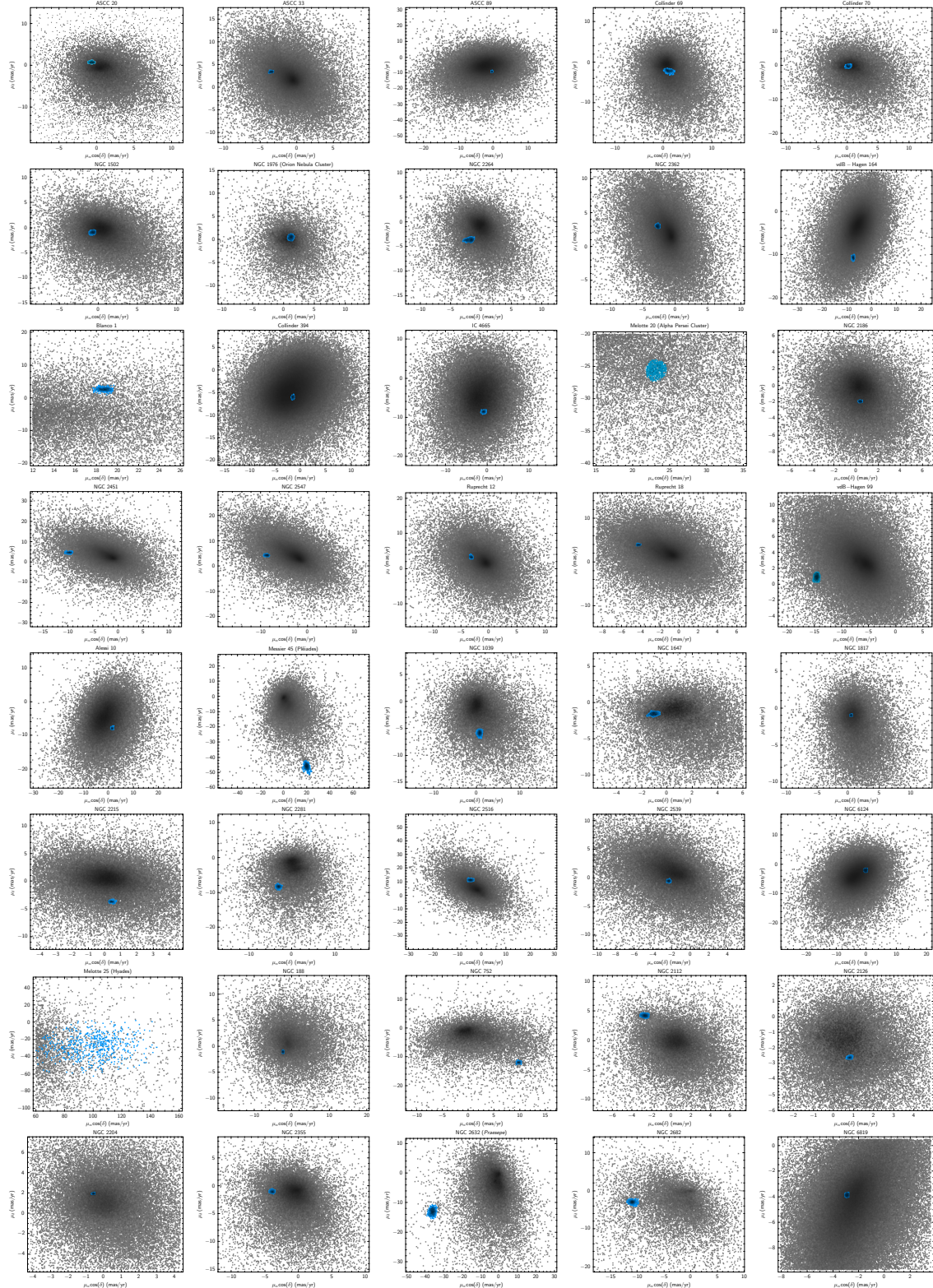
Nota: A tabela está disposta em ordem crescente de idade, tendo dez aglomerados para as faixas etárias 100 Myr e 1 Gyr (de acordo com a [Tabela 2](#)) respectivamente. Col. (1) – massa total do aglomerado; (2) – massa estelar presente no CMD; (3) – módulo de distância; (4) – excesso de cor; (5) – metalicidade; (6) – distância ao Sol; (7) – idade.

Fonte: O autor.

A fim de proceder o ajuste com isócronas junto ao *software fitCMD*, além da criação dos VDPs e RDPs, realizou-se antes a descontaminação de estrelas de campo a partir do programa TOPCAT com diagramas de ponto vetorial de movimento próprio nas coordenadas de ascensão reta e declinação. Os resultados estão dispostos na [Figura 4](#).

Os VDPs de trinta e seis aglomerados, sendo os restantes apresentados no [Capítulo 4](#), encontram-se nas [Figuras 5, 6, 7 e 8](#) e suas isócronas ajustadas junto aos diagramas cor-magnitude nas [Figuras 9, 10, 11 e 12](#), ambos ordenados de maneira crescente em idade para cada grupo, conforme [Tabelas 3 e 4](#).

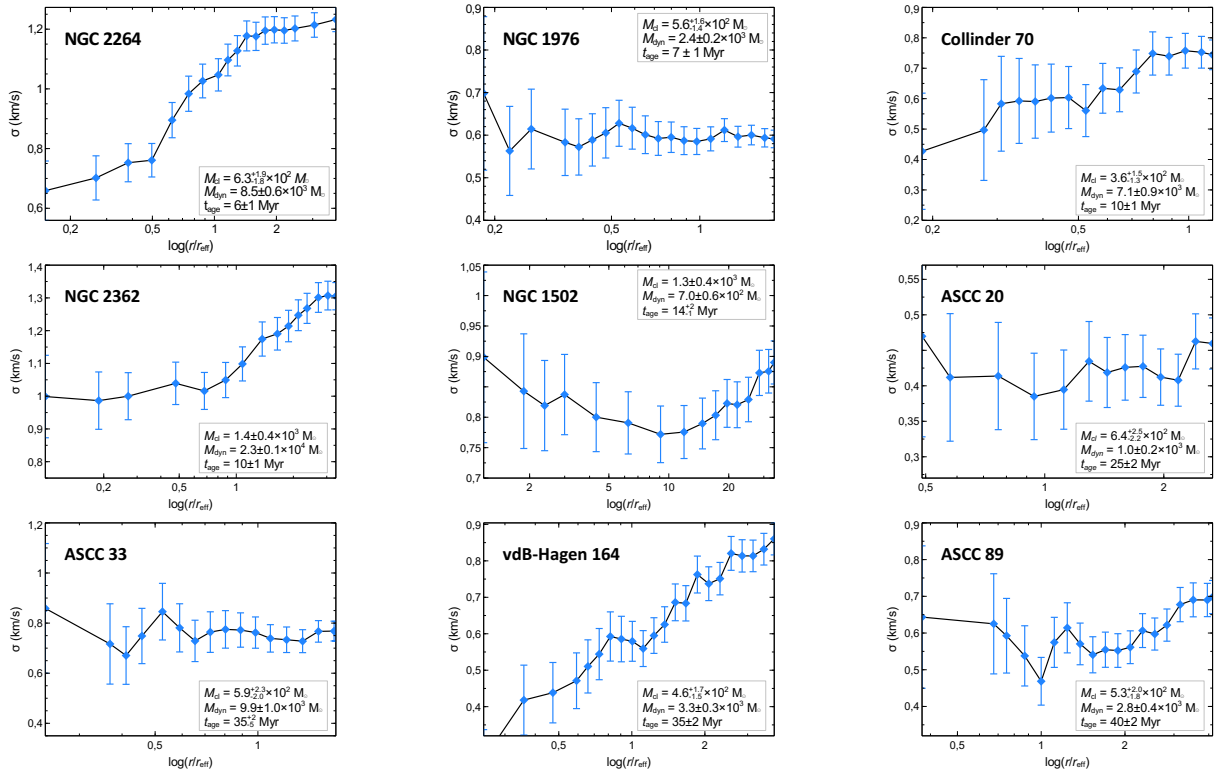
Figura 4 – Diagramas de ponto vetorial de movimento próprio em ascensão reta e declinação para aglomerados nas faixas de idade de 10, 50, 100 e 1000 Myr respectivamente



Os pontos (estrelas) circundados em azul são os prováveis membros de cada aglomerado. Os pontos em cinza representam as estrelas de campo para determinada ascensão reta e declinação.

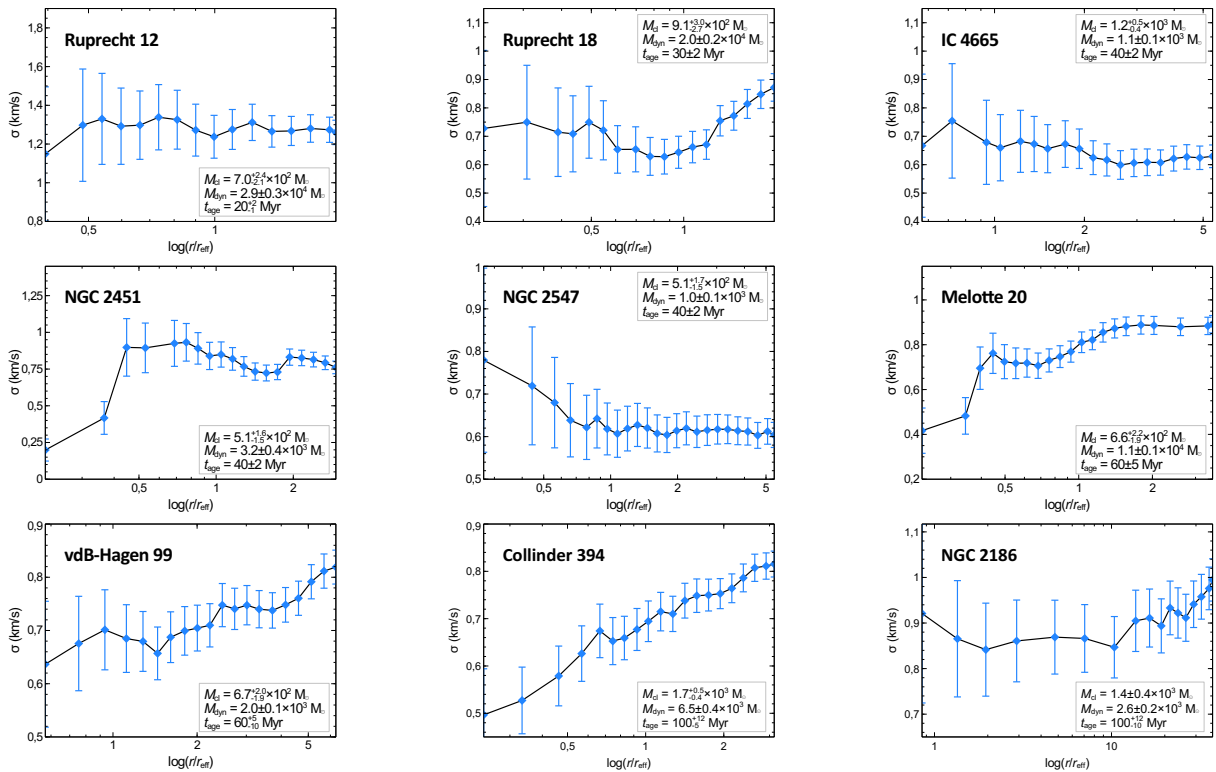
Nota: Os VPDs de Blanco 1, Melotte 20 e Melotte 25 diferem-se visualmente dos outros devido aos seus diâmetros angulares maiores. Nesses casos, uma pré-filtragem foi realizada.

