

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
Dipartimento di Fisica e Astronomia “*Galileo Galilei*”

---

Laurea Triennale in Astronomia

## Età degli ammassi globulari in epoca Gaia

*Laureanda:*  
Rachele Toniolo

*Relatore:*

Prof. Giampaolo Piotto

*Correlatori:*

Dr. Domenico Nardiello

Dr. Marco Montalto

---

Anno Accademico 2017/2018



*Alla mia famiglia, passata, presente e futura.*



# Indice

<b>1</b>	<b>Gli ammassi globulari</b>	<b>3</b>
1.1	Introduzione . . . . .	3
1.2	Metodi per la derivazione dell'età . . . . .	3
1.3	Gaia . . . . .	9
1.4	Lo scopo . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Metodologia dell'analisi dati</b>	<b>11</b>
2.1	Selezione delle stelle . . . . .	11
2.2	I CMD delle isocrone . . . . .	13
2.3	Introduzione degli errori . . . . .	16
2.3.1	L'errore del modulo di distanza . . . . .	16
2.3.2	L'errore del reddening . . . . .	16
2.4	Interpolazione del CMD . . . . .	17
2.5	Analisi del $\chi^2$ . . . . .	20
2.6	Errori sull'età . . . . .	20
2.7	Confronto con la letteratura . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Presentazione dei risultati sperimentali</b>	<b>27</b>
3.1	NGC 104: <i>47 Tucanae</i> . . . . .	27
3.2	NGC 6121: <i>M 4</i> . . . . .	29
3.2.1	Reddening di Harris . . . . .	30
3.2.2	Reddening di Schlegel . . . . .	31
3.2.3	Reddening di Green . . . . .	32
3.2.4	Considerazioni finali . . . . .	33
3.3	NGC 6205: <i>M13</i> . . . . .	35
3.3.1	Reddening di Harris . . . . .	36
3.3.2	Reddening di Schlegel . . . . .	36
3.3.3	Reddening di Green . . . . .	36

---

3.3.4	Considerazioni finali . . . . .	38
3.4	NGC 6397 . . . . .	40
3.4.1	Reddening di Harris . . . . .	41
3.4.2	Reddening di Schlegel . . . . .	42
3.4.3	Considerazioni finali . . . . .	42
3.5	NGC 6656: <i>M22</i> . . . . .	44
3.5.1	Reddening di Harris . . . . .	44
3.5.2	Reddening di Schlegel . . . . .	46
3.5.3	Reddening di Green . . . . .	46
3.5.4	Considerazioni finali . . . . .	47
3.6	NGC 6752 . . . . .	48
3.6.1	Reddening di Harris . . . . .	49
3.6.2	Reddening di Schlegel . . . . .	50
3.6.3	Considerazioni finali . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>Ringraziamenti</b>	<b>55</b>
<b>A</b>	<b>Appendice</b>	<b>57</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>85</b>

# Abstract

Il catalogo *Gaia DR2* contiene le misure di parallasse più complete e aggiornate oggi disponibili. Basandosi sui suoi dati sono state ri-determinate le distanze di sei ammassi globulari vicini. Avvalendosi delle isocrone costruite da Dotter et al. (2008) e dei reddening stimati da Harris 1996 (2010 edition), Schlegel et al. (1998) e Green et al. (2018) si sono stimate le età degli ammassi globulari considerati.

Dopo le dovute analisi si arriva alla conclusione che il fattore di reddening è l'elemento che comporta maggiore incertezza nel calcolo delle età: è necessario riconsiderarne i valori per poter stimare al meglio l'età degli ammassi globulari.





# Gli ammassi globulari

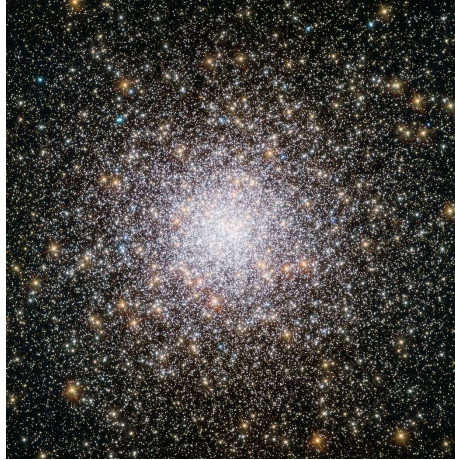
## 1.1 Introduzione

Gli ammassi globulari sono insiemi sferoidali di stelle che orbitano intorno alle galassie. Nella Via Lattea ce ne sono più di 150 e lo studio della loro età è sempre stato alla base delle principali teorie sulla nascita dell'Universo. Come si legge nel paper di Gratton et al. (1997), “gli ammassi globulari sono gli oggetti più vecchi della nostra galassia che possono essere datati con precisione, sfruttando le conoscenze della teoria di evoluzione stellare”. Difatti, oltre ad essere oggetti nati nelle fasi iniziali di formazione stellare, gli ammassi sono anche composti da stelle che si trovano all'incirca alla stessa distanza dall'osservatore (vi sono ovviamente delle differenze tra una stella e l'altra, ma sono minime se rapportate alla distanza da noi). Di conseguenza basterebbe conoscere la distanza di una sola delle componenti dell'ammasso per ottenere la distanza dell'ammasso e da questa conoscerne l'età, tramite l'utilizzo dei diversi metodi che saranno presentati nella sezione seguente.

In figura 1.1 vi è un'immagine dell'ammasso NGC 362 ottenuta con l'uso del telescopio spaziale Hubble. Si nota l'alta densità di stelle tipica di tali oggetti.

## 1.2 Metodi per la derivazione dell'età

In letteratura sono presenti molti lavori che studiano metodi diversi per calcolare l'età assoluta di un ammasso globulare. Si definisce *assoluta* per distinguerla da quella *relativa*: la prima assume come “punto zero” l'istante in cui è nato l'Universo, mentre la seconda si calcola in relazione all'età di



**Figura 1.1:** Ammasso globulare NGC 362.

un altro oggetto, di solito un altro ammasso globulare. In questo lavoro si è deciso di concentrare l'attenzione sul primo tipo.

La principale incertezza nel calcolo dell'età degli ammassi globulari risiede nella loro distanza: molti metodi si basano sull'analisi del diagramma colore-magnitudine (CMD) dell'ammasso<sup>1</sup>. Le magnitudini delle stelle in un ammasso globulare e le loro distanze dalla Terra sono legate dalla relazione:

$$(m - M)_0 = 5 \cdot \log d - 5$$

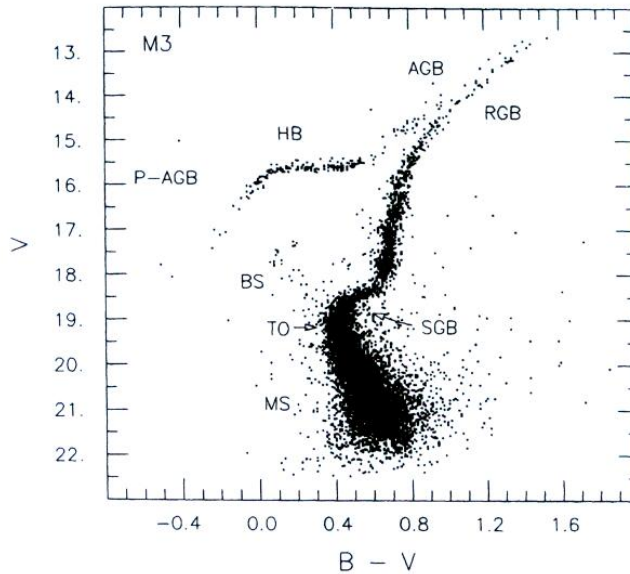
dove  $m$  è la magnitudine apparente e  $M$  la magnitudine assoluta,  $d$  la distanza misurata in  $[pc]$  e il pedice  $_0$  sta a indicare che non si è considerato l'assorbimento dovuto alla presenza, lungo la linea di vista, di polveri che assorbono la radiazione.

Una volta ottenuto il valore di *reddening*, lo si può sommare alle isocrone teoriche, che sono il luogo dei punti che una popolazione stellare semplice forma sul diagramma colore-magnitudine quando le stelle che la compongono si sono formate nello stesso momento. Ogni isocrona viene costruita basandosi su una data età e su diversi criteri dell'evoluzione stellare, ma deve essere trasportata dal piano teorico (il piano temperatura effettiva-luminosità che si traduce nel piano colore-magnitudini assolute) a quello osservativo (il piano colore-magnitudini apparenti), attraverso il modulo di distanza. In questo modo la si può confrontare con il CMD osservato dell'ammasso e l'età dell'isocrona che meglio lo rappresenta è l'età stimata dell'ammasso.

---

<sup>1</sup>Diagramma che mette in relazione il colore, ossia la differenza di magnitudine tra due bande scelte, e la magnitudine apparente per ogni stella dell'oggetto in questione.

In figura 1.2 si riporta a titolo d'esempio il CMD dell'ammasso M13 con evidenziate le varie componenti.



**Figura 1.2:** CMD dell'ammasso M13. [<http://www.sscorp.com/observatory-3DHRDiagrams/3DColorMag.html>].

Di seguito si riportano i principali metodi usati per ricavare il modulo di distanza:

- **metodo di Baade-Wesselink:** studia la variazione del colore, della luminosità e della velocità radiale delle stelle variabili RR Lyrae per ottenere la loro magnitudine assoluta. La caratteristica di queste stelle è che appartengono all'*Horizontal Branch* (HB), il ramo orizzontale del CMD, così definito perché gli elementi che lo compongono presentano all'incirca lo stesso valore di magnitudine;
- **parallasse trigonometrica:** la parallasse è definita come l'angolo creato dallo spostamento apparente di una stella nel cielo nel corso di un anno, dovuto all'effetto di rivoluzione terrestre. Maggiore è tale variazione della posizione, minore è la distanza;
- **parallasse statistica:** calcola la distanza considerando i moti propri di un insieme di stelle nell'ipotesi che tutte siano alla stessa distanza e che sia nota la distribuzione delle loro velocità radiali;

- **modello dinamico:** la distanza si può ottenere confrontando il modello dinamico di King-Michie con i moti propri e le dispersioni delle velocità radiali degli elementi di un ammasso.  
Il vantaggio più grande di questa tecnica è di essere completamente indipendente dai modelli di evoluzione stellare (Carretta et al. 2000);
- **Cefeidi:** le Cefeidi sono stelle variabili che presentano una relazione fissa tra il periodo e la magnitudine assoluta;
- **binarie a eclisse:** lo studio dei loro parametri orbitali e delle caratteristiche fisiche delle due compagne permettono una derivazione della loro distanza;
- **red clump:** le stelle del *red clump*, la zona del ramo delle giganti rosse ad alta densità, sono la controparte ricca di metalli delle stelle dell'HB (che di norma sono povere). Dal confronto tra le stelle che lo compongono nei dintorni solari con parallasse nota e del *red clump* dell'ammasso si ottiene il modulo di distanza di quest'ultimo.  
L'applicabilità di questo metodo si basa su due assunzioni: la sua magnitudine assoluta non dipende dall'età e le popolazioni stellari non differiscono significativamente, in età e in metallicità, dalla popolazione del *red clump* nei dintorni solari (Carretta et al. 2000);
- **sequenza di raffreddamento delle nane bianche:** si confronta il ramo del CMD dell'ammasso che la rappresenta con un modello basato sullo studio di nane bianche nei dintorni solari con valori noti di parallasse e di massa. Lo spostamento in magnitudine tra le due rappresentazioni è dovuto al modulo di distanza.  
Questo metodo ha il vantaggio di essere indipendente dalla metallicità (almeno finché l'assunzione che la loro massa non dipenda dalla metallicità è corretta, come sottolinea Gratton et al. 2003), dall'età e dai dettagli della teoria della convezione (Carretta et al. 2000), ma dipende dalle assunzioni osservative fatte sul colore e dalla considerazione che la massa delle stelle usate come confronto sia la stessa di quelle di ammasso (Gratton et al. 1997);
- **confronto della main sequence:** il metodo è stato particolarmente sfruttato dall'avvento del database di Hipparcos, la prima missione ESA il cui obiettivo era la misurazione precisa delle parallassi di molte stelle. Dal suo catalogo si scelgono stelle di campo (in genere subnane), che presentano la stessa metallicità di quelle d'ammasso e con parallasse nota. Dal confronto della *Main Sequence* (MS) dei due modelli si

ottiene il modulo di distanza.

Le principali fonti di incertezze in questo metodo sono l'incertezza sulla metallicità (che definisce la forma della MS), la contaminazione di binarie non risolte (i cui valori di magnitudine e colore sono alterati dalla presenza di una compagna), le incertezze sul reddening (un solo errore di 0.05 mag comporta una variazione di 5 Gyr nell'età: Gratton et al. 1997).

In particolare la problematica del reddening si basa su una tecnica comunemente usata e descritta da Carretta et al. (2000): in genere l'abbondanza dei metalli dell'ammasso viene ricavata da analisi spettroscopiche di giganti che vi appartengono, mentre il campione di confronto presenta stelle nane. I modelli usati per il calcolo di metallicità rappresentano meglio le stelle nane che le giganti e questo potrebbe comportare una discrepanza sulle abbondanze.

Infine, in un lavoro recente Howes et al. (2018) sottolineano come i parametri del modello stellare scelti siano importanti nell'utilizzo del metodo, come il parametro della *mixing length theory* (la cui calibrazione non sembra valere per tutte le stelle), la diffusione di elementi pesanti sulla superficie stellare (è stato verificato che l'iniziale metallicità di una stella non è pari al valore che si osserva) e la variazione di risposta delle differenti combinazioni di filtri usati;

- **relazioni con la metallicità:** con gli anni si è riscontrata la presenza di una relazione tra la metallicità di un ammasso e la magnitudine assoluta di alcune sue componenti, come la magnitudine assoluta dell'*Horizontal Branch*  $M_V(HB)$  o delle variabili *RR Lyrae*  $M_V(RR)$ .

Esistono poi altri metodi che, invece di passare attraverso il fit con delle isocrone, sfruttano l'esistenza di relazioni calibrate tra l'età e la magnitudine assoluta di alcuni elementi del CMD dell'ammasso. Il primo tra tutti è il *Turn-Off* (TO), il punto rappresentato dalle stelle che lasciano la MS dopo l'esaurimento del primo combustibile, l'idrogeno. Questo viene definito come il punto più blu della MS ed è il principale indicatore dell'età dell'ammasso: la sua posizione nel CMD varia al variare di quest'ultima. Poiché rilevare la sua posizione esatta non è molto facile, a causa della linea che rappresenta il luogo medio del CMD dell'ammasso che in quel punto è quasi verticale, si usano misure alternative che sono funzione dell'età:

- **TO<sup>b</sup> e TO<sup>f</sup>:** sono definiti come i punti del *SubGiant Branch* (SGB), la fase successiva alla MS, che sono 0.05 mag più rossi (in colore) del TO e che giacciono in una porzione meno ripida dell'isocrona. Il primo è un indicatore d'età meno dipendente dai dettagli del modello stellare

usato (Gratton et al. 1997) e ha la stessa sensibilità all'età del TO. Il secondo è meno affetto da incertezze quali la teoria della convezione (Meissner & Weiss, 2006);

- **RGB:** le luminosità dell'estremità (*tip*) e del *bump*, un'altra zona ad alta densità, del *Red Giant Branch* (RGB), il ramo delle giganti rosse, dipendono dall'età. La magnitudine del *bump* si ottiene osservando la funzione di luminosità dell'ammasso: è quello che presenta un picco di luminosità dovuto al maggiore numero di stelle presenti;
- **HB:** come per il RGB, la sua luminosità  $M_V(HB)$  presenta una debole dipendenza dall'età ed è definita come la magnitudine assoluta in banda  $V$  di una stella dell'HB con temperatura  $\log T_{eff} = 3.85$ , ossia la temperatura di equilibrio di una RR Lyrae che si trova nei pressi del centro della striscia di instabilità (Gratton et al. 2003).

Da questi punti indicatori si possono ricavare ulteriori grandezze dalle loro differenze in colore o magnitudine, che oltre ad essere in relazione all'età, sono indipendenti dalla distanza:

- **metodi verticali:** si basano sulla differenza in magnitudine tra due indicatori con lo stesso valore di colore:  $\Delta V_{TO}^{HB}$ ,  $\Delta V_{TO^b}^{HB}$ ,  $\Delta V_{TO^f}^{HB}$ ,  $\Delta V_{TO}^{Bump}$ ,  $\Delta V_{TO}^{Tip}$ ,  $\Delta V_{HB}^{Bump}$ . In particolare il primo metodo non può essere usato quando l'ammasso presenta un HB molto blu e quasi verticale: in questi casi anche una piccola variazione in colore avrebbe un grande effetto sull'età (VandenBerg et al. 2013);
- **metodi orizzontali:** si basano sulla differenza in colore tra due indicatori con lo stesso valore di magnitudine:  $\Delta(B - V)_{TO}^{RGB}$ ,  $\Delta(B - V)_{TO}^{Bump}$ ; dove  $(B - V)_{RGB}$  è il punto 2.5 mag più luminoso del TO. Tali metodi sono particolarmente sensibili alla variazione dell'abbondanza dei metalli quando questi presentano alti valori (VandenBerg et al. 2013).

Per concludere, Chaboyer et al. (1998), in un lavoro in cui confrontano varie tecniche per la stima del modulo di distanza e dell'età degli ammassi globulari, sottolinea quali siano i parametri che, in ordine di abbondanza, influiscono considerevolmente: l'abbondanza degli elementi  $\alpha$  ( $[\alpha/Fe]$ ), il parametro della *mixing length theory*, l'abbondanza di elio, il suo coefficiente di diffusione. Nella scarsa conoscenza di alcuni di essi risiede il principale ostacolo agli studi svolti finora.

## 1.3 Gaia

Gaia<sup>2</sup> è un'ambiziosa missione dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) che ha come obiettivo la creazione di una mappa tridimensionale della Via Lattea, al fine di studiarne la composizione, formazione ed evoluzione. Lanciato nel dicembre 2013, il satellite sta compilando “il più grande catalogo astrometrico mai creato”<sup>3</sup>, includendo la misura dei colori e delle luminosità di molte stelle, oltre agli spettri degli elementi più luminosi della sua *survey*.

Nell'aprile 2018 è stato rilasciato il secondo e più atteso catalogo, definito DR2 (*Data Release 2*), contenente la misura della parallasse e del moto proprio di quasi un miliardo e mezzo di stelle. Ottenuto dopo 22 mesi di osservazione, tra luglio 2014 e maggio 2016, rappresenta un enorme passo avanti rispetto alla prima *release* della missione, la quale era basata su un solo anno di osservazione, fornendo la posizione di più di un miliardo di stelle, ma misura di parallasse e moto proprio di “solo” 2 milioni.

Gaia si presenta come l'erede di Hipparcos (*HIgh Precision PARallax COLlecting Satellite*), missione dell'ESA lanciata nel 1989 con gli stessi obiettivi. La nuova missione ha decisamente migliorato il catalogo del suo predecessore per vari motivi. Per esempio, lo specchio primario di Gaia raccoglie 30 volte più luce della missione precedente, producendo misure molto più sensibili e accurate. La misura della posizione e dei moti delle stelle risulta anch'essa essere 200 volte più precisa di quella di Hipparcos, a tal punto che “se Hipparcos può misurare un angolo che corrisponde all'altezza di un astronauta sulla Luna, Gaia può misurare l'unghia del suo pollice”<sup>4</sup>.

## 1.4 Lo scopo

Lo scopo di questa tesi consiste nel ri-determinare le distanze di sei ammassi globulari vicini, basandosi sul database *Gaia DR2*, e, tramite l'utilizzo di isocrone disponibili in letteratura, ottenere una nuova stima delle età. Tali risultati saranno infine confrontati con i valori ricavati da lavori precedenti.

La scelta dei sei ammassi è stata guidata dalla necessità di avere un basso valore di reddening, poiché si è rivelato essere la principale fonte di incertezza nella nostra analisi.

---

<sup>2</sup>Il nome è dovuto all'acronimo originariamente ideato: *Global Astrometric Interferometer for Astrophysics* che rifletteva la tecnica che avrebbe dovuto usare, l'interferometria. In seguito, quando questa è cambiata a favore delle tecniche più all'avanguardia dei telescopi ottici, si è deciso di conservare lo stesso nome per dare continuità al progetto.

<sup>3</sup><http://sci.esa.int/gaia/60147-waiting-for-gaia-s-second-data-release/>

<sup>4</sup><http://sci.esa.int/gaia/28820-summary/>

La tabella 1.1 riporta la selezione di ammassi con le rispettive coordinate.

NGC	Altri nomi	RA [°]	DEC [°]
0104	47 Tuc	+6.02	-72.08
6121	M 4	+245.90	-26.53
6205	M 13	+250.42	+36.46
6397		+265.18	-53.67
6656	M 22	+279.10	-23.94
6752		+287.72	-59.98

**Tabella 1.1:** Coordinate in ascensione retta (RA) e declinazione (DEC) dei sei ammassi studiati in questa tesi. I valori sono stata ottenuti dal database *Simbad*.

Per ogni ammasso si è calcolato il suo modulo di distanza a partire dalle parallassi fornite da Gaia e tramite questo si è confrontato il suo CMD, in particolare la zona del TO, con le isocrone ricavate in letteratura. La novità di questa tecnica consiste nell’elevata precisione ottenuta da Gaia nel calcolo delle distanze.

Per avere la miglior stima possibile si è deciso di considerare la variazione delle isocrone dovuta all’incertezza del modulo di distanza e del reddening. Con il procedere dello studio si è rilevata la necessità di uno studio più approfondito basato anche sull’incertezza del valore delle abbondanze  $[Fe/H]$  e  $[\alpha/Fe]$ , il quale non è stato tuttavia eseguito poiché sarebbe andato oltre lo scopo di questa tesi.



# Metodologia dell'analisi dati

Nella scelta della metodologia dell'analisi dei dati si è preso spunto dal paper *'Gaia Data Release 2: Observational Hertzsprung-Russell diagrams'*. Il lavoro si pone l'obbiettivo di costruire diagrammi HR per diverse popolazioni stellari usando il secondo catalogo *DR2*, allo scopo di sottolineare la potenza di Gaia nello studio delle strutture di quest'ultimi.

## 2.1 Selezione delle stelle

Poiché il catalogo *DR2* osserva quante più stelle possibili presenti nell'area di cielo considerata, il primo passaggio è stato selezionare le stelle di ammasso che presentano dati sufficientemente precisi per un calcolo del modulo di distanza. Seguendo le indicazioni del paper Gaia Collaboration et al. (2018) si sono scelte le stelle che rispettano le tre condizioni qui riportate e comprese entro una circonferenza di raggio  $1^\circ$  dal centro dell'ammasso:

$$\textit{excess factor} > 1.0 + 0.015(G_{BP} - G_{RP})^2 \quad (2.1)$$

$$\textit{excess factor} < 1.3 + 0.06(G_{BP} - G_{RP})^2 \quad (2.2)$$

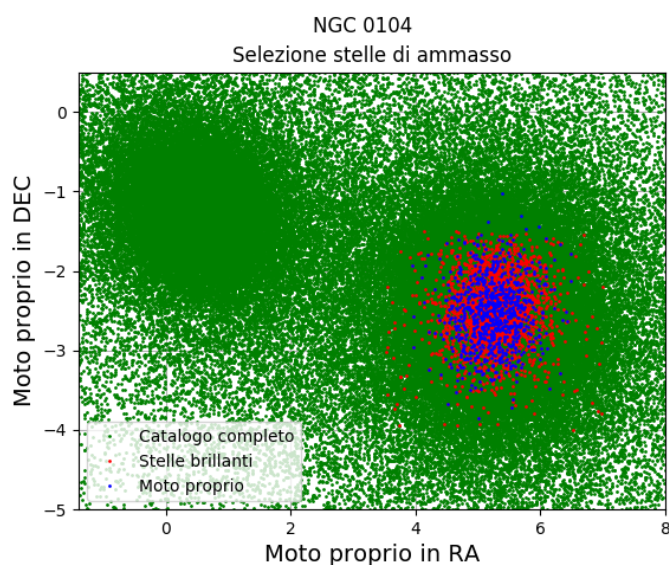
$$\sqrt{\chi^2/(\nu' - 5)} < 1.2 \cdot \max(1, \exp(-0.2(G - 19.5))) \quad (2.3)$$

dove *excess factor* è definito come  $(I_{BP} + I_{RP})/I_G$ , con  $I_{BP}$ ,  $I_{RP}$ ,  $I_G$  i flussi delle tre bande in cui Gaia ha lavorato;  $G_{BP}$ ,  $G_{RP}$  e  $G$  le rispettive magnitudini;  $\chi^2$  il chi quadro, un valore statistico che descrive l'affidabilità delle misure astrometriche e  $\nu'$  il numero di osservazioni considerate valide. Le condizioni (2.1) e (2.2) sono state introdotte per tenere conto del fatto che i flussi misurati delle singole stelle possono includere contributi anche da sorgenti vicine, mentre (2.3) permette di selezionare solo le sorgenti che sono stelle singole e non multiple.

Infine, per calcolare le distanze, si scelgono le stelle che presentano anche una magnitudine apparente in banda G minore di 16 mag, per avere la certezza di trattare stelle con misure il più precise possibili. Questa selezione da adesso in poi verrà chiamata “*Stelle brillanti*”.

Nel “*vectoir-point diagram*”, che mette in relazione il moto proprio delle stelle lungo la declinazione e il moto proprio lungo l’ascensione retta, come prima selezione si scelgono le stelle che appartengono all’ammasso: sono quelle che presentano lo stesso moto proprio rispetto all’osservatore. Di queste si calcola il valore medio dei moti propri: il risultato rappresenterà il *centro del moto proprio dell’ammasso*.

A titolo d’esempio viene riportato in figura 2.1 il grafico descritto sopra per l’ammasso NGC 104. Osservando il “*Catalogo completo*” (punti verdi) si nota facilmente che si presentano due agglomerati di elementi: uno rappresenta i moti propri dell’ammasso (sulla destra), mentre l’altro caratterizza le stelle di campo (sulla sinistra).



**Figura 2.1:** Distribuzione dei moti propri delle stelle presenti entro un grado dal centro dell’ammasso. Il colore verde rappresenta tutte le stelle considerate, il colore rosso quelle appartenenti alla selezione “*Stelle brillanti*” e il colore blu quelle della selezione “*Moto proprio*”.

Dalle “*Stelle brillanti*” si scelgono gli elementi che presentano parallasse non negativa con errore relativo sulla parallasse minore del 10% (in alcuni casi, data la scarsità di stelle di questa selezione, si è dovuto alzare il limite al 20% o 30%) e che si trovano a una distanza in moto proprio minore di 1.5

mas/yrs dal centro del moto proprio dell'ammasso. Questa selezione viene chiamata “*Moto proprio*” ed è presente nel grafico di figura 2.1 (punti blu).

Per ogni stella di questa selezione si è calcolato il valore della distanza:

$$d = \frac{1}{\pi} \quad (2.4)$$

dove  $d$  rappresenta la distanza in  $kpc$  e  $\pi$  la parallasse in  $mas$ . Per i valori ottenuti si è applicata una media clippata, ottenuta interpolando iterativamente una gaussiana alla distribuzione della distanza ed escludendo, ad ogni iterazione, i punti al di fuori di  $4\sigma$ , dove  $\sigma$  è la deviazione standard. Così facendo si sono eliminati i punti che deviano troppo dal valore medio. Dopo aver escluso gli *outliers*, il valore finale della distanza  $D$  con incertezza  $e_D$  sarà infine dato da:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} d_i}{N} \quad (2.5)$$

$$e_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (d_i - D)^2}{N}} \quad (2.6)$$

dove  $N$  è il numero totale di stelle della selezione “*Moto proprio*” e le distanze sono espresse in  $kpc$ . Il modulo di distanza  $m - M$  si calcola tramite la nota formula:

$$(m - M)_0 = 5 \log (D \cdot 10^3) - 5 \quad (2.7)$$

con incertezza  $e_{(m-M)_0}$  ricavata dalla teoria di propagazione dell'errore:

$$e_{(m-M)_0} = \frac{5 \cdot e_D}{D \cdot \ln 10} \quad (2.8)$$

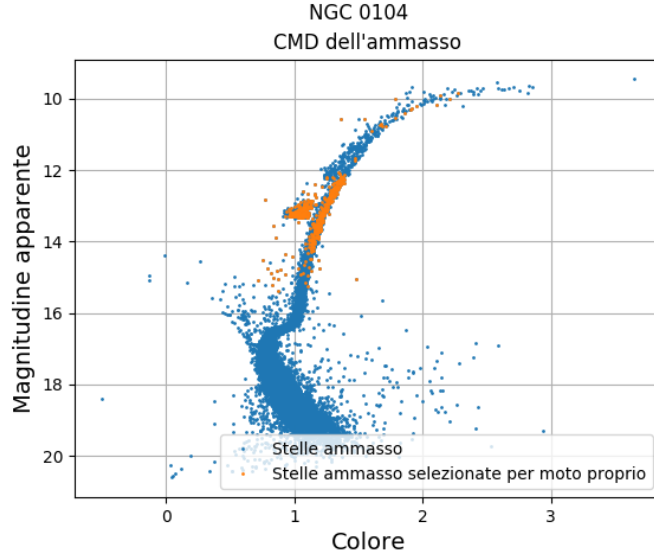
Infine si crea una selezione, chiamata “*Stelle di ammasso*”, con le quali si traccia il diagramma colore-magnitudine (CMD) e si fanno tutte le analisi successive: si scelgono le stelle che rispettano le tre condizioni (2.1), (2.2), (2.3) e con un moto proprio minore di 1.5 mas/yrs dal centro del moto proprio dell'ammasso includendo, in questa fase, anche le stelle con  $G > 16$ .

Nel grafico di figura 2.2 è riportato per NGC 104 in colore blu il CMD delle “*Stelle di ammasso*”, mentre in colore arancione le stelle della selezione “*Moto proprio*”, che sono quelle brillanti.

