



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA TEÓRICA E EXPERIMENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

AGLOMERADO ESTELAR M67: PROCESSOS DE DILUIÇÃO E A EVOLUÇÃO DO MOMENTUM ANGULAR

Bruno Leonardo Canto Martins

Orientador: **Prof. Dr. José Renan De Medeiros**

Coorientadora: **Profa. Dra. Agnès Lèbre**

Tese de doutorado apresentada ao Departamento de Física Teórica e Experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito parcial à obtenção do grau de **DOUTOR** em **FÍSICA**.

Natal, Agosto de 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

In memoriam

Aos meus queridos,
Maria Vanda de Araújo e
Raimundo Augusto de Araújo

*“Grande é o Senhor e grande seu poder,
sua sabedoria não tem limites.
Louvai-o céus, Sol, Lua e Planetas,
seja qual for a linguagem que usais para louvar vosso Criador.
Louvai-o também tu, ó minha alma.
Efetivamente, dele, para ele e nele são todas as coisas,
tanto as que ignoramos totalmente,
como as que conhecemos, e são uma mínima parte.
A ele o louvor , a honra e a glória para sempre.
Amém”*

(Kepler, Johannes, *Opera omnia*, Volume V, 1864, p.327)

Agradecimentos

Ao Prof. José Renan de Medeiros, por ter me mostrado o lado belo e prazeroso da Ciência e da Vida.

À Profa. Agnès Lèbre, pela dedicação, não somente no trabalho desta tese, como também nos momentos pessoais, onde fomos construindo uma grande amizade durante meu estágio em Montpellier, na França. *Merci beaucoup Mlle. Lèbre!*

Ao pessoal do GRAAL, Bertrand Plez, Gérard Jasnewicz, Éric Josselin, Olivier Richard, Jocelyne Gauthier, Christophe Mercier, Carole Prévot, que muito me ensinou, não somente sobre Astronomia, mas também como viver longe de casa durante um ano.

Agradeço aos colaboradores internacionais, Patrick de Laverny e Alejandra Recio-Blanco, pelas importantes discussões e enorme contribuição a esta tese.

Agradeço enormemente a Marwan Gebran, Ishbel Addyman, Sylvain Guiriec, Emelyne Calimoutou, Christine Masduraud, Andrea Chiavassa e Thomas Masseron, meus eternos amigos que me ajudaram a enfrentar um ano longe de casa com muitas alegrias.

Agradeço também aos professores Paulo Fulco, Ananias Monteiro Mariz, Francisco Alexandre da Costa, Joel Câmara de Carvalho Filho e José Dias do Nascimento Jr., que deram grande contribuição à minha carreira científica.

Aos amigos do Grupo de Astrofísica da UFRN, Cristián C. Angel, Daniel B. de Freitas, Eliade F. Lima, Jefferson Costa, Luiz P. S. Neto, Osman R. Nelson, Pedro P. da Silva, Sânzia A. do Nascimento, Saulo C. Maciel, Sumaia S. V. de Barros e a todos os colegas do DFTE, em especial a Erika Cristina e Emília Leopoldina que me ajudaram com alegria e companheirismo.

Um agradecimento muito especial ao grande amigo que me acompanhou e que batalhou ao meu lado com sua tranquilidade e humildade nata. Meu muito obrigado Izan de Castro Leão, melhor dizendo, *Valeu Reis!*

Aos funcionários do Departamento de Física e da Pós-graduação pelos serviços prestados durante a produção deste trabalho.

À minha família, minha mãe, minhas irmãs e meu sobrinho, que compreenderam todas as vezes que fiquei em falta com eles nestes 4 anos.

Ao companheiro Ricardo Wagner, que sempre acreditou em mim e me deu forças para continuar nas horas mais difíceis da vida.

À Capes pelo apoio financeiro.

Resumo

Os aglomerados estelares possuem uma grande variedade de propriedades físicas que os tornam provas valiosas da evolução estelar e galáctica. Estudos recentes mostram uma discrepância entre o modelo padrão de evolução e as observações, principalmente com relação ao nível de mistura e diluição convectiva de elementos leves, bem como na evolução do *momentum* angular.

Para melhor estabelecer algumas destas propriedades, apresentamos uma análise espectroscópica detalhada de 28 estrelas evoluídas, do *turn-off* ao ramo das gigantes, pertencentes ao aglomerado estelar aberto M67. As observações foram feitas com o espectrógrafo UVES+FLAMES no VLT/U2. Determinamos os parâmetros estelares e a metalicidade a partir de análises em ETL de linhas de Fe I e Fe II entre 420–1100 nm. A abundância de ${}^7\text{Li}$ foi obtida a partir da linha do lítio em 6707.78 Å, para todas as estrelas da amostra.

A abundância de ${}^7\text{Li}$ apresenta, para as estrelas evoluídas de M67, um gradual decréscimo na medida em que a temperatura efetiva diminui. O fator de diluição do Li para estrelas gigantes de M67 com $T_{ef} \sim 4350\text{K}$ é pelo menos 2300 vezes superior ao previsto pela teoria padrão para estrelas gigantes simples de campo. A abundância de Li em função da rotação apresenta uma boa correlação para as estrelas evoluídas de M67, com uma dispersão muito menor do que para as estrelas de campo. A massa e a idade parecem ser alguns dos parâmetros que influenciam tal conexão.

Um outro resultado interessante de nosso trabalho diz respeito à descoberta de uma estrela subgigante rica em Li de M67 (S1242). Ela é membro de um sistema binário espectroscópico com alta excentricidade. Sua abundância de Li é 2,7, a maior até então medida em uma estrela evoluída de M67. Duas possibilidades podem explicar este conteúdo anômalo de Li: (i) preservação do Li nos estágios pós-*turn-off* devido a efeitos de maré gravitacional, ou (ii) uma dragagem eficiente do Li presente nas camadas abaixo da zona

convectiva através de difusão atômica em estágios pós-*turn-off*.

Também estudamos a relação do ${}^7\text{Li}$ com a evolução do momentum angular em estrelas evoluídas de M67. Os resultados encontrados estão em acordo com estudos anteriores dedicados a estrelas evoluídas deste aglomerado, onde as estrelas de uma mesma região do diagrama CM possuem rotações bastante similares, porém com valores que apontam para uma desaceleração extra ao longo da seqüência principal.

Por fim, analisamos as distribuições da velocidade rotacional média e da abundância média de Li em função da idade. Com relação a abundância média de Li, tanto as estrelas em aglomerados quanto as estrelas de campo, apresentam um mesmo decrescimento exponencial do tipo $t^{-\beta}$. Tal decrescimento só é observado para idades menores do que 2 Giga-anos. A partir desta idade, observa-se que a abundância média de Li mantém-se constante, diferentemente do que é observado na conexão rotação-idade, onde a velocidade rotacional média decresce lentamente com a idade.

Abstract

Galactic stellar clusters have a great variety of physical properties that make valuable probes of stellar and galactic chemical evolution. Current studies show a discrepancy between the standard evolutionary models and observations, mainly considering the level of mixing and convective dilution of light elements, as well as to the evolution of the angular momentum.

In order to better settle some of these properties, we present a detailed spectroscopic analysis of 28 evolved stars, from the turn-off to the RGB, belonging to the stellar open cluster M67. The observations were performed using UVES+FLAMES at VLT/UT2. We determined stellar parameters and metallicity from LTE analysis of Fe I and Fe II lines between 420–1100 nm. The Li abundance was obtained using the line at 6707.78 Å, for the whole sample of stars.

The Li abundances of evolved stars of M67 present a gradual decreasing when decreasing the effective temperature. The Li dilution factor for giant stars of M67 with $T_{eff} \sim 4350K$ is at least 2300 times greater than that predicted by standard theory for single field giant stars. The Li abundance as a function of rotation exhibits a good correlation for evolved stars of M67, with a much smaller dispersion than the field evolved stars. The mass and the age seem to be some of the parameters that influence this connection.

We discovered a Li-rich subgiant star in M67 (S1242). It is member of a spectroscopic binary system with a high eccentricity. Its Li abundance is 2.7, the highest Li content ever measured for an evolved star in M67. Two possibilities could explain this anomalous Li content: (i) preservation of the Li at the post turn-off stage due to tidal effects, or (ii) an efficient dredge-up of Li, hidden below the convective zone by atomic diffusion occurring in the post turn-off stage.

We also study the evolution of the angular momentum for the evolved stars in M67.

The results are in agreement with previous studies dedicated to evolved stars of this cluster, where stars in the same region of the CM-diagram have quite similar rotations, but with values that indicate an extra breaking along the main sequence.

Finally, we analyze the distributions of the average rotational velocity and of the average Li abundance as a function of age. With relation to the average Li abundances, stars in clusters and field stars present the same type of exponential decay law $t^{-\beta}$. Such decay is observed for ages lesser than 2 Gyr. From this age, is observed that the average Li abundance remain constant, differently of the one observed in the rotation–age connection, where the average rotational velocity decreases slowly with age.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
1 Introdução	1
1.1 Nucleossíntese Primordial	3
1.2 Sobre o estudo do Li em estrelas evoluídas	5
1.3 Aglomerados Estelares	7
1.3.1 Aglomerados Abertos	8
1.4 Objetivo deste Trabalho	9
1.5 Plano de trabalho	10
2 O Aglomerado Aberto M67	11
2.1 Estudos sobre a evolução estelar em M67	12
2.1.1 Mistura extra ou uma nucleossíntese diferente em M67?	14
3 Amostra estelar e o procedimento observacional	16
4 Síntese e Análise Espectral	21
4.1 Síntese Espectral	21
4.1.1 Parâmetros Atômicos e Moleculares	22
4.1.2 Parâmetros de Convolução	22
4.1.3 Espectro Solar e Arcturus	22
4.2 Análise Espectroscópica	23

4.2.1	Larguras Equivalentes	23
4.2.2	Modelos Atmosféricos	24
4.2.3	Forças de Oscilador, $\log gf$	25
4.2.4	Determinação dos Parâmetros Atmosféricos	26
5	Resultados e discussões	34
5.1	A natureza evolutiva do Lítio em M67	36
5.1.1	Lítio <i>versus</i> rotação em M67	43
5.1.2	S1242: um Laboratório Particular	53
5.2	Evolução do momentum angular em M67	56
5.3	Conexão lítio–idade <i>versus</i> rotação–idade	62
6	Conclusões e Perspectivas	66
6.1	Conclusões	66
6.2	Perspectivas	69
A	Parâmetros fundamentais	71
B	Medidas de largura equivalente	76
C	Publicações	93

Lista de Figuras

3.1	Diagrama Cor–Magnitude (CM) do aglomerado aberto M67. A fotometria ($V, B - V$) foi retirada de Montgomery et al. (1993). As estrelas de nossa amostra estão assinaladas com cruces vermelhas. Foi aplicada uma correção de $E(B - V) = 0.059$. Uma isócrona de 4 Giga–anos, com massa em torno de $1,3 M_{\odot}$, de Girardi et al. (2002) foi usada para auxiliar a seleção da amostra.	17
4.1	Definição de largura equivalente (LE).	23
4.2	Correção do $\log gf$ na região do Li para o Sol. O espectro observado está indicado por uma linha pontilhada preta e os espectros sintéticos, por linhas sólidas vermelha e verde, para a lista atômica obtida da base de dados de VALD sem correções das forças de oscilador e mais listas de moléculas e lista atômica com as correções das forças de oscilador e listas de moléculas, respectivamente.	27
4.3	Correção do $\log gf$ na região do Li para Arcturus. Os símbolos são os mesmos descritos na Fig. (4.2).	28
4.4	Equilíbrio de excitação entre as linhas de Fe I da estrela S1487. A regressão linear (linha vermelha tracejada) é referente às linhas de Fe I, onde a intersecção com o eixo das ordenadas nos fornece a metalicidade ($[Fe/H]$). Os parâmetros obtidos para S1487 são: $T_{ef} = 5940 K$, $v_{mic} = 1,60 km s^{-1}$ e $\log g = 3,8$	30

4.5	O equilíbrio de ionização, que é o acordo entre as linhas fracas e intensas, entre as linhas de Fe I da estrela S1487 determina o valor da velocidade de microturbulência. A regressão linear é referente somente às linhas de Fe I. Os parâmetros obtidos para S1487 são os mesmos apresentados na Fig. (4.4).	31
5.1	(a) Região do Li para S1487. O espectro observado está indicado através de uma linha pontilhada preta e o espectro sintético, por uma linha sólida vermelha. A linha vertical azul indica a linha do Li em 6707,78 Å. (b) Diferença residual entre o melhor espectro sintético ($A_{Li} = 1,1dex$) e o espectro observado.	35
5.2	Diagrama Cor-Magnitude (CM) das estrelas do campo. A fotometria foi retirada de Brown et al. (1989), de Medeiros et al. (1997), Lèbre et al. (1999), de Medeiros et al. (2000), do Nascimento et al. (2003) e de Laverny et al. (2003). Os traçados evolutivos utilizados foram os de Girardi et al. (2000) para a determinação de suas massas e estágios evolutivos.	37
5.3	Abundância de lítio em função da temperatura efetiva de M67. As estrelas de nossa amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242. As estrelas da seqüência principal de M67 obtidas de Jones et al. (1999) e Randich et al. (2002) são representadas por quadrados e os valores do Sol por \odot . As linhas tracejadas representam os limites inferior e superior para as estrelas de nossa amostra.	40
5.4	Diluição do Li em função da temperatura efetiva para as estrelas de M67 que compõem a nossa amostra, representadas por círculos vermelhos, e as estrelas de tipo-solar de M67 obtidas de Jones et al. (1999) e Randich et al. (2002), representadas por quadrados abertos. O traçado azul é a curva teórica prevista para a diluição do Li para estrelas do campo com massa $1,25 M_{\odot}$, previsto por Iben (1967a,b). O traçado vermelho foi gerado a partir de um ajuste polinomial de segunda ordem para as estrelas de M67. As linhas tracejadas representam os limites inferior e superior para as estrelas de nossa amostra.	41