Figura 5 – VDPs para aglomerados na faixa de idade de 10 Myr



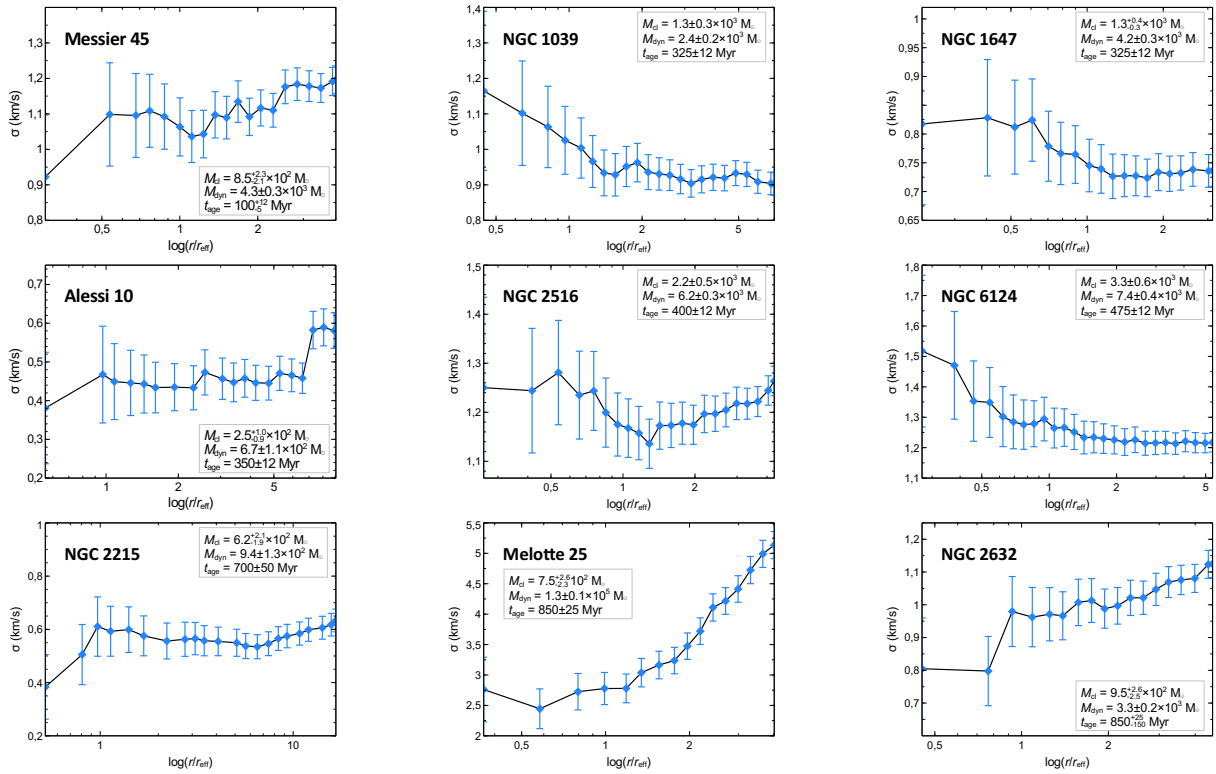
Fonte: O autor.

Figura 6 – VDPs para aglomerados na faixa de idade de 50 Myr



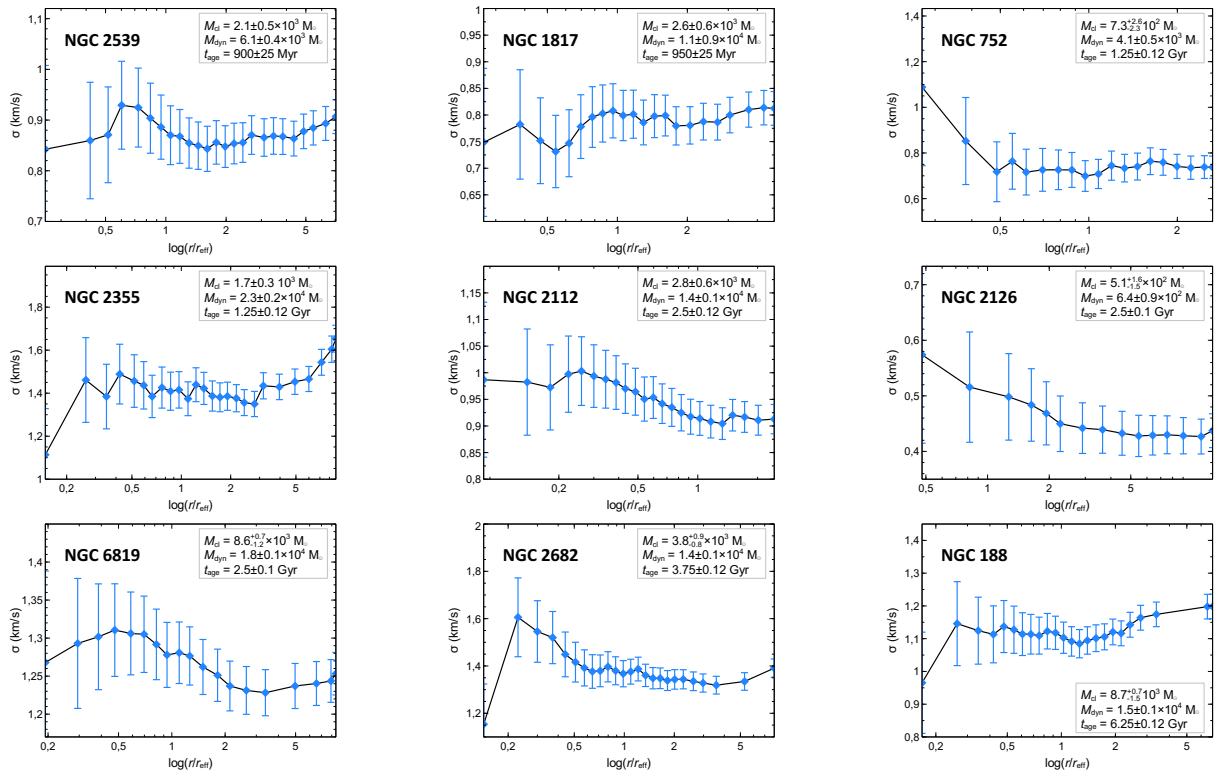
Fonte: O autor.

Figura 7 – VDPs para aglomerados na faixa de idade de 100 Myr



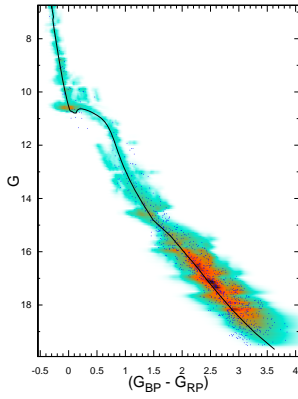
Fonte: O autor.

Figura 8 – VDPs para aglomerados na faixa de idade de 1000 Myr

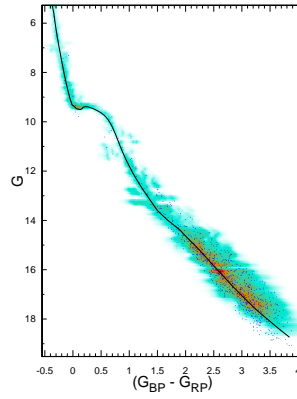


Fonte: O autor.

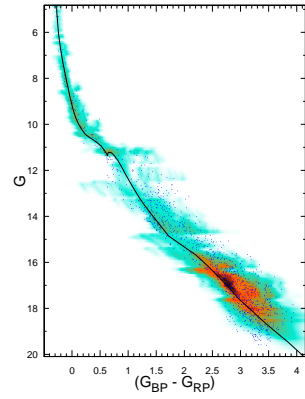
Figura 9 – Diagramas cor-magnitude com ajuste de isócronas para aglomerados na faixa de idade de 10 Myr



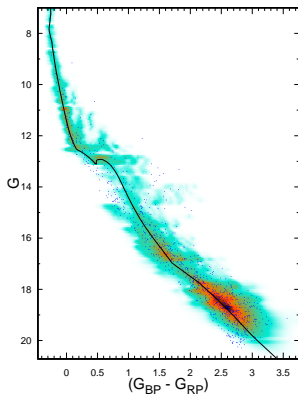
(a) NGC 2264



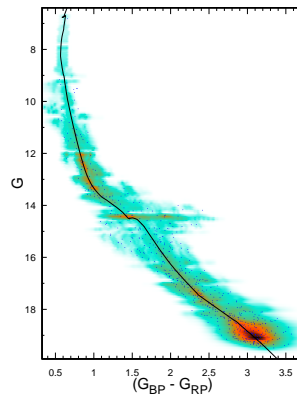
(b) NGC 1976



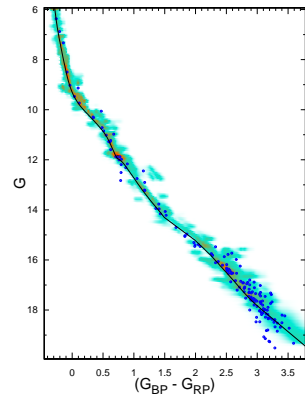
(c) Collinder 70



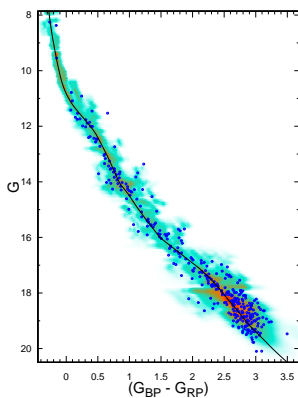
(d) NGC 2362



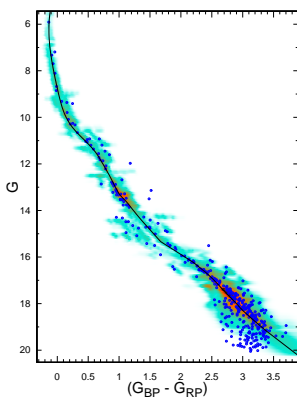
(e) NGC 1502



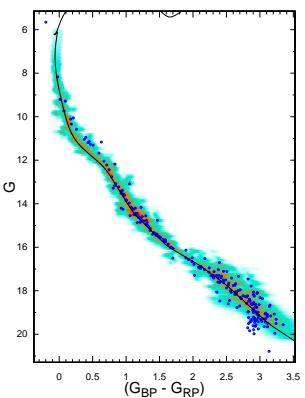
(f) ASCC 20



(g) ASC 33



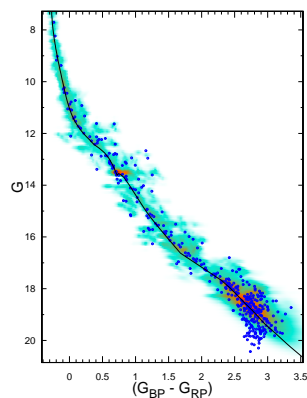
(h) vdB-Hagen 164



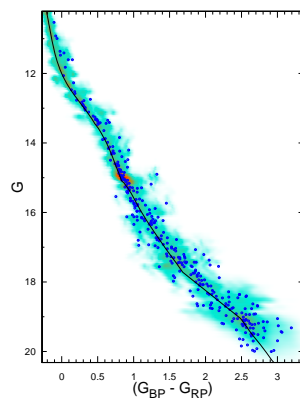
(i) ASCC 89

Fonte: O autor.