## 2.2 I CMD delle isocrone

Le isocrone di confronto sono state ottenute dal catalogo online di Dotter et al. (2008) <sup>1</sup>. Per ogni ammasso sono state costruite delle isocrone aventi

<sup>1</sup>[http://stellar.dartmouth.edu/models/isolf\\_new.html](http://stellar.dartmouth.edu/models/isolf_new.html)



**Figura 2.2:** CMD dell'ammasso NGC 104. I punti rossi descrivono le stelle della selezione “*Stelle di ammasso*”, mentre i punti arancioni quelle della selezione “*Moto proprio*”.

stessi valori di metallicità, reddening e *alpha-enhancement* (riportati nella tabella 2.1), ma diversi valori di età. Lo scopo finale è quello di confrontare tali isocrone con il CMD dell'ammasso e vedere quali di queste interpolano i dati osservativi.

Una volta ottenuti i dati per ogni isocrona (si è scelto un range di età che va da 9 Gyr a 15 Gyr con un passo di 0.5 Gyr) si è reso necessario trasformare il valore di magnitudine assoluta in apparente tramite il modulo di distanza e considerare il fattore di estinzione dovuto alla presenza, lungo la linea di vista, di polveri che assorbono la radiazione.

Nella trattazione di quest'ultimo parametro si è deciso di far riferimento alla teoria utilizzata nel paper Gaia Collaboration et al. (2018). Gli autori hanno usato una formula per definire il coefficiente di assorbimento, ripresa da Danielski et al. (2018), che permette di trasformare l'estinzione dell'ammasso nelle bande di Gaia tenendo conto della sua dipendenza dal colore e dal coefficiente di estinzione stesso  $A_0$ . L'equazione che ne risulta è la seguente:

$$k_x = c_1 + c_2(G_{BP} - G_{RP}) + c_3(G_{BP} - G_{RP})^2 + c_4(G_{BP} - G_{RP})^3 + c_5 \cdot A_0 + c_6 \cdot A_0^2 + c_7(G_{BP} - G_{RP})A_0 \quad (2.9)$$

con  $A_0 = 3.1 \cdot E(B - V)$  ed  $E(B - V)$  valore di reddening caratteristico di ogni ammasso;  $x$  rappresenta il tipo di banda considerato (in questo caso

NGC	E(B-V) Harris	E(B-V) Scheleg	E(B-V) Green	[Fe/H]	[ $\alpha$ /Fe]
0104	0.04	0.0320 $\pm$ 0.0004	-	-0.72	0.4
6121	0.35	0.4975 $\pm$ 0.0060	0.414 $\pm$ 0.004	-1.16	0.4
6205	0.02	0.0169 $\pm$ 0.0013	0.06 $\pm$ 0.01	-1.53	0.2
6397	0.18	0.1881 $\pm$ 0.0032	-	-2.02	0.4
6656	0.34	0.3252 $\pm$ 0.0041	0.27 $\pm$ 0.04	-1.70	0.2
6752	0.04	0.0564 $\pm$ 0.0011	-	-1.54	0.4

**Tabella 2.1:** Valori di reddening e abbondanze degli ammassi analizzati. Le colonne (2), (3), (4) riportano i valori di reddening ottenuti rispettivamente da Harris 1996 (2010 edition), Schlegel et al. (1998) e Green et al. (2018). La colonna (5) riporta le metallicità di Harris 1996 (2010 edition) e la colonna (6) le abbondanze degli  $\alpha$ -enhancements approssimate a 0.2 o 0.4 e acquisite dal paper di Carretta et al. (2010).

$BP$ ,  $RP$  o  $G$ ). Infine si ricava  $A_x = A_0 \cdot k_x$ . I coefficienti  $c$  indicati variano a seconda della banda considerata, secondo la tabella 2.2.

	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$
$k_G$	0.9761	-0.1704	0.0086	0.0011	-0.0438	0.0013	0.0099
$k_{BP}$	1.1517	-0.0871	-0.0333	0.0173	-0.0230	0.0006	0.0043
$k_{RP}$	0.6104	-0.0170	-0.0026	-0.0017	-0.0078	0.00005	0.0006

**Tabella 2.2:** Coefficienti per l'equazione (2.9)

Per definire il colore dell'isocrona si usa la formula seguente:

$$colore = G_{BP} - G_{RP} = (G_{BP} - G_{RP})_0 + (A_B - A_R) \quad (2.10)$$

dove  $A_B$  e  $A_R$  rappresentano l'estinzione in banda  $BP$  e  $RP$ ,  $(G_{BP} - G_{RP})_0$  è il colore osservato, mentre  $(G_{BP} - G_{RP})_0$  è il colore intrinseco delle stelle. Come da definizione il colore rappresenta la differenza di magnitudine tra due diverse bande, alle quali va aggiunto il valore di estinzione per tenere conto della presenza di polveri lungo la linea di vista.

Per il calcolo della magnitudine apparente si è utilizzata la magnitudine della banda  $RP$ . Dalla formula del modulo di distanza si ricava l'equazione per la magnitudine apparente  $m$ :

$$m = G_{RP} + (m - M)_0 + A_R \quad (2.11)$$

## 2.3 Introduzione degli errori

Per poter avere una stima degli errori della nostra analisi, si è scelto di considerare due diversi tipi: l'errore del modulo di distanza ottenuto precedentemente e l'errore del reddening. Lo scopo è quello di ottenere altre quattro diverse stime di età da cui ricavare un errore superiore e uno inferiore finale.

### 2.3.1 L'errore del modulo di distanza

Nel primo caso si sono create, per ogni età, altre due isocrone: una ottenuta aggiungendo anche l'errore del modulo alla magnitudine assoluta e una togliendolo, secondo le formule seguenti:

$$m_{more} = G_{RP} + (m - M)_0 + e_{(m-M)_0} + A_R \quad (2.12)$$

$$m_{less} = G_{RP} + (m - M)_0 - e_{(m-M)_0} + A_R \quad (2.13)$$

dove si è indicato con  $m_{more}$  e  $m_{less}$  le magnitudini apparenti ottenute nei due casi. Il colore è rimasto invariato.

### 2.3.2 L'errore del reddening

Nel caso dell'errore del reddening sono state necessarie analisi più approfondite. Per ogni ammasso si sono scelti tre diversi valori di  $E(B - V)$ : i valori di Harris<sup>2</sup>, Schlegel<sup>3</sup> e Green<sup>4</sup> ove disponibile. Per considerare l'incertezza del valore di Harris si è preso il 10% del valore stesso, mentre negli altri due casi l'errore veniva già proposto, secondo i valori di tabella 2.1. Per ognuno di questi casi si è ri-calcolato il valore di  $A_0$ , considerando il valore inferiore e superiore di  $E(B - V)$  ottenuti togliendo e aggiungendo l'errore al valore medio, e di conseguenza il colore e la magnitudine apparente:

$$color_{emore} = G_{BP} + A_{Bm} - G_{RP} - A_{Rm} \quad (2.14)$$

$$color_{eless} = G_{BP} + A_{Bl} - G_{RP} - A_{Rl} \quad (2.15)$$

$$m_{emore} = G_{RP} + (m - M)_0 + A_{Rm} \quad (2.16)$$

$$m_{eless} = G_{RP} + (m - M)_0 + A_{Rl} \quad (2.17)$$

dove sono stati indicati con i pedici  $emore, m$  ed  $eless, l$  i nuovi valori ottenuti con il valore superiore e inferiore del reddening.

<sup>2</sup><http://physwww.mcmaster.ca/harris/mwgc.dat>

<sup>3</sup>Schlegel et al. 1998, ApJ, 500, 525

<sup>4</sup>Green et al. 2018, MNRAS, 478, 651

In conclusione si ottengono quindici diverse stime (dieci se il valore del reddening di Green non fosse disponibile) per l'età, una per ognuno dei casi presentati di seguito:

**Reddening di Harris, Schlegel o Green:**

- (a) valore medio del reddening e valore inferiore del modulo di distanza;
- (b) valore medio del reddening e valore superiore del modulo di distanza;
- (c) valore medio del modulo di distanza e del reddening;
- (d) valore medio del modulo di distanza e valore inferiore del reddening;
- (e) valore medio del modulo di distanza e valore superiore del reddening.

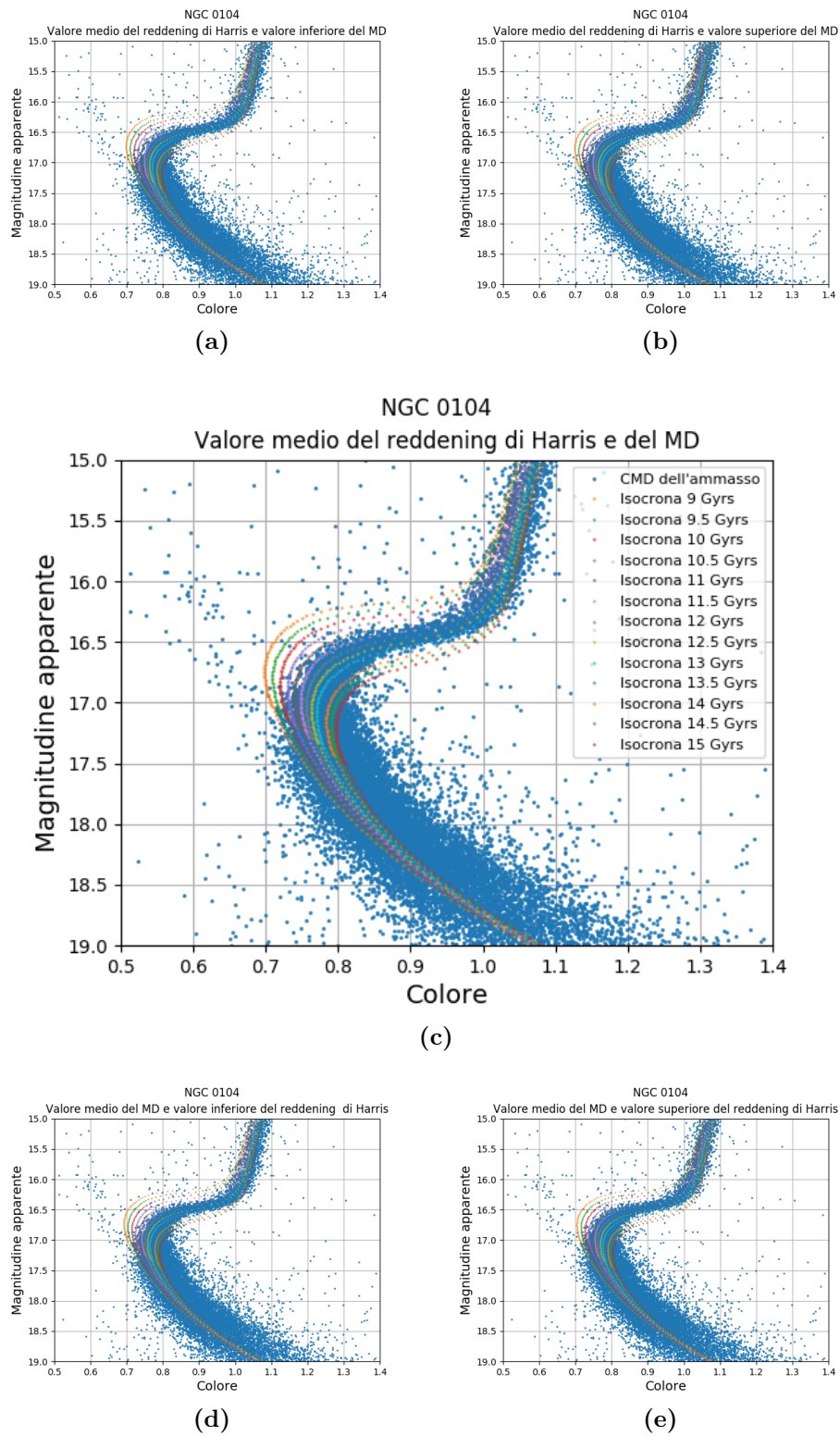
Per ognuno di questi si crea un grafico colore-magnitudine del CMD dell'ammasso e delle isocrone corrispondenti ai vari valori di età, per poter verificare visivamente se la teoria rispetta l'osservazione. Nei grafici di figura 2.3 e 2.4 sono riportati i CMD corrispondenti all'ammasso NGC 104 nel caso in cui si sia considerato il valore di reddening di Harris e di Schlegel.

## 2.4 Interpolazione del CMD

Il prossimo passaggio consiste nel creare una *fiducial line* che rappresenta un'interpolazione del CMD dell'ammasso per poterlo confrontare con le isocrone. Per fare ciò lo si è diviso, nella zona del TO, in bin di ampiezza di 0.25 mag. Per ognuno di questi si è applicata una media clippata per poter eliminare dall'analisi le stelle binarie che si trovano nella parte rossa del diagramma. In seguito si è calcolata la mediana in colore e in magnitudine. Questi punti sono stati interpolati linearmente su un vettore contenente le magnitudini da 16 a 18 distanziati da intervalli di 0.01 mag. Il risultato è un vettore che rappresenta i nuovi valori (teorici) del colore dell'ammasso in funzione della magnitudine, chiamata *fiducial line*.

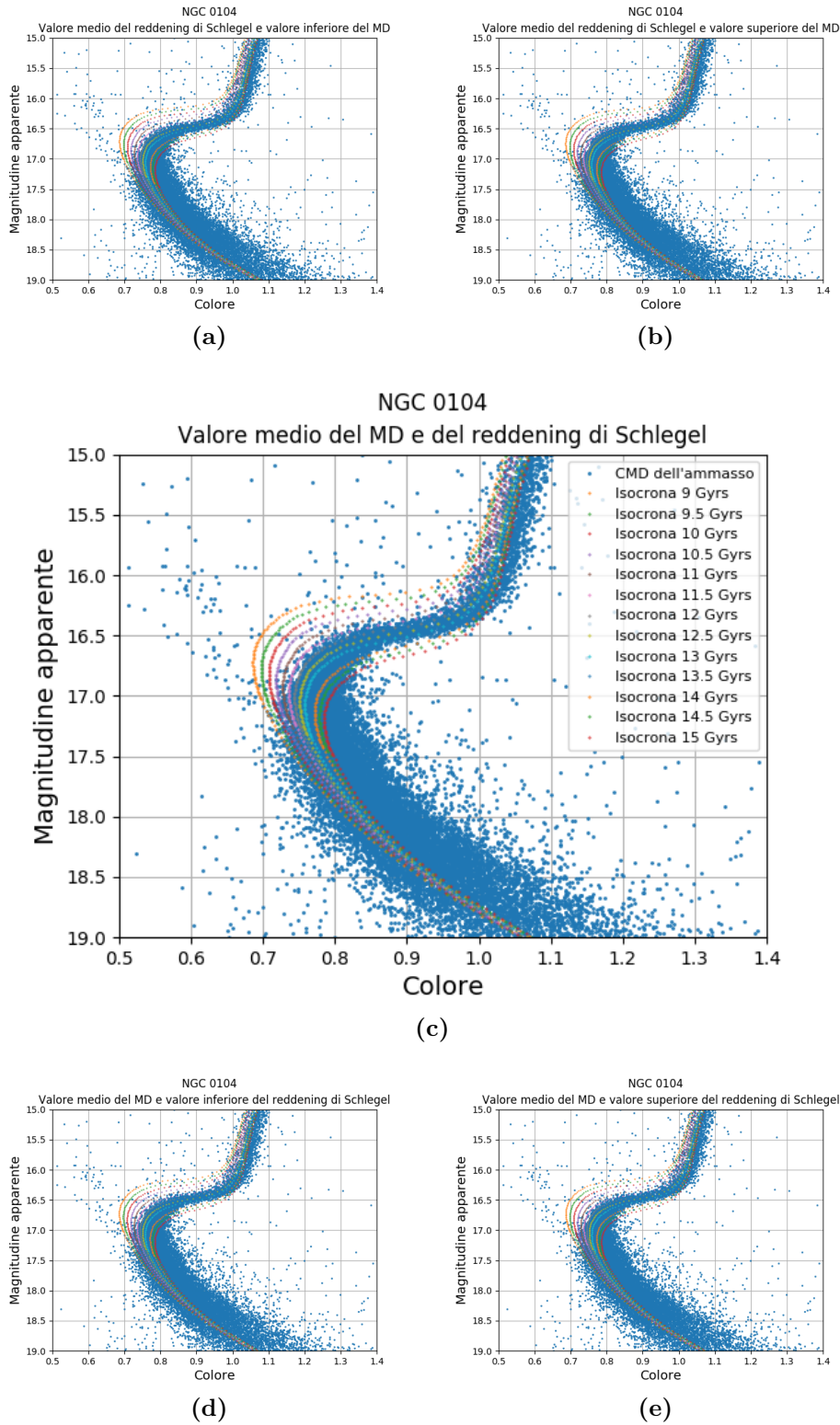
Lo stesso procedimento è stato applicato alle isocrone dei casi precedentemente presentati.

Nei grafici di figura 2.5 e 2.6 sono riportati i fit delle fiducial line delle isocrone e del CMD per l'ammasso NGC 104.



**Figura 2.3:** Isocrone e CMD dell'ammasso NGC 104 con reddening di Harris. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici. Le isocrone vanno da 9 Gyr (colore arancione, a sinistra) fino a 15 Gyr (colore rosso, a destra). I punti blu rappresentano le stelle che compongono il CMD dell'ammasso.





**Figura 2.4:** Isocrone e CMD dell'ammasso NGC 104 con reddening di Schlegel. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici. Le isocrone vanno da 9 Gyr (colore arancione, a sinistra) fino a 15 Gyr (colore rosso, a destra). I punti blu rappresentano le stelle che compongono il CMD dell'ammasso.

## 2.5 Analisi del $\chi^2$

Per capire qual è l'isocrona che più si avvicina al CMD dell'ammasso si calcola per ognuna il  $\chi^2$ , secondo la formula:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{i=N} (\text{fiducial}_i - \text{fiducial}_{obs;i})^2 \quad (2.18)$$

dove si indica con *fiducial* il valore del colore dell'isocrona e *fiducial<sub>obs</sub>* quello dell'ammasso; *N* è il numero di stelle con tali colori. L'età dell'isocrona per cui il valore del  $\chi^2$  è minore è la stima migliore.

Di nuovo, si applica la stessa tecnica alle isocrone ottenute con i vari metodi.

## 2.6 Errori sull'età

La relazione  $\chi^2$ -età dell'isocrona risulta essere una parabola. L'obiettivo è trovare il valore minimo di quest'ultima il cui corrispondente valore dell'età è il valore finale.

Nei grafici di figura 2.7 e 2.8 sono riportati, per l'ammasso NGC 104, i valori del  $\chi^2$  corrispondenti alle età considerate e la parabola che meglio li rappresenta.

Per ottenere un errore inferiore e uno superiore finale dell'età si calcola, nei tre casi di reddening considerati, la differenza tra il valore medio e quello ottenuto considerando un tipo di errore. Di questi si attua la somma in quadratura dell'incertezza del modulo di distanza e del reddening secondo le formule che seguono:

$$\text{errore}_{sup} = \sqrt{\text{errore}_{sup;md}^2 + \text{errore}_{sup;e}^2} \quad (2.19)$$

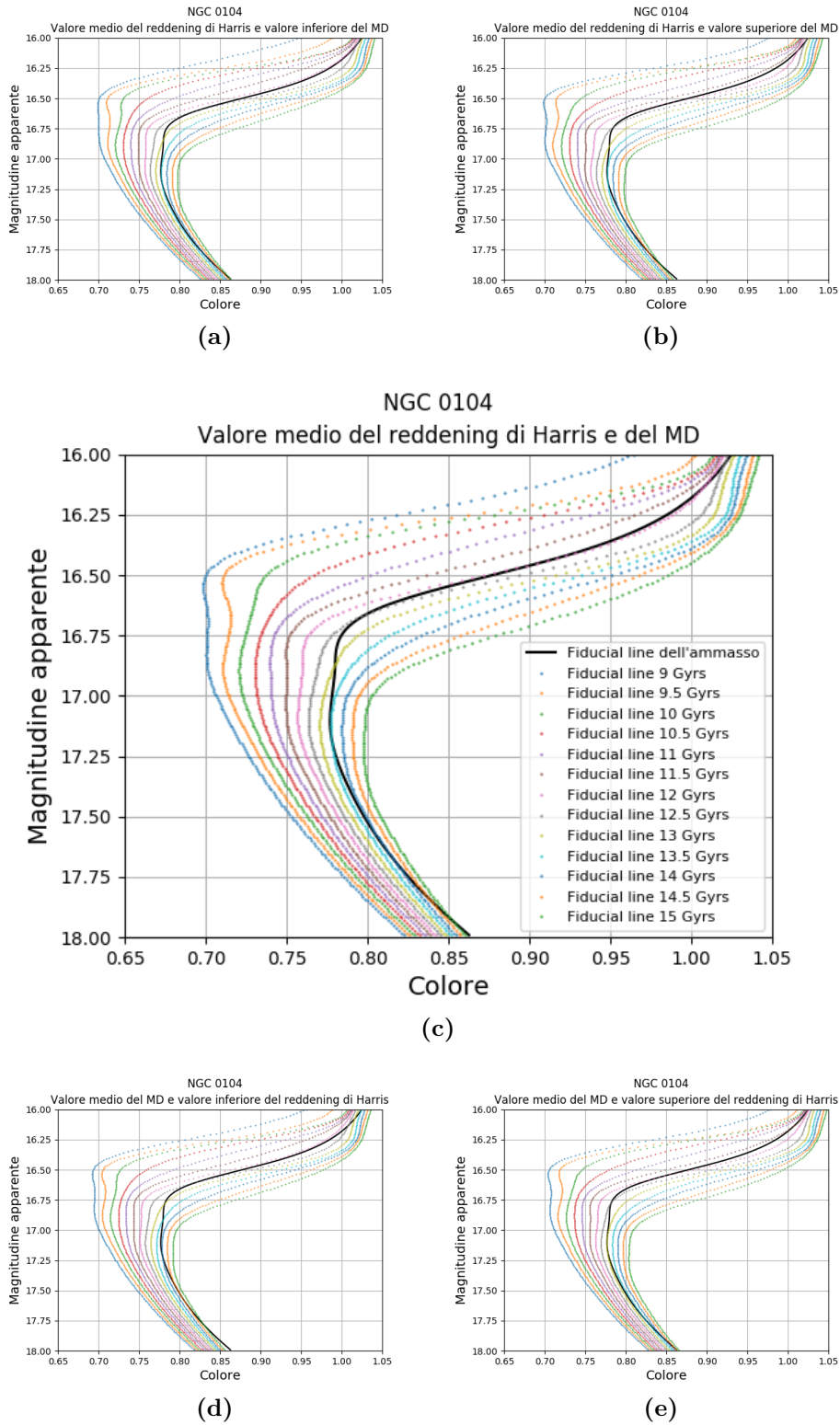
$$\text{errore}_{inf} = \sqrt{\text{errore}_{inf;md}^2 + \text{errore}_{inf;e}^2} \quad (2.20)$$

dove si sono indicati con i pedici *sup* i valori ottenuti dalla somma dell'errore del modulo di distanza (*md*) e del reddening (*e*) e *inf* per la sottrazione.

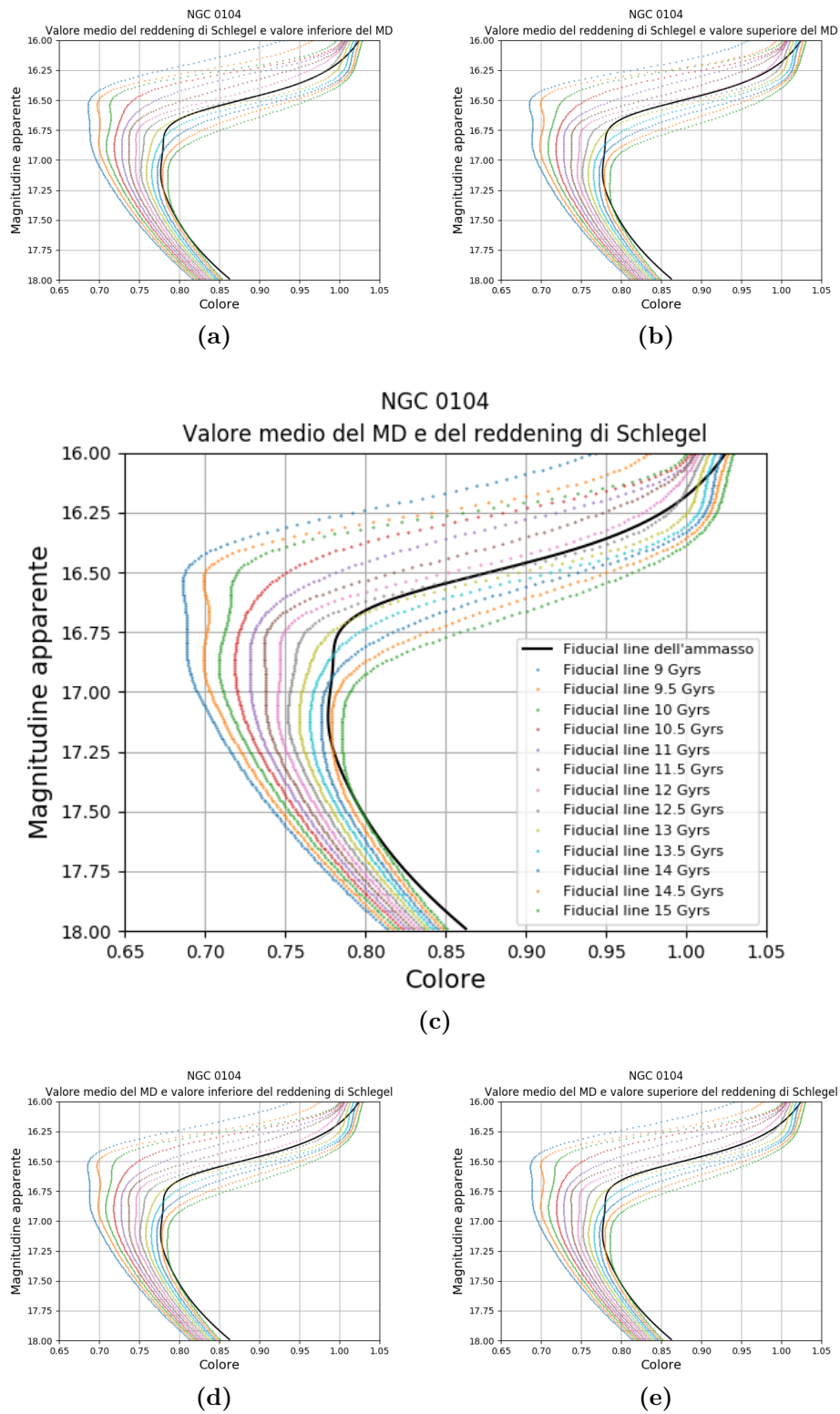
Infine, per ottenere la stima finale dell'età, si calcola la media pesata dei valori ottenuti con diversi reddening.

## 2.7 Confronto con la letteratura

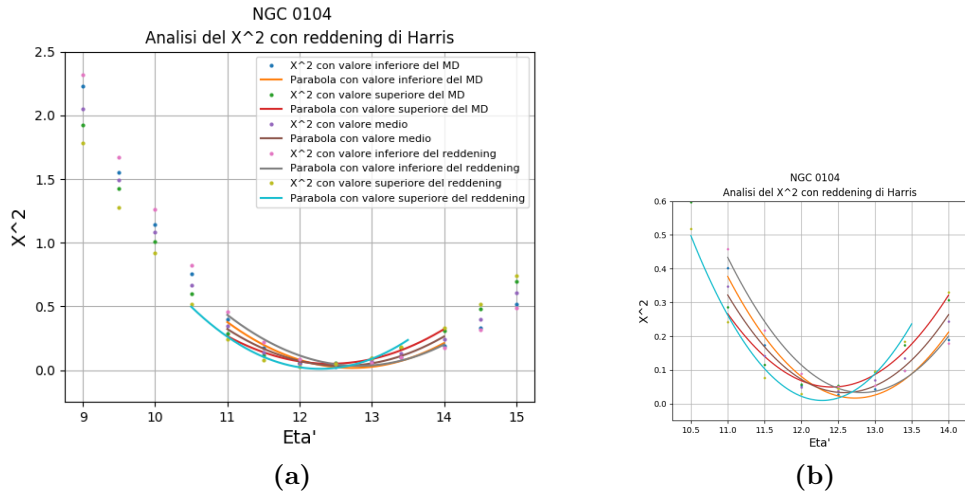
In conclusione si confrontano i risultati ottenuti con quelli ritrovati nei seguenti lavori:



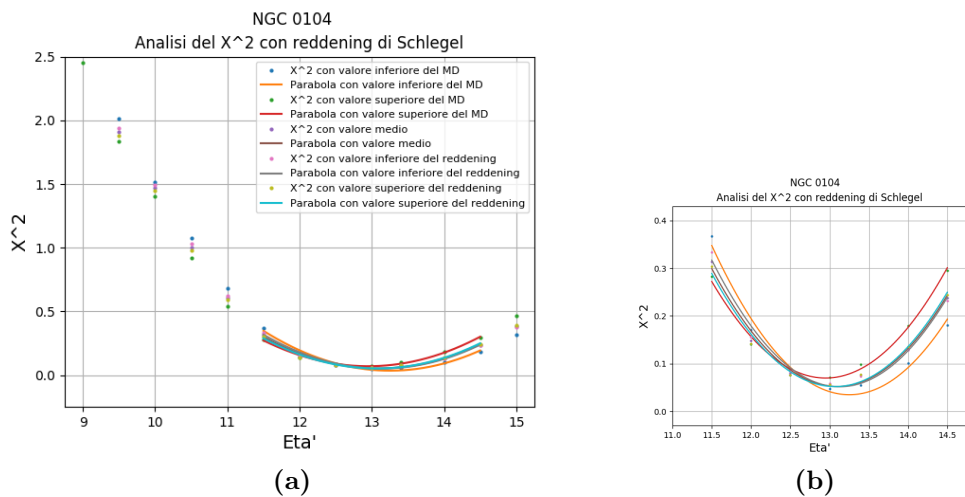
**Figura 2.5:** Fiducial line delle isocrone e del CMD dell'ammasso NGC 104 con reddening di Harris. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici. Le fiducial line delle isocrone vanno da 9 Gyr (colore azzurro, a sinistra) fino a 15 Gyr (colore verde, a destra). La linea nera rappresenta la fiducial line dell'ammasso.