5.5	Abundância de Li em função da temperatura efetiva. As estrelas de nossa amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242. As estrelas do campo, por cruces pretas e os valores do Sol, por \odot . As linhas tracejadas são as mesmas da Fig. (5.3)	44
5.6	Abundância de lítio em função da temperatura efetiva. As estrelas de nossa amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242. As estrelas do campo estão representadas por cruces e os valores do Sol, por \odot . Nesta figura estão representadas apenas as estrelas do campo com metalicidade variando entre $-0,15 dex$ e $+0,15 dex$. As linhas tracejadas são as mesmas da Fig. (5.5).	45
5.7	Abundância de lítio em função da velocidade rotacional. As estrelas de M67 estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242, e as estrelas do campo, por cruces pretas. Os valores do Sol estão representados nesta figura por \odot . As linhas tracejadas indicam o limite superior e inferior para as estrelas de M67.	46
5.8	Metalicidade em função da temperatura efetiva. As estrelas da presente amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242, e as estrelas do campo, por cruces pretas. A posição do Sol também está indicada nesta figura por \odot . A linha tracejada representa o valor médio da metalicidade das estrelas do campo ($0,08 dex$) enquanto que a linha sólida indica o valor médio para as estrelas de nossa amostra de M67 ($-0,03 dex$).	48
5.9	Abundância de lítio em função da velocidade rotacional. As estrelas de nossa amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242. Somente estrelas do campo com metalicidades variando entre $-0,15$ e $+0,15 dex$, representadas por cruces pretas, estão presentes. Os valores do Sol também estão representados nesta figura por \odot . As linhas tracejadas são as mesmas da Fig. (5.7).	50

- 5.10 Abundância de lítio em função da velocidade rotacional. As estrelas de nossa amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242. Para as estrelas do campo, os triângulos abertos representam estrelas com $M_*/M_\odot < 1,2$, os círculos pretos fechados com $1,2 \leq M_*/M_\odot < 1,4$ e os quadrados abertos são estrelas com $M_*/M_\odot \geq 1,4$. Os valores do Sol também estão representados nesta figura. As linhas tracejadas são as mesmas da figura 5.7. 51
- 5.11 Abundância de lítio em função da velocidade rotacional. As estrelas de nossa amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242. Para as estrelas do campo, somente estrelas com massa variando entre $1,24 \leq M_*/M_\odot \leq 1,36$ estão presentes e são representadas por cruces pretas. Os valores do Sol também estão representados por \odot . As linhas tracejadas são as mesmas da figura 5.7. . . . 52
- 5.12 Abundância de lítio em função da velocidade rotacional. As estrelas de nossa amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242. Para as estrelas do campo, os triângulos abertos representam estrelas com Idade < 3 Giga-anos, os círculos pretos fechados com $3 \text{ Giga-anos} \leq \text{Idade} < 5 \text{ Giga-anos}$ e os quadrados abertos são estrelas com Idade ≥ 5 Giga-anos e os valores do Sol por \odot . As linhas tracejadas são as mesmas da figura 5.7. 54
- 5.13 **(a)** Região do Li para S1242. O espectro observado está indicado como uma linha pontilhada preta e o espectro sintético, por uma linha sólida vermelha. A linha vertical azul indica a linha do Li em $6707,78 \text{ \AA}$. **(b)** Diferença residual entre o melhor espectro sintético ($A_{Li} = 2,7dex$) e o espectro observado. 57

5.14	Evolução de A_{Li} para três modelos estelares de $1,33 M_{\odot}$. A linha pontilhada representa a evolução para um A_{Li} inicial, de 3,0 no início da seqüência principal, onde a destruição do Li na Pré–Seqüência Principal não foi considerada. As três curvas diferentes correspondem a diferentes modelos, levando em consideração a difusão atômica (linha sólida) e duas diferentes parametrizações de mistura (linhas tracejadas e ponto–tracejadas). Para uma descrição dos modelos, ver Richard et al. (2002). Os pontos pretos representam as abundâncias superficiais de Li previstas pelos modelos de 3,6 e 3,9 Giga–anos. A estrela S1242 está representada por uma cruz (x) e as barras de erro para a temperatura (100 K) e A_{Li} (0,13 dex). (<i>Canto Martins et al. 2006</i>)	58
5.15	Diagrama CM para as estrelas de M67 observadas por diferentes trabalhos. As estrelas do presente trabalho estão representadas por círculos; já as estrelas de Melo et al. (2001) são os triângulos e as estrelas estudadas por Pace & Pasquini (2004) estão representadas por quadrados. Os tamanhos dos símbolos representam diferentes intervalos de velocidade rotacional. A estrela S1242, única estrela binária de nossa amostra, está representada por um círculo fechado.	60
5.16	Distribuição da velocidade rotacional média $\langle v \sin i \rangle$ como função da idade para as estrelas simples de campo na vizinhança solar, representadas por círculos pretos (de Freitas et al. 2007), e para as estrelas em aglomerados abertos de Pace & Pasquini (2004), representadas pelos losangos abertos vermelhos. As barras de erro representam o espalhamento pico-a-pico na velocidade rotacional nas estrelas do campo, separadas por intervalos de 1 Giga–ano. A rotação do Sol está representada por \odot	61

5.17 Distribuição da abundância média de Li $\langle A_{Li} \rangle$ como função da idade para as estrelas simples de campo, representadas por círculos pretos (Duncan 1981; Chen et al. 2001), e para as estrelas em aglomerados abertos de Sestito & Randich (2005), representadas pelos losangos abertos vermelhos. As letras indicam os aglomerados (ver texto). As barras de erro representam o desvio padrão na abundância de Li, tanto para as estrelas do campo quanto para as estrelas dos aglomerados. As estrelas do campo estão separadas por intervalos de 1 Giga-ano. Os valores do Sol estão representados por \odot . 65

Lista de Tabelas

2.1	Dados observacionais e parâmetros físicos de M67. O módulo da distância e a idade de M67 foram obtidos de Loktin et al. (2001) e Pasquini et al. (1997), respectivamente, enquanto os outros parâmetros foram obtidos da base de dados WEBDA (Mermilliod 1995).	13
3.1	Tabela das observações espectroscópicas das estrelas de nossa amostra. Sanders: identificação de Sanders (1977); V e (B-V): fotometria de Montgomery et al. (1993); Data: data de observação; T_{exp} : tempo de exposição em segundos; S/N: sinal-ruído medido na região do Li; VR: velocidade radial medida.	19
5.1	Parâmetros atmosféricos calculados para as estrelas de nossa amostra e a abundância de Li obtida a partir do método de síntese espectral. Sanders: identificação de Sanders (1977); T_{ef} : temperatura efetiva em Kelvins; $\log g$: gravidade superficial; v_{mic} : velocidade de microturbulência em $km s^{-1}$; [Fe/H]: metalicidade; $v \sin i$: velocidade rotacional em $km s^{-1}$; A_{Li} : abundância de Li.	38
5.2	Fator de diluição médio do Li para diferentes valores de $\log(T_{ef})$ para as estrelas de M67 comparados com os valores preditos teoricamente por Iben (1967a,b).	42
5.3	Valores médios da velocidade rotacional para estrelas de M67 em diferentes estágios evolutivos para as estrelas de Melo et al. (2001) e as estrelas que compõem a nossa amostra.	62

A.1	Parâmetros atômicos e medidas da largura equivalente do Sol e de Arcturus para as linhas de Fe I e Fe II usadas na análise espectral.	72
B.1	Medidas das larguras equivalentes para as estrelas evoluídas de M67 analisadas neste trabalho.	77
B.2	Medidas das larguras equivalentes para as estrelas evoluídas de M67 analisadas neste trabalho.	81
B.3	Medidas das larguras equivalentes para as estrelas evoluídas de M67 analisadas neste trabalho.	85
B.4	Medidas das larguras equivalentes para as estrelas evoluídas de M67 analisadas neste trabalho.	89

Introdução

Foi a partir de 1610, quando Galileu apontou o seu telescópio para o céu, que começamos a melhor compreender a natureza cósmica. A partir de então, o estudo sistemático de vários objetos celestes passou a ser o caminho natural para a compreensão da dinâmica, estrutura e formação de planetas, estrelas e galáxias, além de, constantemente, ampliar as fronteiras do Universo conhecido.

Nosso conhecimento sobre a abundância dos elementos químicos do Universo evoluiu junto às teorias de nucleossíntese. A aplicação da Física Nuclear à Astrofísica, conhecida como Astrofísica Nuclear, encontrou êxito no pioneirismo dos trabalhos de Bethe (1939) propondo o ciclo CNO e o de Burbidge et al. (1957) com o modelo da seqüência completa de síntese dos elementos.

Durante as décadas de 50 e 60, devido ao rápido desenvolvimento das técnicas de análise espectral, vários estudos foram desenvolvidos no sentido de melhor explicar a origem dos elementos leves ($A < 12$). Porém, a baixa precisão dos dados observacionais limitou este avanço. Sabe-se atualmente que o estudo das abundâncias dos elementos leves é crucial para solucionar vários problemas na Astrofísica Estelar.

A ciência da nucleossíntese estuda também a evolução da composição química, interpretando as medidas das abundâncias de espécies nucleares com relação à sua origem e suas propriedades nucleares, traçando, desta forma, suas relações com o tempo e o espaço. Para tentar explicar a origem dos elementos químicos durante os estágios primordiais do

Universo, várias teorias foram propostas, tais como: a teoria de polineutrons de Mayer & Teller (1949); a teoria do equilíbrio desenvolvida por Klein (1947) e Beskow e Treffenberg (1947) e a teoria do não-equilíbrio proposta por Alpher & Herman (1953), que mais tarde foi alterada por Hayashi & Nishida (1956). Uma revisão destas teorias é encontrada em Alpher & Herman (1953). Tais teorias, apesar de muito falharem, serviram como base para o desenvolvimento das teorias atuais.

Foi a partir da descoberta de Penzias & Wilson (1965) da radiação térmica de fundo que ficou claro que o *Big Bang* era capaz de produzir elementos com massa atômica até $A \leq 12$. A radiação térmica de fundo corresponde a um espectro de corpo negro a uma temperatura de $2,728 \pm 0,002 K$, e entendida como resíduo da fase primordial e densa do Universo, o tão chamado *Big Bang*. Já para os elementos mais pesados, $A > 12$, as estrelas seriam as fontes reponsáveis pela síntese destes elementos por apresentarem condições de temperatura e massa ideais durante os seus vários estágios evolutivos, através de reações termonucleares em seu interior. Um estudo das abundâncias das espécies atômicas faz-se necessário para uma melhor compreensão da nucleossíntese dos elementos, assim como para desenvolvimento e verificação destas teorias. As primeiras curvas de abundâncias atômicas foram traçadas por Goldschmidt (1937), a partir de abundâncias observadas em meteoritos e do espectro estelar. Outros estudos relativos às abundâncias de espécies nucleares foram desenvolvidos por Brown (1949) e Suess & Urey (1956), com base em dados do Sol, das estrelas e dos meteoritos.

Para o estudo da nucleossíntese dos elementos leves, as observações de abundâncias cósmicas encontradas nas estrelas, nos meteoritos e nos meios interestelares são de grande valor. Contudo, o meio interestelar apresenta efeitos de granulação e os meteoritos sofrem fragmentação química, efeitos estes que comprometem a confiabilidade da análise dos dados. Por outro lado, as estrelas jovens e estáveis são os mais confiáveis laboratórios para o estudo das abundâncias químicas, pois não apresentam variação nas suas propriedades físicas. A determinação das razões de isótopos encontrados em amostras de material terrestre, lunar e meteorítico permite uma representação das abundâncias do Sistema Solar, sendo fundamental para a determinação das abundâncias da superfície do Sol atual, bem

como da nebulosa de onde o Sol e os planetas se originaram. Portanto, através do estudo das curvas evolutivas de abundância para cada isótopo encontrado, podemos obter informações que dizem respeito aos processos de nucleossíntese, bem como aos aspectos físicos do objeto astronômico em estudo.

O lítio, o berílio e o boro são elementos raros com baixas abundâncias cósmicas em comparação com os elementos vizinhos na tabela periódica (H, He, C, N e O). Estes elementos são alvo de interesse em muitos estudos devido aos seus diferentes processos de criação. Além de determinarem vínculos aos modelos cosmológicos do Universo (e.g. Reeves et al. 1990, 1994; Chaboyer 1994; Thomas et al. 1994; Steigman 1996), estes elementos determinam detalhes relativos à estrutura interna das estrelas a partir de suas abundâncias (Boesgaard 1976).

1.1 Nucleossíntese Primordial

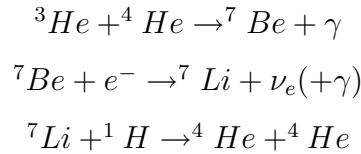
O modelo cosmológico da criação do Universo mais aceito atualmente é a *teoria do Big Bang*. Ela é baseada na recessão das galáxias, como consequência da lei de Hubble, e na radiação cósmica de fundo de 2,7 K.

O modelo mais simples e canônico de nucleossíntese do *Big Bang* tem uma forte dependência da densidade bariônica do Universo (η), que é a razão entre o número de bárions e o número de fótons, $\eta = \eta_b/\eta_\gamma$, e que está diretamente relacionada à temperatura da radiação de fundo. A síntese dos elementos leves é fortemente dependente da densidade bariônica. Friedman (1922), Lemaitre (1927) e Einstein & de Sitter (1932) apresentaram o formalismo associado à criação do Universo, onde seus modelos explicam um Universo em expansão.