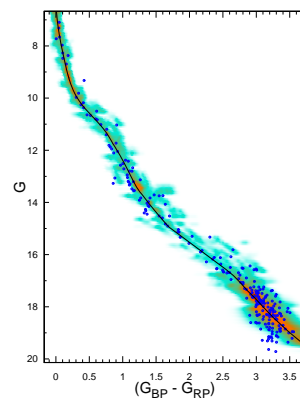
Figura 10 – Diagramas cor-magnitude com ajuste de isócronas para aglomerados na faixa de idade de 50 Myr



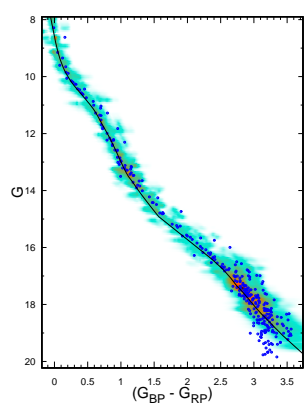
(a) Ruprecht 12



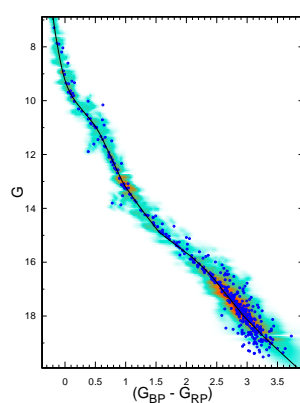
(b) Ruprecht 18



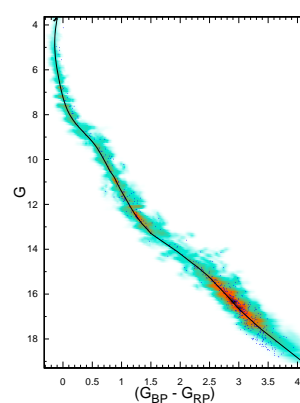
(c) IC 4665



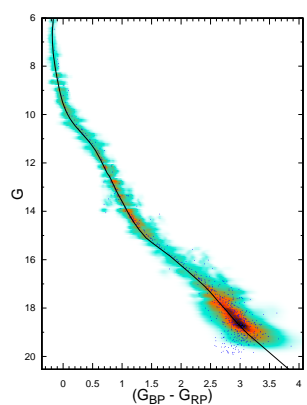
(d) NGC 2451



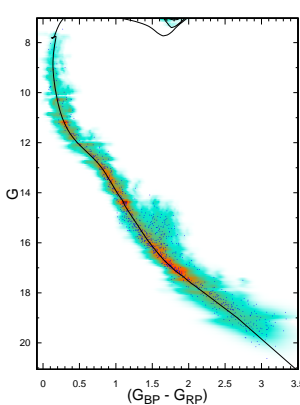
(e) NGC 2547



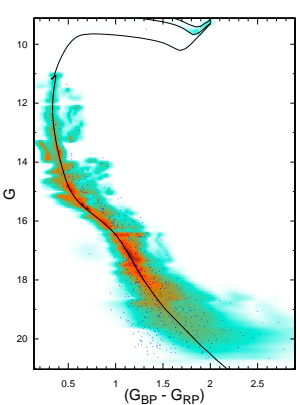
(f) Melotte 20



(g) vdB-Hagen 99



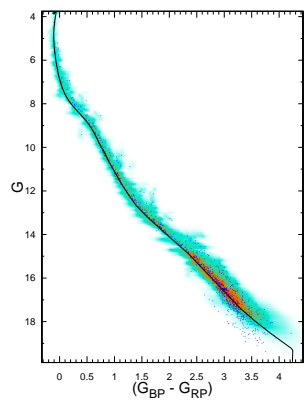
(h) Collinder 394



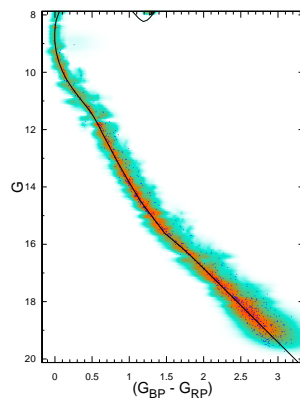
(i) NGC 2186

Fonte: O autor.

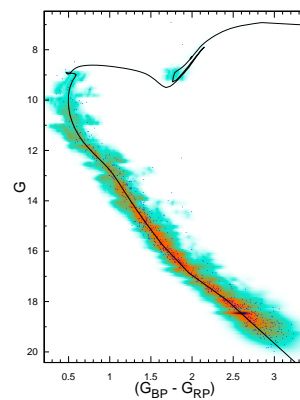
Figura 11 – Diagramas cor-magnitude com ajuste de isócronas para aglomerados na faixa de idade de 100 Myr



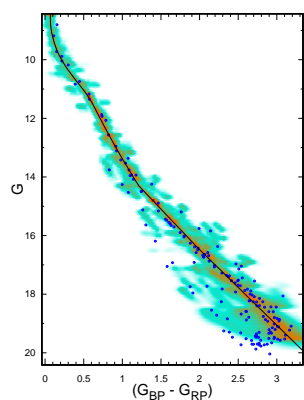
(a) Messier 45 (Plêiades)



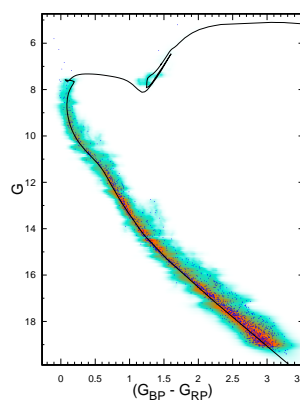
(b) NGC 1039



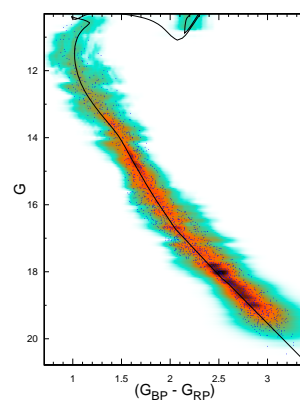
(c) NGC 1647



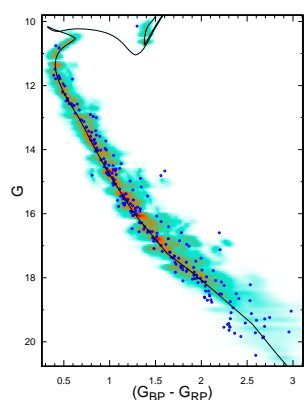
(d) Alessi 10



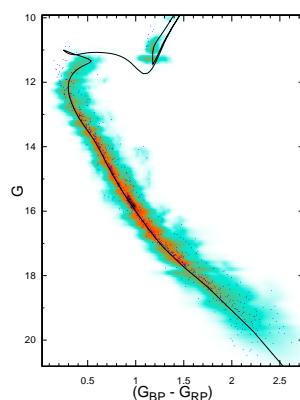
(e) NGC 2516



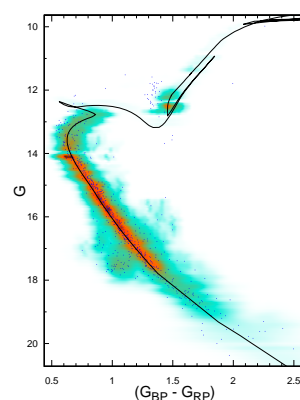
(f) NGC 6124



(g) NGC 2215



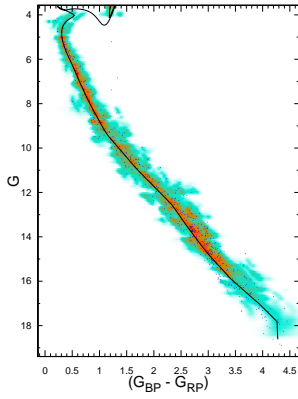
(h) NGC 2539



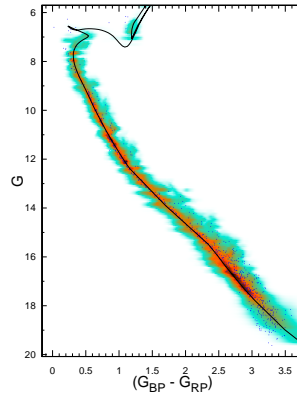
(i) NGC 1817

Fonte: O autor.