**Figura 2.6:** Fiducial line delle isocrone e del CMD dell'ammasso NGC 104 con reddening di Schlegel. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici. Le fiducial line delle isocrone vanno da 9 Gyr (colore azzurro, a sinistra) fino a 15 Gyr (colore verde, a destra). La linea nera rappresenta la fiducial line dell'ammasso.



**Figura 2.7:**  $\chi^2$  dell'ammasso NGC 104 con reddening di Harris. Il secondo grafico rappresenta un ingrandimento del primo. Il colore arancione rappresenta il caso (a), rosso il caso (b), marrone il caso (c), viola il caso (d), azzurro il caso (e).



**Figura 2.8:**  $\chi^2$  dell'ammasso NGC 104 con reddening di Schlegel. Il secondo grafico rappresenta un ingrandimento del primo. Il colore arancione rappresenta il caso (a), rosso il caso (b), marrone il caso (c), viola il caso (d), azzurro il caso (e).

- **Gratton et al. (1997)** riporta le stime di età ottenute con diversi set di isocrone. La tecnica scelta si basa sull'utilizzo di  $M_V(TO)$ , usando il valore del modulo di distanza ottenuto dal confronto della MS con parallassi misurate da Hipparcos.  
Il valore d'età considerato di seguito come finale è la media delle stime della tabella 5 dell'articolo, così come per il reddening. Il valore di metallicità  $[Fe/H]$  è stato ricavato da Bolte (1987b);
- **Chaboyer et al. (1998)** coniuga cinque tecniche per il calcolo della distanza (compreso il confronto della MS con le parallassi di Hipparcos) e sfrutta il metodo di  $M_V(TO)$  per determinarne l'età.  
Il valore di metallicità deriva dalla stima di Zinn & West (1984) (indicato in seguito con  $(Z)$ ) o da Kraft et al. 1997 ( $(K)$ );
- **Carretta et al. (2000)** usa la stessa tecnica dei paper precedenti, con il valore della metallicità e del reddening acquisito da Carretta & Gratton (1997);
- **Gratton et al. (2003)** stima l'età dal metodo del fit della MS con isocrone di confronto. Il valore del reddening deriva dalla media delle misure fatte usando due tipi di colori, così come per la metallicità.  
La tecnica si basa sull'assunzione che  $E(B - V)$  deriva dalla differenza tra le relazioni colore-magnitudine di due stelle con metallicità e gravità simili. Ugualmente il modulo di distanza si ottiene come media delle due quantità;
- **Meissner & Weiss (2006)** usa i punti indicatori d'età per trovare l'isocrona che meglio li fitta, riscontrando dei problemi: non tutti gli indicatori rispettano il fit, soprattutto il *bump* e il *tip* del RGB. Per questo motivo si sono ottenute diverse stime, a seconda dell'indicatore usato, sotto forma di range e non di valore medio. Per tale motivo si è deciso di considerare il valore medio di ognuno di essi e di mediarli.  
Il modulo di distanza si ottiene dalla media del valore ottenuto dal fit dell'HB e dalla magnitudine assoluta del *bump* del RGB;
- **Brown et al. (2018)** stima l'età dell'ammasso NGC 6397 tramite una misura diretta della parallasse trigonometrica ottenuta dall'*Hubble Space Telescope* e la luminosità del TO. Il valore di reddening è ottenuto dalla media dei valori Gratton et al. (2003), Schlegel et al. (1998) e Anthony-Twarong et al. (1992);
- **VandenBerg et al. (2013)** calcola la distanza dal fit dell'HB, assumendo un reddening ottenuto dalle mappe di polvere di Schlegel et al.

(1998) e una metallicità dalle ultime analisi spettroscopiche. Il valore dell'età viene ottenuto in alcuni casi con il metodo orizzontale (di seguito abbreviato con (H))  $\Delta(B - V)_{TO}^{RGB}$ , in altri con quello verticale (in breve (V))  $\Delta V_{TO}^{HB}$  o con la media (A) dei due.





## Presentazione dei risultati sperimentali

### 3.1 NGC 104: *47 Tucanae*

Seguendo la metodologia presentata nel capitolo precedente, si è costruito il CMD dell'ammasso NGC 104, descritto nel grafico di figura 2.2. Il *Turn-Off* è ben riconoscibile come una curva a gomito nella zona tra 16 e 18 mag. Le stelle nella parte destra della MS sono stelle binarie.

Nella tabella 3.1 si riportano i valori relativi al modulo di distanza ritrovati secondo le formule (2.5), (2.6), (2.7), (2.8).

D [kpc]	$e_D$ [kpc]	$(m - M)_0$ [mag]	$e_{(m-M)_0}$ [mag]
4.64	0.04	13.33	0.02

**Tabella 3.1:** Valori del modulo di distanza e della distanza stessa con relativi errori dell'ammasso NGC 104.

Nei grafici di figura 2.3 e 2.4 sono riportati il CMD dell'ammasso insieme alle isocrone costruite. Si può notare come, sia per il valore di reddening trovato da Harris che da Schlegel, entrambi i set di isocrone sembrano descrivere bene il CMD dell'ammasso. In altre parole si può affermare che entrambi i valori di reddening teorizzati ben rappresentano l'osservazione. Questa affermazione viene confermata dai grafici di figura 2.5 e 2.6, che rappresentano le fiducial line nei due casi: entrambi sembrano suggerire che l'età dell'ammasso si aggira nell'intervallo compreso tra gli 11 e i 13 Gyr.

Nei grafici di figura 2.7 e 2.8 sono presentati i test del  $\chi^2$  per ognuno dei casi presentati precedentemente. Secondo la formula (2.18) e il metodo pre-

sentato nella sezione 2.6, si ottengono i diversi valori di incertezze presentati in tabella 3.2.

Variazione	E(B – V)	Errore superiore	Errore inferiore
MD	Harris	0.14	0.17
MD	Schlegel	0.16	0.15
$E(B - V)$	Harris	0.30	0.24
$E(B - V)$	Schlegel	0.03	0.04

**Tabella 3.2:** Errori dell'età dell'ammasso NGC 104 nei casi presentati. La prima colonna descrive che misura è stata variata, mentre la seconda il reddening usato.

Secondo le equazioni (2.19) e (2.20) si calcola il risultato finale, riportato di seguito:

$$\begin{aligned} \text{Harris} & 12.6_{0.3}^{+0.4} \text{ Gyr;} \\ \text{Schlegel} & 13.1_{0.2}^{+0.2} \text{ Gyr.} \end{aligned}$$

In tabella 3.3 si riportano i risultati ottenuti da diversi lavori degli anni passati e quelli di questa tesi.

Paper	E(B-V)	[Fe/H]	(m – M) <sub>0</sub>	Età [Gyr]
Gr(1997)	0.055 ± 0.007	-0.67	13.64 ± 0.08	10.28
Car(2000)	0.055 ± 0.007	-0.67	13.57 ± 0.09	12.5
Gr(2003)	0.024 ± 0.004	-0.66 ± 0.04	13.52 ± 0.08	11.0 ± 1.1
M&W(2006)	-	-0.78	13.27 ± 0.03	10.98
VdB(2013)	0.032	-0.76	13.33	11.75 ± 0.25 (V)
Questa tesi	0.04 (Harris)	-0.72	13.33 ± 0.02	12.6 <sub>0.3</sub> <sup>+0.4</sup>
Questa tesi	0.0320 ± 0.0004 (Schlegel)	-0.72	13.33 ± 0.02	13.1 <sub>0.2</sub> <sup>+0.2</sup>

**Tabella 3.3:** Determinazioni del reddening, della metallicità, del modulo di distanza e dell'età per NGC 104, secondo diverse analisi. Gr(1997) sta per Gratton et al. (1997); Car(2000) per Carretta et al. (2000); Gr(2003) per Gratton et al. (2003); M&W(2006) per Meissner & Weiss (2006); VdB(2013) per Vandenberg et al. (2013).

Dai risultati presentati in tabella 3.3 si evince che i valori ottenuti da questa analisi mostrano un'età più vecchia rispetto ai lavori precedenti. La

principale motivazione è dettata dall’abbassamento del modulo di distanza, grazie alle misure di parallasse più precise di Gaia rispetto a quelle delle missioni precedenti.

La stima della metallicità scelta si pone in buon accordo con le altre, trovandosi a un valore intermedio, così come il reddening.

È interessante notare come, nonostante Vandenberg et al. (2013) abbia scelto il valore del reddening di Schlegel, le due stime dell’età non sono compatibili, probabilmente a causa dei due diversi valore di metallicità.

La stima finale dell’età, ottenuta come media pesata dei due valori, è:

$$\text{NGC 104: } 12.8 \pm 0.3 \text{ Gyr}$$

## 3.2 NGC 6121: *M 4*

Nel grafico (a) di figura 3.1 viene riportata la distribuzione dei moti propri delle stelle nel campo di NGC 6121 con le selezioni descritte nel capitolo 2. Poiché la selezione “*Moto proprio*” è formata da elementi appartenenti alla selezione “*Stelle brillanti*”, il colore blu rappresenta anche le stelle appartenenti a quest’ultima selezione.

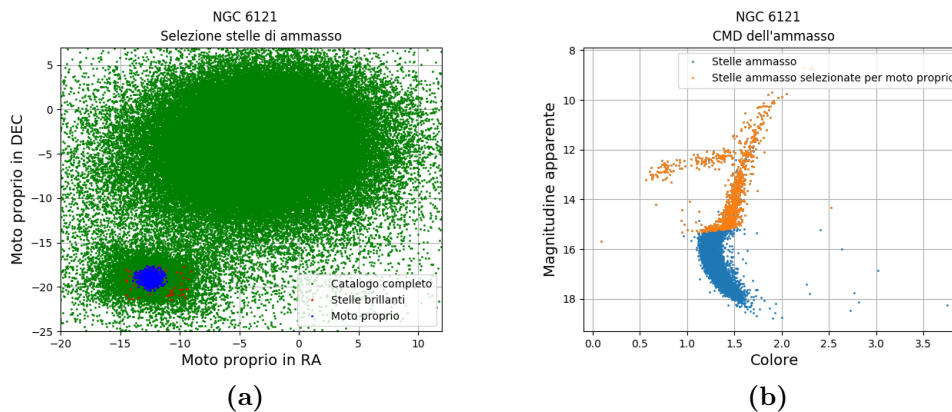
Per selezionare le stelle che forniscono una misura abbastanza precisa del modulo di distanza, i cui risultati sono riportati in tabella 3.4, si sono dovuti considerare gli elementi il cui errore della parallasse fosse inferiore al 20%, e non al 10% come per NGC 104, perché questo avrebbe comportato un numero di stelle troppo basso per averne un errore della distanza sufficientemente basso.

D [kpc]	$e_D$ [kpc]	$(m - M)_0$ [mag]	$e_{(m-M)_0}$ [mag]
2.00	0.01	11.51	0.01

**Tabella 3.4:** Valori del modulo di distanza e della distanza stessa con relativi errori dell’ammasso NGC 6121.

Nel grafico (b) di figura 3.1 è riportato il CMD dell’ammasso e la selezione delle stelle con le quali si è calcolato il modulo di distanza (in arancione). Con la scelta di un errore della parallasse inferiore solo al 10% del valore stesso, quest’ultima selezione avrebbe presentato molti meno elementi.

Come spiegato nella sezione 2.2 si sono scelti tre valori di reddening per verificare quale meglio rappresenti l’ammasso in questione. A differenza di NGC 104 esiste anche una stima del reddening presentata da Green, come riporta la tabella 2.1. Segue la descrizione di questi tre casi.



**Figura 3.1:** (a) distribuzione dei moti propri delle stelle presenti entro un grado dal centro dell’ammasso. Il colore verde rappresenta tutte le stelle considerate, il colore rosso quelle appartenenti alla selezione “*Stelle brillanti*” e il colore blu quelle della selezione “*Moto proprio*”. (b) CMD dell’ammasso NGC 6121. I punti rossi descrivono le stelle della selezione “*Stelle di ammasso*”, mentre i punti arancioni quelle della selezione “*Moto proprio*”.

### 3.2.1 Reddening di Harris

Nelle figure A.1 e A.2 dell’Appendice sono riportati i grafici delle isocrone e delle fiducial line nei cinque casi considerati.

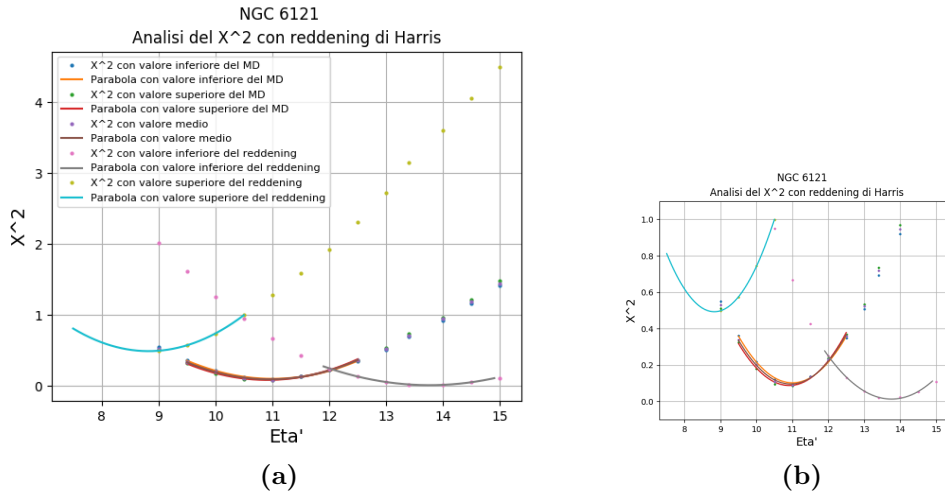
Nei due casi in cui si è fissato il valore del reddening e si è fatto variare il modulo della distanza non vi è grande differenza con il caso del valore medio, poiché l’errore  $e_{(m-M)_0}$  è molto piccolo rispetto a  $(m-M)_0$ . Nei casi in cui, invece, si è fatto variare il valore del reddening, vi sono forti differenze rispetto al valore medio. Questo perché l’ammasso ha un reddening molto alto e quindi anche l’errore assunto, pari al 10% di esso, è considerevole<sup>1</sup>.

Anche i grafici delle fiducial line rispecchiano le stesse caratteristiche. Questo ci porta a concludere che il valore stimato da Harris non descrive a dovere l’estinzione dell’ammasso: l’oggetto si trova in una zona caratterizzata da *reddening differenziale*, ossia il valore di  $E(B-V)$  varia sensibilmente tra i vari punti dell’ammasso.

Nei grafici di figura 3.2 sono rappresentati i valori del  $\chi^2$  nei cinque casi, dove il grafico (b) è un ingrandimento del grafico (a). La parabola azzurra,

<sup>1</sup>Dopo accurate analisi si è scelto di prendere in considerazione il valore di reddening riportato dal database reperibile all’indirizzo web <https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>, pari a 0.43, perché quello ottenuto da Harris dava risultati ancora più discostanti.

che descrive l'andamento del  $\chi^2$  per il caso (e), ha un valore minimo di gran lunga superiore agli altri casi, mentre la parabola del caso (d) ha il valore più piccolo del  $\chi^2$ : è questo il più attendibile dei cinque.



**Figura 3.2:**  $\chi^2$  dell'ammasso NGC 6121 con reddening di Harris. Il secondo grafico rappresenta un ingrandimento del primo. Il colore arancione rappresenta il caso (a), rosso il caso (b), marrone il caso (c), viola il caso (d), azzurro il caso (e).

### 3.2.2 Reddening di Schlegel

Tenendo conto di questa caratteristica, per l'analisi del reddening di Schlegel si è scelto di considerare quattro valori riportati in tabella 3.5, corrispondenti allo spostamento di mezzo grado dal centro dell'ammasso verso uno dei quattro punti cardinali<sup>2</sup>, e di calcolarne la media pesata.

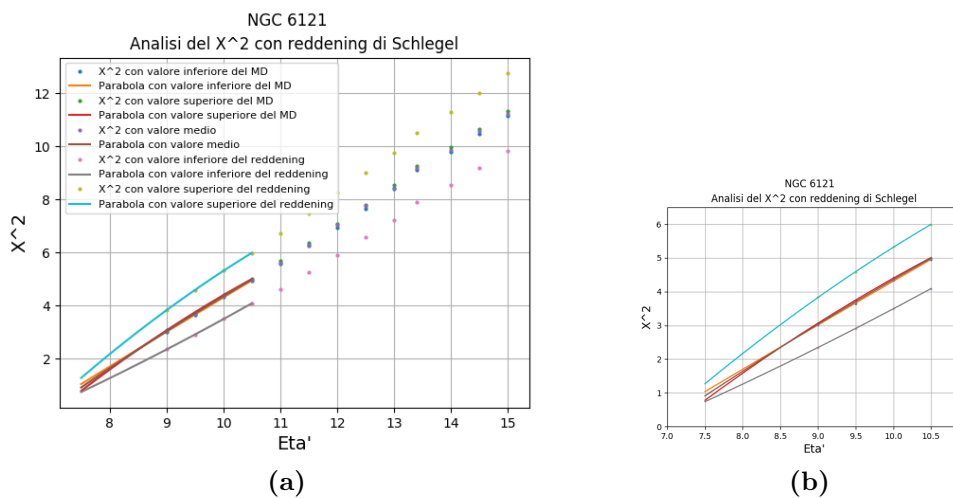
	Nord	Est	Sud	Ovest
<b>valore</b>	0.4866	0.5281	0.5218	0.5466
<b>incertezza</b>	0.152	0.037	0.0135	0.0169

**Tabella 3.5:** Valori del reddening di Schlegel a una distanza di mezzo grado dal centro dell'ammasso NGC 6121, ricavati dal catalogo online *NASA/IPAC Infrared Science Archive*.

<sup>2</sup><https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>

Con il risultato ottenuto si sono ricavate le isocrone e le fiducial line riportate nei grafici di figura A.3 e A.4 dell'Appendice, secondo i soliti casi. Ancora più di prima sono visibili le grandi discrepanze tra CMD dell'ammasso e le isocrone, sia nel caso di variazione del modulo di distanza che del reddening.

I valori del  $\chi^2$  ritrovati nei grafici di figura 3.3 sottolineano quanto detto: i punti non rappresentano più una parabola completa, ma solo la parte ascendente.

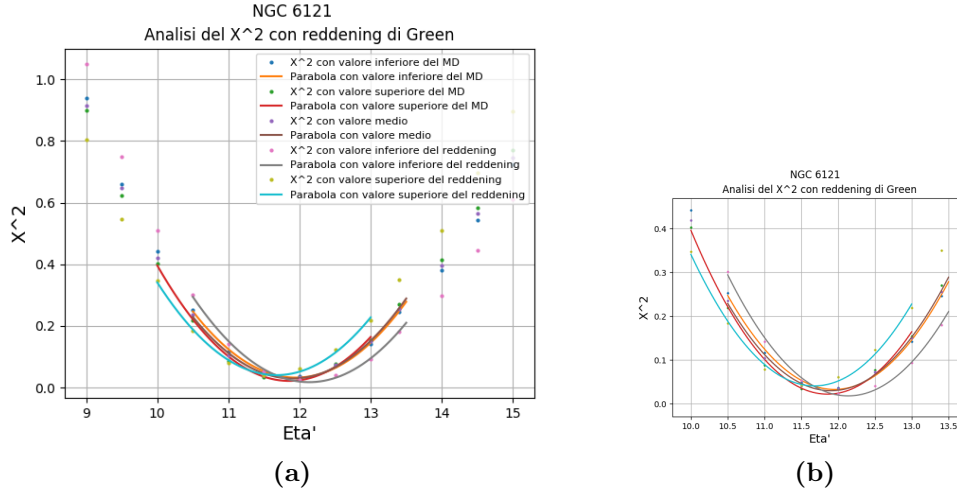


**Figura 3.3:**  $\chi^2$  dell'ammasso NGC 6121 con reddening di Schlegel. Il secondo grafico rappresenta un ingrandimento del primo. Il colore arancione rappresenta il caso (a), rosso il caso (b), marrone il caso (c), viola il caso (d), azzurro il caso (e).

### 3.2.3 Reddening di Green

L'ultima analisi, ottenuta considerando il reddening di Green, è quella che più coincide con l'ammasso. In tutti e cinque i casi della figura A.5 presente in Appendice, le isocrone descrivono il CMD, così come le fiducial line della figura A.6 dell'Appendice.

I grafici di figura 3.4 descrivono parabole che concordano le une con le altre, non solo nei valori dell'età, ma anche dei  $\chi^2$ . Si può dunque concludere che il valore del reddening di Green, pari a 0.414, è il più attendibile tra quelli analizzati.



**Figura 3.4:**  $\chi^2$  dell'ammasso NGC 6121 con reddening di Green. Il secondo grafico rappresenta un ingrandimento del primo. Il colore arancione rappresenta il caso (a), rosso il caso (b), marrone il caso (c), viola il caso (d), azzurro il caso (e).

### 3.2.4 Considerazioni finali

In tabella 3.6 sono riportati i valori degli errori inferiori e superiori per i casi considerati dell'ammasso NGC 6121. È importante sottolineare la natura delle incertezze: nel caso del reddening di Harris sono molto alte, perché l'errore del reddening è esso stesso molto alto (pari a 0.035); per il valore di Schlegel non si hanno misure delle incertezze perché nell'analisi del  $\chi^2$  i punti non riescono a descrivere una parabola: il minimo valore si trova ben al di fuori del range di età considerato; per il caso del reddening di Green gli errori sono molto inferiori perché è inferiore l'incertezza di  $E(B - V)$ .

L'età stimata per l'ammasso NGC 6121 nei tre valori di reddening considerati è:

<b>Harris</b>	$11_{-3}^{+2}$ Gyr;
<b>Schlegel</b>	7.5 Gyr.
<b>Green</b>	$11.9 \pm 0.2$ Gyr.

In tabella 3.7 sono riportati le stime di età e dei parametri fondamentali ottenuti da studi precedenti e comparati con questo. Come descritto prima, l'analisi è stata complicata dalla presenza di *reddening differenziale* che rende ardua la stima di un valore di  $E(B - V)$  che rappresenti a dovere l'ammasso. Questa stessa motivazione sta alla base della scarsa presenza, in letteratura,

Variazione	$E(B - V)$	Errore superiore	Errore inferiore
MD	Harris	0.04	0.05
MD	Schlegel	-	-
MD	Green	0.05	0.01
$E(B - V)$	Harris	2.13	2.81
$E(B - V)$	Schlegel	-	-
$E(B - V)$	Green	0.23	0.23

**Tabella 3.6:** Errori dell'età dell'ammasso NGC 6121 nei casi presentati. La prima colonna descrive che misura è stata variata, mentre la seconda il reddening usato.

Paper	$E(B-V)$	$[Fe/H]$	$(m - M)_0$	Età [Gyr]
VdB(2013)	0.445	-1.18	12.62	$11.50 \pm 0.38$ (V)
Questa tesi	0.35 (Harris)	-1.16	$11.51 \pm 0.01$	$11^{+2}_{-3}$
Questa tesi	$0.4975 \pm 0.0060$ (Schlegel)	-1.16	$11.51 \pm 0.01$	7.5
Questa tesi	$0.414 \pm -0.004$ (Green)	-1.16	$11.51 \pm 0.01$	$11.9 \pm 0.2$

**Tabella 3.7:** Determinazioni del reddening, della metallicità, del modulo di distanza e dell'età per NGC 6121, secondo diverse analisi. VdB(2013) sta per VandenBerg et al. (2013).



di una stima della sua età.

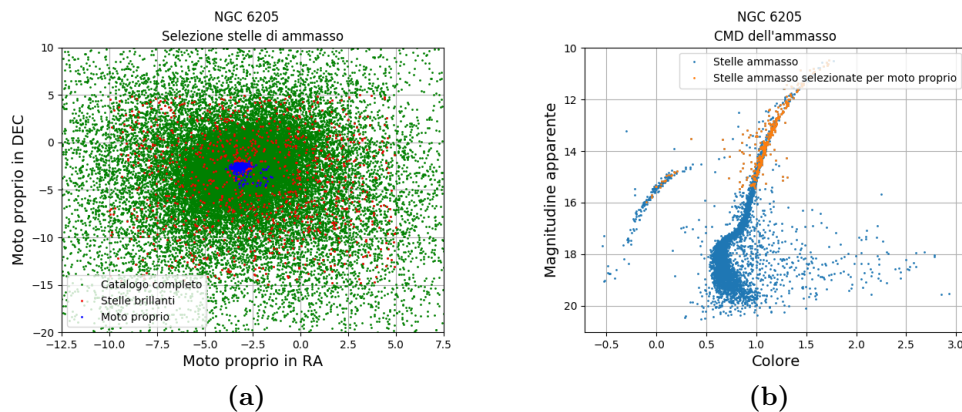
Appurato ciò, il valore di reddening stimato da Green è quello che meglio rappresenta l'ammasso, determinando un errore sull'età inferiore a 0.5 Gyr. Inoltre tale stima è compatibile con quella ottenuta da Vandenberg.

Si può dunque affermare che la stima finale dell'età è la media pesata dei valori ottenuti con il reddening di Harris e Green (si ignora Schlegel perché non si è potuto definire un errore):

$$\text{NGC 6121: } 11.9 \pm 0.2 \text{ Gyr}$$

### 3.3 NGC 6205: M13

Anche in questo caso, nella scelta degli elementi della selezione “*Moto proprio*”, si è reso necessario considerare come limite all'errore della parallasse il 30% del valore medio, a causa della scarsità di stelle con misure migliori. I valori di reddening e abbondanze dell'ammasso sono riportati in tabella 2.1, mentre nel grafico (a) della figura 3.5 sono riportate, nel piano dei moti propri, le selezioni fatte. Nel grafico (b) della stessa figura è riportato il CMD delle “*Stelle di ammasso*” in blu, mentre in arancione la già citata selezione “*Moto proprio*”, da cui si sono ricavati i valori riportati in tabella 3.8.



**Figura 3.5:** (a) distribuzione dei moti propri delle stelle presenti entro un grado dal centro dell'ammasso. Il colore verde rappresenta tutte le stelle considerate, il colore rosso quelle appartenenti alla selezione “*Stelle brillanti*” e il colore blu quelle della selezione “*Moto proprio*”. (b) CMD dell'ammasso NGC 6205. I punti rossi descrivono le stelle della selezione “*Stelle di ammasso*”, mentre i punti arancioni quelle della selezione “*Moto proprio*”.

$D$ [kpc]	$e_D$ [kpc]	$(m - M)_0$ [mag]	$e_{(m-M)_0}$ [mag]
8.48	0.20	14.64	0.05

**Tabella 3.8:** Valori del modulo di distanza e della distanza stessa con relativi errori dell’ammasso NGC 6205.

### 3.3.1 Reddening di Harris

I grafici di figura A.7 e A.8 dell’Appendice riportano le isocrone e le fiducial line nel caso del reddening di Harris. I modelli descrivono le osservazioni per quanto riguarda il colore, mentre vi è una certa discordanza per la magnitudine apparente: questo “slittamento” verticale delle isocrone rispetto al CMD dell’ammasso è dovuto a una stima inesatta del modulo di distanza. L’evidenza che anche i casi **(a)** e **(b)**, in cui si sono considerati i valori superiori e inferiori del modulo di distanza, non ricreano adeguatamente l’osservazione conferma l’ipotesi avanzata. Se anche le analisi successive presenteranno lo stesso problema si potrà affermare che la selezione di stelle scelta per il calcolo del modulo di distanza non si confà allo scopo.

Anche gli andamenti dei valori del  $\chi^2$  riportati nei grafici di figura 3.6 discordano tra loro. Il valore minimo e massimo del  $\chi^2$  vengono forniti dalla differenza tra i due casi in cui si varia il modulo di distanza, che quindi descrive un *upper limit* e un *lower limit* nella stima dell’età.

### 3.3.2 Reddening di Schlegel

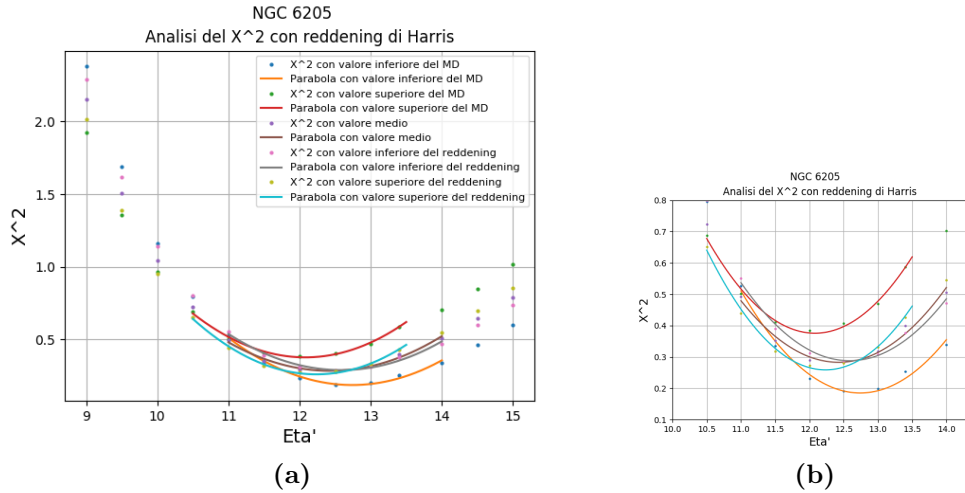
Per quanto riguarda il reddening di Schlegel, si ripropone la stessa situazione: nei grafici di figura A.9 e A.10 dell’Appendice si riconoscono discrete differenze per quanto riguarda sia la magnitudine apparente che il colore.