Quando o Universo atingiu a idade de um minuto, sua temperatura era de 1 bilhão de graus Kelvin e iniciou-se o processo que levou à formação dos átomos de D, ^3He , ^4He e ^7Li , através da fusão de prótons e neutrons. Esta fase é chamada de *Nucleossíntese*

Primordial. Sabe-se também que estes elementos somente sobreviveram devido ao rápido resfriamento do Universo.

Quando a densidade de energia do Universo era dominada pela radiação, ocorreu então a nucleossíntese primordial dos elementos, onde as reações de produção e diluição do ${}^7\text{Li}$, nesta fase, podem ser resumidas da seguinte forma:



Com base no modelo de densidade bariônica (η) homogênea, Kolb & Turner (1990) mostraram que as abundâncias primordiais de D, ${}^2\text{He}$ e ${}^3\text{He}$ são funções uniformes de η , enquanto que a abundância de ${}^7\text{Li}$ apresenta um mínimo em $\eta \sim 3 \times 10^{-10}$, o que corresponde a valores observados da abundância de ${}^7\text{Li}$ em estrelas de População II. Estas estrelas possuem baixa metalicidade, pertencem ao halo galáctico e aos aglomerados globulares e são estrelas com idades em torno de 13×10^9 anos. Para $\eta \leq 3 \times 10^{-10}$, o Li é predominantemente produzido por ${}^4\text{He}({}^3\text{He}, \gamma){}^7\text{Be}$ e destruído por ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$. Aumentando-se η , o Li é queimado e, conseqüentemente, sua abundância diminui. Já para $\eta \geq 3 \times 10^{-10}$, o ${}^7\text{Li}$ é produzido pela reação ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}(e^-, \nu_e){}^7\text{Li}$, ocasionando um aumento na abundância de ${}^7\text{Li}$.

A teoria do *Big Bang* também repousa na hipótese da homogeneidade do Universo no momento da nucleossíntese primordial. A abundância do ${}^7\text{Li}$ é usada como parâmetro de ajuste no modelo do Universo cuja homogeneidade é reduzida em função da transição de fase quark-hadron (Witten 1984, Iso et al. 1986, Saltz 1985 e 1987).

Entre os elementos leves, o lítio é destacado, ocupando uma posição especial na composição química do Universo, devido à sua fragilidade de combustão, sendo destruído a uma temperatura de $\sim 2,6 \times 10^6$ K, e também por aparecer em vários processos de nu-

cleossíntese.

O lítio é o terceiro elemento mais leve do Universo. Existem 4 isótopos para este elemento. São eles: ${}^6\text{Li}$ e ${}^7\text{Li}$, que são estáveis e encontrados na natureza, sendo o ${}^7\text{Li}$ o mais abundante (e que será tratado daqui para a frente somente como Li), ${}^8\text{Li}$ e ${}^9\text{Li}$, que são isótopos radiativos, cujas meias vidas são muito curtas.

A produção do Li não ocorre somente no *Big Bang*, mas também em outros processos de síntese que contribuem para a abundância total de Li no Universo. Estes processos são: a interação entre raios cósmicos e o meio interestelar e a produção de Li no interior das estrelas (Reeves et al. 1990, Meneguzzi et al. 1971).

1.2 Sobre o estudo do Li em estrelas evoluídas

O estudo dos elementos leves é muito importante em vários campos da Astrofísica, com vários problemas dependendo do comportamento destes elementos. Um exemplo disto é a destruição destes elementos leves no interior estelar, particularmente Li, Be e B, servindo desta forma como teste dos processos físicos que ocorrem nas camadas mais externas da estrela (Charbonnel et al. 1999; Michaud & Charbonneau 1991). O Li em particular também é muito importante no estudo da evolução química da Galáxia (D'Antona & Matteucci 1991), embora sua produção e evolução na Galáxia ainda não sejam bem compreendidas.

Sabe-se também que, em geral, para estrelas evoluídas de tipo tardio, tanto a velocidade de rotação quanto a abundância de lítio decrescem com a idade. Herbig (1965), Iben (1967a,b), Fekel & Balachandran (1993), entre outros, sugeriram que a diluição do lítio ocorre devido ao transporte convectivo da matéria localizada na superfície da estrela, rica em lítio, para camadas mais internas da estrela, onde as temperaturas são próximas a $2,6 \times 10^6 K$, temperatura esta que provoca a destruição do lítio através da reação ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$.

Iben (1967a,b) previu a diluição de lítio em estrelas de pouca massa (desde as estrelas da seqüência principal, passando pelas subgigantes até o topo do ramo das gigantes com massas variando de $1,0\text{--}1,5 M_{\odot}$) a partir do modelo padrão de mistura convectiva. Este modelo prediz uma diluição da abundância de lítio para as gigantes por um fator de até 60, com relação ao valor inicial de $\log n(Li) = 3,0$. Entretanto, estudos observacionais mostram abundâncias com valores até 400 vezes menores do que os esperados (Brown et al. 1989; de Medeiros et al. 2000).

Existe um importante número de evidências apontando para um, ou mais, processos de mistura extra no interior estelar (Pinsonneault et al. 2001), no entanto os parâmetros físicos que controlam tais processos são objetos de grandes debates (Charbonnel & Balachandran 2000). Entre os candidatos, a rotação parece explicar algumas abundâncias anômalas observadas em estrelas da seqüência principal (Pinsonneault et al. 2001). No entanto, ainda não está claro se a rotação possui um papel importante em estágios evolutivos mais avançados, já que sabemos que a rotação diminui com o aumento do raio estelar e também devido a desaceleração magnética.

Caso a diluição do lítio esteja relacionada com a idade, poderíamos esperar por uma correlação entre abundância de lítio e velocidade rotacional para estrelas de mesma massa, mesma metalicidade e mesmo tipo espectral (Skumanich 1972). De acordo com isto, Zahn (1992) e Pinsonneault et al. (1989, 1990) postularam que a diluição do lítio em estrelas de tipo tardio está diretamente relacionada com a perda de *momentum* angular.

Vários autores consideram que a diluição de lítio está relacionada com a idade (Herbig 1965; Duncan 1981; Soderblom, 1983). Já outros autores consideram que ela está ligada com outros parâmetros, tais como, metalicidade, atividade e massa (Pallavicini et al. 1987; Spite & Spite 1982; Randich et al. 1994).

1.3 Aglomerados Estelares

Para melhor compreender a formação e a evolução dos sistemas estelares, é natural que o conjunto de estrelas que formam a estrutura da nossa Galáxia, bem como os seus aglomerados, sejam utilizados como laboratório, já que estes sistemas podem ter suas estrelas analisadas em função de alguns parâmetros físicos similares.

A determinação das propriedades físicas de um sistema estelar, independente da distância, passa necessariamente pela interpretação das informações trazidas pela luz das estrelas que os constituem. Um avanço decisivo para a correta interpretação destas informações foi realizado pela teoria de evolução estelar. O seu sucesso está relacionado com sua capacidade de prever, entre outras coisas, a luminosidade ($\log(L/L_{\odot})$) e a temperatura efetiva (T_{ef}) de uma estrela ao longo de sua vida. A luminosidade em função da temperatura efetiva é o tão conhecido Diagrama H-R, que permite verificar, de forma clara, as diversas fases evolutivas que uma estrela atravessa, desde o seu nascimento até sua morte. Estas fases estão associadas, entre outras coisas, às reações nucleares que ocorrem no interior das estrelas e também dependem das condições iniciais de massa e composição química.

Em termos observacionais, a luminosidade e a temperatura efetiva das estrelas são obtidas através de medidas de magnitude (brilho da estrela) e cor, respectivamente. Podemos então sair de um plano teórico do Diagrama H-R para um plano observacional, o diagrama cor–magnitude (CM), possibilitando desta forma a localização de estrelas quanto à idade, composição química e massa.

O modelo padrão prevê que as estrelas que compõem um aglomerado estelar formaram-se da mesma névem de gás e portanto possuem a mesma idade, a mesma composição química e aproximadamente a mesma distância. Podemos definir um aglomerado estelar com estrutura núcleo/halo. Em geral, o núcleo está ligado gravitacionalmente e o halo perde estrelas para o campo galáctico após a ocorrência de segregação de massa. Segundo a estrutura, idade, cinemática, número de estrelas constituintes e distribuição espacial

em torno do núcleo galáctico, os aglomerados podem ser classificados em aglomerados globulares e abertos.

Estes aglomerados fornecem uma ampla visão dos processos de formação e evolução estelar. Em ambos os casos, a formação estelar ocorreu de forma mais ou menos simultânea a partir de sua nuvem molecular progenitora. Eles contêm uma significativa amostra de estrelas em um amplo espectro de massa com a mesma origem e concentrados em um pequeno volume. Neste sentido, constituem, pois, importantes laboratórios astrofísicos.

A hipótese mais aceita para os aglomerados globulares é a de que a sua formação ocorreu a partir de nuvens moleculares gigantes com $\sim 10^8 M_{\odot}$. Eles se apresentam de forma esférica ou de um elipsóide ligeiramente achatado, onde a densidade estelar cresce das regiões externas em direção ao centro. O número de estrelas nestes aglomerados pode atingir centenas de milhares e podemos encontrar aglomerados globulares com massas totais com valores típicos da ordem de $10^5 M_{\odot}$.

1.3.1 Aglomerados Abertos

Os aglomerados abertos são formados continuamente. Desta forma, vários aglomerados abertos são encontrados com distintas faixas de idade. Estes aglomerados são formados ao longo do plano galáctico e a massa de sua nuvem progenitora pode variar entre 10^4 e $10^6 M_{\odot}$. Eles contêm desde dezenas a algumas centenas de estrelas, sendo encontradas em alguns casos milhares de estrelas, distribuídas em uma estrutura com alguns *parsecs*¹ de raio.

O estudo da distribuição espacial dos aglomerados abertos – sua idade, processos de formação, evolução dinâmica e dissolução – pode fornecer importantes testes sobre a evolução estelar, bem como sobre a formação e a evolução do disco galáctico. Dados fotométricos e espectroscópicos fornecem informações sobre idades, abundâncias químicas e

¹Unidade de comprimento usada em Astronomia, baseado no método de paralaxe trigonométrica.

cinemática, que auxiliam no entendimento das relações entre aglomerados abertos e outras populações galácticas, como por exemplo as estrelas do campo². Estudos para diferentes aglomerados abertos de diferentes idades e distâncias têm sido feitos para explorar possíveis gradientes de abundâncias e a relação abundância química *versus* idade. Estes estudos têm apontado para uma complexa história do enriquecimento químico e mistura do disco (Friel 1995, Friel et al. 2002).

Em síntese, os aglomerados estelares possuem características que são cruciais no estudo das propriedades físicas das estrelas e da própria Galáxia. Isto, devido à uniformidade de propriedades físicas das estrelas pertencentes a estes aglomerados, uma vez que tais estrelas foram formadas de uma mesma nuvem de gás e poeira. Em outras palavras, podemos considerar que as estrelas que formam um aglomerado estelar possuem a mesma idade, mesma composição química inicial e, devido a sua pequena dimensão comparada à distância que nos separa deles, podemos também considerar que elas estão a uma mesma distância de nós.

1.4 Objetivo deste Trabalho

Um problema clássico e bastante relevante dentro da Astrofísica Estelar é o de entender como as abundâncias dos elementos leves e a evolução do momentum angular se comportam quando uma estrela evolui para estágios mais avançados. É neste contexto que se insere o escopo desta Tese.

Neste trabalho, estudamos, especificamente, o comportamento do lítio e da rotação em uma ampla amostra de estrelas evoluídas, em diferentes estágios evolutivos (estrelas do *turn-off*, subgigantes e gigantes) do aglomerado aberto M67 (4 Giga-anos), analisando as relações entre a abundância, rotação e alguns parâmetros fundamentais. Este estudo visa uma melhor compreensão do nível de mistura e diluição convectiva nas estrelas evoluídas,

²São estrelas que não estão localizadas em aglomerados estelares e são observadas nas três componentes principais da Via-Láctea, o disco, o bojo e o halo.

assim como da evolução do momentum angular estelar. Ao mesmo tempo, testamos qual o papel da rotação na diluição do lítio, e realizamos uma comparação com estrelas do campo com massa, idade e metalicidade, aproximadamente similares às de M67.

1.5 Plano de trabalho

A presente tese está apresentada na forma descrita a seguir.

No capítulo 2, são apresentadas as características do aglomerado aberto M67.

No capítulo 3, são apresentados os dados observacionais utilizado neste trabalho.

No capítulo 4, apresentamos a técnica de síntese espectral utilizada neste trabalho para a obtenção dos parâmetros atmosféricos, da velocidade de rotação e da abundância de Li para a nossa amostra. Também discutimos alguns pontos importantes destas medidas, tais como seus erros e análise das medidas em si.

No capítulo 5, apresentamos e discutimos os principais resultados deste trabalho.

Por fim, no capítulo 6, apresentamos nossas conclusões e algumas perspectivas de continuidade para este trabalho.

O Aglomerado Aberto M67

Ao longo das últimas 3 décadas, o aglomerado estelar M67 (também conhecido como NGC 2682) tem sido usado como um importante laboratório no estudo da evolução estelar (Burstein et al. 1986; Carraro et al. 1996 e referências contidas).

M67 é um aglomerado aberto, localizado na constelação de Câncer. Foi Johann Gottfried Koehler, entre 1772 e 1779, o primeiro a observar tal aglomerado. Devido à baixa resolução dos instrumentos utilizados na época, ele observou uma fraca nebulosa de forma alongada próxima à estrela α Cnc (Bode, 1779). Em 1780, Charles Messier observou, pela primeira vez, a presença de pequenas estrelas neste aglomerado. Sua idade é estimada entre 3,2 e 5 bilhões de anos. Estimativas mais recentes indicam que é mais provável que sua idade seja da mesma ordem de grandeza que a idade do nosso sistema solar, cerca de 4,5 Giga-anos (Pasquini et al. 1997).