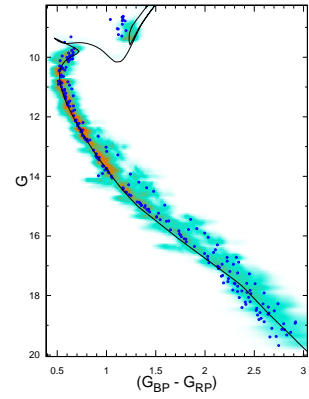
Figura 12 – Diagramas cor-magnitude com ajuste de isócronas para aglomerados na faixa de idade de 1000 Myr



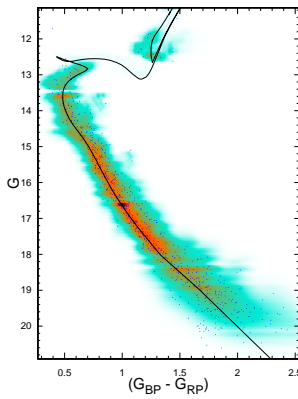
(a) Melotte 25 (Híades)



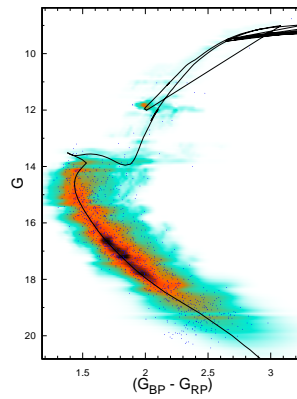
(b) NGC 2632



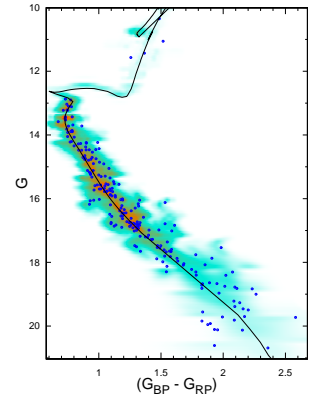
(c) NGC 752



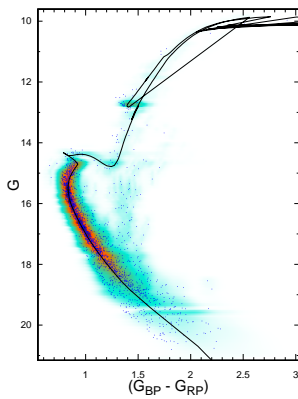
(d) NGC 2355



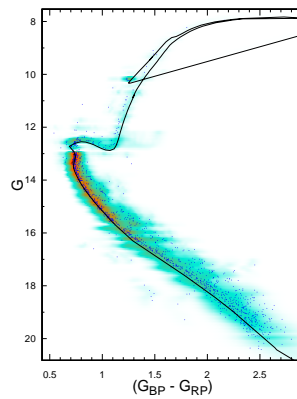
(e) NGC 2112



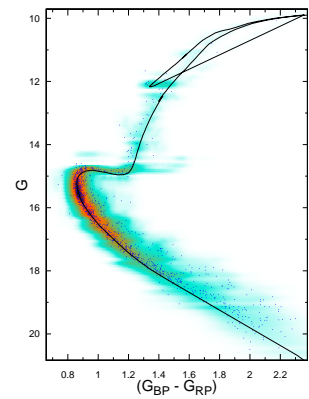
(f) NGC 2126



(g) NGC 6819



(h) NGC 2682

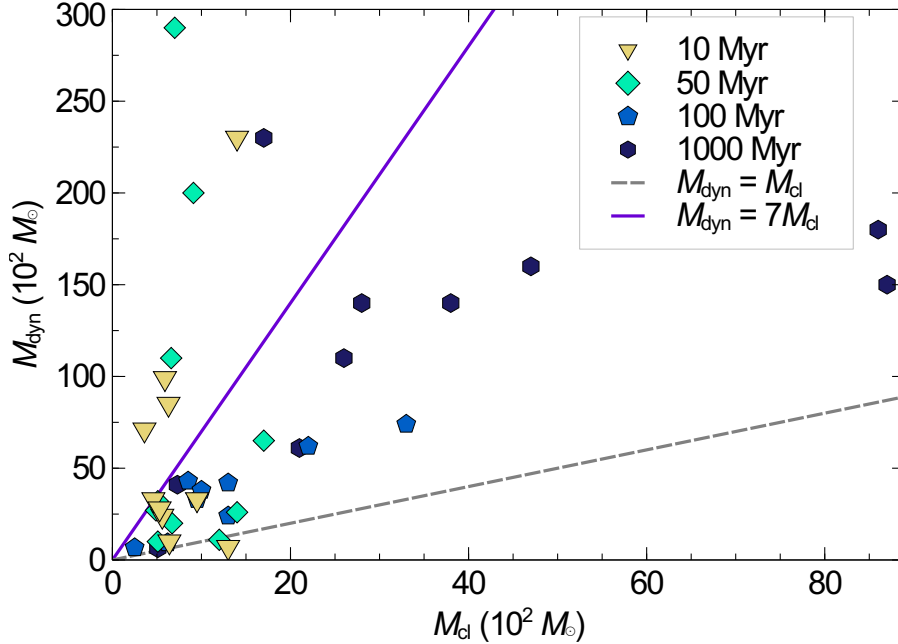


(i) NGC 188

Fonte: O autor.

Ademais, na [Figura 13](#), as massas dinâmicas obtidas com o algoritmo de construção dos VDPs são comparadas com as massas fotométricas simuladas via *fitCMD*.

Figura 13 – Massa estelar dinâmica contra massa estelar fotométrica para os aglomerados abertos



Comparação das massas estelares dinâmicas (M_{dyn}), obtidas através de VDPs, e as massas estelares fotométricas (M_{cl}), obtidas através do *fitCMD*. Ambas as medidas não incluem representações de incertezas. Os símbolos representam diferentes faixas de idade dos aglomerados: triângulos (∇) amarelos: 10 Myr; Quadriláteros (\diamond) cianos: 50 Myr; Pentágonos (\diamond) azuis: 100 Myr; Hexágonos (\diamond) azul-marinho: 1000 Myr. A linha tracejada em cinza representa a identidade $M_{\text{dyn}} = M_{\text{cl}}$. A linha sólida em roxo representa valores 7 vezes maiores para a massa dinâmica em relação à massa fotométrica.

Nota: O aglomerado Melotte 25 está omitido da figura devido ao valor superestimado para a massa dinâmica (presente na [Figura 7](#)).

Fonte: O autor.

Com exceção dos aglomerados NGC 1502 e IC 4665, o restante apresenta valores maiores para a massa dinâmica (M_{dyn}) em relação à massa fotométrica (M_{cl}). Essa inconsistência, como indicam [Gieles, Sana e Zwart \(2010\)](#), pode ser atribuída a variações na função de massa inicial (IMF), nas quais M_{cl} se baseia em parte, ou a falta de equilíbrio virial, o qual é o fundamentador de M_{dyn} , o que pode indicar que NGC 1502 e IC 4665 encontram-se em um estado virializado. Além disso, nove aglomerados abertos, a maioria dos quais jovens, apresentam valores maiores ou próximos de 7 para a razão entre a massa dinâmica e a massa fotométrica ($M_{\text{dyn}}/M_{\text{cl}} \gtrsim 7$). Em todos esses casos, as curvas de dispersão de velocidade são crescentes, o que está em concordância com um estado supervirializado. Os demais aglomerados abertos exibem curvas variadas, tornando necessários estudos específicos para compreender a evolução dinâmica desses objetos. Além

disso, em termos gerais, para uma análise mais concreta, é necessário aumentar a amostra, incluindo mais aglomerados próximos do plano Galáctico, por exemplo, a fim de melhorar a estatística.

No [Capítulo 4](#) subsequente, procede-se à discussão individualizada de um aglomerado estelar pertencente a cada intervalo etário específico — nomeadamente, Collinder 69, Blanco 1, NGC 2281 e NGC 2204. Para fins de comparação, o aglomerado globular NGC 6121 também é analisado, sendo escolhido devido à sua proximidade em relação à Terra, o que melhora, em tese, a qualidade da observação.

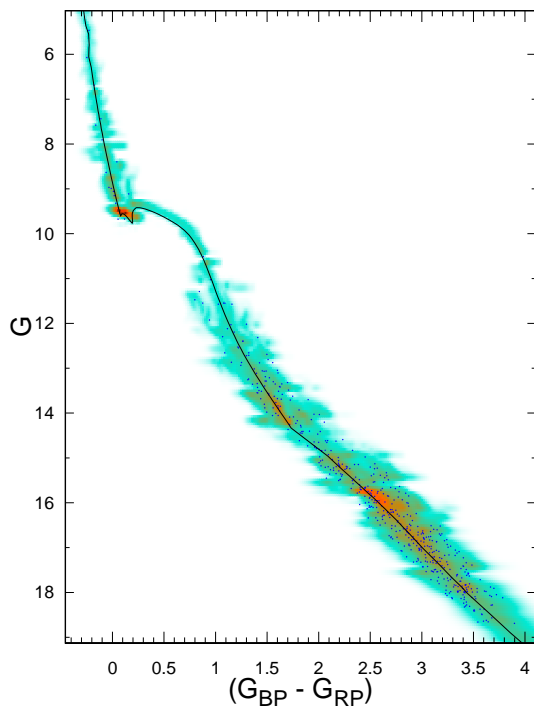
4 Discussões

4.1 Collinder 69

O aglomerado aberto Collinder 69, também conhecido como aglomerado de λ -Orionis, está localizado a noroeste da estrela Betelgeuse, na constelação de Órion. [Barrado et al. \(2011\)](#) realizaram estudos envolvendo sondagem de raios X a partir do satélite XMM-Newton, sugerindo um limite inferior para a idade desse aglomerado como sendo de 3 Myr e um limite superior, devido à presença da estrela central muito massiva λ -Ori, de 7 Myr. Ademais, a função de luminosidade de raios X de Collinder 69 concorda muito bem com a de NGC 2264, indicando uma idade semelhante de ambos aglomerados. Dentro deste trabalho, as idades obtidas para Collinder 69 e NGC 2264, conforme a [Tabela 3](#), foram respectivamente 5 ± 1 Myr e 6 ± 1 Myr.

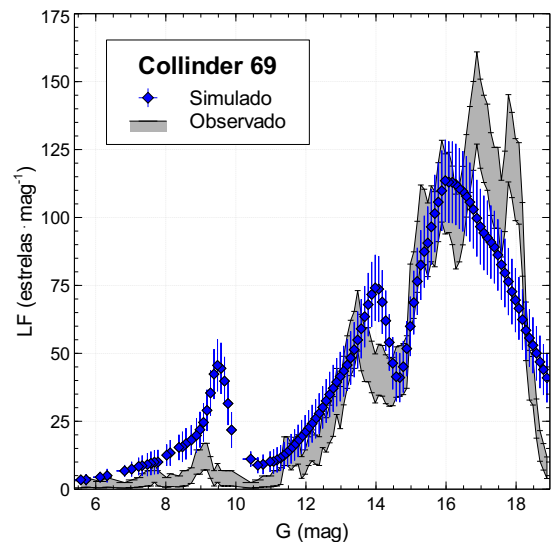
As Figuras 14 e 15 a seguir representam o CMD ajustado por uma isócrona e as funções de luminosidade observada e simulada, ambas obtidas via *fitCMD*.

Figura 14 – Diagrama cor-magnitude com ajuste de isócrona para Collinder 69



Fonte: O autor.

Figura 15 – Funções de luminosidade de Collinder 69



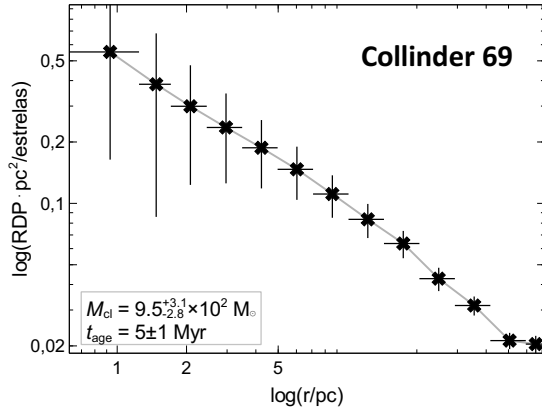
A região sombreada representa limites de 1σ da LF observada; símbolo azuis: LF simulada pelo *fitCMD*.