Gli andamenti del  $\chi^2$  dei grafici di figura 3.7 concordano sul range di età: ci si aspetta, come per il reddening di Harris, un basso errore.

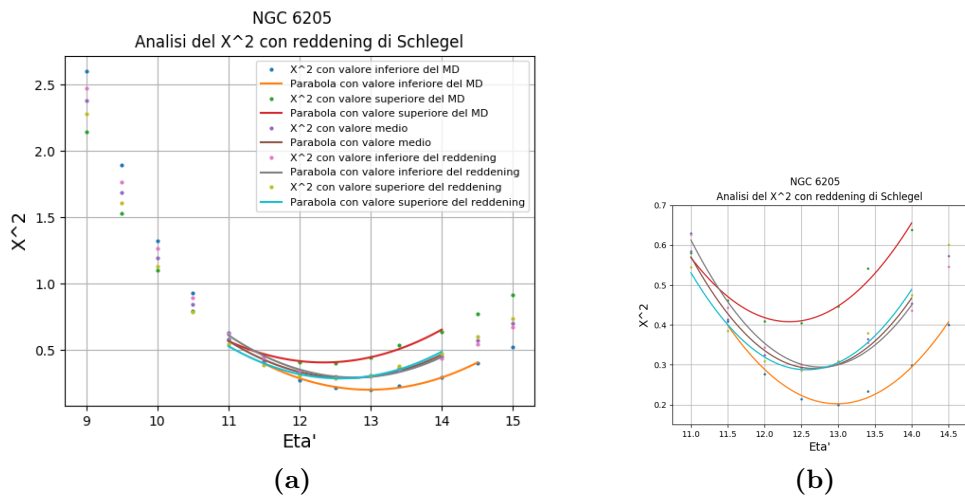
### 3.3.3 Reddening di Green

Infine, dei grafici di figura A.11 e A.12 sono riportate le isocrone e le fiducial line per il reddening di Green: a differenza dei casi precedenti qui il CMD dell’ammasso sembra indicare un’età minore.

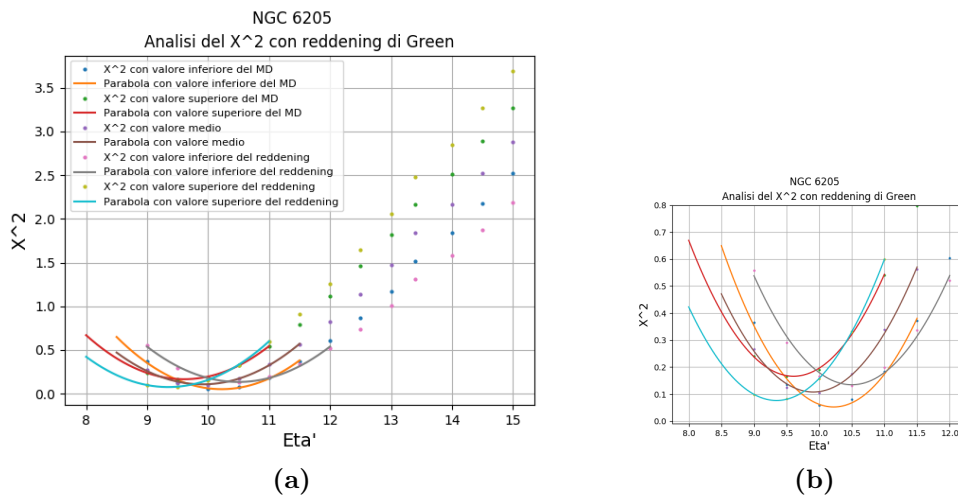
Anche gli andamenti dei  $\chi^2$  di figura 3.8 sono diversi dai casi precedenti: concordano sui valori del  $\chi^2$ , ma non fanno altrettanto nel caso del range di età.



**Figura 3.6:**  $\chi^2$  dell'ammasso NGC 6205 con reddening di Harris. Il secondo grafico rappresenta un ingrandimento del primo. Il colore arancione rappresenta il caso (a), rosso il caso (b), marrone il caso (c), viola il caso (d), azzurro il caso (e).



**Figura 3.7:**  $\chi^2$  dell'ammasso NGC 6205 con reddening di Schlegel. Il secondo grafico rappresenta un ingrandimento del primo. Il colore arancione rappresenta il caso (a), rosso il caso (b), marrone il caso (c), viola il caso (d), azzurro il caso (e).



**Figura 3.8:**  $\chi^2$  dell'ammasso NGC 6205 con reddening di Green. Il secondo grafico rappresenta un ingrandimento del primo. Il colore arancione rappresenta il caso (a), rosso il caso (b), marrone il caso (c), viola il caso (d), azzurro il caso (e).

### 3.3.4 Considerazioni finali

In tabella 3.9 sono riportate le incertezze sulle età ottenute con i diversi metodi. Come si è notato dai grafici delle isocrone, tutti e tre i casi presentano lo stesso ordine di incertezza, così come è stato per NGC 104. La caratteristica che accomuna questi due ammassi è il valore del reddening: in media è dell'ordine dei centesimi. Questa peculiarità sembra dividere gli ammassi in due categorie: quelli con basso reddening concordano sommariamente con le isocrone, mentre quelli ad alto valore si discostano maggiormente. {E questa una considerazione che verrà ripresa adeguatamente nei capitoli successivi, ma che solleva la grande problematica di questo lavoro: il valore del reddening.

In conclusione si riportano i valori dell'età con le rispettive incertezze nei tre casi analizzati:

<b>Harris</b>	$12.4 \pm 0.4$ Gyr;
<b>Schlegel</b>	$12.7^{+0.4}_{-0.3}$ Gyr;
<b>Green</b>	$9.9^{+0.6}_{-0.7}$ Gyr.

In tabella 3.10 si riportano i valori delle stime d'età ottenute dallo studio di analisi precedenti e di quella di questa tesi.

In questo caso, a differenza degli ammassi precedenti, si ha un incremento del modulo di distanza e un suo errore che si pone in un valore intermedio

Variazione	E(B - V)	Errore superiore	Errore inferiore
MD	Harris	0.35	0.31
MD	Schlegel	0.33	0.31
MD	Green	0.30	0.30
$E(B - V)$	Harris	0.19	0.16
$E(B - V)$	Schlegel	0.10	0.09
$E(B - V)$	Green	0.56	0.59

**Tabella 3.9:** Errori dell'età dell'ammasso NGC 6205 nei casi presentati. La prima colonna descrive che misura è stata variata, mentre la seconda il reddening usato.

Paper	E(B-V)	[Fe/H]	(m - M) <sub>0</sub>	Età [Gyr]
Gr(1997)	0.020 ± 0.000	-1.41	14.47 ± 0.07	12.26
Ch(1998)	0.02 ± 0.01	-1.58 ± 0.08	14.47 ± 0.09	10.9 ± 1.4
Car(2000)	0.020 ± 0.000	-1.41	14.46 ± 0.04	12.6
M&W(2006)	-	-1.33	14.40 ± 0.03	10.57
VdB(2013)	0.017	-1.58	14.40	12.00 ± 0.38 (A)
Questa tesi	0.02 (Harris)	-1.53	14.64 ± 0.05	12.43 + 0.40 - 0.35
Questa tesi	0.0169 ± 0.0013 (Schlegel)	-1.53	14.64 ± 0.05	12.67 + 0.35 - 0.33
Questa tesi	0.06 ± 0.01 (Green)	-1.53	14.64 ± 0.05	9.91 + 0.64 - 0.66

**Tabella 3.10:** Determinazioni del reddening, della metallicità, del modulo di distanza e dell'età per NGC 6205, secondo diverse analisi. Gr(1997) sta per Gratton et al. (1997); Ch(1998) sta per Chaboyer et al. (1998); Car(2000) per Carretta et al. (2000); M&W(2006) per Meissner & Weiss (2006); VdB(2013) per VandenBerg et al. (2013).

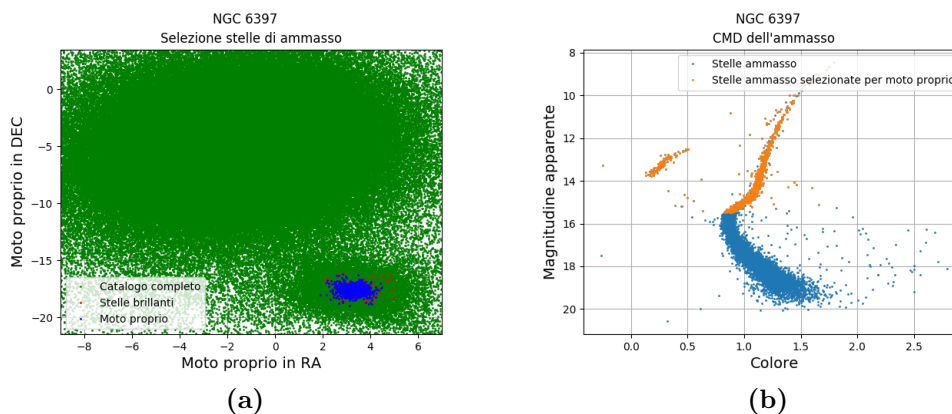
rispetto agli altri. Nonostante questo, salvo qualche caso come Meissner & Weiss (2006), le età ottenute sono tutte compatibili se si considerano i valori di reddening di Harris e Schlgel, anch'essi simili ai valori della letteratura.

La stima finale dell'età dell'ammasso è:

$$\text{NGC 6205: } 12.2 \pm 0.3 \text{ Gyr}$$

### 3.4 NGC 6397

I valori di abbondanza e reddening dell'ammasso NGC 6397 sono riportati nella tabella 2.1, mentre nel grafico (a) di figura 3.9 sono riportate le selezioni di stelle fatte. Anche in questo caso si è reso necessario considerare le stelle con errore sulla parallasse pari al 20% del valore stesso per poter avere abbastanza elementi con cui calcolare il modulo di distanza.



**Figura 3.9:** (a) distribuzione dei moti propri delle stelle presenti entro un grado dal centro dell'ammasso. Il colore verde rappresenta tutte le stelle considerate, il colore rosso quelle appartenenti alla selezione “*Stelle brillanti*” e il colore blu quelle della selezione “*Moto proprio*”. (b) CMD dell'ammasso NGC 6397. I punti rossi descrivono le stelle della selezione “*Stelle di ammasso*”, mentre i punti arancioni quelle della selezione “*Moto proprio*”.

Dalle stelle colorate in arancione nel grafico (b) dei figura 3.9, che rappresentano la selezione “*Moto proprio*”, si è calcolato il modulo della distanza, riportato in tabella 3.11.

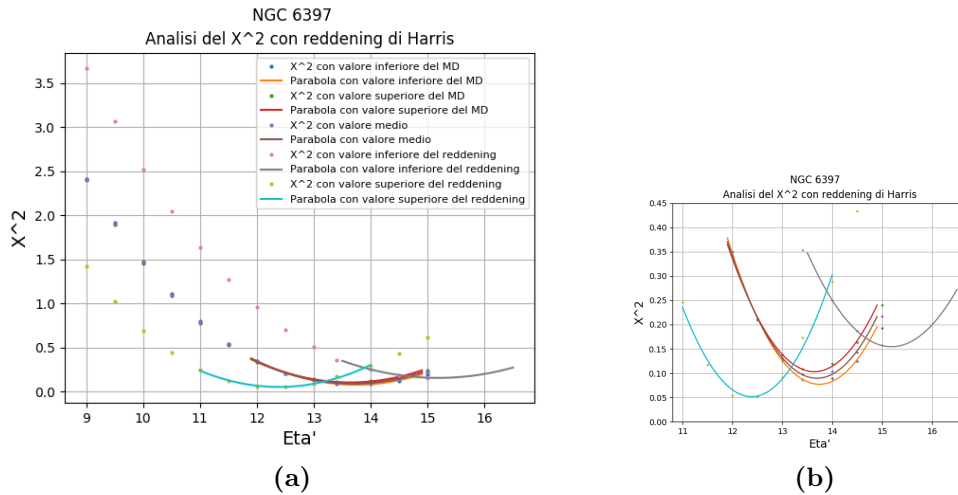
D [kpc]	$e_D$ [kpc]	$(m - M)_0$ [mag]	$e_{(m-M)_0}$ [mag]
2.68	0.01	12.14	0.01

**Tabella 3.11:** Valori del modulo di distanza e della distanza stessa con relativi errori dell'ammasso NGC 6397.

### 3.4.1 Reddening di Harris

Nei grafici di figura A.13 e A.14 dell'Appendice sono riportati le isocrone e le fiducial line nel caso in cui si consideri il valore del reddening di Harris. Si nota subito come queste stime tendano a sovrastimare l'età dell'ammasso. In particolare, nel caso **(d)**, la fiducial line dell'ammasso è quasi del tutto fuori dal range delle isocrone.

Gli andamenti del  $\chi^2$  di figura 3.10 sottolineano come la variazione del modulo di distanza comporti una piccola modifica alla stima dell'età, mentre i due casi della variazione del reddening discostano molto l'uno dall'altro. Di nuovo, questa evidenza può essere associata all'alto valore di reddening (pari a 0.18).

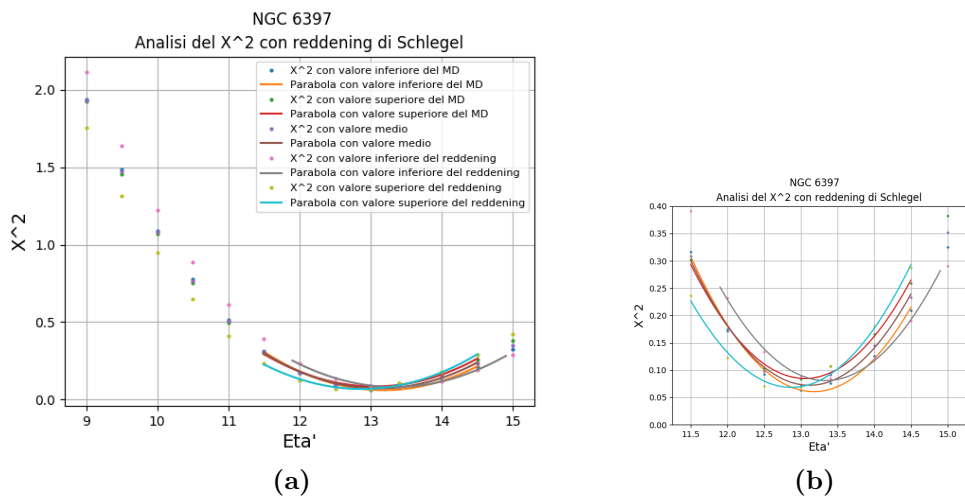


**Figura 3.10:**  $\chi^2$  dell'ammasso NGC 6397 con reddening di Harris. Il secondo grafico rappresenta un ingrandimento del primo. Il colore arancione rappresenta il caso **(a)**, rosso il caso **(b)**, marrone il caso **(c)**, viola il caso **(d)**, azzurro il caso **(e)**.

### 3.4.2 Reddening di Schlegel

Analogo è il caso del reddening di Schlegel: le isocrone e le fiducial line dei grafici di figura A.15 e A.16 dell'Appendice stimano un'età avanzata per l'ammasso, ma sembrano concordare tra loro.

La concordanza apparente tra le stime delle età trova conferma nell'andamento del  $\chi^2$  di figura 3.11: i casi concordano sia nel range d'età che nei valori del  $\chi^2$ . Ci si aspetta, a differenza del caso del reddening di Harris, un valore inferiore di errore.



**Figura 3.11:**  $\chi^2$  dell'ammasso NGC 6397 con reddening di Schlegel. Il secondo grafico rappresenta un ingrandimento del primo. Il colore arancione rappresenta il caso (a), rosso il caso (b), marrone il caso (c), viola il caso (d), azzurro il caso (e).

### 3.4.3 Considerazioni finali

In tabella 3.12 sono riportate le incertezze sull'età nei casi visti. Come detto prima, il caso del reddening di Harris presenta un errore maggiore di quello di Schlegel: si può affermare che quest'ultimo valore risulta essere più attendibile del primo.

Di seguito sono riportate le stime delle età con relative incertezze per i due casi analizzati, a partire dai dati di tabella 3.12.

<b>Harris</b>	$14 \pm 1$ Gyr;
<b>Schlegel</b>	$13.1^{+0.3}_{-0.1}$ Gyr.



Variazione	$E(B - V)$	Errore superiore	Errore inferiore
MD	Harris	0.05	0.05
MD	Schlegel	0.06	0.06
$E(B - V)$	Harris	1.31	1.49
$E(B - V)$	Schlegel	0.25	0.22

**Tabella 3.12:** Errori dell'età dell'ammasso NGC 6397 nei casi presentati. La prima colonna descrive che misura è stata variata, mentre la seconda il reddening usato.

Paper	$E(B-V)$	$[Fe/H]$	$(m - M)_0$	Età [Gyr]
Gr(2003)	$0.183 \pm 0.005$	$-2.03 \pm 0.05$	$12.60 \pm 0.08$	$13.7 \pm 1.1$
VdB(2013)	-	-1.99	-	$13.00 \pm 0.25$ (A)
Questa tesi	0.18 (Harris)	-2.02	$12.14 \pm 0.01$	$14 \pm 1$
Questa tesi	$0.1881 \pm 0.0032$ (Schlegel)	-2.02	$12.14 \pm 0.01$	$13.1^{+0.3}_{-0.1}$

**Tabella 3.13:** Determinazioni del reddening, della metallicità, del modulo di distanza e dell'età per NGC 6397, secondo diverse analisi. Gr(2003) sta per Gratton et al. (2003); VdB(2013) per Vandenberg et al. (2013).

In tabella 3.13 si riportano i valori delle stime di età ottenute da questa tesi e da lavori precedenti. Tutte le età stimate sono compatibili, se non identiche, e la misura dell'errore del modulo di distanza è decrementato notevolmente.

Poiché nel caso del reddening di Harris si è scelto a priori un errore pari al 10%, la stima della sua età ha un valore di incertezza molto più alto del caso di Schelgel, ma compatibile.

La stima finale dell'età dell'ammasso è quindi:

$$\text{NGC 6397: } 13.1 \pm 0.2 \text{ Gyr}$$

dove si è scelta come incertezza la media dei due errori.

### 3.5 NGC 6656: M22

NGC 6656 è un ammasso che, trovandosi in direzione del centro galattico, presenta un corposo numero di stelle di campo nel “*Catalogo completo*”, rappresentato nel grafico (a) di figura 3.12. Nonostante questo anche qui si è reso necessario, nella selezione degli elementi adatti a calcolarne il moto proprio, considerare le stelle che presentassero un valore dell'errore della parallasse inferiore al 20% del valore stesso. I risultati di tale procedimento sono riportati in tabella 3.14, mentre i valori di abbondanza e reddening in tabella 2.1.

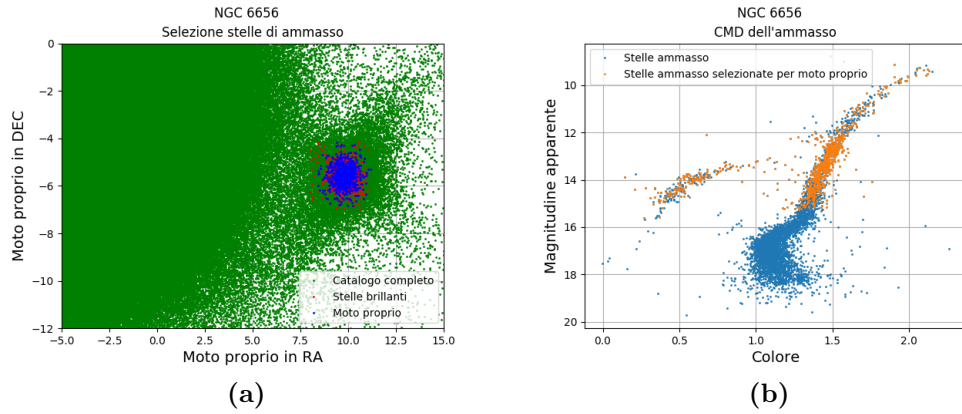
D [kpc]	e <sub>D</sub> [kpc]	(m – M) <sub>0</sub> [mag]	e <sub>(m–M)<sub>0</sub></sub> [mag]
3.42	0.03	12.67	0.02

**Tabella 3.14:** Valori del modulo di distanza e della distanza stessa con relativi errori dell'ammasso NGC 6656.

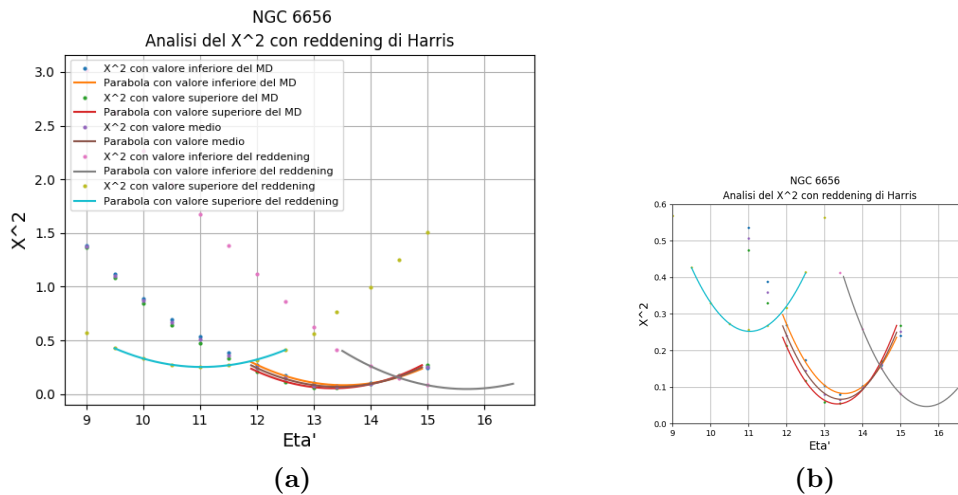
#### 3.5.1 Reddening di Harris

Solo nei casi (a) e (b) di figura A.17 e A.18 presenti in Appendice le isocrone e le fiducial line rappresentano meglio il CMD dell'ammasso, ossia nei casi in cui a variare è il modulo di distanza. Infatti il reddening di Harris in questo caso è dell'ordine dei decimi (0.34), andando a influire in maniera importante sulla devianza dall'ammasso.

Gli andamenti del  $\chi^2$  dei grafici di figura 3.13 riflettono tali considerazioni: la variazione del modulo di distanza non comporta grandi effetti, a differenza della variazione del reddening. Ci si aspetta, di conseguenza, un valore maggiore dell'incertezza di questi due ultimi casi rispetto ai primi due.



**Figura 3.12:** (a) distribuzione dei moti propri delle stelle presenti entro un grado dal centro dell'ammasso. Il colore verde rappresenta tutte le stelle considerate, il colore rosso quelle appartenenti alla selezione “*Stelle brillanti*” e il colore blu quelle della selezione “*Moto proprio*”. (b) CMD dell'ammasso NGC 6656. I punti rossi descrivono le stelle della selezione “*Stelle di ammasso*”, mentre i punti arancioni quelle della selezione “*Moto proprio*”.

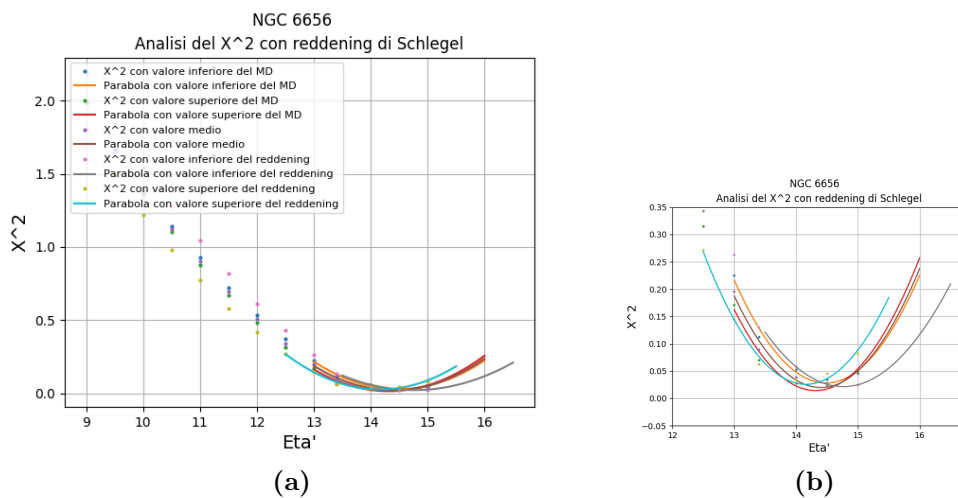


**Figura 3.13:**  $\chi^2$  dell'ammasso NGC 6656 con reddening di Harris. Il secondo grafico rappresenta un ingrandimento del primo. Il colore arancione rappresenta il caso (a), rosso il caso (b), marrone il caso (c), viola il caso (d), azzurro il caso (e).

### 3.5.2 Reddening di Schlegel

Il reddening di Schlegel ( $0.3252 \pm 0.0041$ ), avendo un'incertezza molto minore rispetto a quello di Harris, presenta isocrone e fiducial line (grafici di figura A.19 e A.20 dell'Appendice) che stimano un'età maggiore ma che concordano tra loro.

Gli andamenti del  $\chi^2$  di figura 3.14 concordano sia in età che in  $\chi^2$ : ci si aspetta un valore minore di incertezza nella stima dell'età rispetto al caso di Harris.

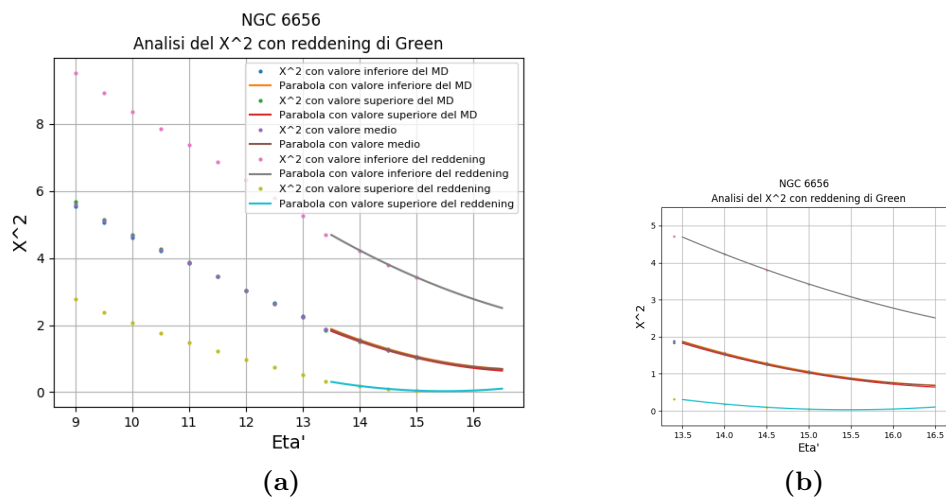


**Figura 3.14:**  $\chi^2$  dell'ammasso NGC 6656 con reddening di Schlegel. Il secondo grafico rappresenta un ingrandimento del primo. Il colore arancione rappresenta il caso (a), rosso il caso (b), marrone il caso (c), viola il caso (d), azzurro il caso (e).

### 3.5.3 Reddening di Green

Dai grafici di figura A.21 e A.22 dell'Appendice si evince fin da subito che il valore del reddening di Green è quello meno adatto a rappresentare il vero assorbimento dell'ammasso: in tutti i casi la fiducial line dell'ammasso si discosta in maniera considerevole dal range di isocrone considerato, andando oltre il limite superiore di età.

L'andamento del  $\chi^2$  di figura 3.15 non è più una parabola completa, a causa della mancanza di concordanza tra le isocrone e l'ammasso prima descritta. Di nuovo, avendo un errore del reddening considerevole, i casi (d) ed (e) si discostano maggiormente tra loro, mentre gli altri due concordano. I cinque casi comprendono lo stesso range di età, ma diversi valori di  $\chi^2$ .



**Figura 3.15:**  $\chi^2$  dell'ammasso NGC 6656 con reddening di Green. Il secondo grafico rappresenta un ingrandimento del primo. Il colore arancione rappresenta il caso (a), rosso il caso (b), marrone il caso (c), viola il caso (d), azzurro il caso (e).

### 3.5.4 Considerazioni finali

Nella tabella 3.15 sono riportati i valori delle incertezze dei vari casi considerati. Come anticipato prima, l'errore maggiore corrisponde al caso del valore di Harris, dove le stime dell'età si discostano maggiormente.

Variazione	$E(B - V)$	Errore superiore	Errore inferiore
MD	Harris	0.10	0.09
MD	Schlegel	0.09	0.08
MD	Green	-	1.47
$E(B - V)$	Harris	2.40	2.25
$E(B - V)$	Schlegel	0.25	0.36
$E(B - V)$	Green	1.02	-

**Tabella 3.15:** Errori dell'età dell'ammasso NGC 6656 nei casi presentati. La prima colonna descrive che misura è stata variata, mentre la seconda il reddening usato.

Di seguito si riportano le migliori stime dell'età ottenute considerando i tre casi:

$$\begin{aligned} \text{Harris} & 14.4^{+2.4}_{-2.3} \text{ Gyr;} \\ \text{Schlegel} & 14.4^{+0.3}_{-0.4} \text{ Gyr;} \\ \text{Green} & 16.5^{+1.0}_{-1.5} \text{ Gyr.} \end{aligned}$$

Il valore del reddening di Green, come verificato visivamente, comporta un'età di gran lunga maggiore rispetto alle altre due, e di conseguenza non può essere considerato una buona stima dell'assorbimento a cui è soggetto l'ammasso.