M67 não é o aglomerado aberto mais velho na Via-Láctea. A maioria dos aglomerados abertos possuem idades inferiores a 1 bilhão de anos, pelo fato de serem tipicamente desfeitos devido a perdas de massa ocorridas durante escalas de tempo muito curtas desde a formação dos mesmos.

No que diz respeito à velocidade radial, esta é obtida pela combinação da velocidade orbital em torno do núcleo da Via-Láctea, com a velocidade própria do Sol e da Terra. A velocidade radial medida para M67 é de $33,0 \text{ km s}^{-1}$ (Friel & Janes, 1993).

O número total de estrelas deste aglomerado é estimado em cerca de 500. O aglomerado estelar M67 contém 11 estrelas gigantes de tipo espectral K com magnitude absoluta entre +0,5 e +1,5, e várias estrelas localizadas no ramo horizontal. Também são encontradas algumas estrelas peculiares localizadas na região mais azul da sequência principal: são as tão conhecidas *Blue Stragglers*, onde a mais brilhante tem tipo espectral B8 ou B9. O aglomerado M67 também possui, aproximadamente, 200 estrelas anãs e 100 estrelas bastante parecidas com o nosso Sol. Shapley (1917) realizou os primeiros trabalhos sobre cor e magnitude em M67. Barnard (1931) mediu a posição de seus principais componentes estelares determinando também seus movimentos próprios, enquanto Popper (1954) obteve o espectro das estrelas mais brilhantes de M67.

O primeiro Diagrama H-R preciso deste aglomerado, para cerca de 500 estrelas, foi elaborado por Johnson & Sandage (1955). Algumas das descobertas provindas dos trabalhos destes autores são a elevada idade e o estágio evolutivo bastante avançado de M67.

A Tabela (2.1) mostra alguns dados observacionais e algumas características físicas para o aglomerado estelar M67 obtidos da base de dados WEBDA dedicada a aglomerados abertos (Mermilliod 1995).

2.1 Estudos sobre a evolução estelar em M67

Um teste particularmente sensível da evolução estelar é o estudo da abundância de carbono e de nitrogênio na atmosfera das estrelas. Para M67, foi encontrado que as razões C/N e $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ¹ em estrelas gigantes do *clump*² e em estrelas no topo do ramo das gigantes possuem valores muito menores do que os preditos pelo modelo padrão (Brown, 1987; Gilroy, 1989; Gilroy & Brown, 1991).

¹Nesta Tese, usamos a notação $[X/Y] \equiv \log_{10}(N_X/N_Y)_{Estrela} - \log_{10}(N_X/N_Y)_{\odot}$.

²São estrelas em que seu estágio evolutivo corresponde a um processo de queima de hélio em seu núcleo.

Tabela 2.1: Dados observacionais e parâmetros físicos de M67. O módulo da distância e a idade de M67 foram obtidos de Loktin et al. (2001) e Pasquini et al. (1997), respectivamente, enquanto os outros parâmetros foram obtidos da base de dados WEBDA (Mermilliod 1995).

Ascensão reta (J2000.0)	08:51:18
Declinação (J2000.0)	+11:48:00
Longitude Galáctica	215,696
Latitude Galáctica	31,896
Distância (pc)	828
Avermelhamento (mag)	0,059
Módulo da distância (mag)	9,79
Idade (Giga-anos)	4,5

Devido à falta de observações em alta resolução de estrelas de M67, dados de abundância de oxigênio são ainda muito escassos. Alguns resultados de Griffin (1975) e Cohen (1980) são um tanto incertos.

Para alguns outros elementos, observações de M67 mostram um comportamento bastante peculiar. Por exemplo, as razões de $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ chega a $-0,8 \text{ dex}$, enquanto que as razões de outros elementos α , como $[\text{Si}/\text{Fe}]$, são enriquecidos de cerca de $+0,6 \text{ dex}$; $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ é aproximadamente igual a $-0,4 \text{ dex}$, enquanto que para o lantânium, um elemento bastante similar ao anteriores, é encontrado $[\text{La}/\text{Fe}]$ em torno de $+0,6 \text{ dex}$. A partir de observações de seis estrelas com queima de hélio no núcleo e três estrelas gigantes, Tautvaisiene et al. (2000) sugeriram que, após uma explosão do núcleo de hélio (*He-flash*), ocorre uma mistura extra do material produzido pelo ciclo CN na superfície estelar. Estes autores também encontraram que abundâncias de elementos pesados em M67 são quase idênticas ou próximas aos valores solares. Apesar de todos estes esforços, tais trabalhos estão baseados em amostras bastante limitadas.

No que diz respeito à metalicidade de M67, vários autores, a partir de determinações

espectroscópicas e fotométricas, determinaram uma abundância média do ferro, $[\text{Fe}/\text{H}]$, muito próximas à abundância solar. São elas: $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,05$ (Canterna et al. 1986), $[\text{Fe}/\text{H}] = 0,06$ (Nissen et al. 1987), $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,07$ (Anthony-Twarog 1987), $[\text{Fe}/\text{H}] = 0,04$ (Garcias Lopez et al. 1988), $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,08$ (Friel & Janes 1991), $[\text{Fe}/\text{H}] = 0,02$ (Friel & Boesgaard 1992), $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,09$ (Friel & Janes 1993), $[\text{Fe}/\text{H}] = -0,03$ (Tautvaisiene et al. 2000) e $[\text{Fe}/\text{H}] = 0,03$ (Randich et al. 2006). Devido a estes resultados, o aglomerado aberto M67 é também considerado um aglomerado cuja metalicidade, além da idade, é solar.

2.1.1 Mistura extra ou uma nucleossíntese diferente em M67?

De acordo com a evolução estelar clássica, mudanças na composição química superficial das estrelas que estão movendo-se para o ramo das gigantes são esperadas quando a estrela evolui ao longo desta região. Neste ponto, a envoltória convectiva se aprofunda e os produtos do ciclo CN são trazidos para a superfície estelar pelo processo de dragagem, causando uma diminuição das razões de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ e $^{12}\text{C}/^{13}\text{N}$. Tais razões diminuem com a diminuição da metalicidade e o aumento da massa estelar (Gilroy 1989; Gilroy & Brown 1991; Charbonnel 1998).

No caso particular de M67, Tautvaisiene et al. (2000) encontraram indícios da existência de processos extra de mistura em estrelas do *clump*. No entanto, estudos observacionais sólidos baseados em uma ampla amostra estelar ainda são necessários para se confirmar ou rejeitar tal proposição.

Como vimos no Capítulo anterior, a abundância de elementos leves é uma ferramenta muito importante na investigação de processos de mistura no interior das estrelas. Algumas observações de Li no aglomerado estelar M67 mostram que existe uma real dispersão na abundância do lítio para estrelas da seqüência principal, apesar de suas envoltórias convectivas ainda não terem se aprofundado o suficiente para atingirem a região de destruição do Li (Pasquini et al. 1997; Jones et al. 1999; Randich et al. 2002, 2007).

Vários modelos de processos de mistura foram propostos com o intuito de explicar a diluição do Li de estrelas de tipo F e G. São alguns deles: difusão (Michaud 1986; Chaboyer et al. 1995), circulação meridional (Charbonnel & Talon 1999), ondas gravitacionais (García López & Spruit 1991; Montalba & Schatzmann 2000) e perda de momentum angular e mistura induzida rotacionalmente (Schatzman & Baglin 1991; Pinsonneault et al. 1992; Deliyannis & Pinsonneault 1997). Dentre os candidatos, a mistura induzida rotacionalmente parece explicar a dispersão de lítio encontrada em M67.

No entanto, ainda não é muito claro se a mistura induzida rotacionalmente possui um papel importante em estágios evolutivos mais avançados. Melo et al. (2001) deram um primeiro passo para uma resposta a esta dúvida. Esses autores mediram velocidades rotacionais precisas para 28 estrelas de diferentes estágios evolutivos (desde a seqüência principal até o ramo das gigantes) pertencentes a M67. A partir da análise da história do *momentum* angular de estrelas com massas de $1,2 M_{\odot}$, estes autores verificaram que tais velocidades provavelmente obedecem a diferentes leis de evolução do momentum angular na seqüência principal e no ramo das gigantes.

Amostra estelar e o procedimento observacional

O presente estudo tem como base uma amostra de estrelas dividida em três grupos, de acordo com o estágio evolutivo. O primeiro grupo é formado por estrelas subgigantes do *turn-off*, ou seja, as estrelas que estão deixando a seqüência principal; o segundo grupo é composto por estrelas que se encontram no ramo das subgigantes. As estrelas destes dois grupos já devem apresentar uma rápida expansão de suas envoltórias convectivas. Finalmente, o último grupo é formado pelas estrelas do Ramo das Gigantes Vermelhas e estrelas do *clump*. Tais estrelas já devem ter passado pela primeira dragagem, trazendo para a superfície os produtos do ciclo CNO e, desta forma, alterando as abundâncias de C, N e O.

Na figura (3.1), mostramos o diagrama cor–magnitude (CM) de M67, onde a fotometria de Montgomery et al. (1993) foi utilizada. Nossa amostra, representada na referida figura pelos símbolos em vermelho, é composta de 28 estrelas com probabilidades de pertencerem ao aglomerado estelar M67 maiores do que 70%.

As observações destas estrelas foram realizadas com o telescópio do VLT/Unit 2 (ESO, Paranal, Chile), utilizando-se o espectrógrafo FLAMES–UVES (Pasquini et al. 2002) durante os dias 03, 04, 05, 07, 24 e 27 de janeiro de 2004, 28 de janeiro e 02 de março de 2005. Todas as estrelas foram observadas usando-se a mesma configuração instrumental: o braço vermelho do UVES centrado em 580 nm, cobrindo uma faixa do comprimento

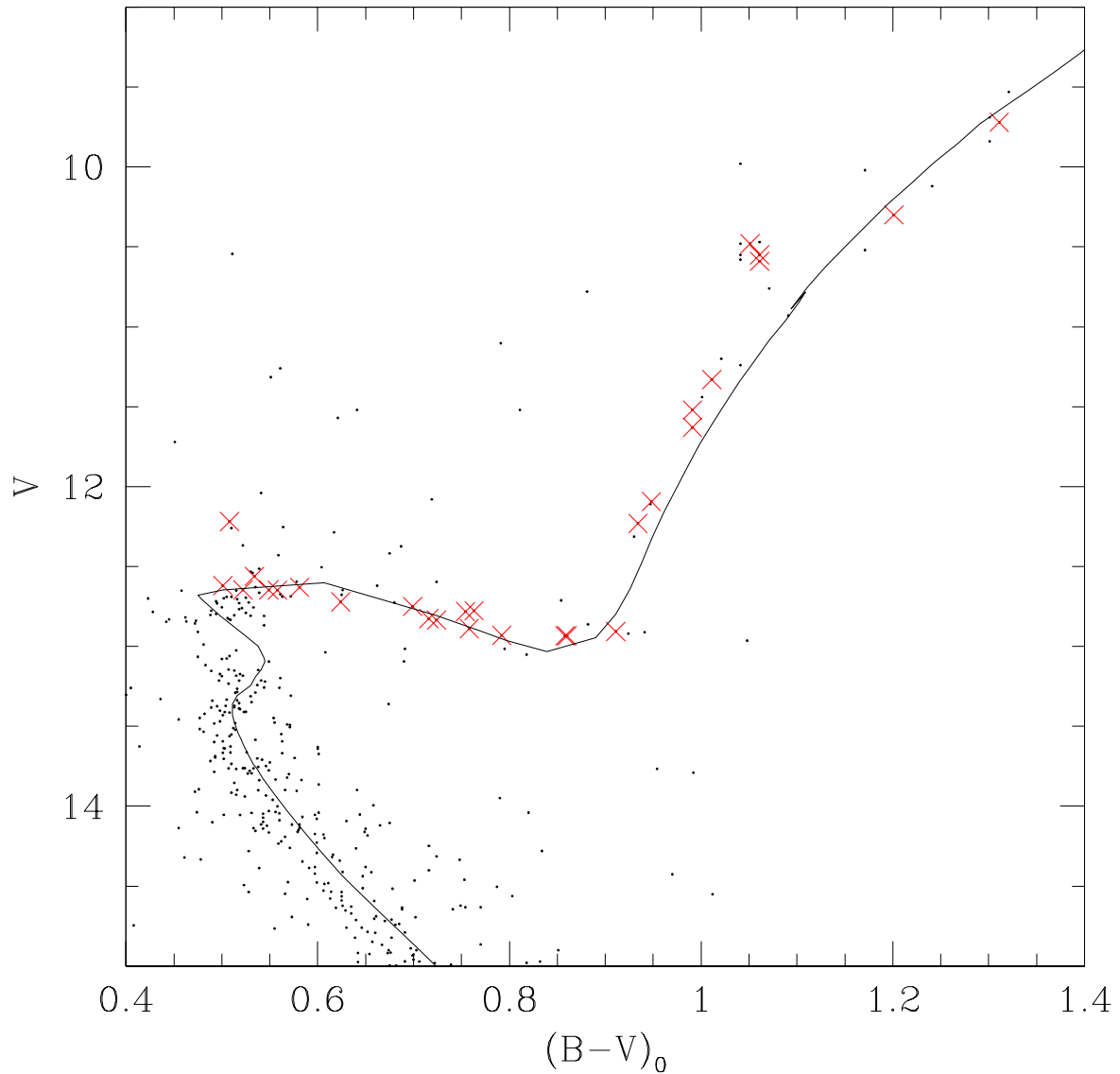


Figura 3.1: Diagrama Cor–Magnitude (CM) do aglomerado aberto M67. A fotometria ($V, B - V$) foi retirada de Montgomery et al. (1993). As estrelas de nossa amostra estão assinaladas com cruces vermelhas. Foi aplicada uma correção de $E(B - V) = 0.059$. Uma isócrona de 4 Giga–anos, com massa em torno de $1,3 M_{\odot}$, de Girardi et al. (2002) foi usada para auxiliar a seleção da amostra.

de onda entre 420–680 nm com um poder de resolução $R \sim 47\,000$ (1 segundo de arco de abertura). Para algumas estrelas, os espectros também foram observados com outra configuração instrumental centrada em 860 nm, cobrindo então uma maior região que vai de 660–1060 nm, com o mesmo poder de resolução.