Fonte: O autor.

Posteriormente, as Figuras 16 e 17 representam o RDP e o VDP obtidos para esse

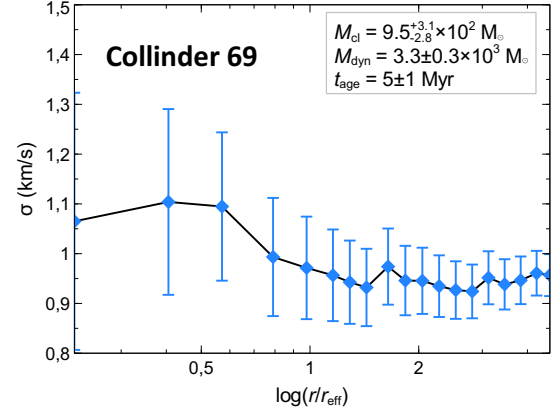
aglomerado.

Figura 16 – Perfil de densidade radial de Collinder 69



Fonte: O autor.

Figura 17 – Perfil de dispersão de velocidade de Collinder 69



Fonte: O autor.

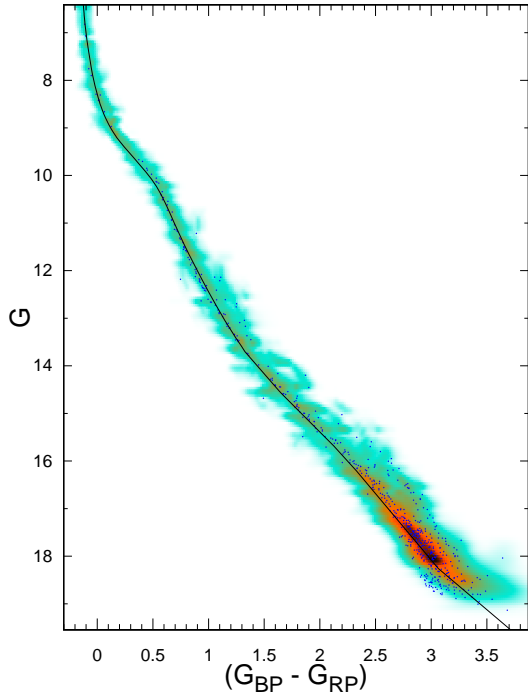
Assim como esperado, o perfil de densidade radial apresenta uma diminuição aproximadamente exponencial com o aumento do raio do aglomerado. Por outro lado, o perfil de dispersão de velocidade (σ) exibe comportamento semelhante ao VDP de NGC 1976, o aglomerado da Nebulosa de Órion, presente na [Figura 5. Kim et al. \(2019\)](#), ao analisar os movimentos próprios estelares de NGC 1976, sugeriram que a região central — de formação estelar — evoluiu dinamicamente, já que o perfil de dispersão de velocidade concorda com um estado virializado.

4.2 Blanco 1

Blanco 1 (aglomerado de ζ -Sculptoris) localiza-se na constelação do Escultor, no hemisfério sul. Possui uma alta latitude galáctica, tendo, por conta disso, um interesse astrofísico considerável para estudos de formação e evolução ([MERMILLIOD et al., 2008](#)). É um aglomerado aberto jovem, possuindo uma idade aproximada de 100 Myr ([ALFONSO; GARCÍA-VARELA, 2023](#); [BABUSIAUX et al., 2018](#)). As [Figuras 18, 19, 20 e 21](#) indicam respectivamente o CMD, as LFs, o perfil de densidade radial e o perfil de dispersão de velocidade desse objeto.

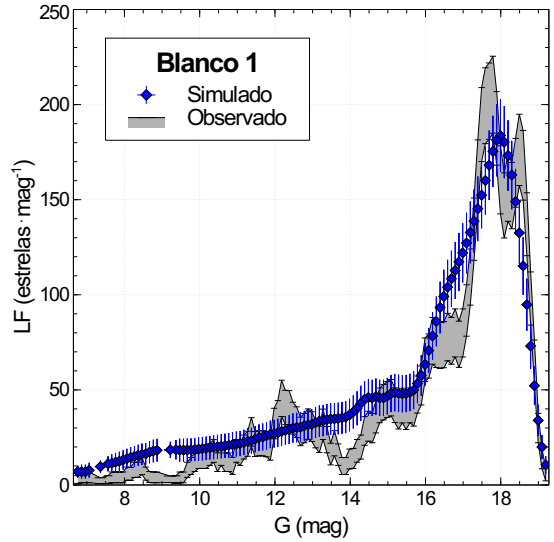
Analisando o RDP e o VDP de Blanco 1, percebe-se que estrelas mais distantes do centro do aglomerado estão se afastando mais rapidamente. [Zhang et al. \(2020\)](#) indicam, em seus estudos, que esse objeto está sofrendo uma desintegração dinâmica inicial manifestado pela ejeção de estrelas. OCs de mesma idade dentro deste trabalho, como NGC 2186 e Messier 45 (Plêiades), apresentam comportamento semelhante em seus perfis de dispersão de velocidade radial (presentes nas [Figuras 6 e 7](#)).

Figura 18 – Diagrama cor-magnitude com ajuste de isócrona para Blanco 1



Fonte: O autor.

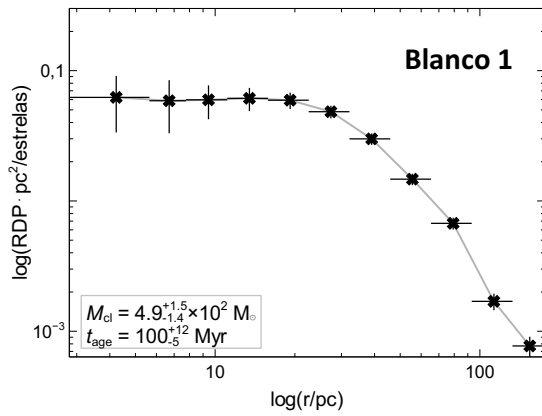
Figura 19 – Funções de luminosidade de Blanco 1



A região sombreada representa limites de 1σ da LF observada; símbolo azuis: LF simulada pelo *fitCMD*.

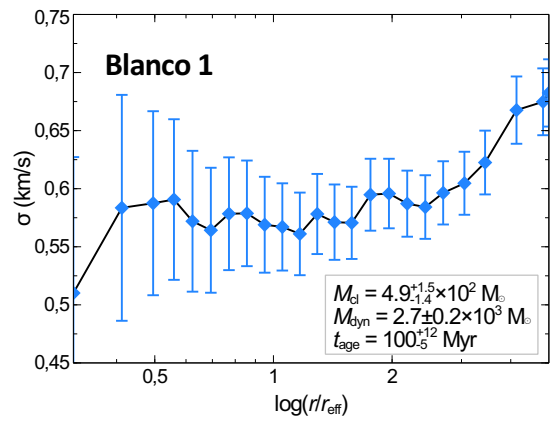
Fonte: O autor.

Figura 20 – Perfil de densidade radial de Blanco 1



Fonte: O autor.

Figura 21 – Perfil de dispersão de velocidade de Blanco 1

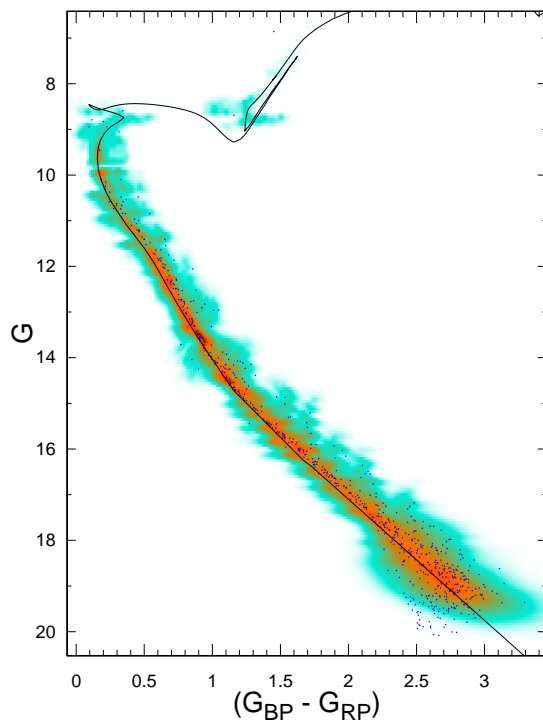


Fonte: O autor.

4.3 NGC 2281

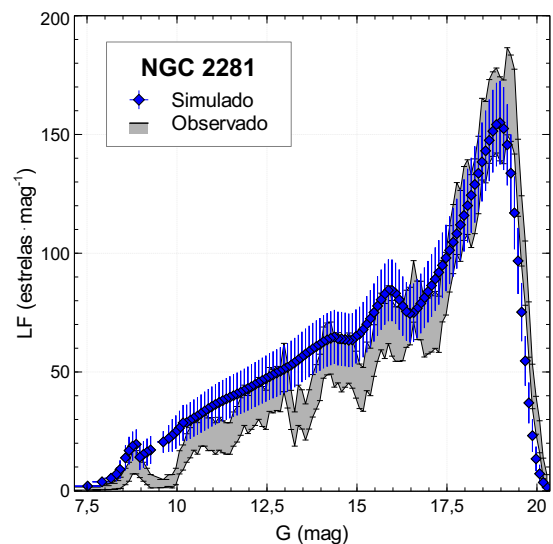
O aglomerado do coração partido, usualmente conhecido por NGC 2281, encontra-se em Auriga, constelação do hemisfério celestial norte. Estimativas de idade para esse objeto abrangem uma grande faixa, determinado como sendo relativamente jovem (250–300 Myr) em estudos mais antigos (HARRIS, 1976; MERMILLIOD, 1981), enquanto trabalhos mais recentes indicam que o aglomerado tem o dobro da idade. A partir de dados Gaia DR2, Bossini et al. (2019) apontam o tempo de vida de 600 milhões de anos, enquanto Fritzewski et al. (2023) o estima como sendo 430 ± 50 Myr com base nas propriedades rotacionais de seus membros de baixa massa. Neste trabalho a idade obtida foi de 550 ± 25 Myr, conforme Tabela 4. Seu CMD e as funções de luminosidade encontram-se nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 – Diagrama cor-magnitude com ajuste de isócrona para NGC 2281



Fonte: O autor.