Paper	E(B-V)	[Fe/H]	(m - M) <sub>0</sub>	Età [Gyr]
VdB(2013)	-	-1.70	-	12.50 ± 0.50 (H)
Questa tesi	0.34 (Harris)	-1.70	12.67 ± 0.02	14.4 <sup>+2.4</sup> <sub>-2.3</sub>
Questa tesi	0.3252 ± 0.0041 (Schlegel)	-1.70	12.67 ± 0.02	14.4 <sup>+0.3</sup> <sub>-0.4</sub>
Questa tesi	0.27 ± 0.04 (Green)	-1.70	12.67 ± 0.02	16.5 <sup>+1.0</sup> <sub>-1.5</sub>

**Tabella 3.16:** Determinazioni del reddening, della metallicità, del modulo di distanza e dell'età per NGC 6656, secondo diverse analisi. VdB(2013) sta per VandenBerg et al. (2013).

In tabella 3.16 sono riportati i valori delle stime d'età ottenute da questa analisi e da stime precedenti. Poiché questo ammasso si trova in direzione del centro galattico, il suo CMD è contaminato da molte più stelle di campo degli altri ammassi, rendendo difficile una sua analisi precisa. Di conseguenza pochi sono i lavori che lo hanno preso in considerazione. L'unico valore riportato da VandenBerg stima un'età che è compatibile con le stime ottenute considerando il reddening di Harris, grazie alla sua grande incertezza.

I tre valori ottenuti in questa tesi sono compatibili a coppie: Harris con Schlegel ed Harris con Green.

Facendo una media pesata dei tre valori si ottiene la migliore stima dell'età per l'ammasso:

$$\text{NGC 6656: } 14.5 \pm 0.3 \text{ Gyr.}$$

### 3.6 NGC 6752

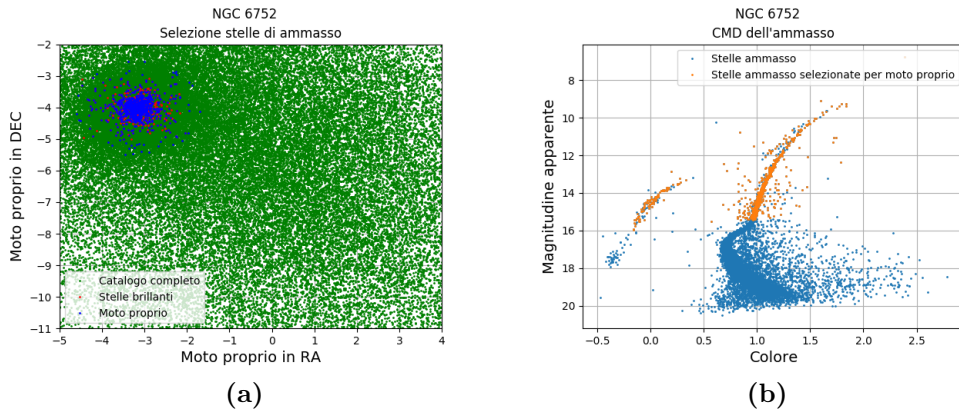
NGC 6752, l'ultimo ammasso globulare di questa tesi, si trova nella costellazione australe del Pavone. Le sue caratteristiche sono raccolte nella tabella

2.1. In questo caso, per la selezione “*Moto proprio*” si è dovuto alzare al 30% la soglia dell’errore della parallasse rispetto al suo valore.

$D$ [kpc]	$e_D$ [kpc]	$(m - M)_0$ [mag]	$e_{(m-M)_0}$ [mag]
3.96	0.04	12.99	0.02

**Tabella 3.17:** Valori del modulo di distanza e della distanza stessa con relativi errori dell’ammasso NGC 6656.

Nei grafici di figura 3.16 sono riportati le selezioni delle stelle e i rispettivi CMD.

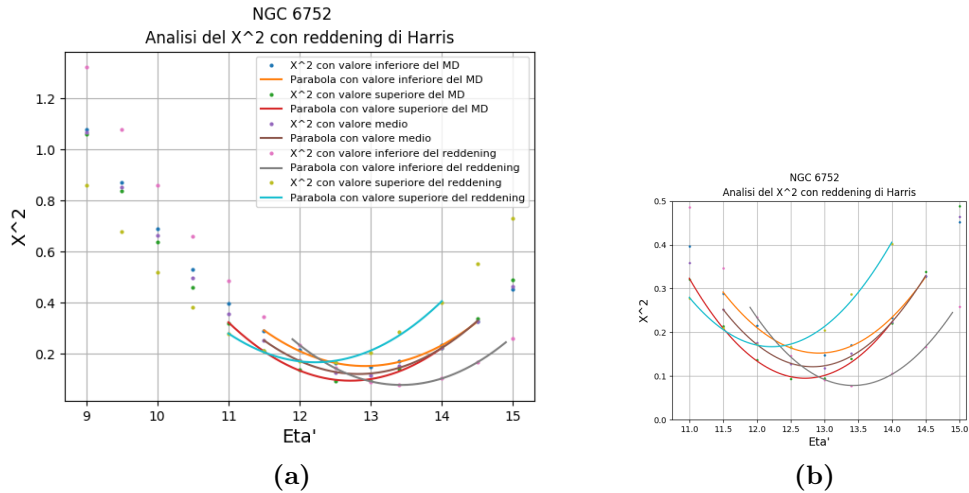


**Figura 3.16:** (a) distribuzione dei moti propri delle stelle presenti entro un grado dal centro dell’ammasso. Il colore verde rappresenta tutte le stelle considerate, il colore rosso quelle appartenenti alla selezione “*Stelle brillanti*” e il colore blu quelle della selezione “*Moto proprio*”. (b) CMD dell’ammasso NGC 6752. I punti rossi descrivono le stelle della selezione “*Stelle di ammasso*”, mentre i punti arancioni quelle della selezione “*Moto proprio*”.

### 3.6.1 Reddening di Harris

Nel caso del reddening di Harris le isocrone e le fiducial line delle figure A.23 e A.24 presenti in Appendice sono spostate rispetto alla magnitudine apparente: una discordanza che può essere fatta risalire alla difficile stima del modulo di distanza per quanto detto prima.

Gli andamenti del  $\chi^2$  nei grafici di figura 3.17 descrive misure che discorcano tra di loro sia nel range dell’età che dei valori del  $\chi^2$ .



**Figura 3.17:**  $\chi^2$  dell'ammasso NGC 6752 con reddening di Harris. Il secondo grafico rappresenta un ingrandimento del primo. Il colore arancione rappresenta il caso (a), rosso il caso (b), marrone il caso (c), viola il caso (d), azzurro il caso (e).

### 3.6.2 Reddening di Schlegel

Le isocrone e le fiducial line con reddening di Schlegel delle figure A.25 e A.26 presenti in Appendice sommariamente forniscono un'età maggiore del caso precedente, ma concordano tra di loro.

Gli andamenti del  $\chi^2$  nei grafici di figura 3.18 riflettono tali considerazioni: ci si aspetta valori simili di incertezze in quanto le parabole concordano sia lungo l'ordinata che l'ascissa.

### 3.6.3 Considerazioni finali

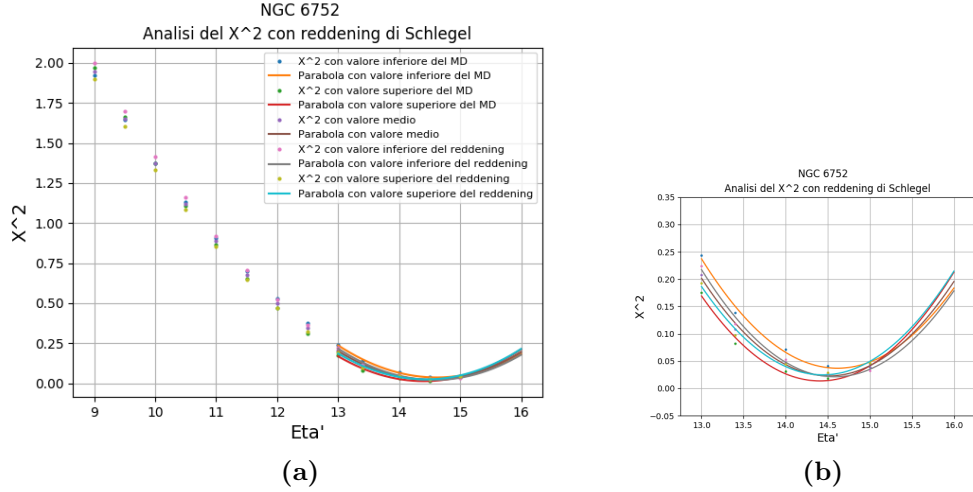
In tabella 3.18 sono riportati i risultati, sotto forma di incertezze, delle considerazioni precedenti. Gli errori non sono molto grandi grazie al basso valore di reddening e dell'incertezza del modulo di distanza.

Di seguito sono riportate le stime di età con le incertezze relative per i due casi visti. Le età non concordano tra di loro, sollevando dubbi su quale sia il valore di reddening più giusto da considerare.

$$\begin{aligned} \text{Harris} & 12.8 \pm 0.6 \text{ Gyr;} \\ \text{Schlegel} & 14.5 \pm 0.1 \text{ Gyr.} \end{aligned}$$

In tabella 3.19 si riportano i valori delle stime d'età ottenute da questa analisi e da lavori precedenti.





**Figura 3.18:**  $\chi^2$  dell'ammasso NGC 6752 con reddening di Schlegel. Il secondo grafico rappresenta un ingrandimento del primo. Il colore arancione rappresenta il caso (a), rosso il caso (b), marrone il caso (c), viola il caso (d), azzurro il caso (e).

Variazione	$E(B - V)$	Errore superiore	Errore inferiore
MD	Harris	0.12	0.09
MD	Schlegel	0.11	0.10
$E(B - V)$	Harris	0.61	0.57
$E(B - V)$	Schlegel	0.07	0.07

**Tabella 3.18:** Errori dell'età dell'ammasso NGC 6752 nei casi presentati. La prima colonna descrive che misura è stata variata, mentre la seconda il reddening usato. Il colore arancione rappresenta il caso (a), rosso il caso (b), marrone il caso (c), viola il caso (d), azzurro il caso (e).

Paper	$E(B - V)$	$[Fe/H]$	$(m - M)_0$	Età [Gyr]
Gr(1997)	$0.035 \pm 0.005$	-1.43	$13.34 \pm 0.07$	12.70
Ch(1998)	$0.04 \pm 0.01$	$-1.51 \pm 0.08$	$13.25 \pm 0.07$	$11.2 \pm 1.3$
Car(2000)	$0.035 \pm 0.005$	-1.43	$13.34 \pm 0.04$	12.9
Gr(2003)	$0.040 \pm 0.005$	$-1.43 \pm 0.04$	$13.26 \pm 0.08$	$13.6 \pm 1.1$
Br(2018)	0.185	-	$11.89 \pm 0.02$	$13.4 \pm 0.03$
VdB(2013)	-	-1.55	-	$12.50 \pm 0.25$ (A)
Questa tesi	0.04	-1.54	$12.99 \pm 0.02$	$12.8 \pm 0.6$
	(Harris)			
Questa tesi	$0.0564 \pm 0.0011$	-1.54	$12.99 \pm 0.02$	$14.5 \pm 0.1$
	(Schlegel)			

**Tabella 3.19:** Determinazioni del reddening, della metallicità, del modulo di distanza e dell'età per NGC 6752, secondo diverse analisi. Gr(1997) sta per Gratton et al. (1997); Ch(1998) sta per Chaboyer et al. (1998); Car(2000) sta per Carretta et al. (2000); Gr(2003) sta per Gratton et al. (2003); Br(2018) sta per Brown et al. (2018); VdB(2013) sta per Vandenberg et al. (2013).

In generale, il modulo di distanza risulta essere diminuito, salvo il caso di Brown et al (2018). Di conseguenza si ha un incremento dell'età rispetto al passato.

La nota interessante che si evince dalla tabella è che entrambi i valori di reddening qui adoperati sono bassi, così come il loro errore. Nonostante questo le stime medie delle età differiscono di quasi 2 Gyr. Un fatto che non si spiega se si considera che NGC 104, il primo ammasso analizzato, presentava gli stessi valori di reddening, ma età compatibili. La conclusione che si deduce è che le isocrone scelte non rappresentino a dovere l'ammasso, dunque sarebbe necessaria un'ulteriore analisi con altri modelli di confronto.

Analizzando i valori degli anni precedenti, si osserva che il valore ottenuto dal reddening di Harris è quello più compatibile con gli altri.

Dalla media pesata dei due valori ottenuti si ottiene la migliore stima dell'età dell'ammasso:

$$\text{NGC 6752: } 14.5 \pm 0.1 \text{ Gyr.}$$

## Conclusioni

In tabella 4.1 si riportano i valori dei moduli di distanza e dell'età ottenuti come conclusione dell'analisi dei sei ammassi elencati.

NGC	Altri nomi	$(m - M)_0$	Età [Gyr]
0104	47 Tuc	$13.33 \pm 0.02$	$12.8 \pm 0.3$
6121	M 4	$11.51 \pm 0.01$	$11.9 \pm 0.2$
6205	M 13	$14.64 \pm 0.05$	$12.2 \pm 0.3$
6397		$12.14 \pm 0.01$	$13.2 \pm 0.2$
6656	M 22	$12.67 \pm 0.02$	$14.5 \pm 0.3$
6752		$12.99 \pm 0.02$	$14.5 \pm 0.1$

**Tabella 4.1:** Valori del modulo di distanza e dell'età ottenuti dall'analisi dei sei ammassi elencati

Si può affermare che, in media, il reddening di Harris è da considerarsi attendibile solo se descrive bassi valori: non avendo una misura dell'incertezza se ne è dovuta scegliere una a priori, che in caso di alto valore del reddening ha comportato un'alta barra di errore dell'età.

Per quanto riguarda il valore mutuato da Schlegel, avendo un errore molto basso (dell'ordine dei millesimi) si presta meglio a rappresentare il reddening degli ammassi sia per valori alti che bassi.

Infine il valore di Green, quando disponibile, risulta essere il meno adatto alla nostra analisi, salvo il caso di NGC 6121 che comunque, come descritto precedentemente, presenta un *reddening differenziale* che rende necessaria un'analisi più accurata, ma che esula dallo scopo di questa tesi.

Analizzando e confrontando i moduli di distanza, si nota un'incertezza molto bassa rispetto alle misure precedenti. Tale risultato deriva dalle pre-

stazioni di Gaia, che è riuscita a ricalcolare la parallasse delle stelle con una precisione innovativa. Ne consegue che anche le misure d'età sono molto accurate.

L'unico grande impedimento alla piena riuscita di questa analisi è la determinazione del reddening. Una volta ottenuto un valore del modulo di distanza accurato grazie a Gaia, si rende necessaria la ri-analisi dei valori di reddening per ogni ammasso: sarà questa la direzione futura da intraprendere per migliorare ancora le stime delle età degli ammassi globulari e, di conseguenza, dell'Universo intero.

# Capitolo 5

## Ringraziamenti

Ringrazio il prof. Giampaolo Piotto per avermi seguita con pazienza e professionalità in questo lavoro, i correlatori dr. Domenico Nardiello e dr. Marco Montalto per avermi sempre spronato a dare il meglio di me.

Ringrazio la mia numerosa famiglia, che mi ha sempre supportata: i miei genitori, per avermi incoraggiato a credere nelle mie capacità; i miei fratelli Emma, Jacopo e Giada, per avermi insegnato che la fratellanza trascende ogni differenza; i miei nonni, che mi hanno insegnato tanto; i miei zii e i miei cugini, per tutto il loro sostegno; Pietro, che ha saputo ricordarmi quali sono le vere priorità.

Ringrazio le mie amiche e i miei colleghi di corso, indispensabili compagni di viaggio.

Ringrazio Silvia e Diletta, amiche fidate; Isabella, sorellina acquisita; Irene, che c'è sempre stata e sempre ci sarà.

Un ultimo pensiero a Iva, il cui ricordo mi accompagna ogni giorno.

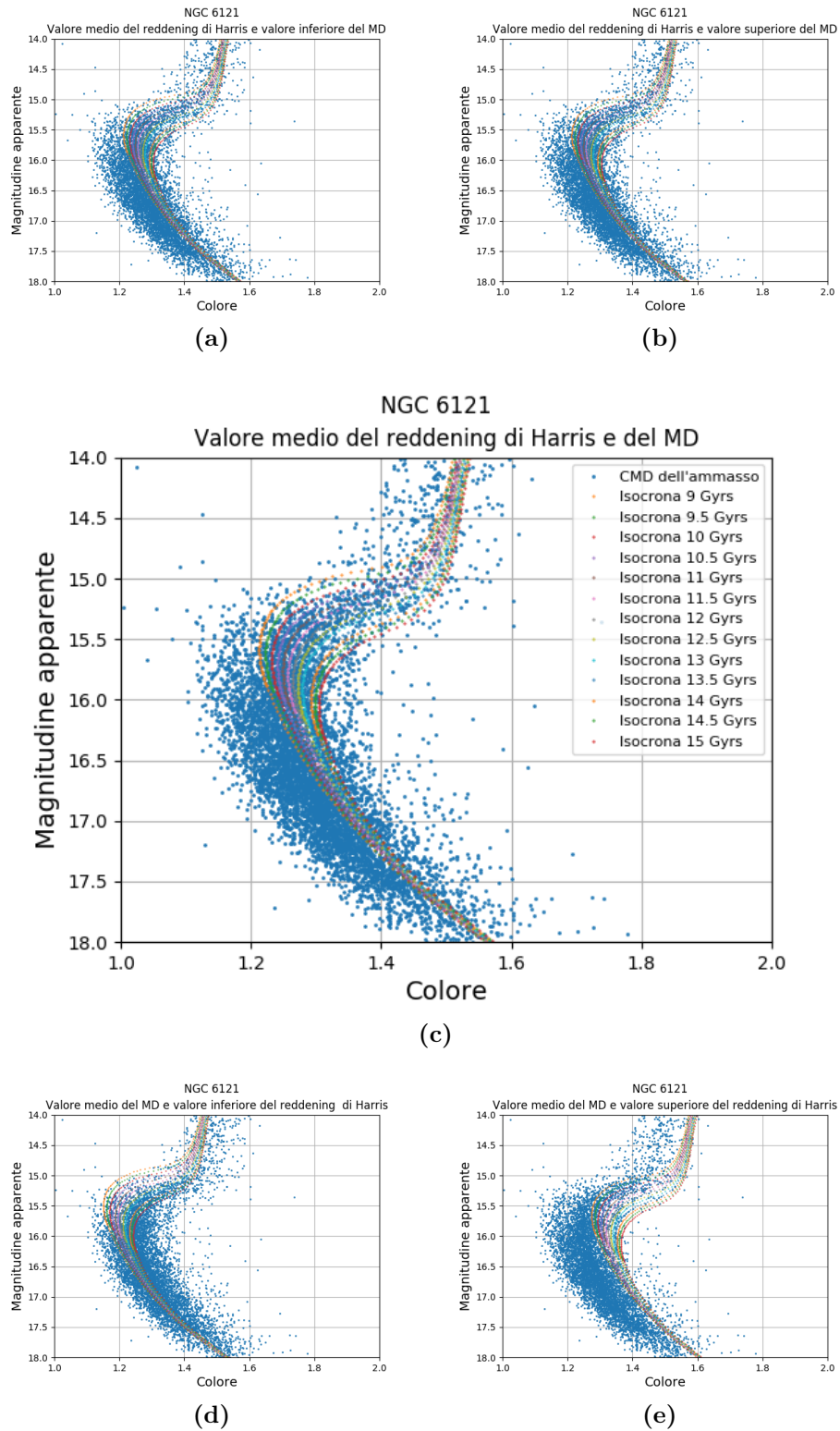


# Appendice **A**

## Appendice

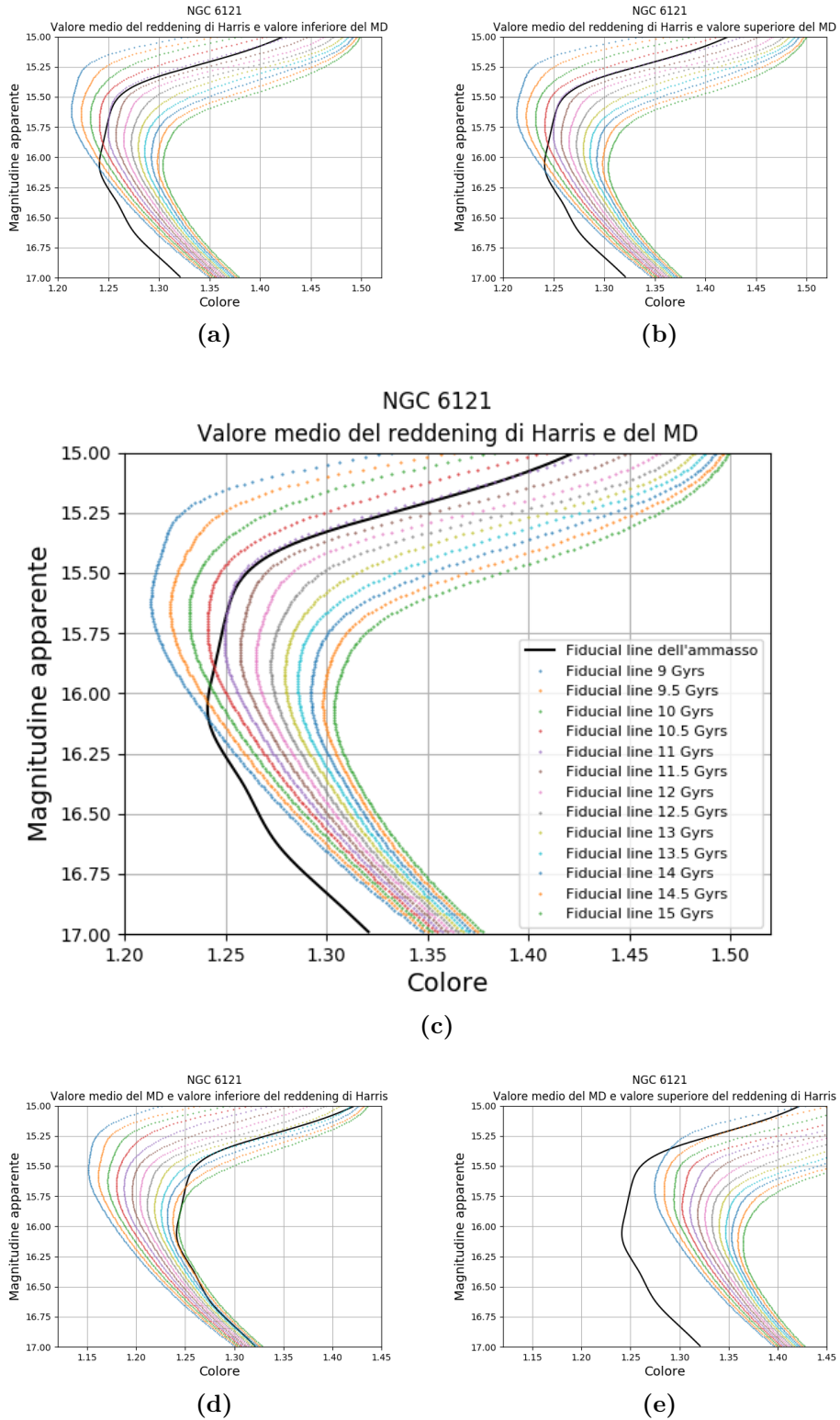
In questa appendice si riportano i grafici delle isocrone, del CMD e delle fiducial line per tutti gli ammassi analizzati. Per ognuno di essi si sono considerati due o tre valori di reddening (Green, Schlegel o Harris) come riportato nelle didascalie.

Le isocrone vanno da 9 Gyr (colore arancione, a sinistra) fino a 15 Gyr (colore rosso, a destra). I punti blu rappresentano le stelle che compongono il CMD dell'ammasso. Per quanto riguarda i colori delle fiducial line delle isocrone, vanno dal colore azzurro (9 Gyr, a sinistra), fino al colore verde (15 Gyr, a destra). La linea nera rappresenta la fiducial line dell'ammasso.

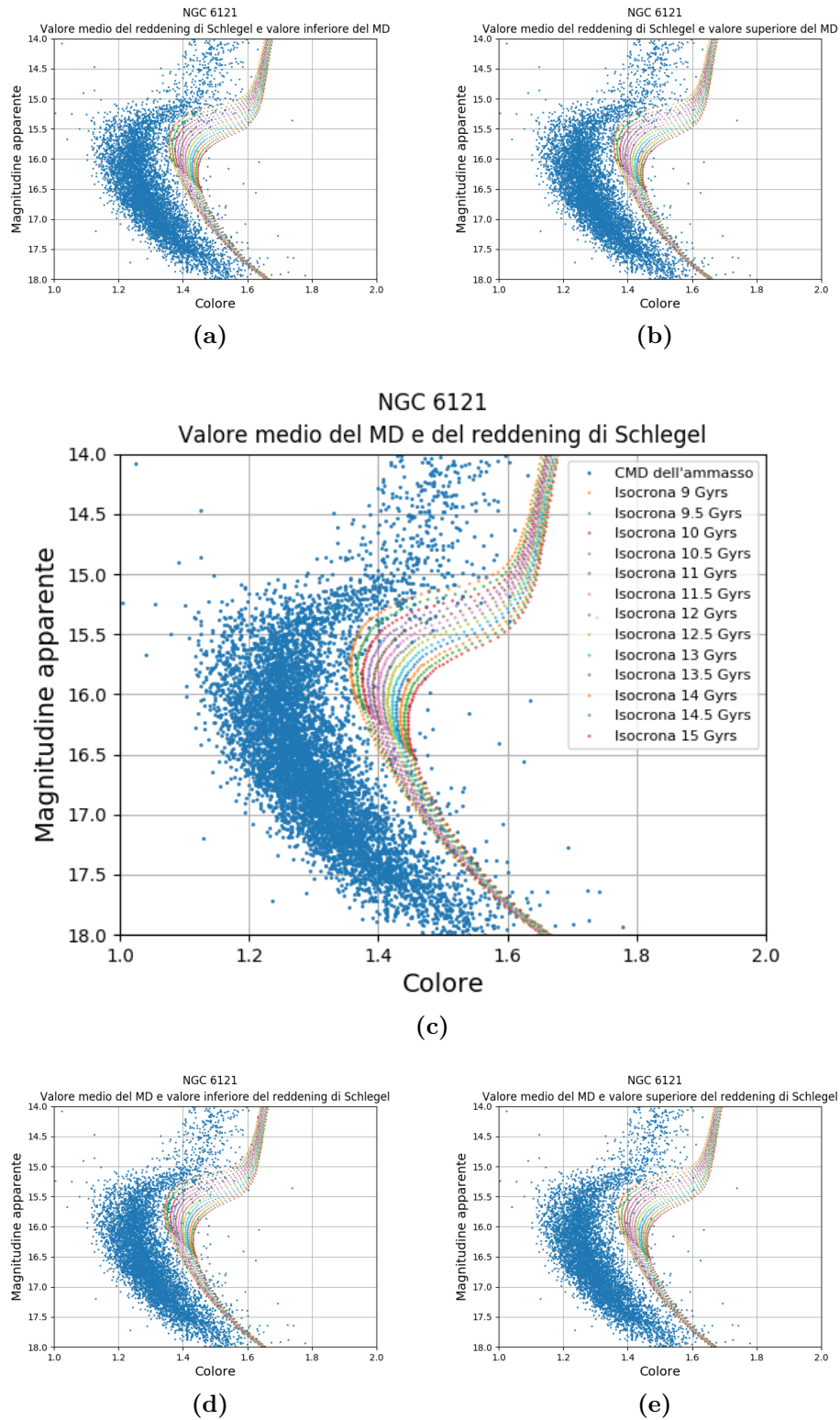


**Figura A.1:** Isocrone e CMD dell'ammasso NGC 6121 con reddening di Harris. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.