Os espectros foram reduzidos usando-se o pacote de tratamento dos espectros do UVES, seguindo-se os passos usuais de redução. Inicialmente, aplicamos as correções de bias, *flat-field* e *background*, e por fim, fizemos a calibração em comprimento de onda com o auxílio de um espectro obtido a partir de uma lâmpada de tório-argônio (ThAr) acoplada ao telescópio. Após este primeiro tratamento, aplicamos a correção de velocidade radial e normalizamos todos os espectros. Por fim, para obtermos uma boa qualidade dos dados, combinamos diferentes exposições de uma mesma estrela, coletadas em diferentes datas, para obtermos espectros de melhor qualidade. O tempo total de exposição varia de acordo com a magnitude das estrelas observadas. Para as estrelas brilhantes ($V < 12$), o tempo de exposição foi de 1500 segundos, enquanto que para estrelas fracas ($V > 12$), foi de 3000 segundos. As razões de sinal-ruído (S/N) finais estão em torno de 100 por pixel, com exceção das estrelas gigantes onde somente uma observação foi feita com valores de S/N em torno de 50 por pixel. A Tab. (3.1) apresenta a amostra em questão, juntamente com a tabela das observações, com a razão S/N para cada uma das exposições na região do Li e a velocidade radial medida a partir de cada observação.

Tabela 3.1: Tabela das observações espectroscópicas das estrelas de nossa amostra. Sanders: identificação de Sanders (1977); V e (B-V): fotometria de Montgomery et al. (1993); Data: data de observação; T_{exp} : tempo de exposição em segundos; S/N: sinal-ruído medido na região do Li; VR: velocidade radial medida.

Sanders	V	(B-V)	Data	T_{exp} (seg)	S/N	VR ($km s^{-1}$)
S1607	12,62	0,56	Jan 28, 2005	2580	71	33,4
			Mar 02, 2005	2580	72	33,6
S1273	12,219	0,567	Jan 24, 2004	3000	91	34,7
			Jan 24, 2004	3000	107	34,6
S1268	12,647	0,581	Jan 05, 2004	3000	88	32,9
			Jan 07, 2004	1500	42	33,6
			Jan 27, 2004	3000	108	32,9
S1275	12,562	0,593	Jan 05, 2004	3000	110	33,6
			Jan 07, 2004	1500	47	34,1
			Jan 27, 2004	3000	128	33,7
S1034	12,647	0,608	Jan 24, 2004	3000	91	34,7
			Jan 24, 2004	3000	101	34,7
S2207	12,648	0,617	Jan 28, 2005	2580	92	31,4
			Mar 02, 2005	2580	68	31,7
S1487	12,63	0,64	Jan 28, 2005	2580	76	33,3
			Mar 02, 2005	2580	84	33,1
S1242	12,722	0,683	Jan 05, 2004	3000	91	37,6
			Jan 07, 2004	1500	45	38,4
			Jan 27, 2004	3000	93	33,6
S1239	12,75	0,758	Jan 24, 2004	3000	94	32,9
			Jan 24, 2004	3000	94	32,9
S1323	12,826	0,775	Jan 24, 2004	3000	78	33,3
			Jan 24, 2004	3000	83	33,3
S1000	12,835	0,783	Jan 12, 2005	2580	45	42,8
			Jan 12, 2005	2580	54	42,7

Sanders	V	(B-V)	Data	T_{exp} (sec)	S/N	VR (kms^{-1})
S806	12,782	0,813	Jan 05, 2004	3000	73	33,6
			Jan 07, 2004	1500	41	34
			Jan 27, 2004	3000	82	33,5
S1438	12,889	0,817	Jan 28, 2005	2580	100	32,9
			Mar 02, 2005	2580	68	32,7
S2208	12,777	0,822	Jan 24, 2004	3000	94	33
			Jan 24, 2004	3000	87	33
S774	12,931	0,851	Jan 05, 2004	3000	72	33,6
			Jan 07, 2004	1500	35	34,3
			Jan 27, 2004	3000	67	33,5
S1231	12,934	0,917	Jan 05, 2004	3000	72	33,1
			Jan 07, 2004	1500	41	33,8
			Jan 27, 2004	3000	74	33,1
S1319	12,906	0,97	Jan 28, 2005	2580	90	34,2
			Mar 02, 2005	2580	68	34,4
S1245	12,934	0,919	Jan 24, 2004	3000	84	33,1
			Jan 24, 2004	3000	83	33,2
S1305	12,23	0,993	Jan 28, 2005	2580	80	34,2
			Mar 02, 2005	2580	74	34
S1293	12,094	1,007	Jan 24, 2004	3000	68	34,3
			Jan 24, 2004	3000	73	34,3
S1277	11,63	1,05	Jan 04, 2004	1500	55	34,5
S1254	11,52	1,05	Jan 03, 2004	1500	60	33,2
S1288	11,33	1,07	Jan 03, 2004	1500	53	33,7
S1074	10,59	1,12	Jan 03, 2004	1500	54	34,4
S1279	10,55	1,12	Jan 03, 2004	1500	55	33,6
S1010	10,48	1,11	Jan 04, 2004	1500	50	33,9
S1016	10,3	1,26	Jan 04, 2004	1500	40	34,5
S978	9,72	1,37	Jan 04, 2004	1500	36	34,8

Síntese e Análise Espectral

4.1 Síntese Espectral

Um problema físico bastante complexo é a determinação precisa de abundâncias químicas na atmosfera estelar. Neste Capítulo, iremos mostrar a técnica de síntese espectral, utilizada na determinação das abundâncias de lítio¹ para as estrelas de nossa amostra. A síntese espectral é, em outras palavras, uma análise comparativa entre espectros sintéticos, fabricados em laboratório, com espectros observacionais.

Para os dados do presente trabalho, utilizamos uma ferramenta de síntese espectral, dentre várias existentes, chamada *Turbospectrum* (Alvarez & Plez 1998). Para gerar os espectros sintéticos, o programa *Turbospectrum* necessita de alguns parâmetros de entrada. São eles: parâmetros atmosféricos (temperatura efetiva, gravidade superficial), abundâncias químicas, parâmetros atômicos e moleculares e dois parâmetros de convolução espectral para o ajuste ao perfil das linhas.

¹Trataremos aqui a abundância de Li com relação ao hidrogênio tomada como 12, onde $n(Li)$ é a densidade numérica de átomos de Li, da seguinte forma:

$$A_{Li} = \log n(Li) = \log(Li/H) + 12$$

4.1.1 Parâmetros Atômicos e Moleculares

Para a síntese das linhas atômicas, são necessários os comprimentos de onda central para cada transição presente no espectro, os valores de $\log gf$ e o potencial de excitação. Em relação às linhas moleculares, os parâmetros necessários são: comprimento de onda da transição, potencial de excitação, $\log gf$ e constante de dissociação molecular. A nossa lista de linhas atômicas foi obtida da base de dados de Viena – VALD, *Vienna Atomic Lines Database* (Kupka et al. 1999). Para a geração dos espectros sintéticos, também levamos em consideração as seguintes listas de linhas moleculares: TiO (Plez, 1998), VO (Alvarez & Plez, 1998) assim como as moléculas de CN e CH (Hill et al. 2002).

4.1.2 Parâmetros de Convolução

Todo espectro sintético necessita ser convoluído, levando em consideração o alargamento das linhas devido à velocidade rotacional e ao perfil instrumental. Para a determinação da velocidade rotacional das estrelas da nossa amostra, aplicamos o mesmo procedimento apresentado em de Medeiros et al. (2006). No entanto, os nossos valores de velocidade rotacional estão baseados no ajuste da largura a meia altura (FWHM) em linhas de absorção de Fe I localizadas na região de 20 Å em torno da linha do Li em 6707,78 Å. Para cada espectro, utilizamos um valor de rotação para a produção de um alargamento inicial, também adicionando um alargamento de 142 mÅ na região em torno da linha do Li (6707,78 Å) para reproduzir o perfil instrumental do FLAMES (cujo poder de resolução é de 47 000). O valor da velocidade rotacional foi modificado até que obtivéssemos um alargamento final próximo ao alargamento do perfil das linhas observadas nesta região. A Tab. (5.1), mostra os valores da rotação derivados para as nossas estrelas, com uma incerteza estimada de $1,0 \text{ km s}^{-1}$.

4.1.3 Espectro Solar e Arcturus

Espectros teóricos foram calculados para uma região de 20 Å em torno da linha do Li em 6707,78 Å. Como passo inicial, faz-se necessário efetuar uma calibração dos valores de $\log gf$ de certas linhas de Fe I e Fe II, sobre os espectros de alta resolução do Sol e de

Arcturus (Hinkle et al. 2000), como será mostrado na Seção 4.2.3.

4.2 Análise Espectroscópica

4.2.1 Larguras Equivalentes

A largura equivalente (LE) está associada à intensidade de uma linha espectral. Em um gráfico da intensidade *versus* comprimento de onda, uma linha espectral aparece como uma curva com uma forma definida pelo perfil de linha. Ela é definida como sendo a largura de um retângulo cuja área é igual à área ocupada pela linha formada por um elemento qualquer, como é mostrado na Fig. (4.1).

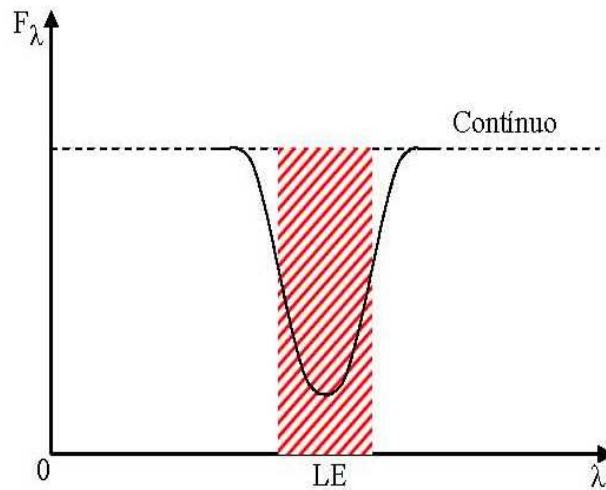


Figura 4.1: Definição de largura equivalente (LE).

Dentro da região de cobertura espectral de nossa amostra, selecionamos linhas de Fe I e Fe II. A Tab. (A.1), do Apêndice A, lista para cada elemento: os valores de comprimento de onda (λ), em angstroms, o potencial de excitação (χ_{exc}), as forças de oscilador ($\log gf$) e as larguras equivalentes (LE), medidas no Sol e em Arcturus.

As larguras equivalentes são medidas ajustando-se um perfil gaussiano ao perfil da linha, tomando-se o contínuo como referência. Para todas as estrelas utilizadas no presente estudo, incluindo o Sol e Arcturus, as medidas de largura equivalente para as linhas selecionadas foram medidas de forma automática com o auxílio do programa DAOSPEC (Stetson & Pancino 2004).

Em muitos casos, uma linha espectral não é suficientemente isolada, dificultando, dessa forma, a determinação da largura equivalente. Devido a este fato, selecionamos o maior número possível de linhas de Fe I e Fe II para realizar uma análise estatística e minimizar o erro associado a problemas como este.

Podemos então, com as medidas de largura equivalente, determinar as abundâncias de Fe I e Fe II para as estrelas de nossa amostra. Para o cálculo das abundâncias, foi então utilizada a ferramenta *Turbospectrum* (descrita em Alvarez & Plez 1998 e gentilmente fornecido pelo Dr. Bertrand Plez, Graal, Montpellier, França) .

4.2.2 Modelos Atmosféricos

A descrição de como certos parâmetros físicos variam com a profundidade das camadas mais externas de uma estrela é feita através de um modelo físico teórico chamado *modelo de atmosfera*.

Tais parâmetros podem ser descritos em função da profundidade ótica para um determinado comprimento de onda. A profundidade ótica é uma quantidade adimensional que determina a fração de intensidade irradiada por uma determinada camada, naquele comprimento de onda, e que atinge a superfície da estrela sem ser absorvida. Quanto maior for a absorção desta irradiação, maior será a profundidade ótica.

Modelos MARCS

Os modelos de atmosferas estelares utilizados na presente análise são os modelos de nova geração MARCS (Gustafsson et al. 2007, em preparação). Tais modelos são baseados na aproximação plano-paralela e esférica de modelos atmosféricos em Equilíbrio Termodinâmico Local (ETL) e equilíbrio radiativo. Os modelos MARCS são válidos para estrelas com temperaturas efetivas entre 4000 e 8000 K (com intervalos de 250 K), logaritmo da gravidade superficial ($\log g$, g em $cm\ s^{-2}$) variando de $-1,0$ a $5,0\ dex$ (com intervalos de $0,5\ dex$) e metalicidade total entre $-5,0$ e $1,0\ dex$ (com intervalos variando de $1,0$ a $0,25\ dex$).

Os modelos atmosféricos para as estrelas de nossa amostra, assim como para o Sol e Arcturus, foram calculados a partir de uma rotina de interpolação, gentilmente fornecida pelo Dr. Thomas Masseron (Universidade Estadual de Ohio, EUA). Os valores da abundância solar adotados são aqueles de Asplund, Grevesse & Sauval (2005). Este programa faz uma interpolação linear em um cubo utilizando no máximo 8 modelos MARCS, cujos parâmetros atmosféricos fundamentais devem ser incluídos. São eles: temperatura efetiva (T_{ef}), metalicidade ($[Fe/H]$) e gravidade superficial ($\log g$).