Figura 23 – Funções de luminosidade de NGC 2281

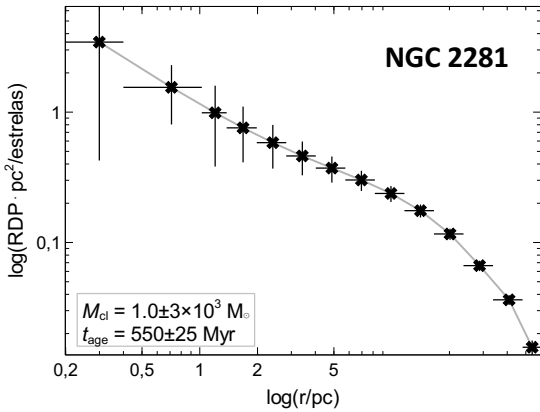


A região sombreada representa limites de 1σ da LF observada; símbolo azuis: LF simulada pelo *fitCMD*.

Fonte: O autor.

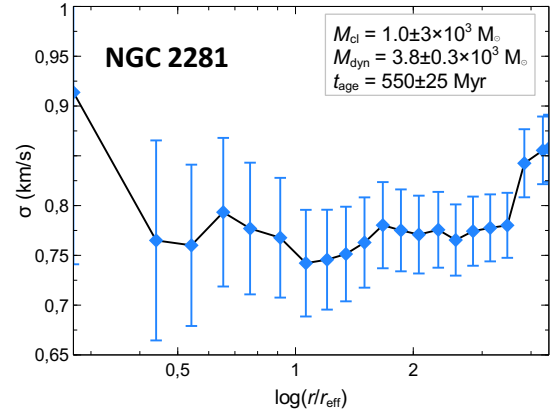
A presença do *turn-off point*, indicando a transição entre a sequência principal e o ramo das gigantes vermelhas, já é notável na Figura 22. As Figuras 24 e 25 apresentam o RDP e VDP obtidos para esse aglomerado.

Figura 24 – Perfil de densidade radial de NGC 2281



Fonte: O autor.

Figura 25 – Perfil de dispersão de velocidade de NGC 2281

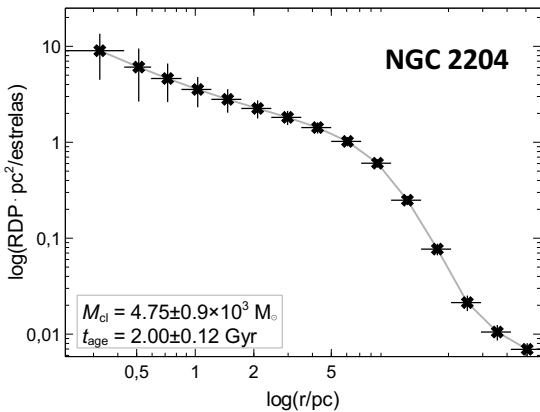


Fonte: O autor.

4.4 NGC 2204

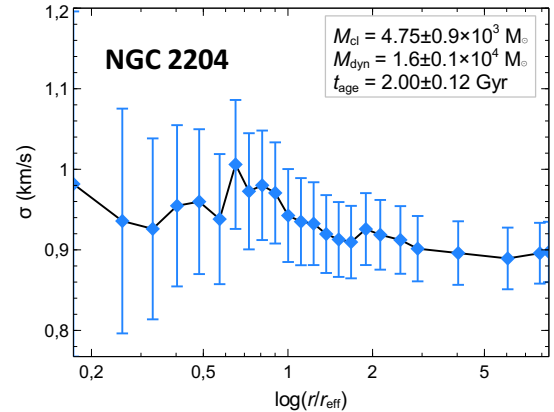
NGC 2204 é um aglomerado aberto na direção da constelação do Cão Maior. Localizado no halo, é o objeto mais distante deste estudo. Estudos anteriores sugerem sua idade como sendo 1.6 Gyr (KASSIS et al., 1997) e 2.0 Gyr (SALARIS; WEISS; PERCIVAL, 2004; JACOBSON; FRIEL; PILACHOWSKI, 2011). A seguir, encontram-se as Figuras 26 e 27 para os respectivos RDP e VDP desse aglomerado.

Figura 26 – Perfil de densidade radial de NGC 2204



Fonte: O autor.

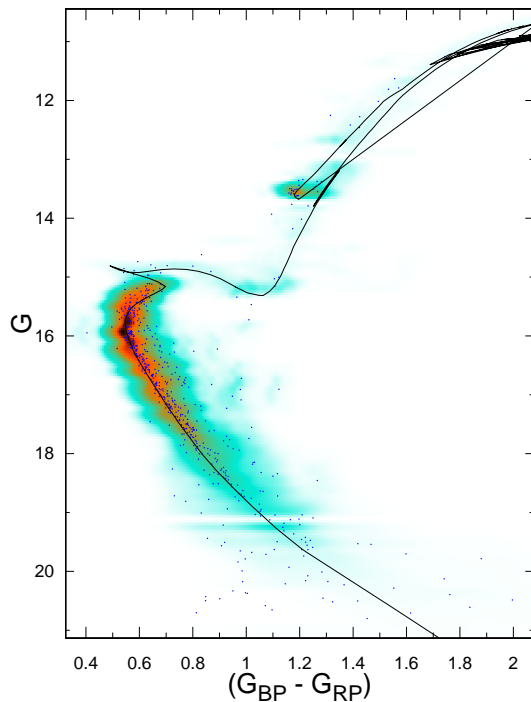
Figura 27 – Perfil de dispersão de velocidade de NGC 2204



Fonte: O autor.

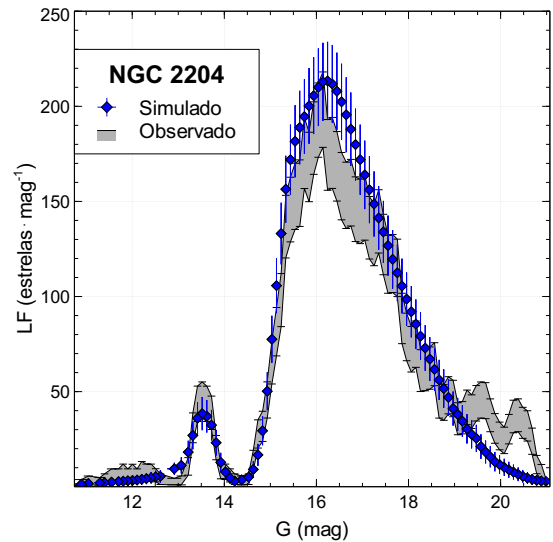
As Figuras 28 e 29 representam o CMD ajustado por uma isócrona e as funções de luminosidade observada e simulada, ambas obtidas via *fitCMD*. A partir do diagrama cor-magnitude (Figura 28) observa-se que uma boa parcela de estrelas já obtiveram tempo suficiente para “desligarem-se” da sequência principal.

Figura 28 – Diagrama cor-magnitude com ajuste de isócrona para NGC 2204



Fonte: O autor.

Figura 29 – Funções de luminosidade de NGC 2204



A região sombreada representa limites de 1σ da LF observada; símbolo azuis: LF simulada pelo *fitCMD*.

Fonte: O autor.

4.5 O aglomerado globular NGC 6121

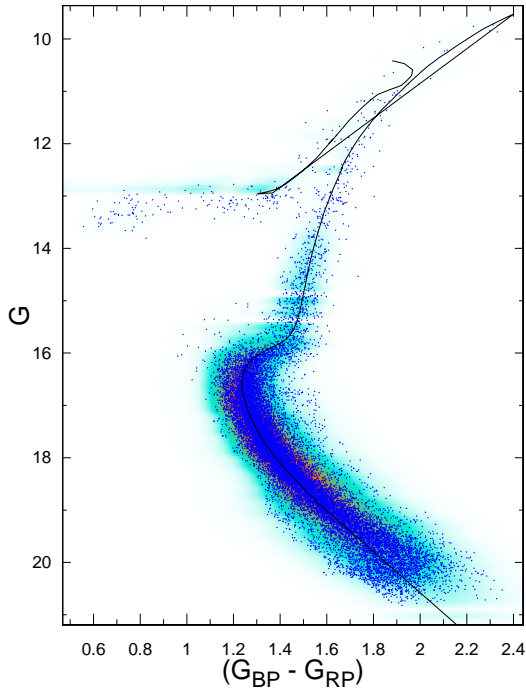
NGC 6121 — também designado como Messier 4 — é um aglomerado globular na constelação de Escorpião, sendo o primeiro GC da história em que suas estrelas foram resolvidas¹. Caputo, Castellani e Quarta (1985) estimaram sua idade, com a utilização das propriedades de pulsação de estrelas variáveis RR Lyrae, como sendo de, aproximadamente, 12 bilhões de anos. Nesse estudo, a idade obtida através do ajuste de isócronas no CMD via *fitCMD*, o qual é apresentado pela Figura 30, foi de 13.2 ± 0.1 Gyr.

Além do exorbitante número de estrelas presentes no diagrama cor-magnitude, a quase inexistência de estrelas azuis luminosas, imposta pelos processos de evolução estelar, é percebida com a ajuda da Figura 31, a qual representa as funções de luminosidade desse objeto. As Figuras 32 e 33 a seguir representam o RDP e o VDP desse aglomerado globular.

A diminuição na dispersão de velocidade radial com o raio, observada claramente na Figura 33, é uma propriedade genérica de qualquer sistema estelar (de extensão finita) povoado por estrelas em órbitas assumidas como sendo isotrópicas (BINNEY; MERRIFIELD, 1998, p. 372). Estando um aglomerado contido em um determinado raio r ,

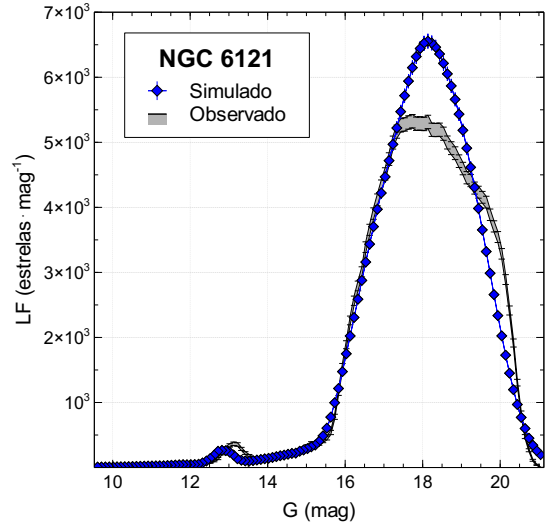
¹ Conteúdo disponível em: <<http://www.messier.seds.org/m/m004.html>>

Figura 30 – Diagrama cor-magnitude com ajuste de isócrona para NGC 6121



Fonte: O autor.