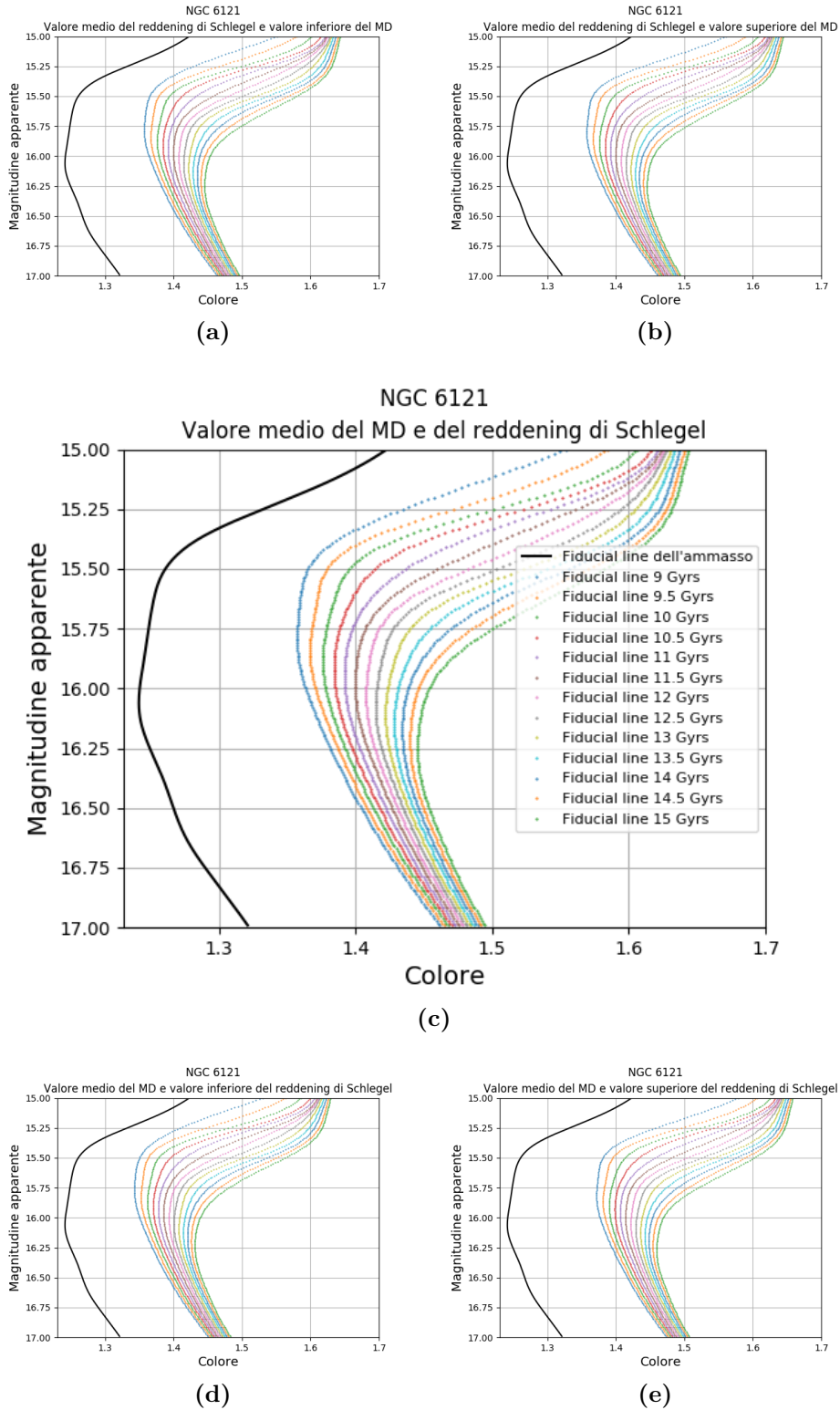




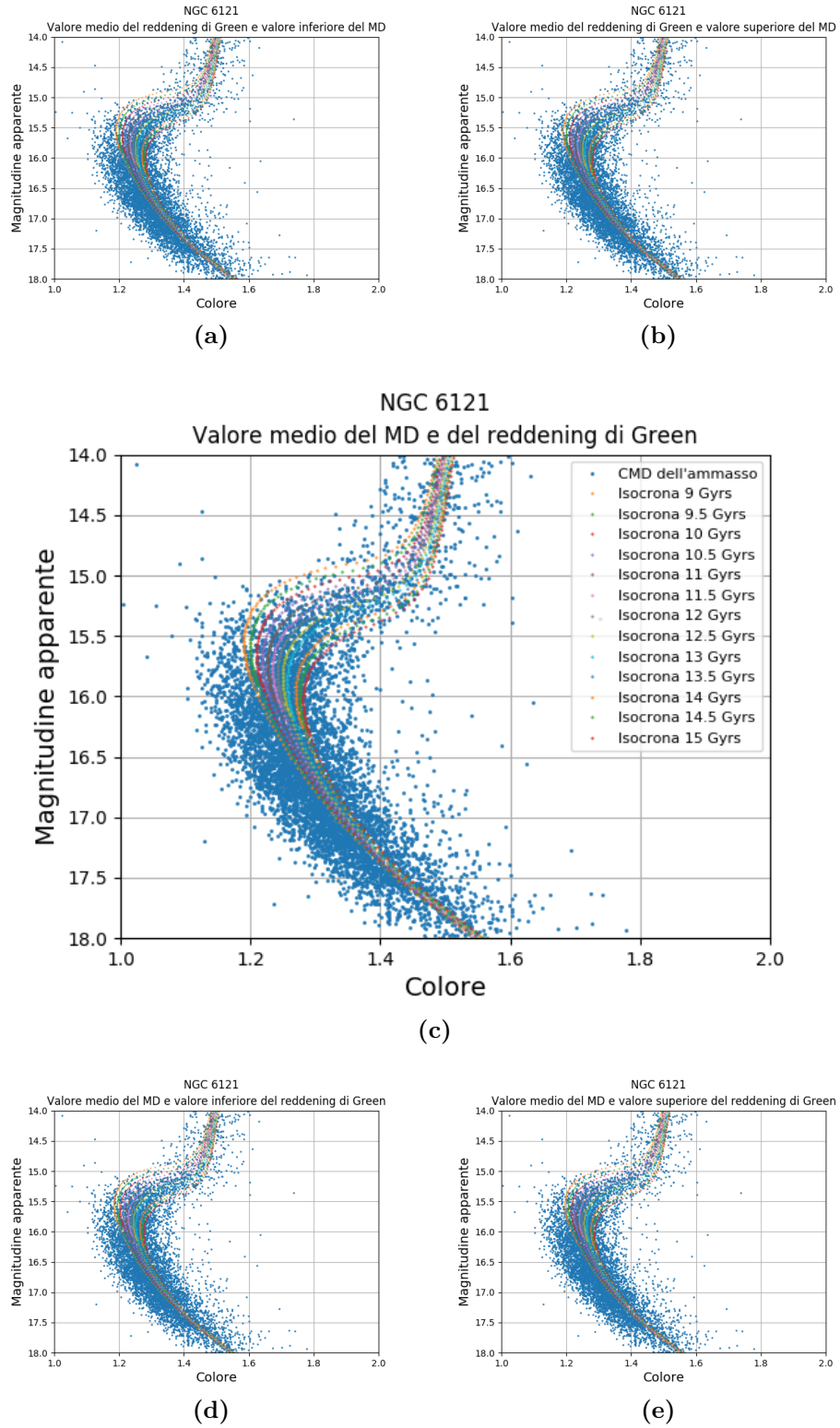
**Figura A.2:** Fiducial line delle isocrone e del CMD dell'ammasso NGC 6121 con reddening di Harris. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



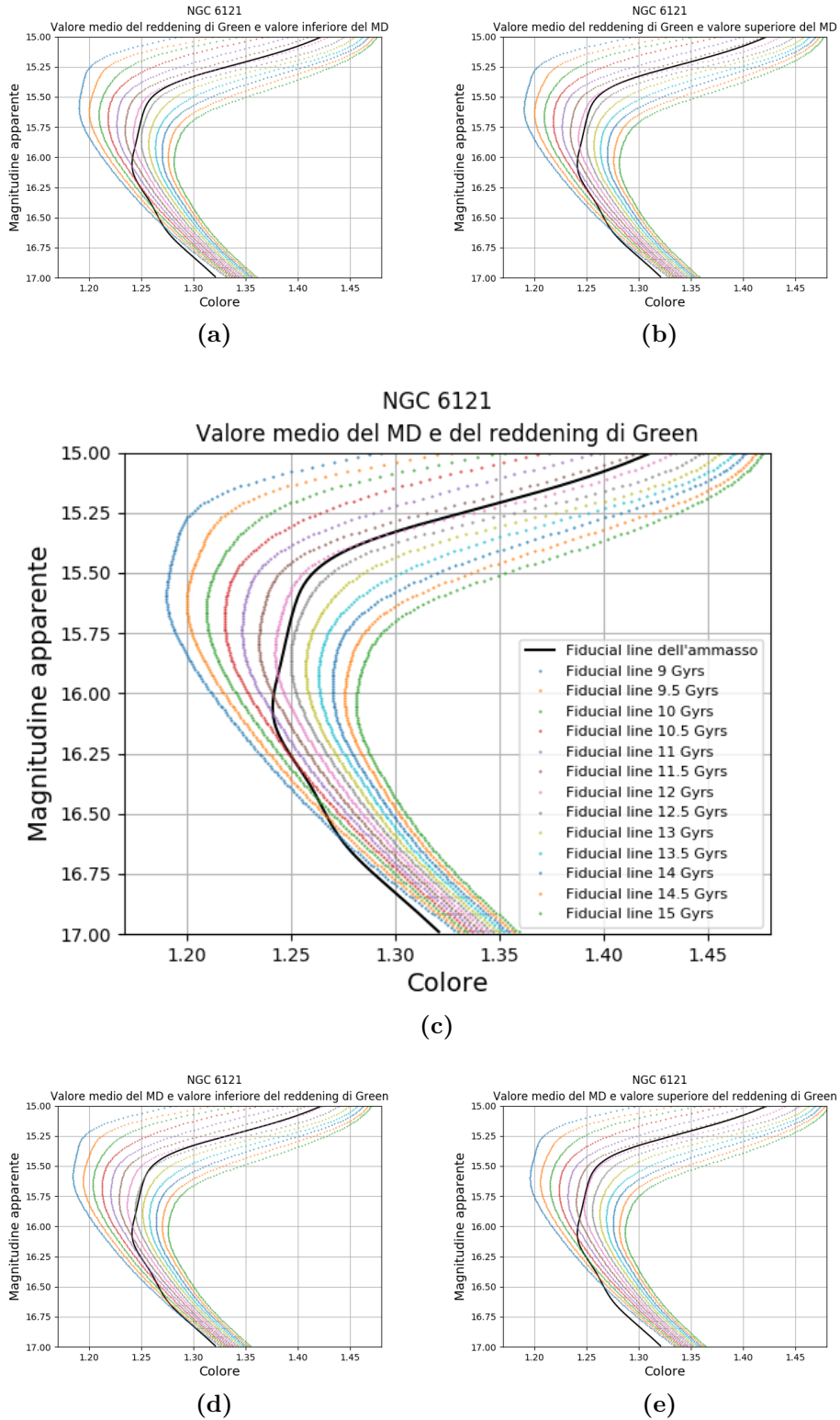
**Figura A.3:** Isocrone e CMD dell'ammasso NGC 6121 con reddening di Schlegel. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



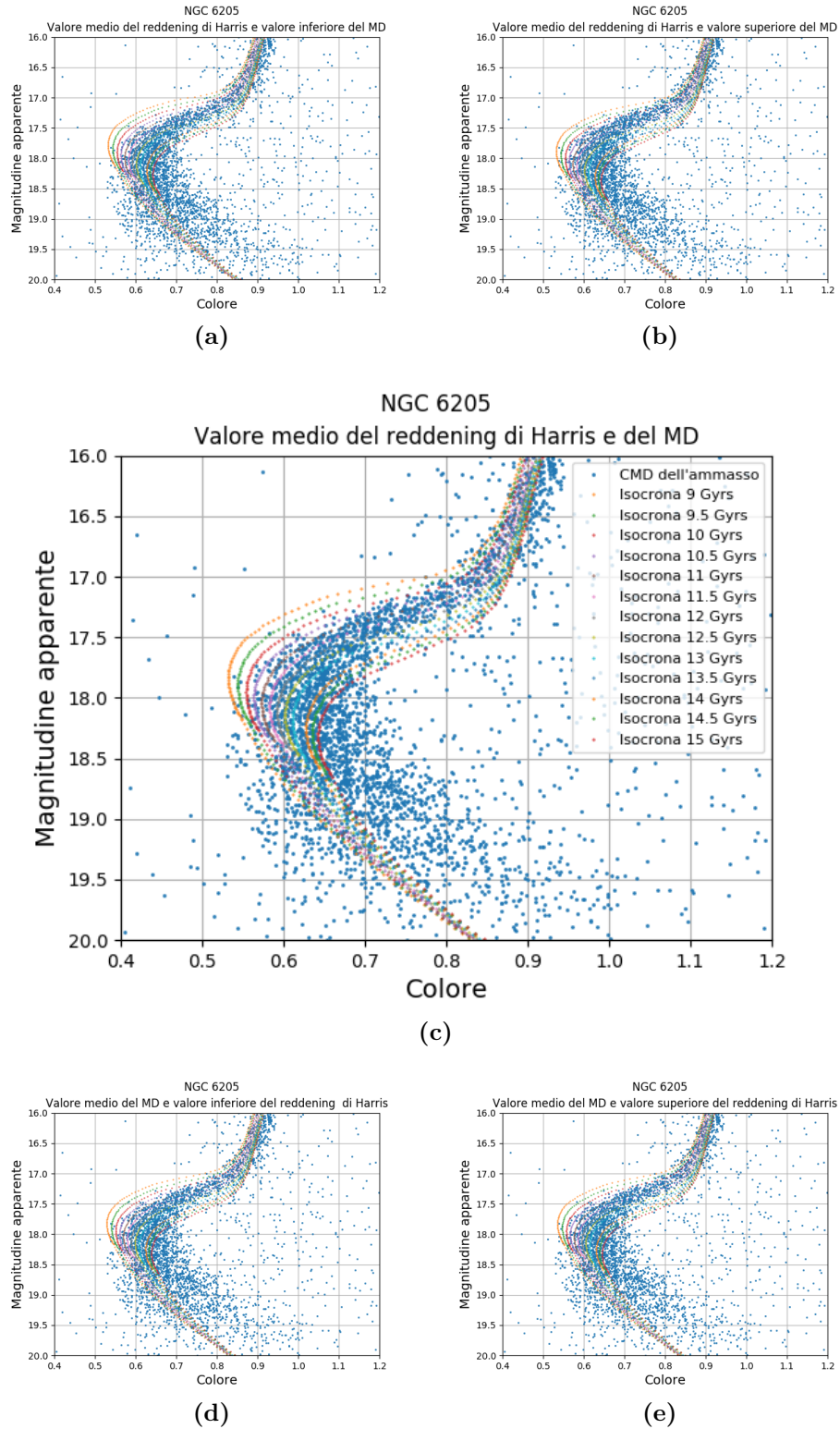
**Figura A.4:** Fiducial line delle isocrone e del CMD dell'ammasso NGC 6121 con reddening di Schlegel. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



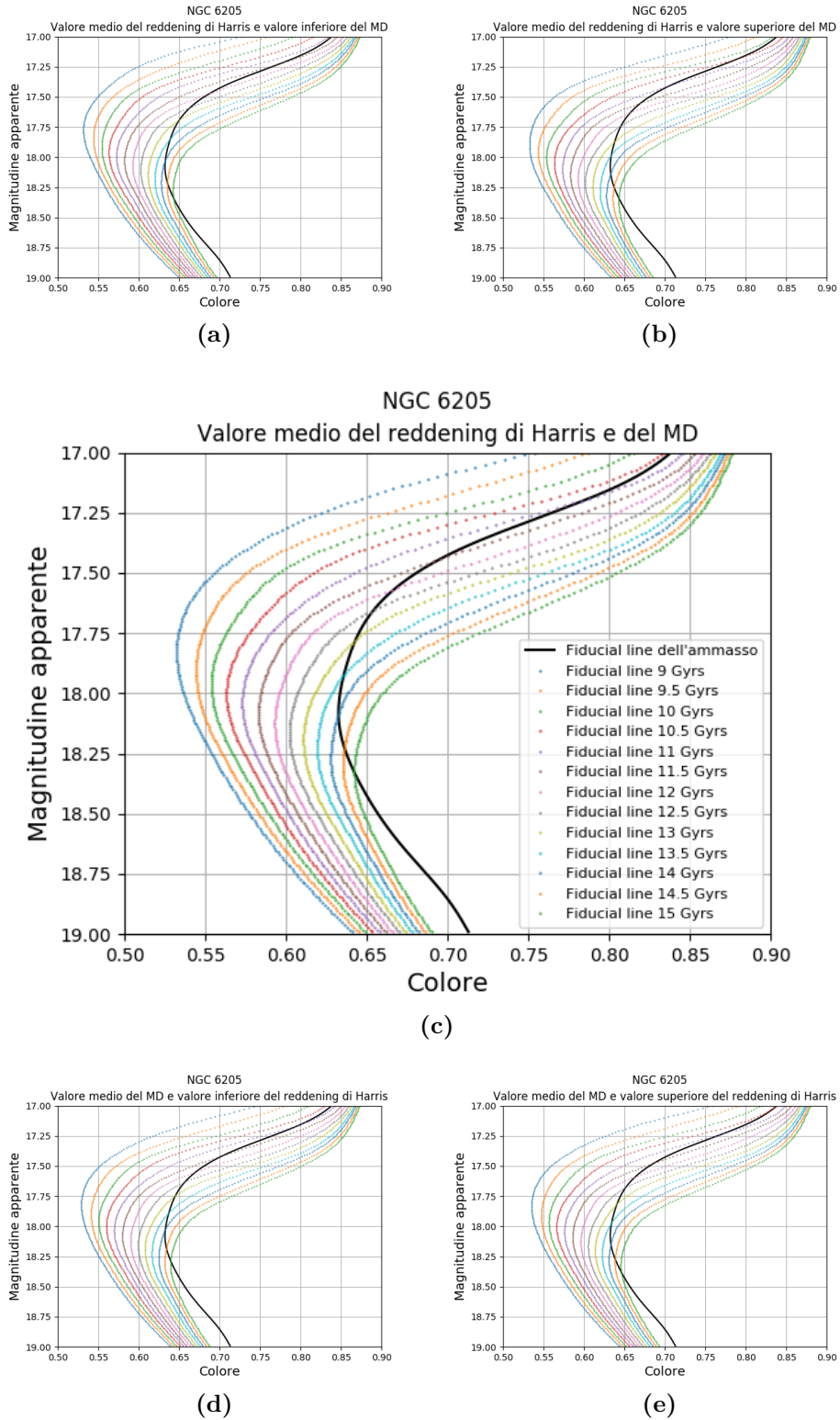
**Figura A.5:** Isocrone e CMD dell'ammasso NGC 6121 con reddening di Green. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



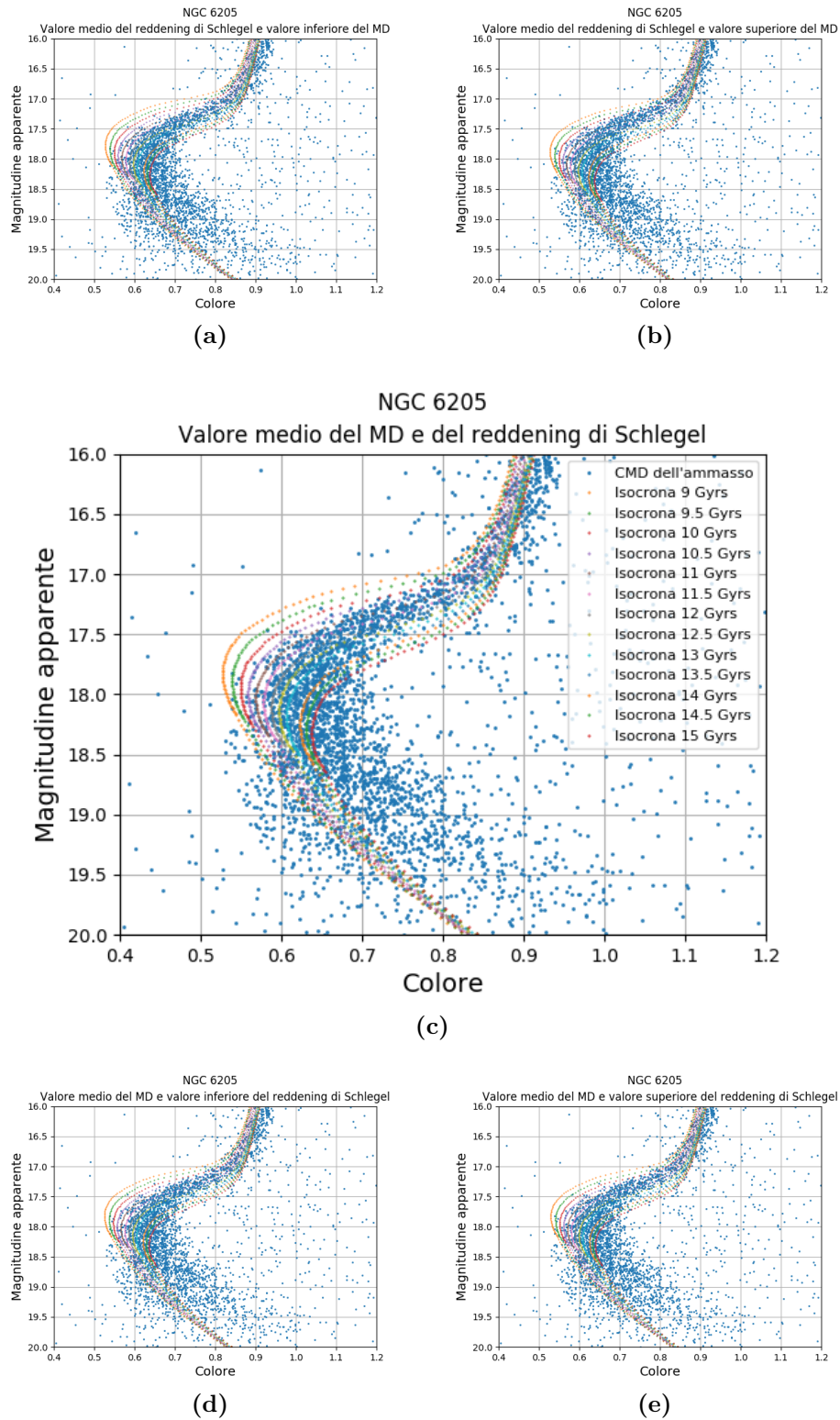
**Figura A.6:** Fiducial line delle isocrone e del CMD dell'ammasso NGC 6121 con reddening di Green. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



**Figura A.7:** Isocrone e CMD dell'ammasso NGC 6205 con reddening di Harris. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.

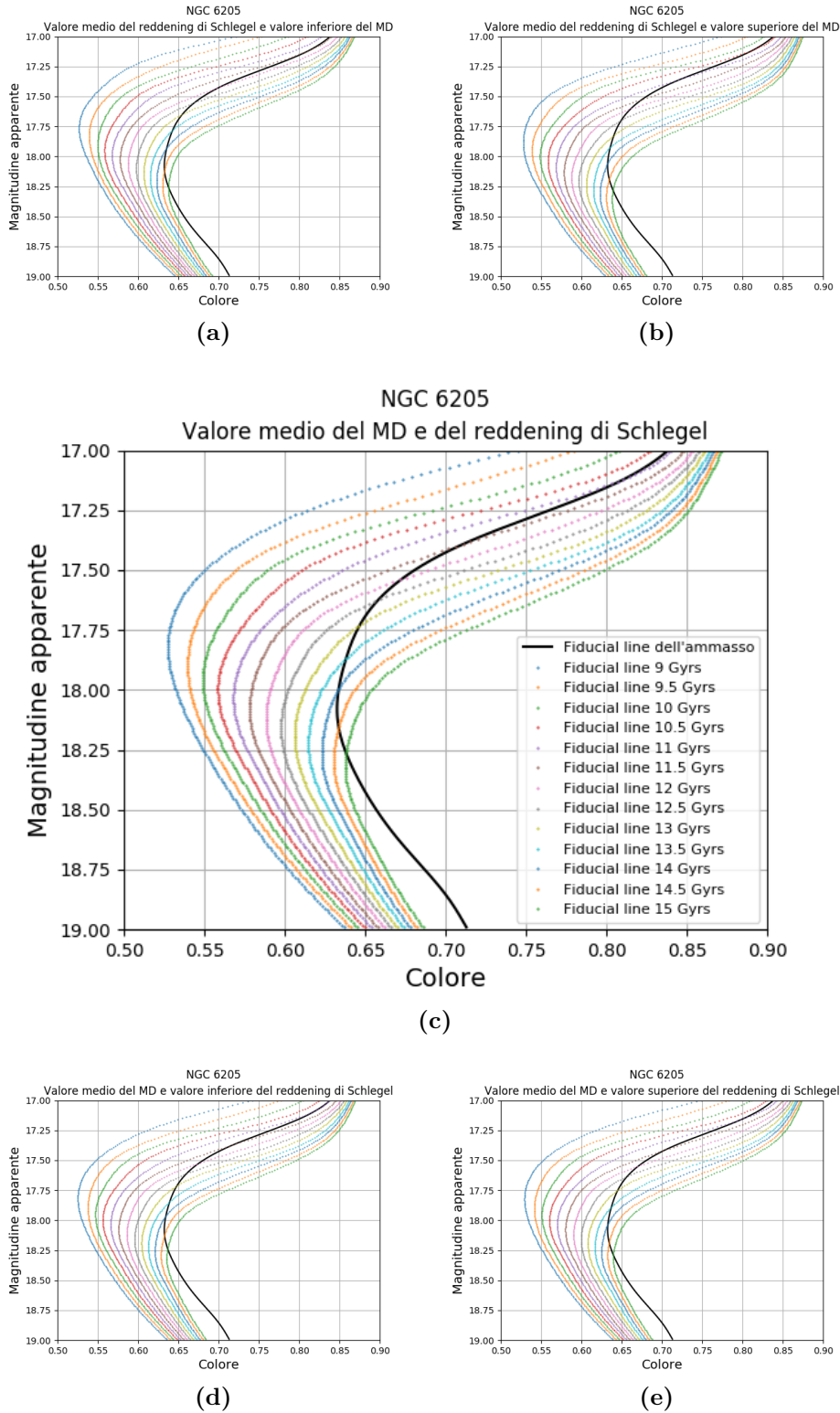


**Figura A.8:** Fiducial line delle isocrone e del CMD dell'ammasso NGC 6205 con reddening di Harris. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.

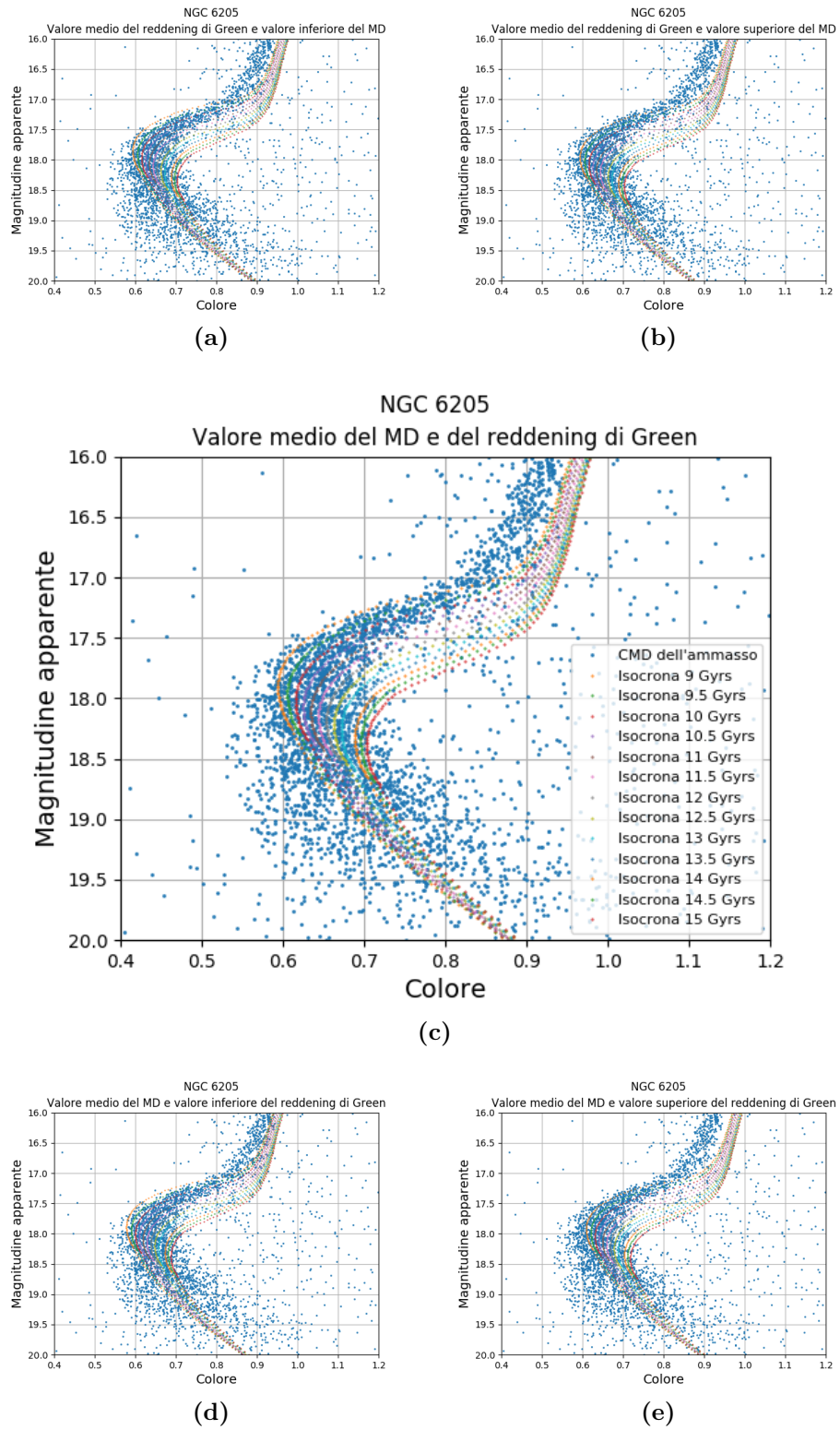


**Figura A.9:** Isocrone e CMD dell'ammasso NGC 6205 con reddening di Schlegel. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.