4.2.3 Forças de Oscilador, $\log gf$

São características fundamentais de uma linha espectral: frequência, forma e força. Elas refletem a estrutura de um átomo, ou íon, produzindo o espectro e as interações com sua vizinhança. Esta estrutura é definida a partir de um elo entre as características da linha e três interações atômicas existentes. São elas: as energias de separação dos estágios estacionários que definem os comprimentos de onda das linhas espectrais, os tempos de vida radiativos dos níveis energéticos determinando as larguras das linhas e as forças de oscilador que estão relacionadas à probabilidade de transição e que influenciam na intensidade das linhas espectrais. A principal razão para que as forças de oscilador sejam medidas é que elas são usadas na análise de dados astronômicos no lugar das probabilidades de transição. Um espectro estelar nos fornece informações sobre quais elementos estão presentes no objeto em estudo. Além disso, a profundidade das linhas de absorção

nos fornece uma medida da abundância de um certo elemento, habilitando-nos a calcular esta abundância e, desta forma, melhor ajustar o espectro sintético ao observado. Porém, imprecisões nos valores das forças de oscilador resultam em incertezas nas abundâncias dos elementos estudados, já que uma força de oscilador incorreta afetará todas as linhas espectrais na sua vizinhança. Devido a este fato, faz-se necessário medidas precisas destas forças para a análise de dados estelares.

Os valores das forças de oscilador, $\log gf$, utilizados neste trabalho foram determinados a partir de uma calibração cautelosa em espectros de alta resolução do Sol e Arcturus (Hinkle et al. 2000) para que, desta forma, obtenhamos uma boa precisão nas medidas da abundância de Fe I e Fe II. Os valores iniciais das forças do oscilador para a nossa lista de linhas atômicas foram obtidos da base de dados VALD (Kupka et al. 1999) para as linhas de ferro que cobrem o domínio de comprimento de onda entre 4800–8000 Å, com um total de 92 linhas de Fe I e 14 linhas de Fe II. Os valores de $\log gf$ das linhas de Fe I e Fe II utilizadas estão apresentados na Tab. (A.1), do Apêndice A.

A grade de parâmetros atmosféricos fundamentais adotados para o Sol foi $T_{ef} = 5777 K$ (Neckel, 1986), $v_{mic} = 1,0 km s^{-1}$ (Rüedi et al. 1997), $\log g = 4,44$ (Allen, 1973) e $[Fe/H] = 0,0$ (por definição). Já para Arcturus, nossa estrela gigante de referência, a grade adotada para os mesmos parâmetros foi $T_{ef} = 4300 K$ e $v_{mic} = 1,6 km s^{-1}$, $\log g = 1,8$ (Zoccali et al. 2004) e $[Fe/H] = -0,50$ (Peterson et al. 1993). A obtenção destes parâmetros para as estrelas de nossa amostra, assim como para o Sol e Arcturus, será descrita na próxima seção.

Nas figuras (4.2) e (4.3), mostramos uma região do espectro de 20 Å em torno da linha do Li em 6707,78 Å.

4.2.4 Determinação dos Parâmetros Atmosféricos

Para a determinação dos parâmetros atmosféricos da amostra analisada neste trabalho, basicamente calculamos vários modelos atmosféricos com diferentes valores dos

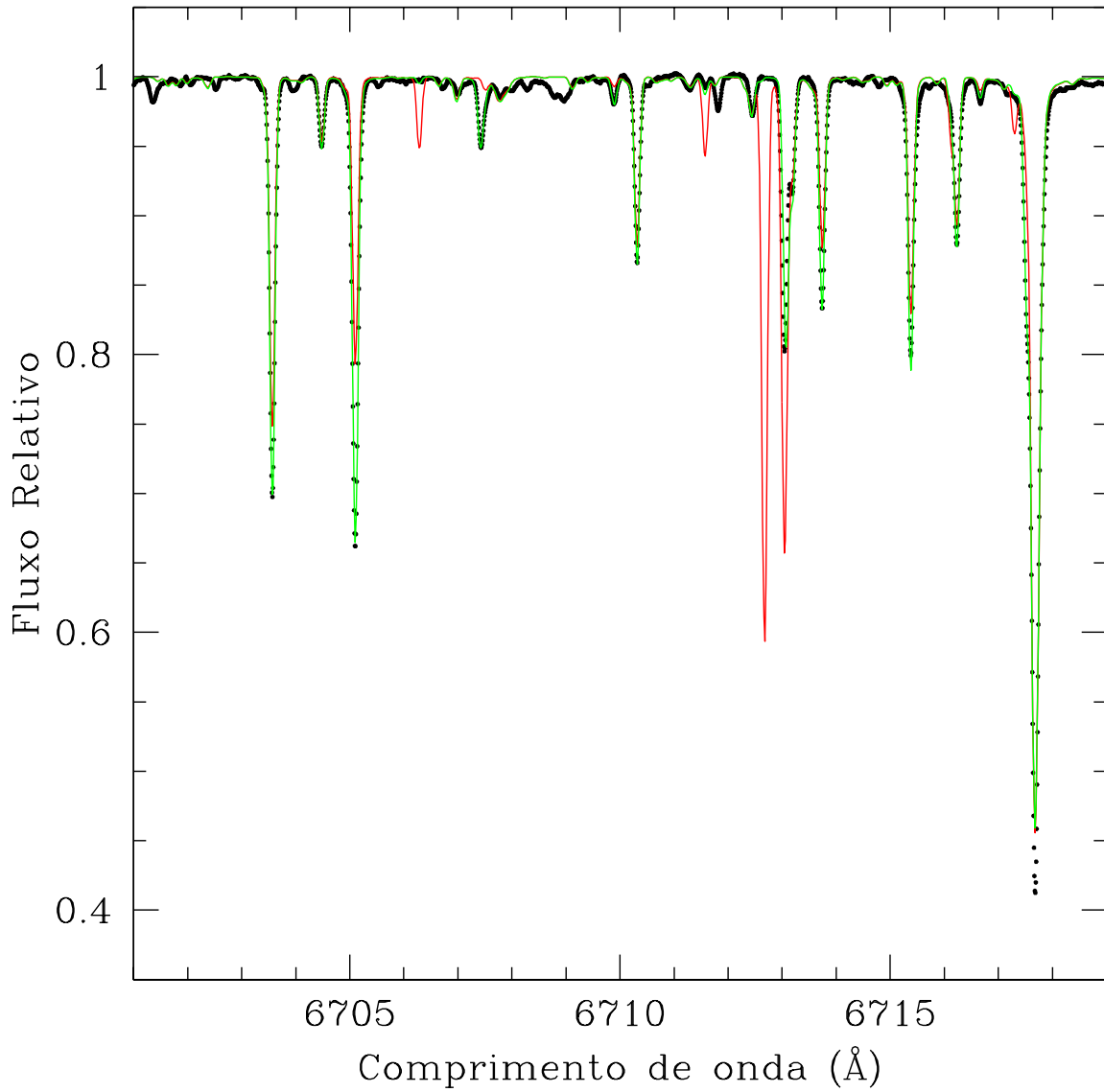


Figura 4.2: Correção do $\log gf$ na região do Li para o Sol. O espectro observado está indicado por uma linha pontilhada preta e os espectros sintéticos, por linhas sólidas vermelha e verde, para a lista atômica obtida da base de dados de VALD sem correções das forças de oscilador e mais listas de moléculas e lista atômica com as correções das forças de oscilador e listas de moléculas, respectivamente.

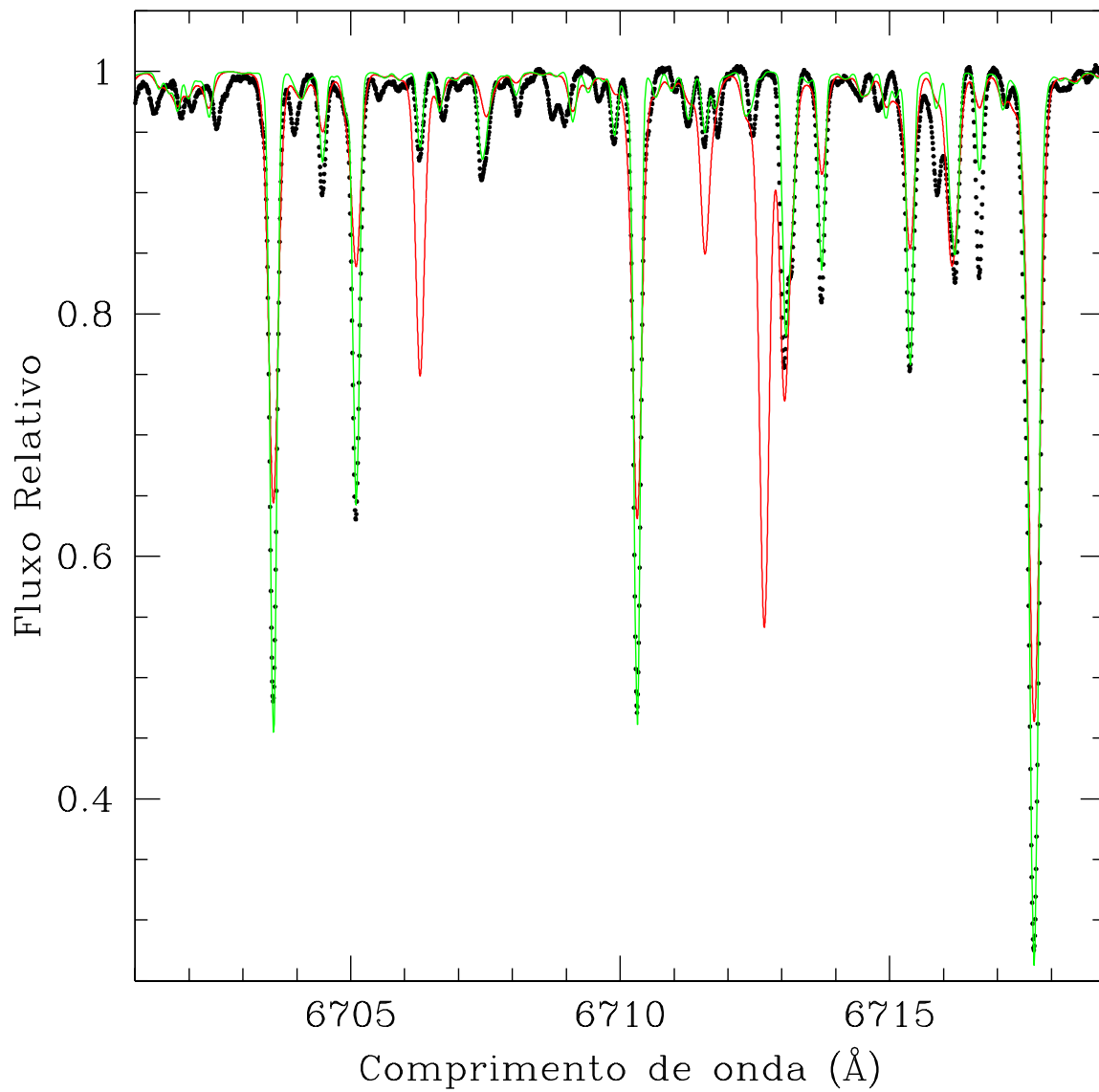


Figura 4.3: Correção do $\log gf$ na região do Li para Arcturus. Os símbolos são os mesmos descritos na Fig. (4.2).

parâmetros de entrada inicial (T_{ef} , v_{mic} e $\log g$).

Temperatura Efetiva, T_{ef}

O procedimento para o cálculo da temperatura efetiva é feito baseado na análise das 92 linhas de Fe I da nossa lista atômica, impondo um equilíbrio de excitação entre estas linhas, já que esta é a espécie que possui um maior número de linhas em um espectro observado. Uma vez que as abundâncias medidas, para diferentes linhas de um mesmo elemento, no nosso caso Fe I, devem ser independentes do potencial de excitação (χ_{exc}), verificamos, então, a existência de alguma tendência no diagrama $\log \epsilon(FeI)$ versus χ_{exc} , como apresentado na Fig. (4.4), para a estrela S1487. O erro interno no valor da temperatura efetiva está relacionado com o erro padrão no coeficiente angular da regressão linear, como feito na Fig. (4.4). A estimativa deste erro é obtida variando-se o valor da temperatura efetiva da estrela até que o módulo do coeficiente angular da regressão linear feita para a nova temperatura seja aproximadamente igual ao módulo do erro padrão. Seguindo, então, este procedimento, medimos o erro para a temperatura efetiva de todas as estrelas da amostra, obtendo um valor típico de 70K.

Velocidade de microturbulência, v_{mic}

Para o caso da microturbulência, a medida deste parâmetro também é feita baseada nas linhas de Fe I, onde desta vez devemos impor que a abundância do Fe seja igual para as linhas fracas, moderadas e intensas, verificando então a existência de alguma tendência no diagrama $\log \epsilon(FeI)$ versus $\log(LE/\lambda)$, para as linhas de ferro de nossa lista atômica. Um exemplo deste efeito está mostrado na Fig. (4.5), para a mesma estrela, S1487.

A principal característica da velocidade de microturbulência nas linhas de um espectro é que ela atrasa a saturação de linhas moderadamente intensas, o que influencia diretamente a medida da LE para as linhas que estão envolvidas na análise. Por isso, um diagrama, como o que está mostrado na Fig. (4.5), é de grande auxílio na determinação da microturbulência, visto que, o valor correto deste parâmetro é aquele cuja abundância medida para as linhas fracas é igual à abundância medida para as linhas mais intensas.