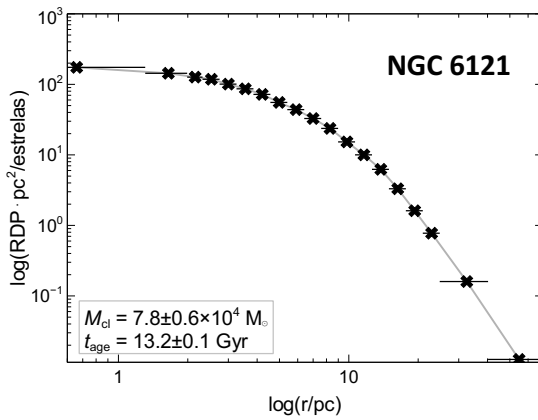
Figura 31 – Funções de luminosidade de NGC 6121



A região sombreada representa limites de 1σ da LF observada; símbolo azuis: LF simulada pelo *fitCMD*.

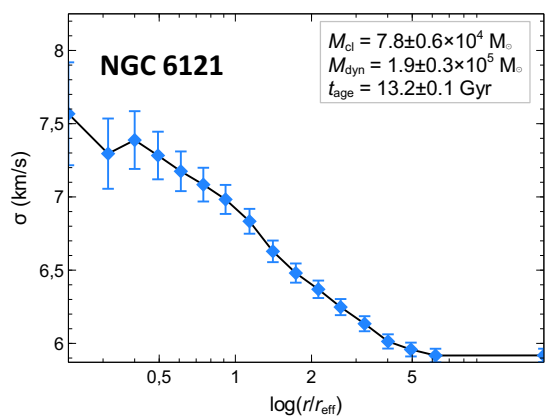
Fonte: O autor.

Figura 32 – Perfil de densidade radial de NGC 6121



Fonte: O autor.

Figura 33 – Perfil de dispersão de velocidade de NGC 6121



Fonte: O autor.

qualquer estrela situada nesse valor r deve possuir uma velocidade radial nula, uma vez que valores diferentes de zero implicariam em uma órbita que a levaria além desse raio. Dessa forma, as velocidades observadas na linha de visada devem cair para zero à medida que se aproximam da borda do aglomerado. NGC 6121, portanto, é um exemplo claro de sistema de N-corpos virializado, ou seja, em equilíbrio dinâmico.

4.6 Observações suplementares

Ao examinar as funções de luminosidade dos aglomerados estelares discutidos individualmente, observa-se uma tendência de deslocamento do pico de densidade estelar para magnitudes mais elevadas. Esta observação está em consonância com a compreensão de que estrelas de magnitude inferior, as quais são mais massivas, já passaram por seu ciclo de vida, explodindo como supernovas ou evoluindo via estágios de nebulosas planetárias, culminando em um estado final como anãs brancas. Ademais, como discutido por (ŽERJAL et al., 2023), aglomerados estelares que possuem idades comparáveis às das Plêiades ou das Híades demonstram um nível de similaridade entre as funções de luminosidade inferior em relação a OCs mais jovens, sendo a evolução da dinâmica interna um dos fatores que poderiam explicar a diversidade crescente desses objetos.

De resto, analisando qualitativamente as curvas de dispersão de velocidade dos aglomerados abertos, percebe-se, em particular para OCs mais jovens (Figura 5), uma tendência de curvas mais planas e até mesmo crescentes, o que pode indicar perda de estrelas para o campo, ou seja, durante processos perturbativos, um aglomerado não se encontra em um estado de equilíbrio virial. Por conseguinte, espera-se significativa ejeção de massa durante esse período. À medida que OCs envelhecem, é esperado que as curvas de dispersão apresentem uma queda em σ com r crescente, como ocorre com o aglomerado globular NGC 6121 (Figura 33), mas de maneira menos acentuada, pois não são objetos tão organizados e regulares como GCs. Entretanto, há a existência de casos como o do aglomerado Melotte 25 (as Híades), por exemplo, que — como também relatado por Oh e Evans (2020) — aparenta estar distante de qualquer equilíbrio virial e não se pode esperar que sobreviva no atual estado frágil por muito mais tempo. Sua dispersão de velocidade mantém uma memória da massa inicial, que engloba tanto o gás quanto as estrelas. Portanto, é provável que as estimativas de massa dinâmica estejam superestimadas por um fator muito significativo, conforme indicado por Goodwin e Bastian (2006).

5 Considerações Finais

A determinação de parâmetros astrofísicos de aglomerados estelares em diferentes estados dinâmicos mostra-se importante para uma ampla variedade de estudos, como a determinação da taxa de formação estelar na Via Láctea, por exemplo. Utilizou-se, nesse trabalho, de dados fotométricos e de movimento próprio, obtidos pelo satélite Gaia, para derivar parâmetros fundamentais de quarenta aglomerados abertos de diferentes idades — dez para cada faixa específica de idade em escala logarítmica, sendo essas 7, 7.7, 8 e 9 (log yr) — com distâncias inferiores a 3000 pc. A partir do programa *fitCMD*, buscaram-se as isócronas que melhor eram ajustadas aos CMDs dos objetos, podendo assim extrair diversos valores como massa do aglomerado, sua idade, módulo de distância, distância ao Sol, excesso de cor e metalicidade. No entanto, a obtenção de idades precisas é dificultada, muitas vezes pela falta de estrelas de grande massa, ampliando as incertezas no ajuste de isócronas. Além disso, não é viável realizar uma comparação direta de todos os valores de saída do *fitCMD* com dados da literatura, uma vez que cada estudo geralmente se concentra em um parâmetro específico (ou um grupo limitado de parâmetros).

Finalmente, os aglomerados abertos Collinder 69, Blanco 1, NGC 2281 e NGC 2204 foram discutidos individualmente, assim como o aglomerado globular NGC 6121, sendo possível efetuar comparações relativas aos seus diagramas cor-magnitude, funções de luminosidade, RDPs e VDPs. Realizou-se, ainda, uma discussão abrangente acerca da dinâmica interna dos aglomerados de maneira qualitativa, a qual foi embasada no comportamento das curvas de dispersão de velocidade radial desses objetos. De maneira geral, aglomerados abertos mais jovens apresentam curvas de dispersão planas ou acentuadas, indicando ausência de equilíbrio dinâmico, enquanto OCs mais velhos tendem a um estado dinamicamente relaxado, com curvas decrescentes de dispersão, como ocorre com NGC 6121.

Como perspectivas futuras, pretende-se realizar uma análise mais aprofundada dos aglomerados presentes neste estudo, com a adição de mais objetos próximos ao plano Galáctico, ou seja, com baixos valores de latitude galáctica. Apesar da provável maior dificuldade na descontaminação das estrelas de campo, essa inclusão visa diversificar a amostra. Além de tudo, procurar-se-á conferir mais enfoque ao entendimento dos processos dinâmicos decorrentes da evolução dos sistemas estelares abordados neste trabalho. Efeitos internos, como segregação de massa, e efeitos externos, tal qual interações de maré, poderão ser identificados a partir da análise aprofundada dos parâmetros fundamentais e estruturais relatados dentro deste trabalho.

Referências

- ALFONSO, J.; GARCÍA-VARELA, A. A *Gaia* astrometric view of the open clusters Pleiades, Praesepe, and Blanco 1. *Astronomy & Astrophysics*, v. 677, p. A163, set. 2023. ISSN 0004-6361, 1432-0746. Disponível em: <<https://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/202346569>>. Citado na página 38.
- BABUSIAUX, C. et al. Gaia Data Release 2 - Observational Hertzsprung-Russell diagrams. *Astronomy & Astrophysics*, v. 616, p. A10, ago. 2018. ISSN 0004-6361, 1432-0746. Disponível em: <<https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2018/08/aa32843-18/aa32843-18.html>>. Citado na página 38.
- BADAWY, W. A. et al. Open clusters with proper motions fully separated from the field stars using Gaia DR2. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, v. 11, n. 1, p. 142–146, dez. 2022. ISSN 2090-9977. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20909977.2022.2037817>>. Citado na página 21.
- BARRADO, D. et al. XMM- *Newton* investigations of the Lambda Orionis star-forming region (XILO): I. The young cluster Collinder 69. v. 526, p. A21, 2011. ISSN 0004-6361, 1432-0746. Disponível em: <<http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/201014732>>. Citado na página 37.
- BINNEY, J.; MERRIFIELD, M. *Galactic Astronomy*. Princeton University Press, 1998. (Princeton Series in Astrophysics). ISBN 978-0-691-02565-0. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=arYYRoYjKacC>>. Citado na página 42.
- BINNEY, J.; TREMAINE, S. *Galactic Dynamics: Second Edition*. Princeton University Press, 2011. ISBN 9781400828722 9780691130262. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/10.2307/j.ctvc778ff>>. Citado 4 vezes nas páginas 12, 13, 14 e 15.
- BLAND-HAWTHORN, J.; KRUMHOLZ, M.; FREEMAN, K. The Long-term Evolution of the Galactic Disk Traced by Dissolving Star Clusters. 2010. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1002.4357>>. Citado na página 13.
- BONATTO, C. An efficient approach to extract parameters from star cluster CMDs: fitCMD. 2018. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1812.01650>>. Citado 4 vezes nas páginas 12, 15, 22 e 23.
- BONATTO, C.; BICA, E. Old open clusters in the inner Galaxy: FSR 1744, FSR 89 and FSR 31. *Astronomy & Astrophysics*, v. 473, n. 2, p. 445–455, out. 2007. ISSN 0004-6361, 1432-0746. Disponível em: <<http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361:20077675>>. Citado na página 14.
- BONATTO, C.; BICA, E. Structural parameters of star clusters: relations among light, mass and star-count radial profiles, and dependence on photometric depth. *Astronomy & Astrophysics*, v. 477, n. 3, p. 829–838, jan. 2008. ISSN 0004-6361, 1432-0746. Disponível em: <<http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361:20078616>>. Citado na página 23.