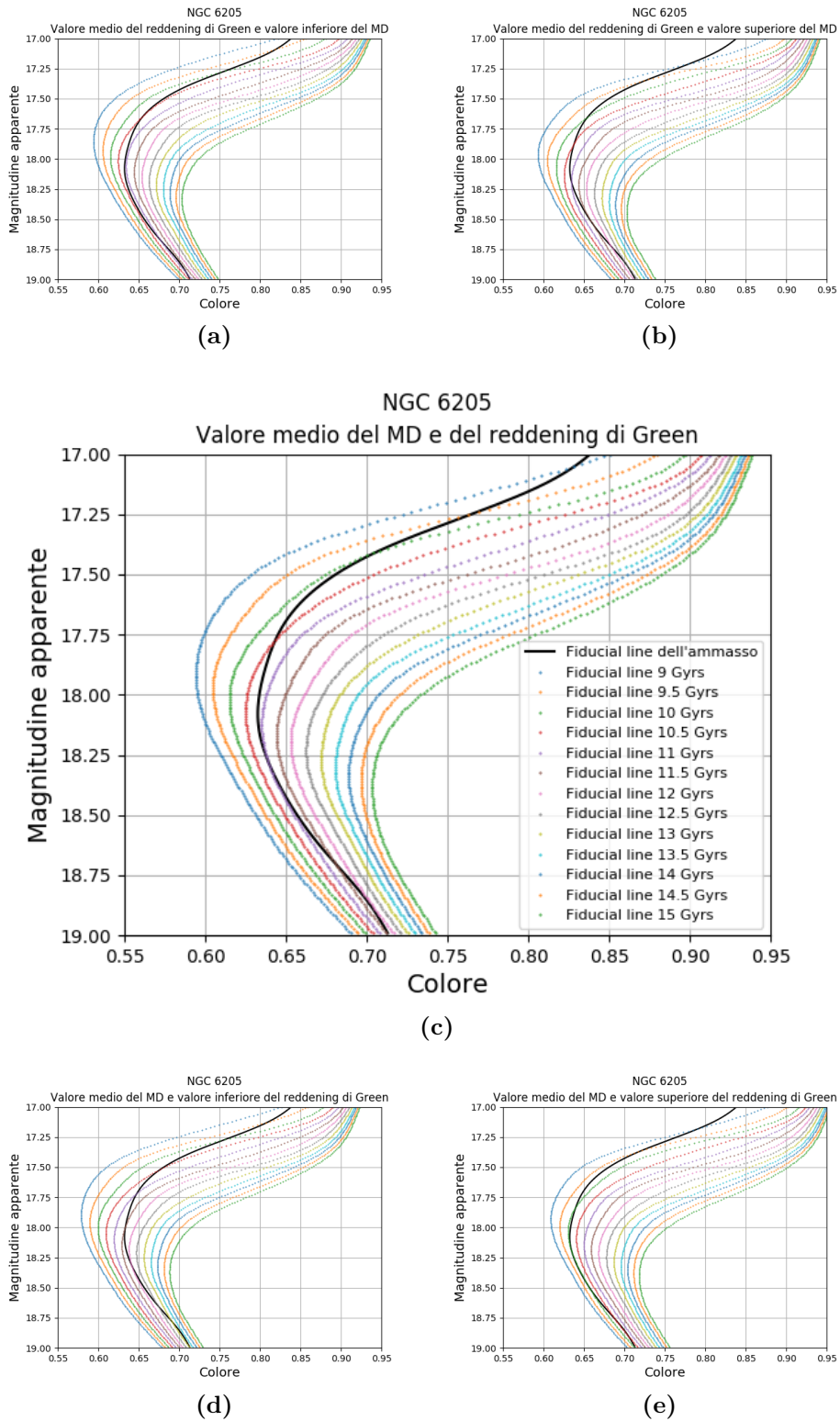




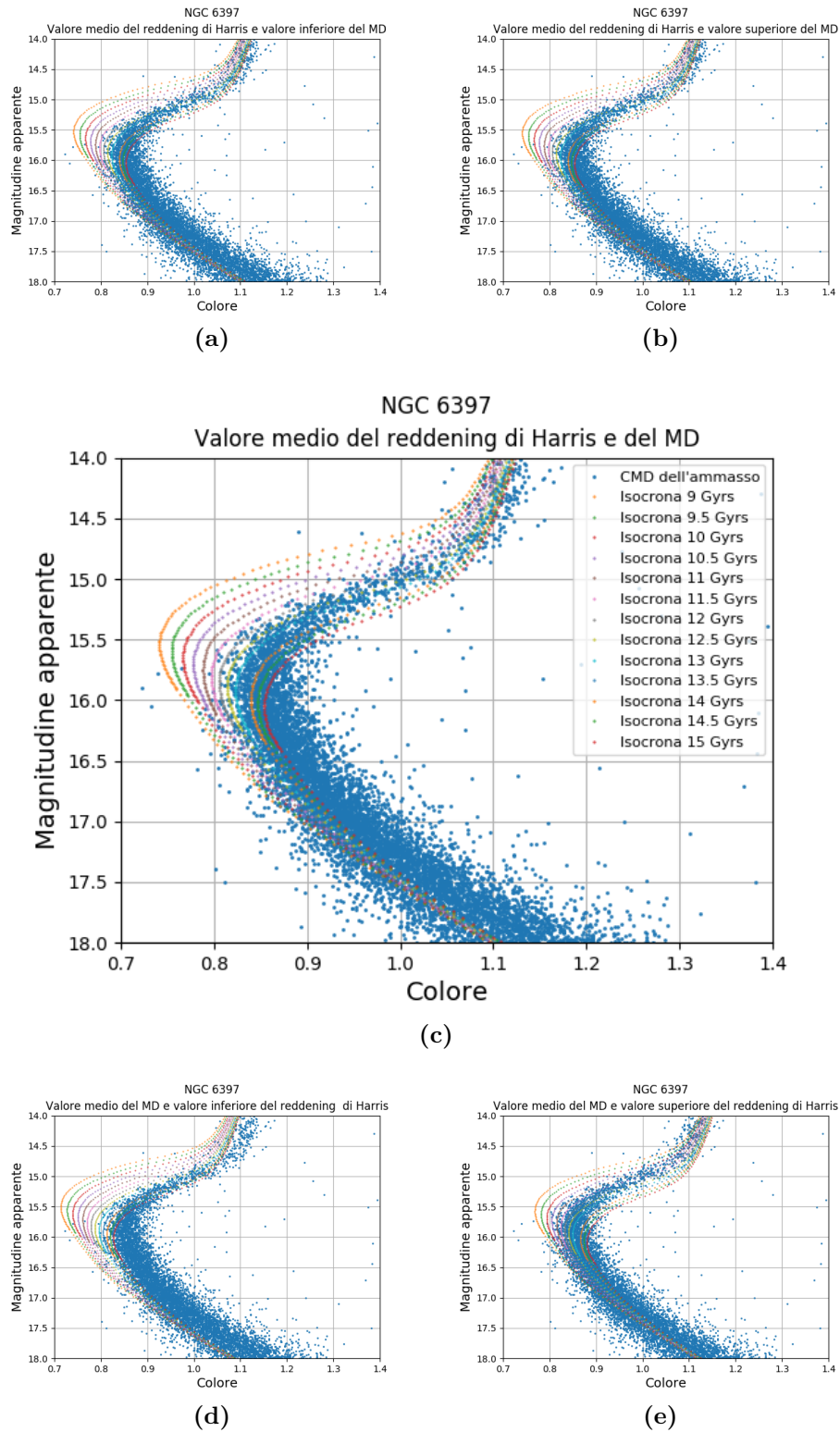
**Figura A.10:** Fiducial line delle isocrone e del CMD dell'ammasso NGC 6205 con reddening di Schlegel. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



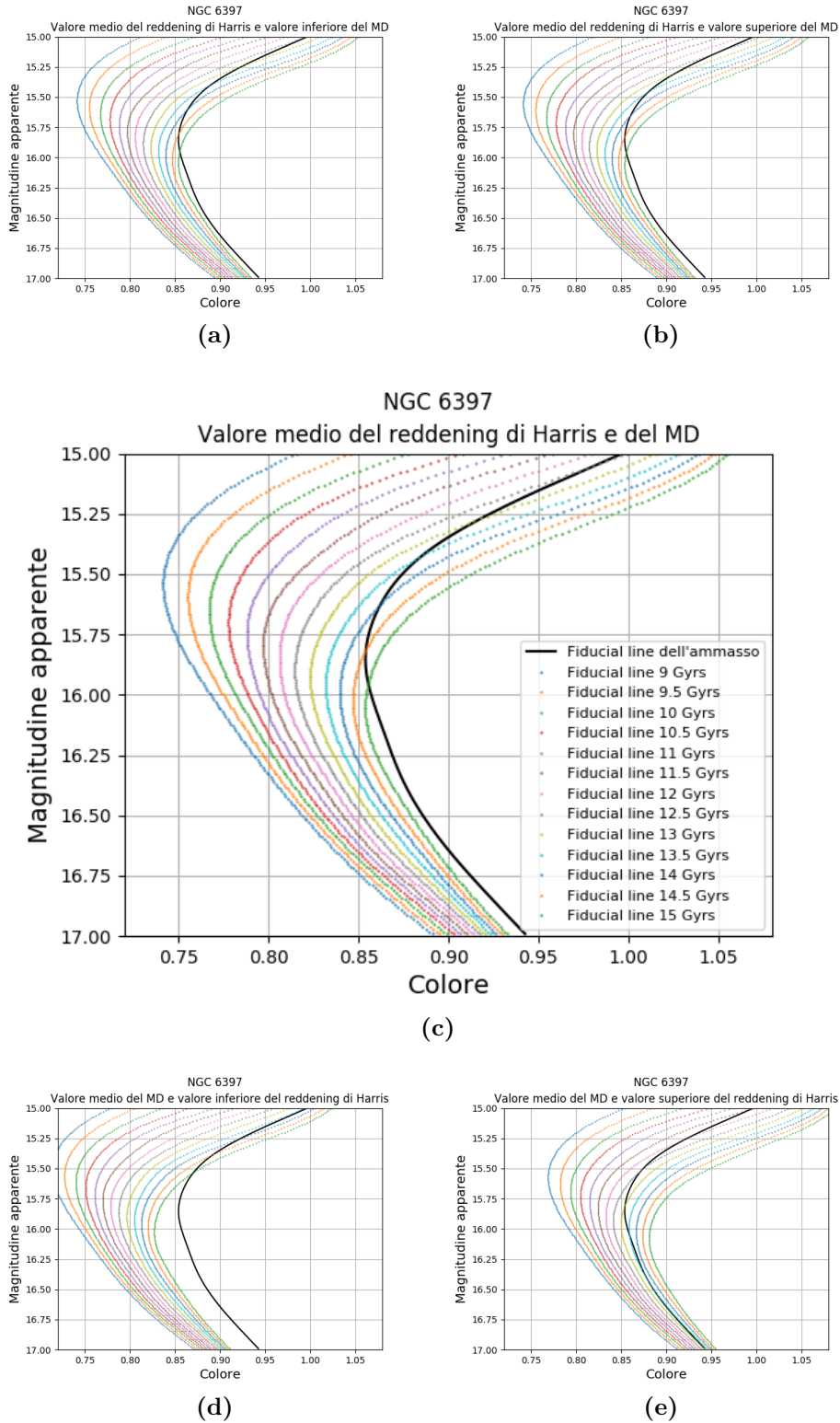
**Figura A.11:** Isocrone e CMD dell'ammasso NGC 6205 con reddening di Green. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



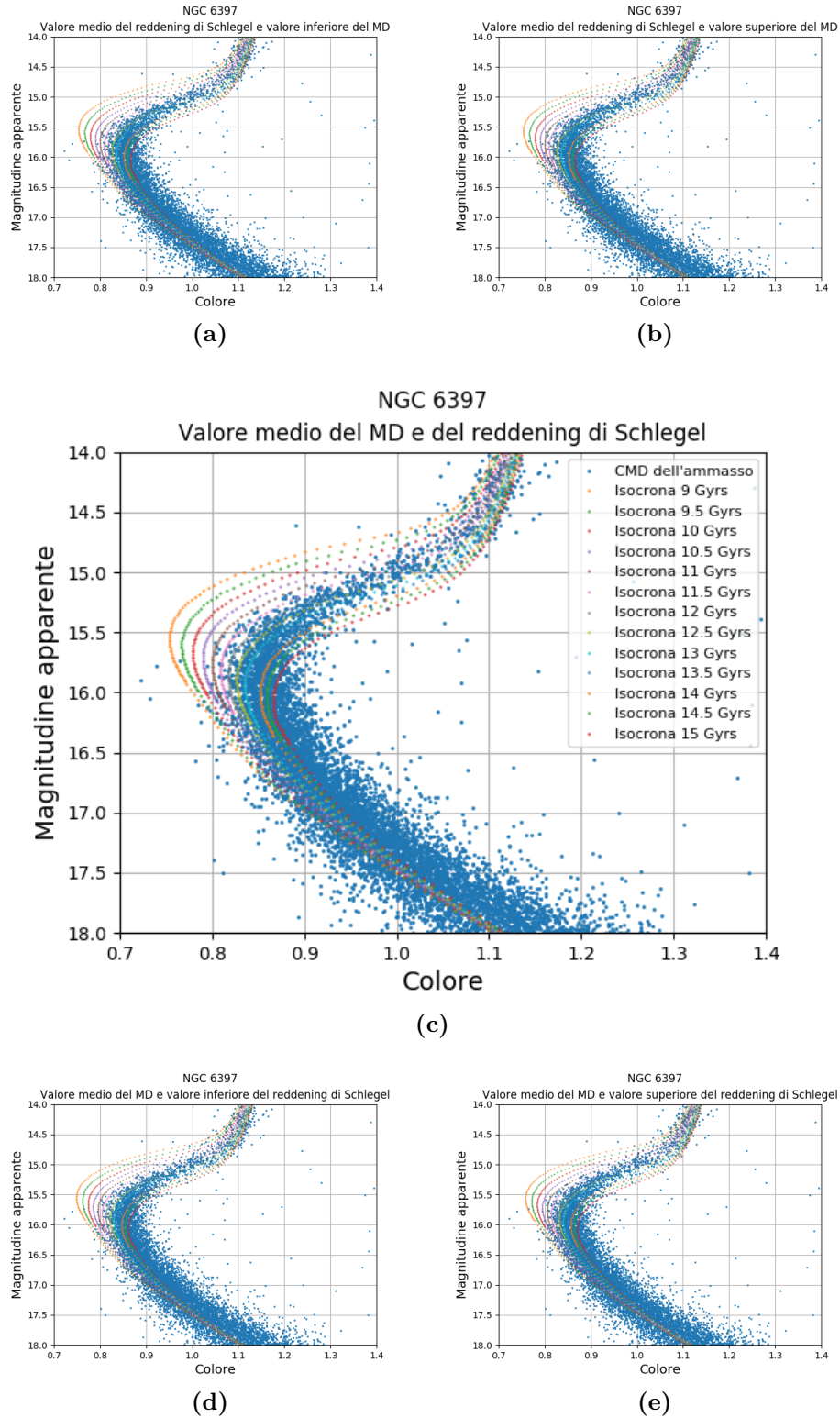
**Figura A.12:** Fiducial line delle isocrone e del CMD dell'ammasso NGC 6205 con reddening di Green. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



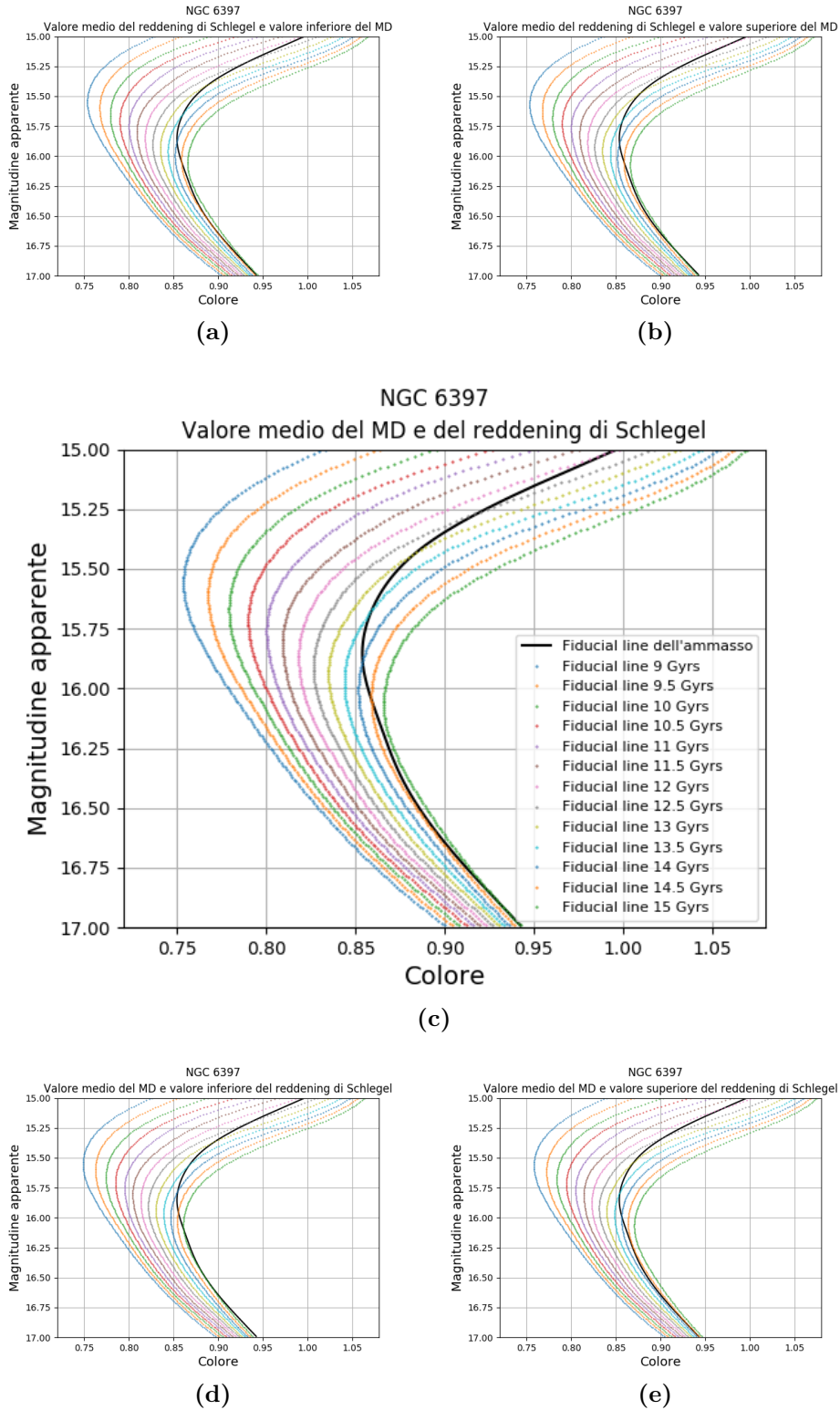
**Figura A.13:** Isocrone e CMD dell'ammasso NGC 6397 con reddening di Harris. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



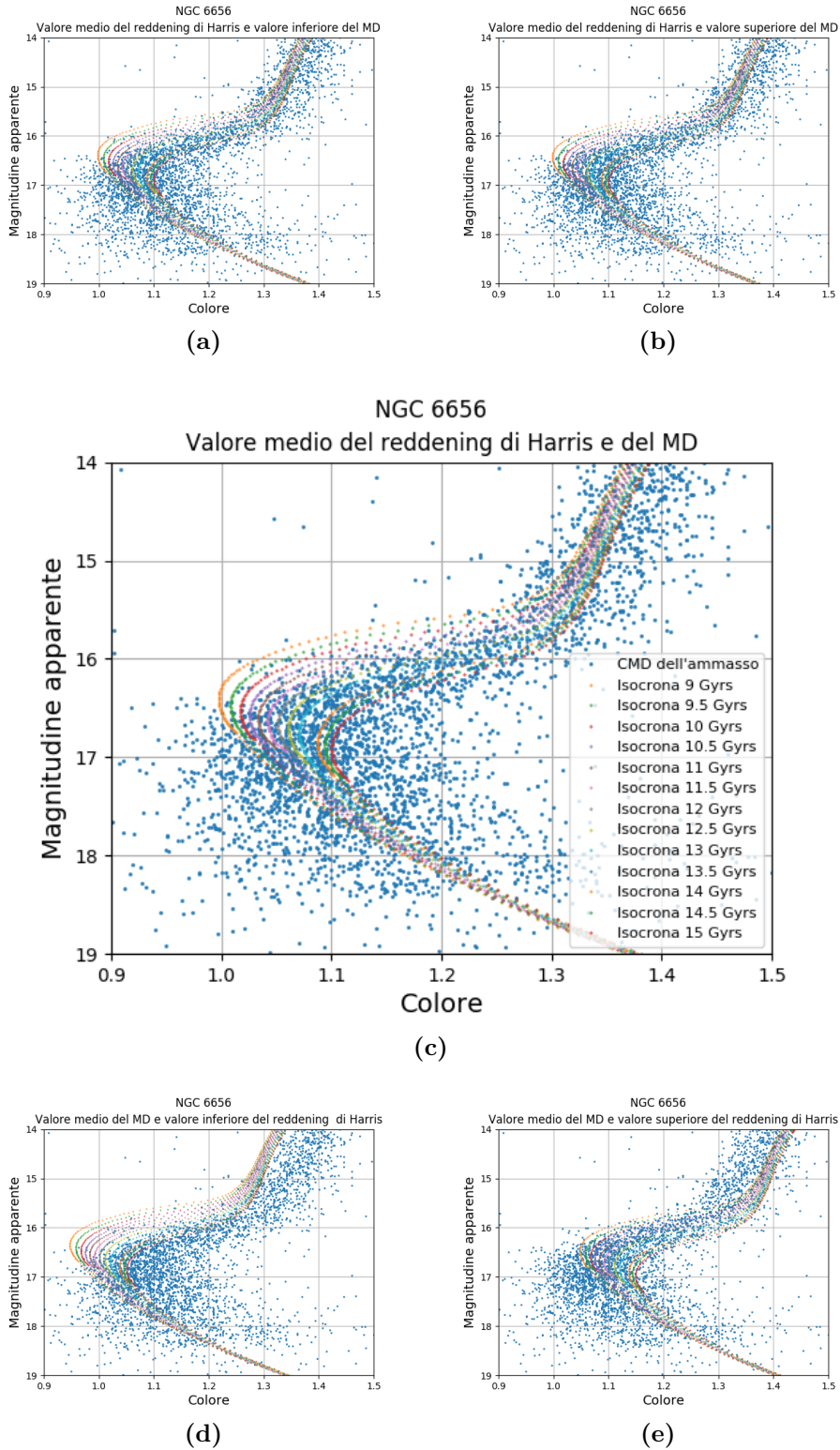
**Figura A.14:** Fiducial line delle isocrone e del CMD dell'ammasso NGC 6397 con reddening di Harris. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



**Figura A.15:** Isocrone e CMD dell'ammasso NGC 6397 con reddening di Schlegel. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.

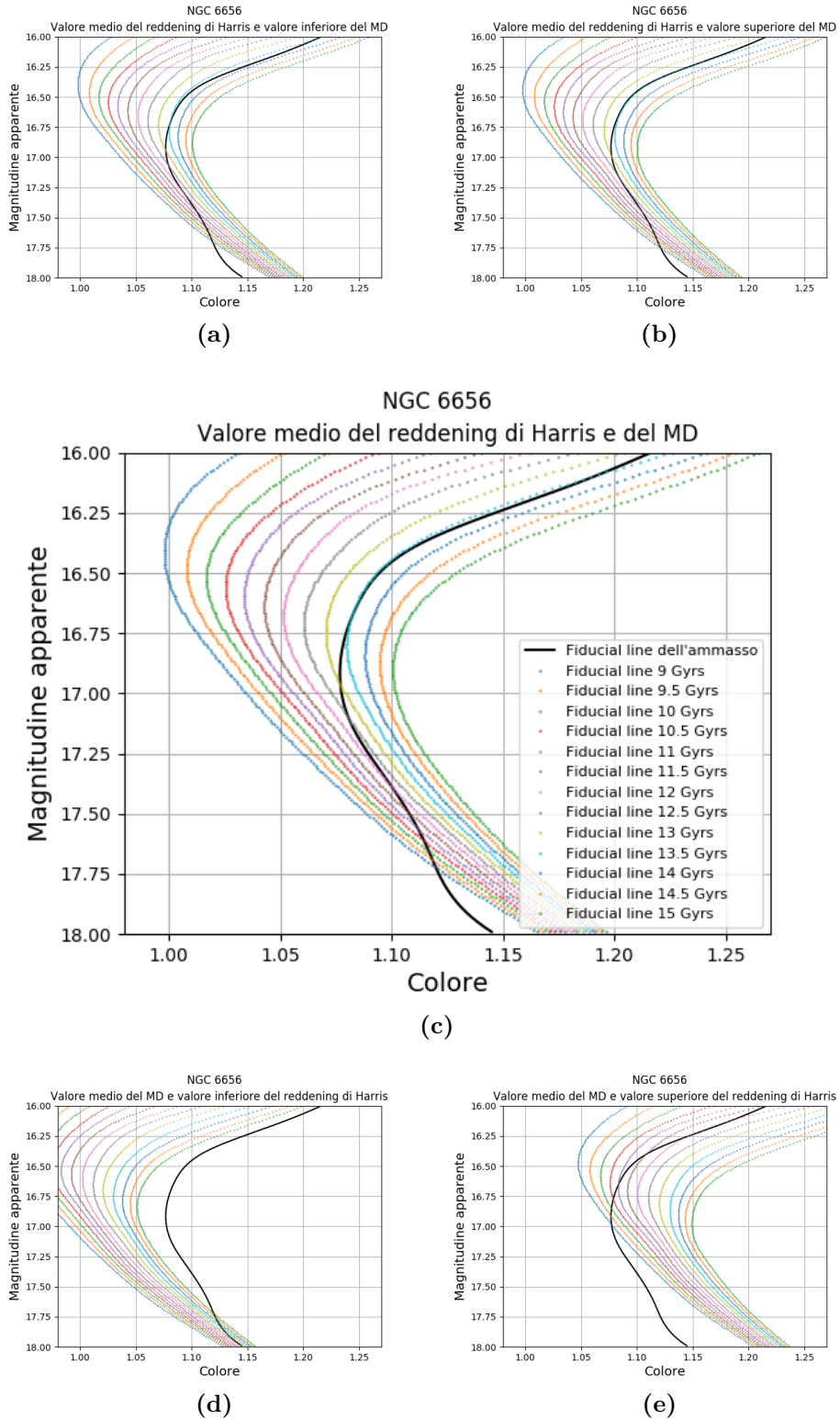


**Figura A.16:** Fiducial line delle isocrone e del CMD dell'ammasso NGC 6397 con reddening di Schlegel. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.

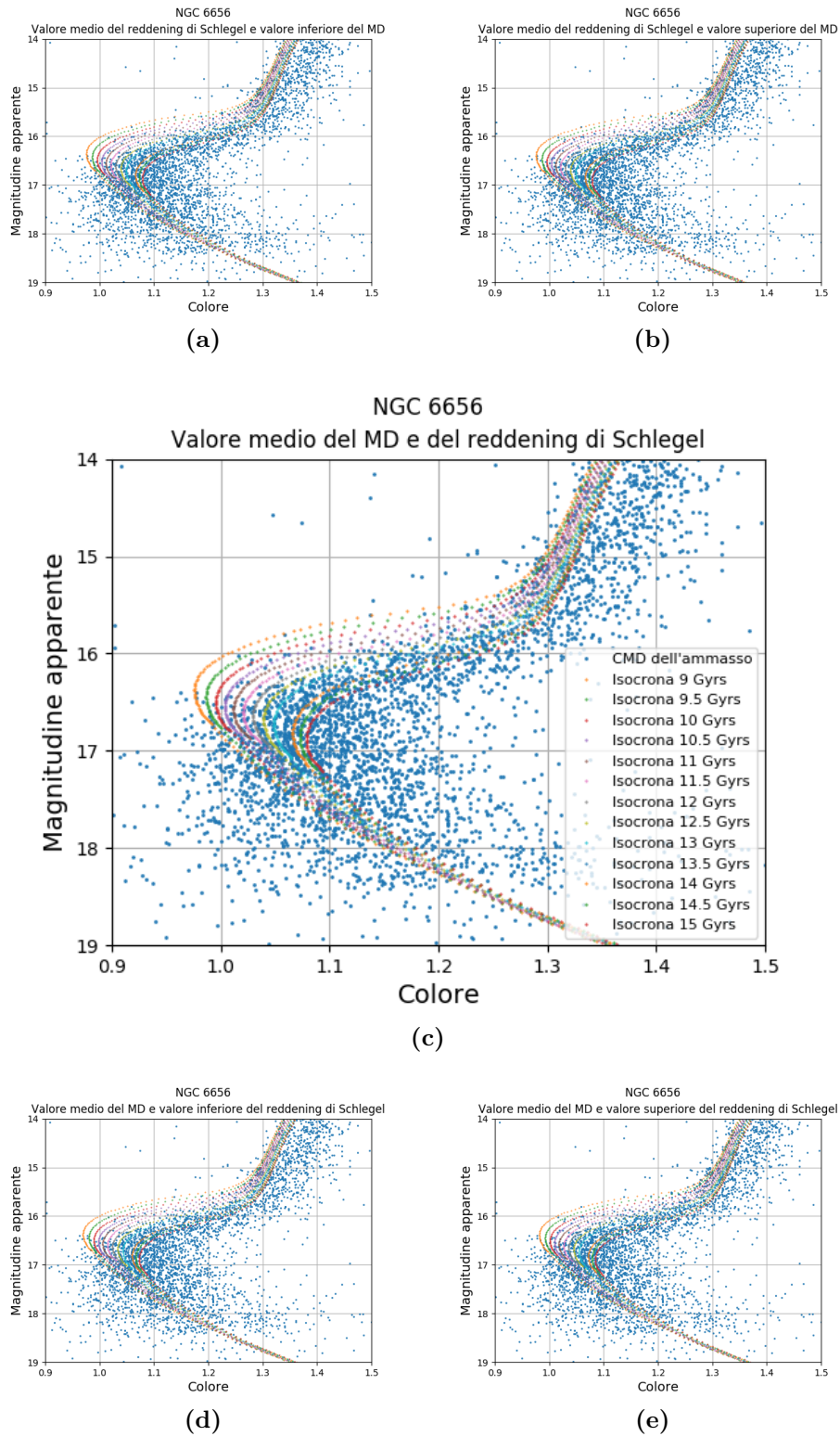


**Figura A.17:** Isocrone e CMD dell'ammasso NGC 6656 con reddening di Harris. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.