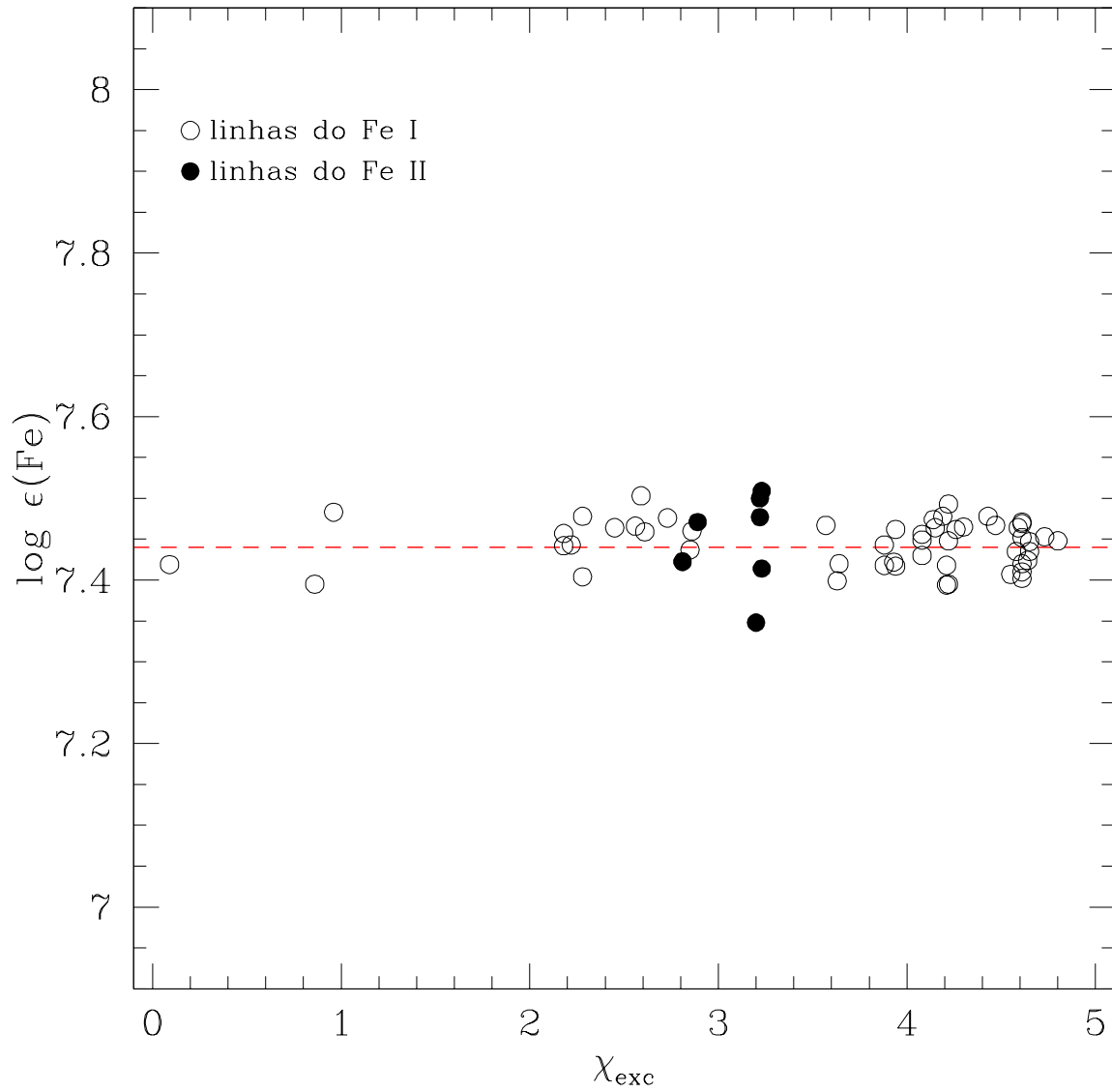


Figura 4.4: Equilíbrio de excitação entre as linhas de Fe I da estrela S1487. A regressão linear (linha vermelha tracejada) é referente às linhas de Fe I, onde a intersecção com o eixo das ordenadas nos fornece a metalicidade ($[Fe/H]$). Os parâmetros obtidos para S1487 são: $T_{ef} = 5940 K$, $v_{mic} = 1,60 km s^{-1}$ e $\log g = 3,8$.

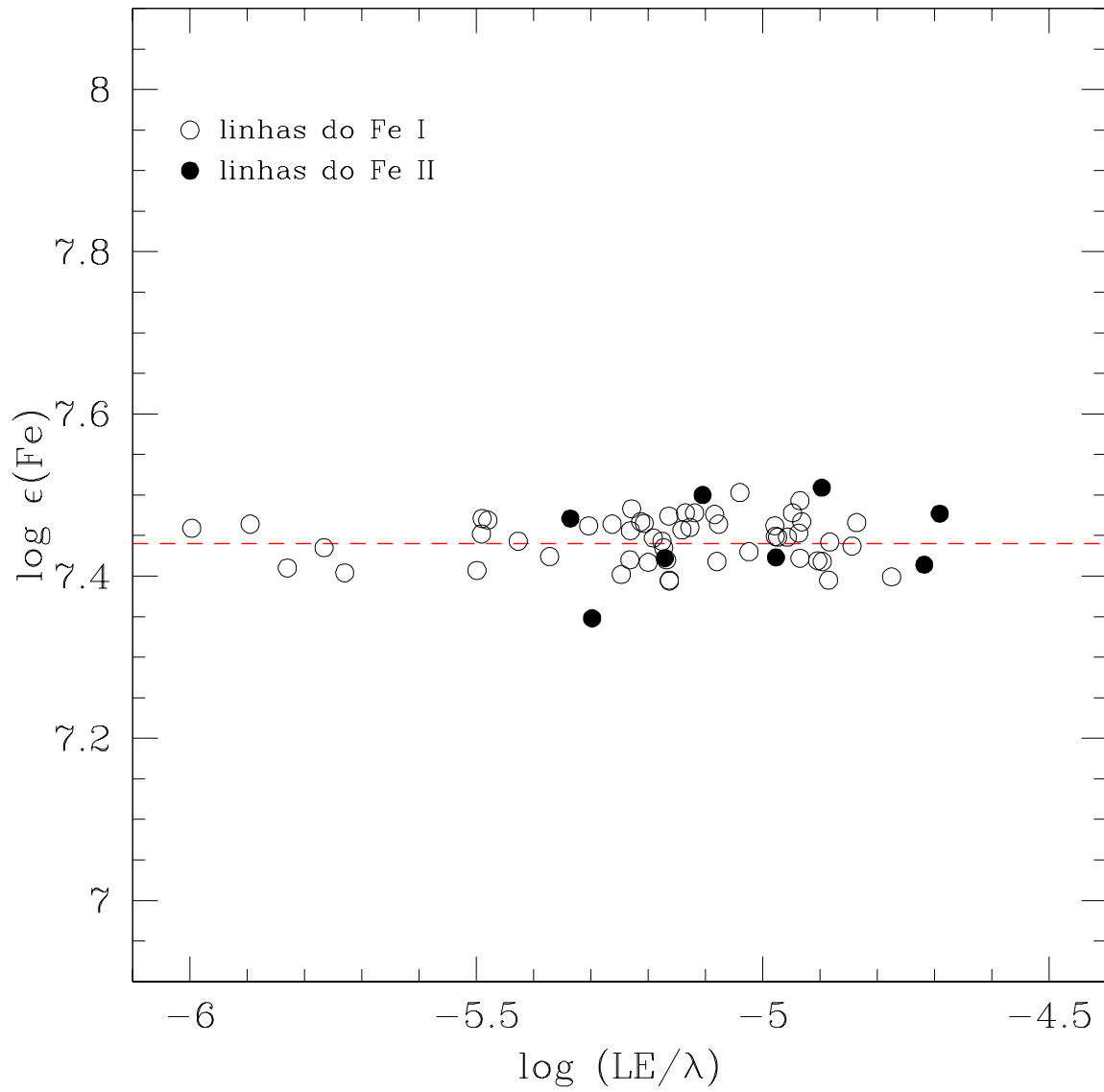


Figura 4.5: O equilíbrio de ionização, que é o acordo entre as linhas fracas e intensas, entre as linhas de Fe I da estrela S1487 determina o valor da velocidade de microturbulência. A regressão linear é referente somente às linhas de Fe I. Os parâmetros obtidos para S1487 são os mesmos apresentados na Fig. (4.4).

O procedimento realizado para calcular o erro na velocidade de microturbulência é semelhante àquele realizado para calcular o erro da temperatura efetiva. Neste caso, utilizamos a regressão linear do diagrama $\log \epsilon(FeI)$ versus $\log(L E/\lambda)$, mostrado na Fig. (4.5), onde a velocidade de microturbulência é variada até que o módulo do coeficiente angular da regressão linear, feita para a nova velocidade de microturbulência, seja aproximadamente igual ao módulo do erro padrão. O erro típico da velocidade de microturbulência obtido para as estrelas de nossa amostra é de $0,1 \text{ km s}^{-1}$.

Gravidade superficial, $\log g$

O último teste a ser feito é o da gravidade superficial. Esta análise é efetuada através do equilíbrio de ionização entre as linhas de Fe I (ferro neutro) e as linhas de Fe II (ferro ionizado). A metalicidade indicada pelas linhas de Fe II é mais sensível a mudanças de gravidade superficial e pouco sensível à mudança de temperatura efetiva (Gray 1992) e também representa a maior parte dos átomos de ferro contidos na atmosfera de estrelas do tipo solar. Um aumento na gravidade superficial de uma estrela causa um desfavorecimento à população de Fe II, devido ao aumento da pressão eletrônica do meio e também pelo fato das larguras equivalentes permanecerem inalteradas. A gravidade superficial correta de uma estrela qualquer é determinada quando as abundâncias medidas para o Fe I e o Fe II são as mesmas, sem que uma população do ferro esteja sendo favorecida na análise. Um exemplo deste teste também está mostrado nas Figs. (4.4) e (4.5). O erro na gravidade superficial é diretamente influenciado pelo erro na determinação das abundâncias de Fe I e Fe II. A determinação desta incerteza é feita variando-se o valor da gravidade superficial até que a diferença entre as abundâncias médias de Fe I e Fe II seja aproximadamente igual aos seus erros internos. O erro típico na gravidade superficial para a nossa amostra é de $0,2 \text{ dex}$.

Os valores finais dos parâmetros atmosféricos (T_{ef} , v_{mic} , $\log g$ e $[Fe/H]$) para as estrelas da amostra estão listados na Tab. (5.1). As incertezas para a metalicidade também estão mostradas e representam o desvio padrão na determinação deste parâmetro. A de-

terminação das abundâncias de outros elementos é influenciada pelo valor de $[Fe/H]$, já que este parâmetro é usado como entrada para os cálculos dos modelos atmosféricos.

Validação dos valores de $\log gf$ e da lista de linhas de Fe I e Fe II

Para checar nossa lista de linhas, assim como a técnica descrita acima, calculamos os valores dos parâmetros atmosféricos e da metalicidade do Sol usando a lista de linhas de ferro neutro (Fe I) e ferro ionizado (Fe II) adotada e os valores de LE medidos. Estes valores são apresentados na Tab. (A.1), do Apêndice A. Um modelo de atmosfera foi gerado com os parâmetros $T_{ef} = 5777 K$, $\log g = 4,44$ e $v_{mic} = 1,0 km s^{-1}$ para remover alguma tendência existente entre as abundâncias de Fe I e as larguras equivalentes, como mostrado na Fig. (4.5). Finalmente calculamos para as abundâncias de Fe I e Fe II os valores $\log n(Fe I) = 7,49 \pm 0,03 dex$ e $\log n(Fe II) = 7,48 \pm 0,04 dex$, estando estes em acordo com os valores das abundâncias solares de Fe I e Fe II de Asplund, Grevesse & Sauval (2005), assim como com o valor da abundância de Fe II encontrado por Biémont et al. (1991).

Como uma checagem adicional da nossa lista de linhas de Fe I e Fe II, assim como da técnica aqui utilizada, analisamos também Arcturus, já que esta é uma gigante vermelha bastante estudada e com um estágio evolutivo similar ao das gigantes do aglomerado estelar M67 analisadas neste trabalho. As medidas de largura equivalente das linhas de Fe I e Fe II em Arcturus são apresentadas na Tab. (A.1), do Apêndice A, e foram obtidas a partir do espectro de alta resolução de Hinkle et al. (2000). O modelo de atmosfera adotado possui os parâmetros $T_{ef} = 4270 K$, $\log g = 1,6$ e $v_{mic} = 1,5 km s^{-1}$. As abundâncias de Fe I e Fe II obtidas, $\log n(Fe I) = 7,02 \pm 0,05 dex$ e $\log n(Fe II) = 7,05 \pm 0,06 dex$, estão em acordo com aquelas calculadas por Peterson et al. (1993) e Carraro et al. (2004).

Resultados e discussões

No capítulo anterior, foram descritos os procedimentos para determinação dos parâmetros atmosféricos da presente amostra composta por estrelas do *turn-off*, sub-gigantes e gigantes do aglomerado aberto M67. Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos ao longo deste programa de Tese de Doutorado. A abundância de lítio (A_{Li}) para cada estrela da amostra foi, então, medida a partir do melhor ajuste da linha de Li I em 6707,78 Å, obtido pela comparação entre o espectro observado e o espectro sintético gerado com o uso dos modelos de atmosfera adotados e dos parâmetros atmosféricos determinados. Na Fig. (5.1), mostramos um espectro típico daqueles utilizados neste trabalho com a região do lítio para a estrela S1487, com os parâmetros obtidos, seguindo a descrição do capítulo anterior. O erro total na abundância do lítio foi estimado calculando-se a soma quadrática dos erros induzidos pelos erros nos parâmetros individuais. Para tal, alteramos estes parâmetros no sentido de variar a temperatura efetiva, a metalicidade, a velocidade de microturbulência, a gravidade superficial e a velocidade de rotação. As abundâncias de lítio com os respectivos erros estão listados na Tab. (5.1). Além do estudo sobre a natureza evolutiva do lítio em M67, apresentamos uma análise sobre o comportamento da rotação estelar no referido aglomerado, em comparação com a rotação em outros aglomerados e em estrelas do campo.