- BONATTO, C.; CHIES-SANTOS, A. L. Lifting the dust veil from the globular cluster Palomar 2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 493, n. 2, p. 2688–2693, abr. 2020. ISSN 0035-8711, 1365-2966. Disponível em: <<https://academic.oup.com/mnras/article/493/2/2688/5741731>>. Citado na página 22.
- BONATTO, C.; LIMA, E. F.; BICA, E. Unveiling hidden properties of young star clusters: differential reddening, star-formation spread, and binary fraction. *Astronomy & Astrophysics*, v. 540, p. A137, abr. 2012. ISSN 0004-6361, 1432-0746. Disponível em: <<http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/201118576>>. Citado na página 23.
- BOSSINI, D. et al. Age determination for 269 *Gaia* DR2 open clusters. *Astronomy & Astrophysics*, v. 623, p. A108, mar. 2019. ISSN 0004-6361, 1432-0746. Disponível em: <<https://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/201834693>>. Citado na página 40.
- BRESSAN, A. et al. PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 427, n. 1, p. 127–145, nov. 2012. ISSN 00358711, 13652966. ArXiv:1208.4498 [astro-ph]. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1208.4498>>. Citado na página 22.
- CAPUTO, F.; CASTELLANI, V.; QUARTA, M. L. Reddening distance modulus and age of the globular cluster NGC 6121 (M4) from the properties of RR Lyrae variables. *Astronomy and Astrophysics*, v. 143, p. 8–12, fev. 1985. ISSN 0004-6361. ADS Bibcode: 1985A&A...143...8C. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1985A&A...143...8C>>. Citado na página 42.
- CHABRIER, G. Galactic Stellar and Substellar Initial Mass Function. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 115, n. 809, p. 763–795, jul. 2003. ISSN 0004-6280, 1538-3873. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1086/376392>>. Citado na página 15.
- CHEN, Y. et al. PARSEC evolutionary tracks of massive stars up to $350 M_{\odot}$ at metallicities $0.0001 \leq z \leq 0.04$. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 452, n. 1, p. 1068–1080, set. 2015. ISSN 0035-8711, 1365-2966. ArXiv:1506.01681 [astro-ph]. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1506.01681>>. Citado na página 22.
- CHEN, Y. et al. Improving PARSEC models for very low mass stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 444, n. 3, p. 2525–2543, nov. 2014. ISSN 0035-8711, 1365-2966. ArXiv:1409.0322 [astro-ph]. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1409.0322>>. Citado na página 22.
- FRITZEWski, D. J. et al. A rotational age for the open cluster NGC 2281: The possibility of using the fast rotator sequence for accurate cluster age determinations. *Astronomy & Astrophysics*, v. 674, p. A152, jun. 2023. ISSN 0004-6361, 1432-0746. Disponível em: <<https://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/202346083>>. Citado na página 40.
- FU, X. et al. New PARSEC database of alpha-enhanced stellar evolutionary tracks and isochrones I. Calibration with 47 Tuc (NGC104) and the improvement on RGB bump. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 476, n. 1, p. 496–511, maio 2018. ISSN 0035-8711, 1365-2966. ArXiv:1801.07137 [astro-ph]. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1801.07137>>. Citado na página 22.

Gaia Collaboration et al. The *Gaia* mission. *Astronomy & Astrophysics*, v. 595, p. A1, nov. 2016. ISSN 0004-6361, 1432-0746. Disponível em: <<http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/201629272>>. Citado na página 15.

GALILEI, G. *Sidereus nuncius*. Apud Thomam Baglionum, 1610. Disponível em: <<https://library.si.edu/digital-library/book/sidereusnunciusm00gali>>. Citado na página 11.

GALILEI, G.; LEITAO, H. d. S. *Sidereus nuncius: o mensageiro das estrelas*. 3.a. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2010. 11,29,175–177 p. ISBN 9789723113174. Citado na página 11.

GIELES, M.; SANA, H.; ZWART, S. F. P. On the velocity dispersion of young star clusters: super-virial or binaries? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 402, n. 3, p. 1750–1757, mar. 2010. ISSN 00358711, 13652966. Disponível em: <<https://academic.oup.com/mnras/article-lookup/doi/10.1111/j.1365-2966.2009.15993.x>>. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 35.

GOODWIN, S. P.; BASTIAN, N. Gas expulsion and the destruction of massive young clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 373, n. 2, p. 752–758, dez. 2006. ISSN 0035-8711, 1365-2966. Disponível em: <<https://academic.oup.com/mnras/article-lookup/doi/10.1111/j.1365-2966.2006.11078.x>>. Citado na página 44.

HARRIS, G. L. H. Evolved stars in open clusters. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 30, p. 451–490, abr. 1976. ISSN 0067-0049. ADS Bibcode: 1976ApJS...30..451H. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1976ApJS...30..451H>>. Citado na página 40.

HEGGIE, D.; HUT, P. *The Gravitational Million-Body Problem: A Multidisciplinary Approach to Star Cluster Dynamics*. 1. ed. Cambridge University Press, 2003. ISBN 9780521773034 9780521774864 9781139164535. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/product/identifer/9781139164535/type/book>>. Citado na página 14.

HERTZSPRUNG, E. Ueber die Verwendung photographischer effektiver Wellenlaengen zur Bestimmung von Farbaequivalenten. *Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam*, v. 63, jan. 1911. Citado na página 12.

JACOBSON, H. R.; FRIEL, E. D.; PILACHOWSKI, C. A. A CHEMICAL ABUNDANCE STUDY OF RED GIANTS IN OPEN CLUSTERS NGC 2204 AND NGC 2243. *The Astronomical Journal*, v. 141, n. 2, p. 58, fev. 2011. ISSN 0004-6256, 1538-3881. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-6256/141/2/58>>. Citado na página 41.

KARTTUNEN, H. et al. (Ed.). *Fundamental Astronomy*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. ISBN 978-3-540-34143-7. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-34144-4>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

KASSIS, M. et al. Deep CCD Photometry of Old Open Clusters. *The Astronomical Journal*, v. 113, p. 1723–1732, maio 1997. ISSN 0004-6256. ADS Bibcode: 1997AJ....113.1723K. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997AJ....113.1723K>>. Citado na página 41.

- KIM, D. et al. Stellar Proper Motions in the Orion Nebula Cluster. *The Astronomical Journal*, v. 157, n. 3, p. 109, mar. 2019. ISSN 0004-6256, 1538-3881. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/aafb09>>. Citado na página 38.
- KIPPENHAHN, R.; WEIGERT, A.; WEISS, A. *Stellar Structure and Evolution*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. vii p. (Astronomy and Astrophysics Library). ISBN 978-3-642-30304-3. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-30304-3>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 15.
- KRAUSE, M. G. H. et al. The Physics of Star Cluster Formation and Evolution. *Space Science Reviews*, v. 216, n. 4, p. 64, jun. 2020. ISSN 0038-6308, 1572-9672. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s11214-020-00689-4>>. Citado na página 13.
- KROUPA, P. On the variation of the initial mass function. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 322, n. 2, p. 231–246, abr. 2001. ISSN 0035-8711, 1365-2966. Disponível em: <<https://academic.oup.com/mnras/article/322/2/231/962260>>. Citado na página 23.
- LADA, C. J.; LADA, E. A. Embedded Clusters in Molecular Clouds. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 41, n. 1, p. 57–115, set. 2003. ISSN 0066-4146, 1545-4282. ArXiv:astro-ph/0301540. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0301540>>. Citado na página 13.
- MARIGO, P. et al. A new generation of PARSEC-COLIBRI stellar isochrones including the TP-AGB phase. *The Astrophysical Journal*, v. 835, n. 1, p. 77, jan. 2017. ISSN 1538-4357. ArXiv:1701.08510 [astro-ph]. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1701.08510>>. Citado na página 22.
- MCKEE, C. F.; OSTRICKER, E. C. Theory of Star Formation. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, v. 45, n. 1, p. 565–687, set. 2007. ISSN 0066-4146, 1545-4282. ArXiv:0707.3514 [astro-ph]. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/0707.3514>>. Citado na página 11.
- MERMILLIOD, J. C. Comparative studies of young open clusters. *Astronomy and Astrophysics*, v. 97, p. 235–244, abr. 1981. ISSN 0004-6361. ADS Bibcode: 1981A&A....97..235M. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1981A&A....97..235M>>. Citado na página 40.
- MERMILLIOD, J.-C. The Database for Galactic Open Clusters (BDA). In: EGRET, D.; ALBRECHT, M. A. (Ed.). *Information & On-Line Data in Astronomy*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1995. v. 203, p. 127–138. ISBN 9789401041782 9789401103978. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-011-0397-8_12>. Citado na página 18.
- MERMILLIOD, J.-C. et al. Membership, binarity, and rotation of F-G-K stars in the open cluster Blanco 1. *Astronomy & Astrophysics*, v. 485, n. 1, p. 95–105, jul. 2008. ISSN 0004-6361, 1432-0746. Disponível em: <<http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361:20079072>>. Citado na página 38.
- NETOPIIL, M.; PAUNZEN, E.; STUTZ, C. Developments of the Open Cluster Database WEBDA. In: MOITINHO, A.; ALVES, J. (Ed.). *Star Clusters in the Era of Large Surveys*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 53–61. ISBN 9783642221125

9783642221132. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-22113-2_7>. Citado na página 18.

OH, S.; EVANS, N. W. Kinematic modelling of clusters with *Gaia* : the death throes of the Hyades. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 498, n. 2, p. 1920–1938, set. 2020. ISSN 0035-8711, 1365-2966. Disponível em: <<https://academic.oup.com/mnras/article/498/2/1920/5899755>>. Citado na página 44.

PANCINO, E. et al. The *Gaia* spectrophotometric standard stars survey - I. Preliminary results: Gaia SPSS survey - I. Preliminary results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 426, n. 3, p. 1767–1781, nov. 2012. ISSN 00358711. Disponível em: <<https://academic.oup.com/mnras/article-lookup/doi/10.1111/j.1365-2966.2012.21766.x>>. Citado na página 15.

RUSSELL, H. N. Relations Between the Spectra and Other Characteristics of the Stars. *Popular Astronomy*, v. 22, p. 331–351, jun. 1914. Citado na página 12.

SALARIS, M.; WEISS, A.; PERCIVAL, S. M. The age of the oldest Open Clusters. *Astronomy & Astrophysics*, v. 414, n. 1, p. 163–174, jan. 2004. ISSN 0004-6361, 1432-0746. Disponível em: <<http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361:20031578>>. Citado na página 41.

SALPETER, E. E. The Luminosity Function and Stellar Evolution. *The Astrophysical Journal*, v. 121, p. 161, jan. 1955. ISSN 0004-637X. ADS Bibcode: 1955ApJ...121..161S. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1955ApJ...121..161S>>. Citado na página 23.

STAHLER, S. W.; SHU, F. H.; TAAM, R. E. The evolution of protostars. I - Global formulation and results. *The Astrophysical Journal*, v. 241, p. 637–654, out. 1980. ISSN 0004-637X. ADS Bibcode: 1980ApJ...241..637S. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980ApJ...241..637S>>. Citado na página 13.

VALLENARI, A. et al. Gaia Data Release 3 - Summary of the content and survey properties. *Astronomy & Astrophysics*, v. 674, p. A1, jun. 2023. ISSN 0004-6361, 1432-0746. Disponível em: <<https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2023/06/aa43940-22/aa43940-22.html>>. Citado na página 16.

ZHANG, Y. et al. Diagnosing the Stellar Population and Tidal Structure of the Blanco 1 Star Cluster. *The Astrophysical Journal*, v. 889, n. 2, p. 99, fev. 2020. ISSN 0004-637X, 1538-4357. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ab63d4>>. Citado na página 38.

ŽERJAL, M. et al. Young nearby open clusters and their luminosity functions. *Astronomy & Astrophysics*, v. 678, p. A75, out. 2023. ISSN 0004-6361, 1432-0746. Disponível em: <<https://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/202345920>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 44.