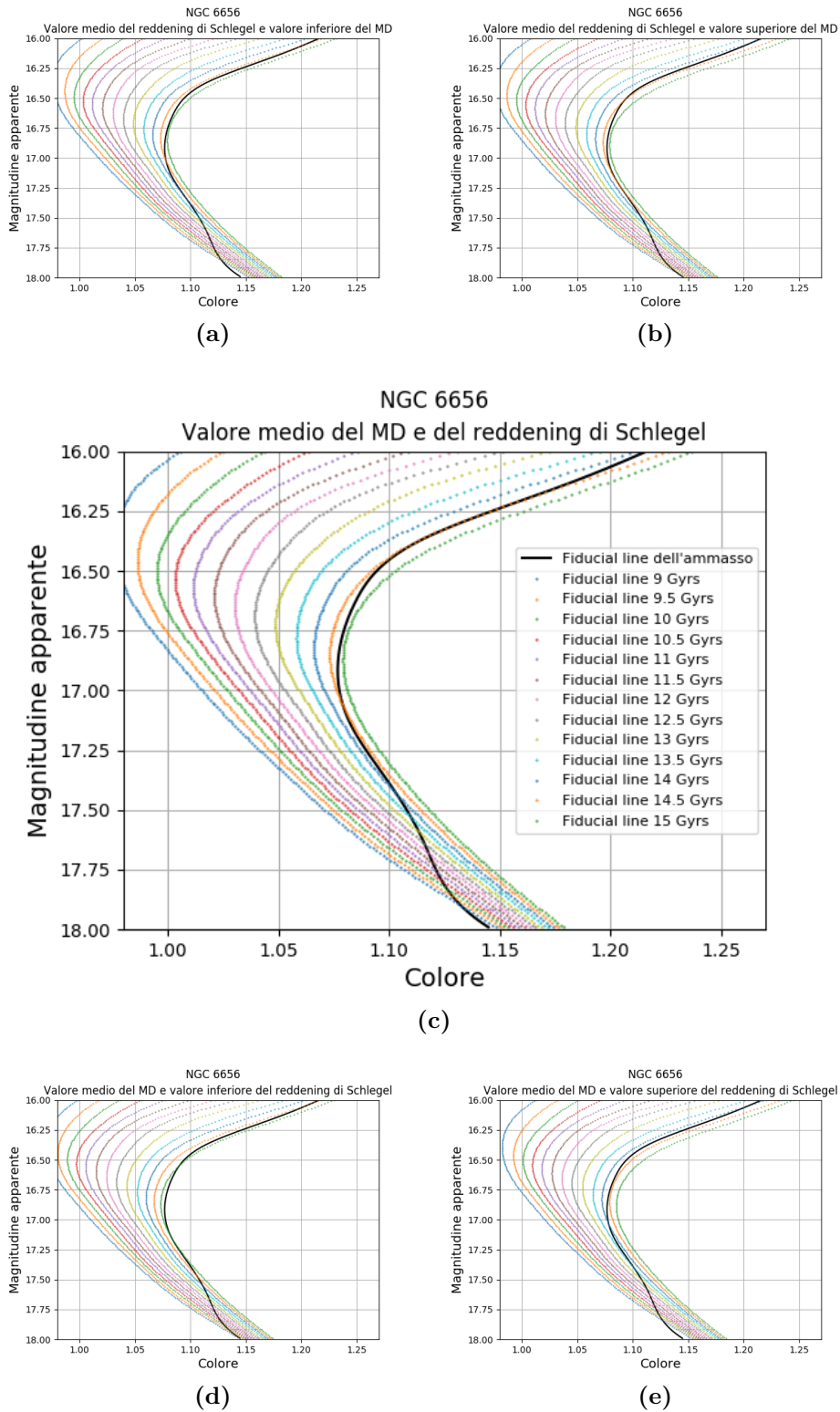




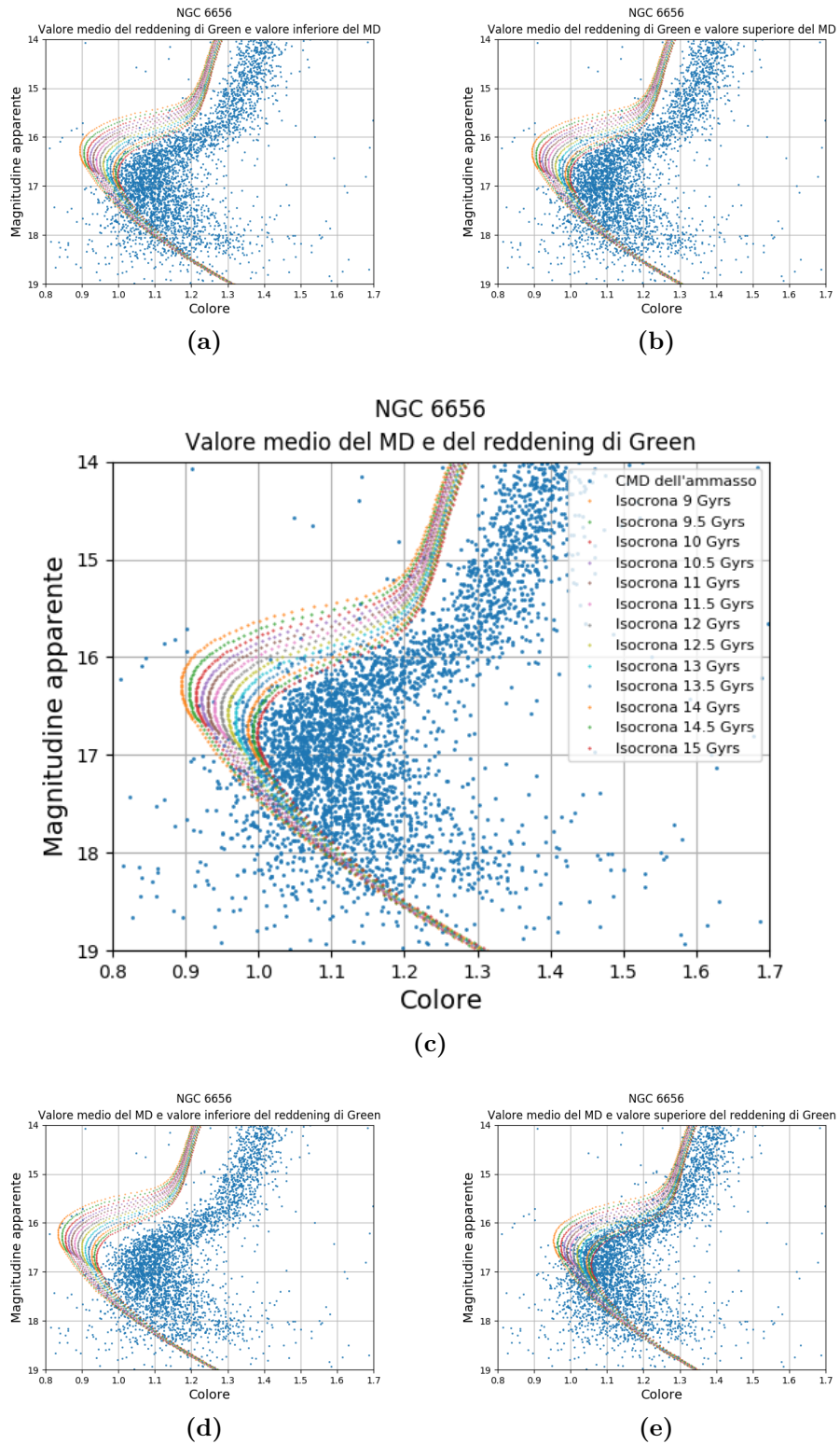
**Figura A.18:** Fiducial line delle isocrone e del CMD dell'ammasso NGC 6656 con reddening di Harris. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



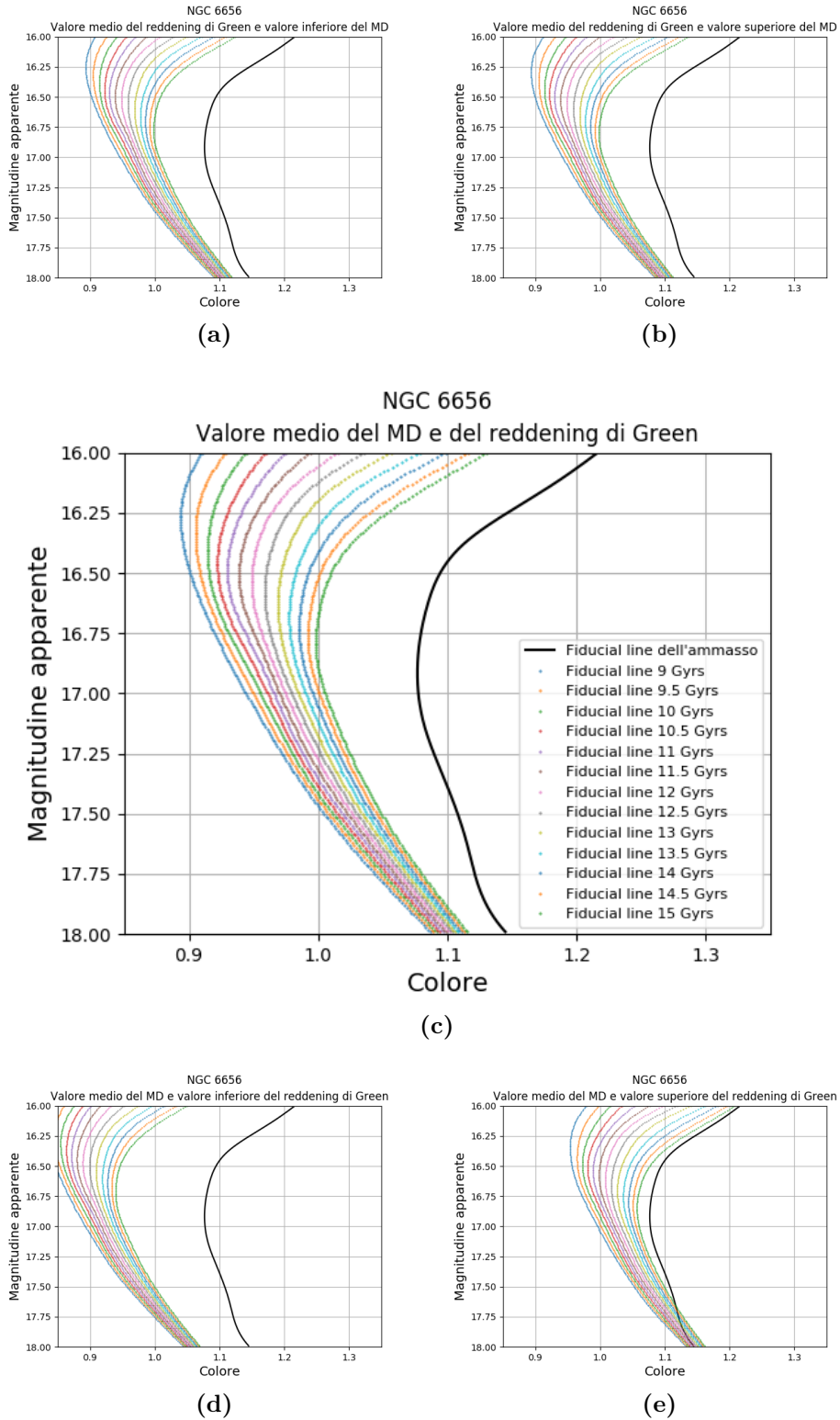
**Figura A.19:** Isocrone e CMD dell'ammasso NGC 6656 con reddening di Schlegel. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



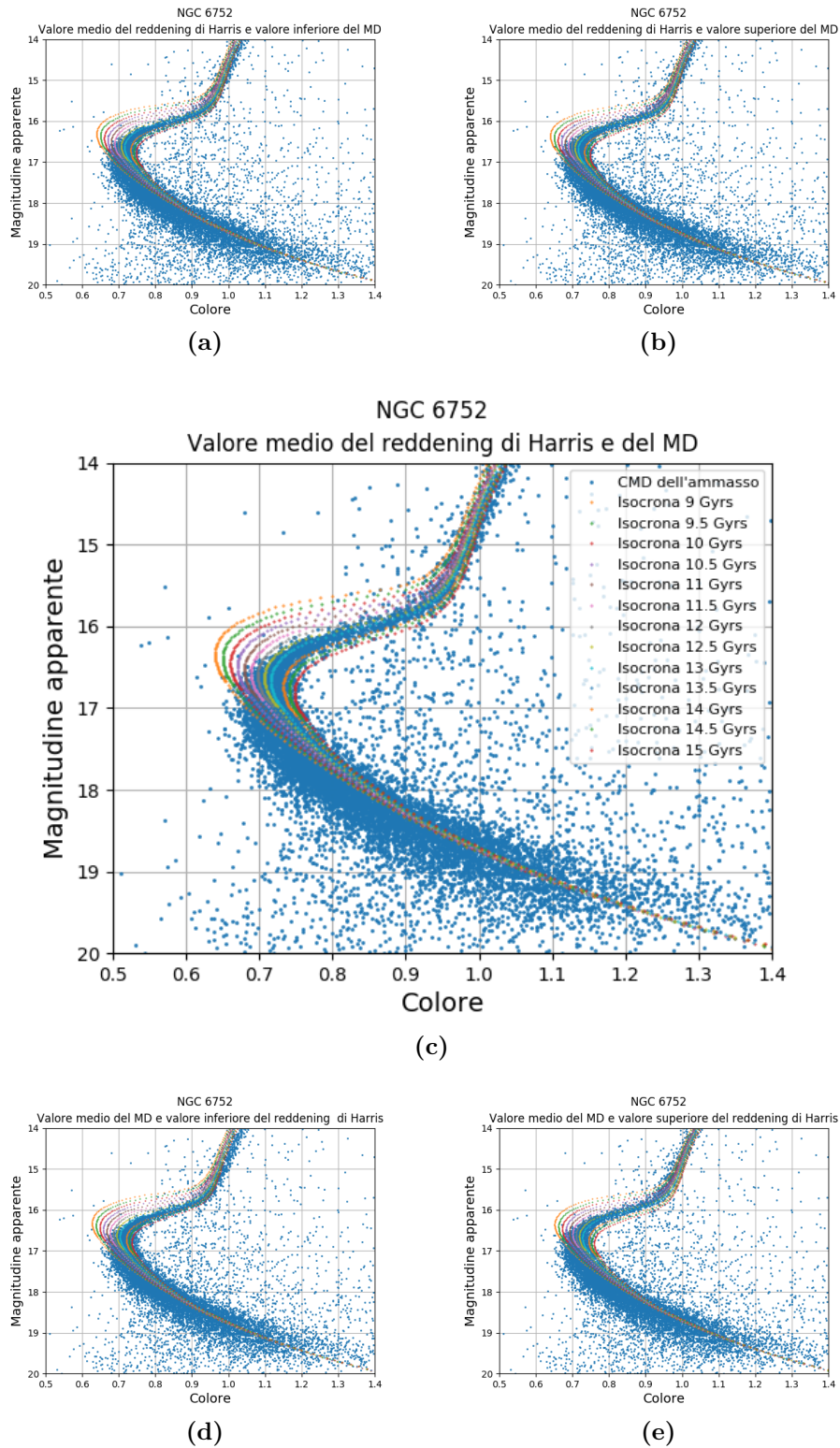
**Figura A.20:** Fiducial line delle isocrone e del CMD dell'ammasso NGC 6656 con reddening di Schlegel. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



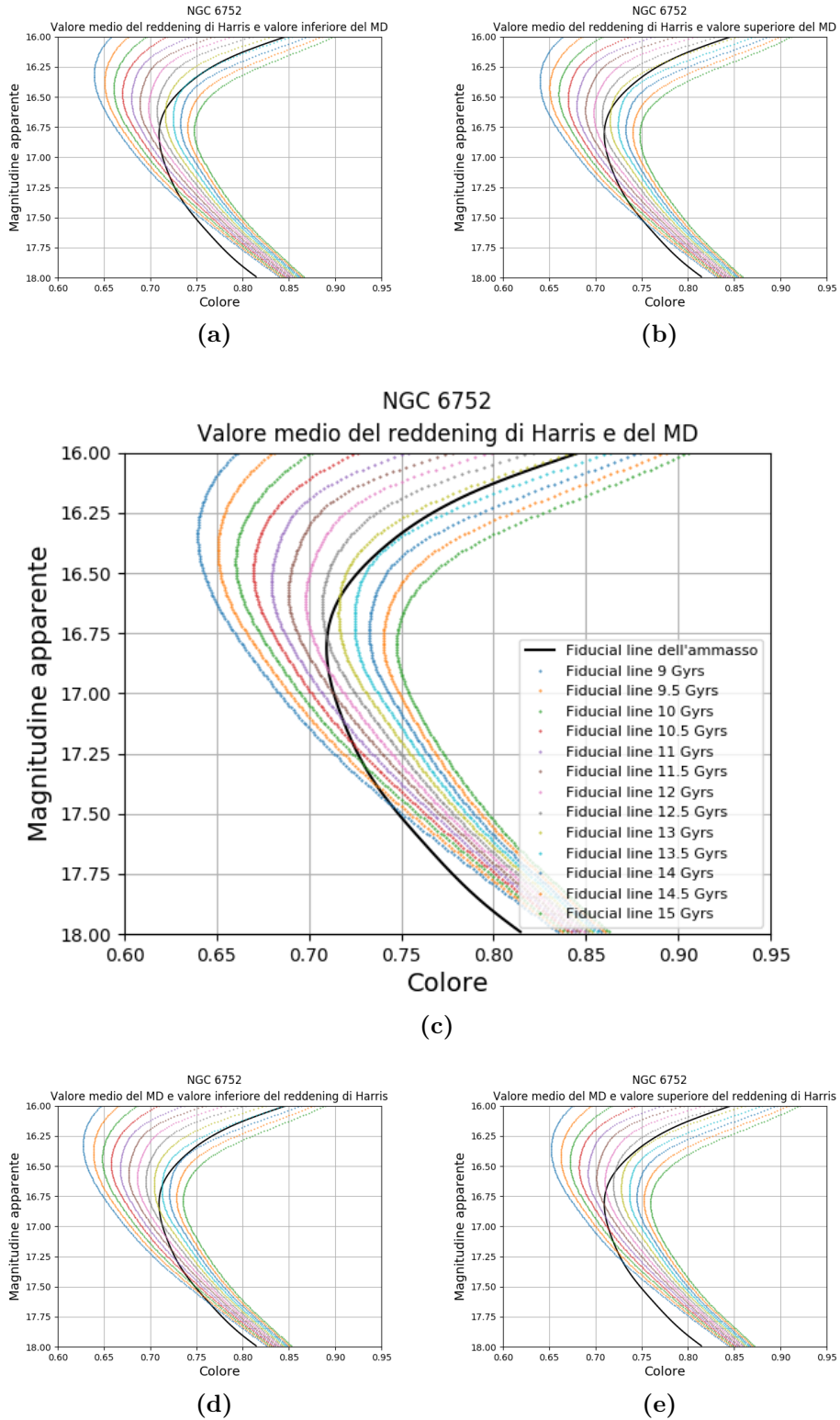
**Figura A.21:** Isocrone e CMD dell'ammasso NGC 6656 con reddening di Green. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



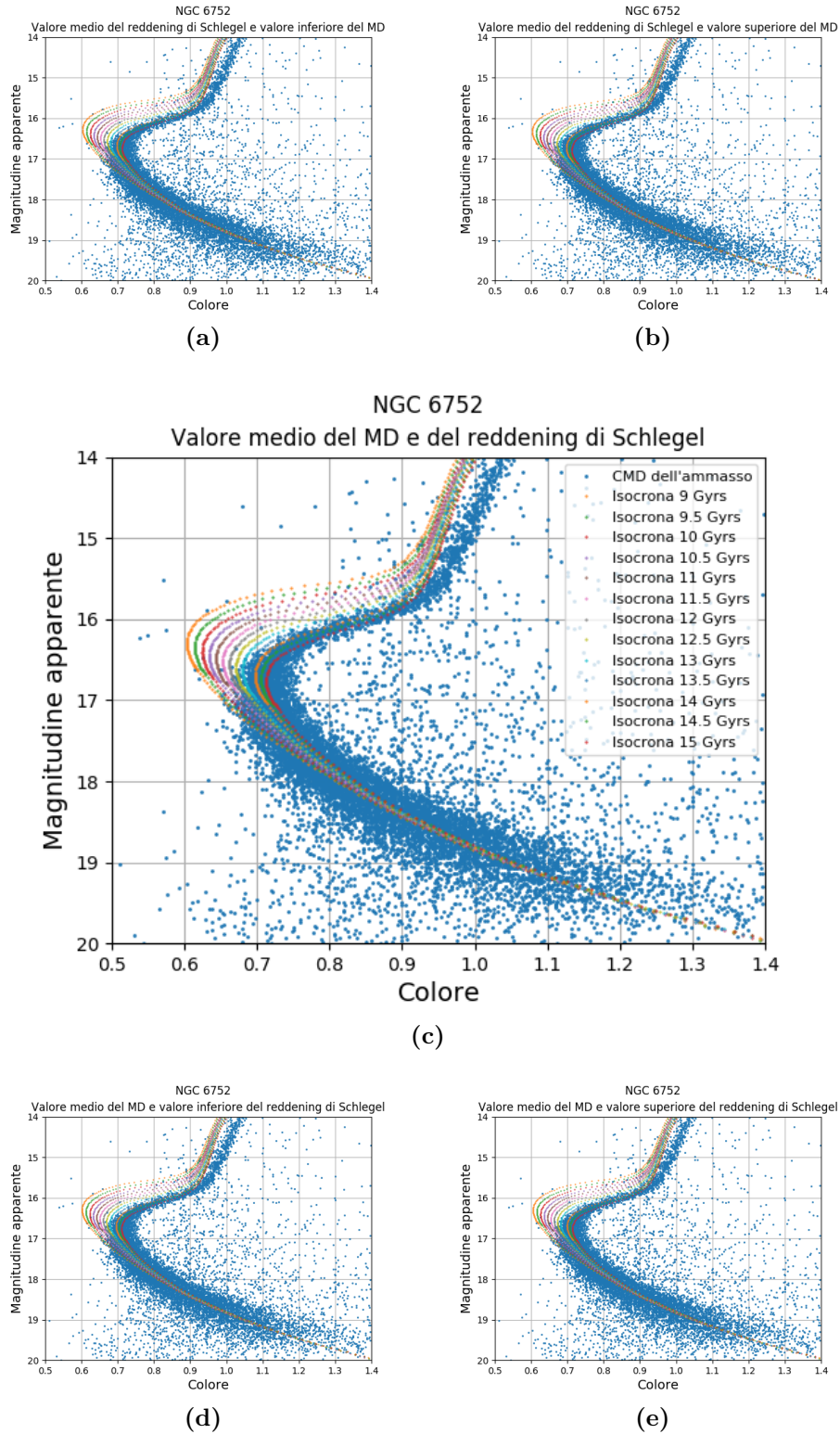
**Figura A.22:** Fiducial line delle isocrone e del CMD dell'ammasso NGC 6656 con reddening di Green. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



**Figura A.23:** Isocrone e CMD dell'ammasso NGC 6752 con reddening di Harris. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.

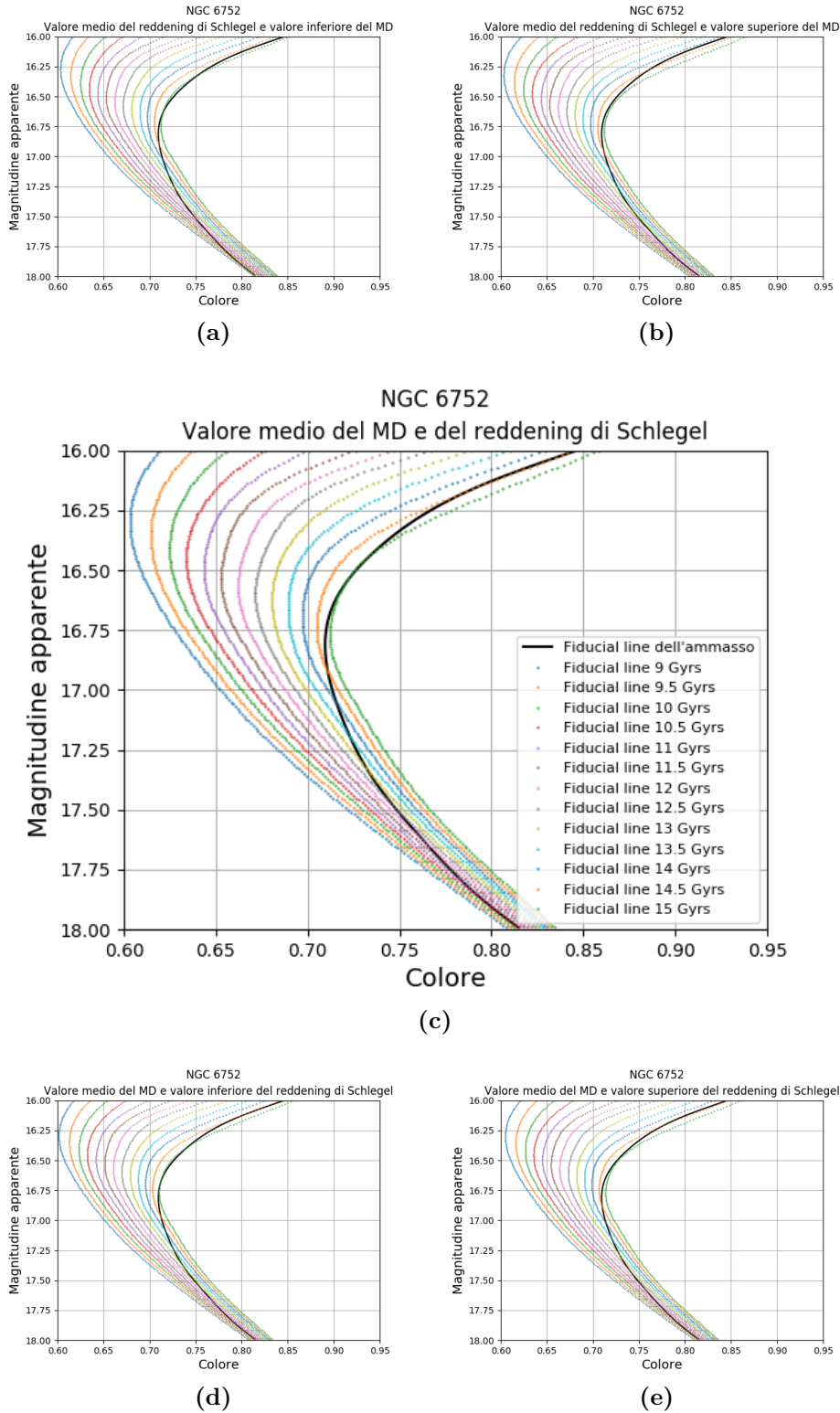


**Figura A.24:** Fiducial line delle isocrone e del CMD dell'ammasso NGC 6752 con reddening di Harris. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



**Figura A.25:** Isocrone e CMD dell'ammasso NGC 6752 con reddening di Schlegel. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.





**Figura A.26:** Fiducial line delle isocrone e del CMD dell'ammasso NGC 6752 con reddening di Schlegel. La legenda presente vale per tutti e cinque i grafici.



# Bibliografia

- BROWN et al. 2018, ApJ Letters, 856:L6, “A high-precision trigonometric parallax to an ancient metal-poor globular cluster”
- CARRETTA et al. 2000, ApJ, 533:215-235, “Distances, ages, and epoch of formation of globular clusters”
- CARRETTA et al. 2010, A&A 516, A55, “Properties of stellar generations in globular clusters and relations with global parameters”
- CHABOYER et al. 1998, ApJ, 494:96-110, “The age of globular clusters in light of Hipparcos: resolving the age problem?”
- DOTTER et al. 2008, [http://stellar.dartmouth.edu/models/isolf\\_new.html](http://stellar.dartmouth.edu/models/isolf_new.html)
- GAIA COLLABORATION 2018, A&A 616, A10, “Gaia Data Release 2: Observational Hertzsprung-Russell diagrams”
- GRATTON et al. 1997, ApJ, 491:749-771, “Ages of globular clusters from HIPPARCOS parallaxes of local subdwarfs”
- GRATTON et al. 2003, A&A 408, 529-543, “Distances and ages of NGC 6397, NGC 6752 and 47 Tuc”
- GREEN et al. 2018, MNRAS, 478, 651, “Galactic Reddening in 3D from Stellar Photometry – An Improved Map”
- HARRIS 1996 (2010 edition), <http://physwww.mcmaster.ca/harris/mwgc.dat>
- HOWES et. al 2018, A&A, arXiv:1804.08321 [astro-ph.SR], “Estimating stellar ages and metallicities from parallaxes and broadband photometry - successes and shortcomings”
- MARIN-FRANCH et al. 2009, ApJ, 694:1498-1516, “The ACS Survey of Galactic globular clusters. VII. Relative ages”
- MEISSNER & WEISS 2006, A&A 456, 1085-1096, “Global fitting of globular cluster age indicators”
- NASA/IPAC Infrared Science Archive, <https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>
- ROSENBERG et al. 1999, ApJ, 118:2306-2320, “Galactic globular cluster

relative ages”

SCHLEGEL et al. 1998, ApJ, 500, 525, “Maps of Dust IR Emission for Use in Estimation of Reddening and CMBR Foregrounds”

SIMBAD Astronomical Database - CDS (Strasbourg); <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

VANDENBERG et al. 2013, ApJ, 775:134 (47 pp), “The ages of 55 globular clusters as determined using an improved  $\Delta_{TO}^{HB}$  method along with color-magnitude diagram constraints, and their implications for broader issues”

<http://sci.esa.int/gaia/28820-summary/>

<http://sci.esa.int/gaia/60147-waiting-for-gaia-s-second-data-release/>

<https://www.nasa.gov/image-feature/goddard/2016/hubble-admires-a-youthful-globular-star-cluster>