Inicialmente, efetuamos uma análise do comportamento do Li em função da temperatura efetiva e da rotação em M67. Também realizamos uma comparação com estrelas evoluídas de campo com o intuito de melhor entendermos quais os processos físicos que estão influenciando na diluição do Li em estrelas de diferentes ambientes estelares. As

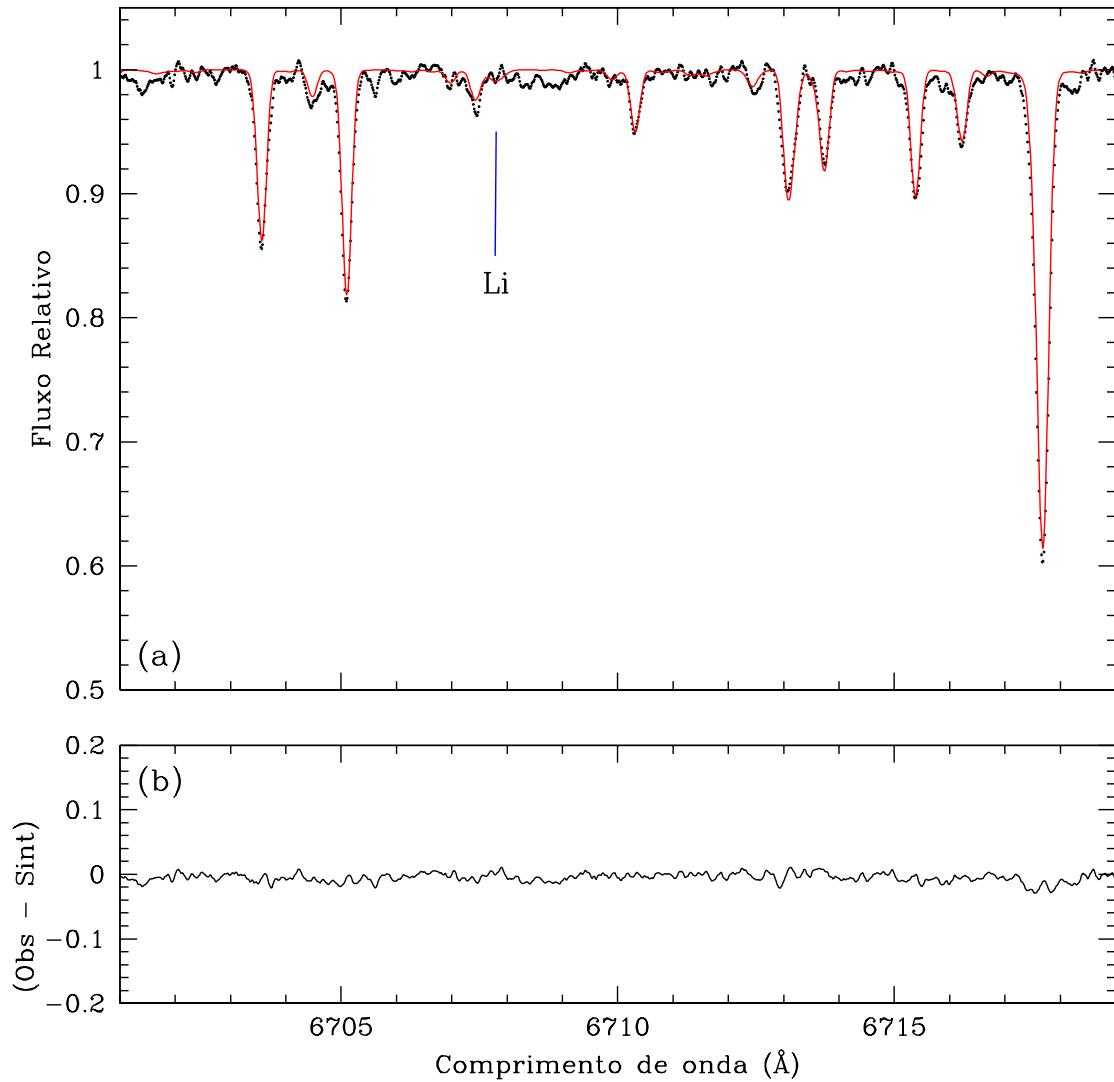


Figura 5.1: **(a)** Região do Li para S1487. O espectro observado está indicado através de uma linha pontilhada preta e o espectro sintético, por uma linha sólida vermelha. A linha vertical azul indica a linha do Li em 6707,78 Å. **(b)** Diferença residual entre o melhor espectro sintético ($A_{Li} = 1,1dex$) e o espectro observado.

massas das estrelas do campo foram medidas com o auxílio de traçados evolutivos de Girardi et al. (2000), com $Z=0,019$, a partir de suas posições no diagrama HR. As medidas de abundância de Li, rotação e metalicidade, foram obtidas de Brown et al. (1989), de Medeiros et al. (1997), Lèbre et al. (1999), de Medeiros et al. (2000), do Nascimento et al. (2003) e de Laverny et al. (2003), enquanto as idades, estimadas a partir de isócronas estelares, foram retiradas do catálogo de Nordstrom et al. (2004). Na Fig. (5.2) mostramos o Diagrama CM para as estrelas do campo que foram selecionadas no intervalo de massa entre $1,0$ e $1,5 M_{\odot}$.

5.1 A natureza evolutiva do Lítio em M67

O comportamento da abundância de Li como função da temperatura efetiva para as estrelas da presente amostra é apresentado na Fig. (5.3) levando em conta também abundâncias de Li para estrelas da seqüência principal, obtidas de Jones et al. (1999) e Randich et al. (2002). Estes autores encontraram que estrelas de tipo solar de M67 apresentam uma grande dispersão nos valores de A_{Li} . Nesta figura, observamos uma mesma dispersão para as estrelas evoluindo logo após o *turn-off* e ao longo do ramo das subgigantes, com um gradual decrescimento com a temperatura. Este resultado é compatível com aquele apresentado por Balachandran (1995) e Pilachowski et al. (1988), onde estrelas subgigantes e gigantes de M67 mostram baixas abundâncias de Li, apontando para uma severa diluição deste elemento, logo após a passagem pelo *turn-off*. É importante sublinhar que os resultados destes trabalhos tiveram como base somente estimativas de limites inferiores. Desta forma, nossos dados solidificam as primeiras sugestões quanto ao comportamento do Li em estrelas evoluídas de M67.

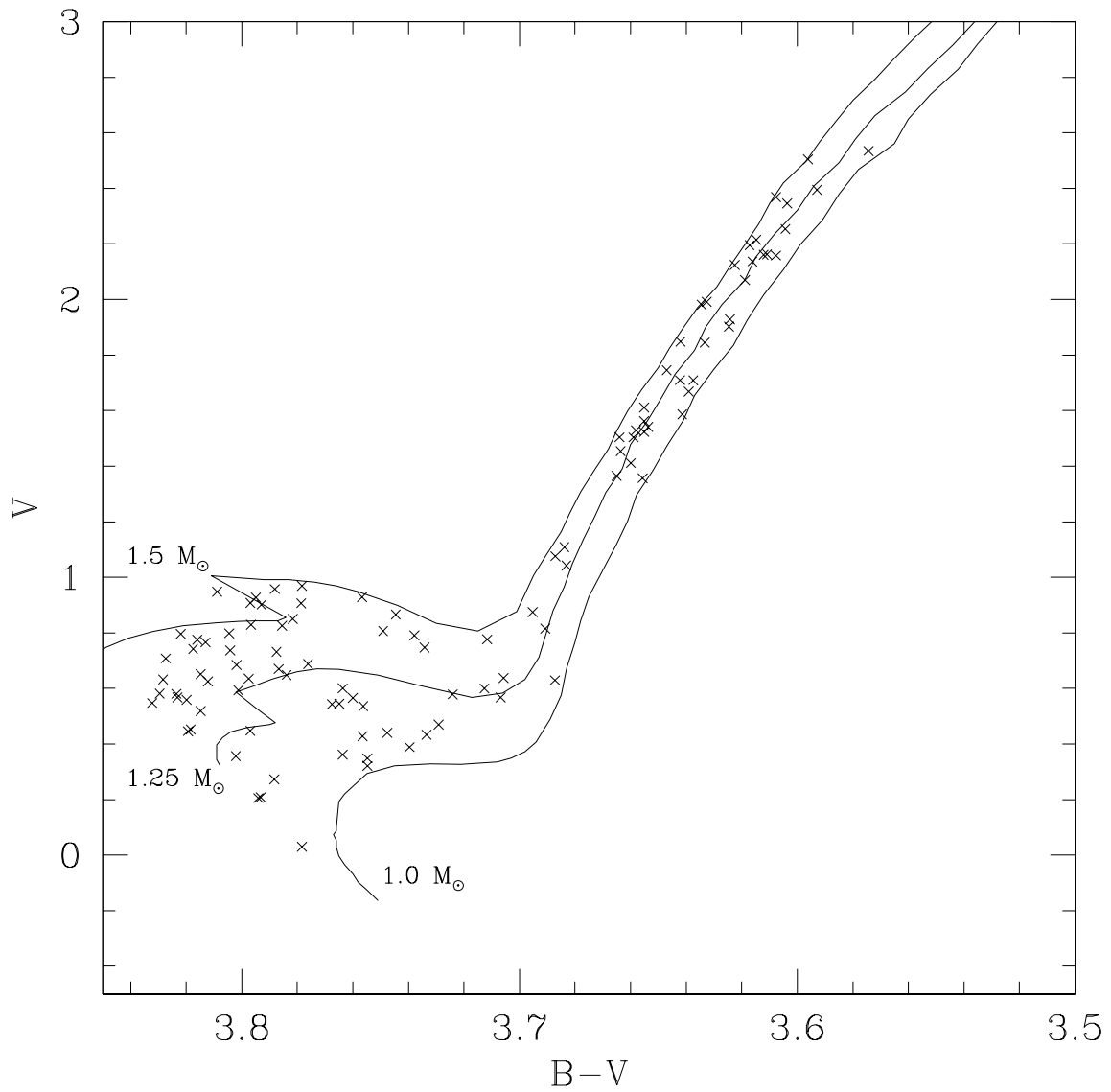


Figura 5.2: Diagrama Cor-Magnitude (CM) das estrelas do campo. A fotometria foi retirada de Brown et al. (1989), de Medeiros et al. (1997), Lèbre et al. (1999), de Medeiros et al. (2000), do Nascimento et al. (2003) e de Laverny et al. (2003). Os traçados evolutivos utilizados foram os de Girardi et al. (2000) para a determinação de suas massas e estágios evolutivos.

Tabela 5.1: Parâmetros atmosféricos calculados para as estrelas de nossa amostra e a abundância de Li obtida a partir do método de síntese espectral. Sanders: identificação de Sanders (1977); T_{ef} : temperatura efetiva em Kelvins; $\log g$: gravidade superficial; v_{mic} : velocidade de microturbulência em $km s^{-1}$; $[Fe/H]$: metalicidade; $v \text{ sen } i$: velocidade rotacional em $km s^{-1}$; A_{Li} : abundância de Li.

Sanders	T_{ef}	$\log g$	v_{mic}	$[Fe/H]$	$v \text{ sen } i$	A_{Li}
1607	6150	3,9	1,62	-0,05±0,05	5,00	1,71±0,10
1273	6120	3,9	1,65	-0,06±0,04	8,50	1,87±0,11
1268	6070	3,9	1,70	-0,07±0,04	4,00	0,80±0,12
1275	6050	3,9	1,55	-0,04±0,04	4,00	2,15±0,11
1034	6020	3,8	1,60	-0,03±0,05	5,00	1,39±0,11
2207	6000	3,8	1,60	-0,03±0,03	5,00	1,10±0,12
1487	5940	3,8	1,60	-0,04±0,03	4,00	1,10±0,13
1242	5800	3,8	1,30	-0,01±0,04	6,50	2,70±0,13
1239	5560	3,7	1,30	-0,03±0,03	3,80	0,60±0,12
1323	5520	3,6	1,30	-0,03±0,04	4,00	0,80±0,12
1000	5500	3,8	1,25	-0,03±0,04	4,50	<0,60
806	5450	3,8	1,20	+0,05±0,04	4,00	0,00±0,19
1438	5440	3,8	1,30	-0,04±0,03	3,00	0,00±0,20
2208	5420	3,9	1,15	+0,00±0,05	3,80	0,70±0,14
774	5270	3,8	1,10	-0,05±0,03	3,30	<0,00
1231	5150	3,8	1,05	+0,01±0,04	3,30	<0,00
1319	5140	3,7	1,15	-0,03±0,03	3,30	<0,34
1245	5140	3,6	1,15	-0,03±0,03	3,70	0,10±0,15
1305	5050	3,5	1,25	-0,01±0,03	3,50	0,00±0,21
1293	5000	3,5	1,25	+0,03±0,04	3,00	-0,05±0,22
1277	4940	3,4	1,30	+0,05±0,05	3,00	-0,05±0,23
1254	4920	3,3	1,35	+0,02±0,05	2,00	< -0,35
1288	4830	3,1	1,35	+0,00±0,04	2,00	-0,25±0,21
1010	4770	2,7	1,55	-0,03±0,04	3,00	0,10±0,21

Tabela 5.1: Cont.

Sanders	T_{ef}	$\log g$	v_{mic}	[Fe/H]	$v \text{ sen } i$	A_{Li}
1074	4750	2,5	1,55	$-0,07 \pm 0,04$	3,00	$-0,05 \pm 0,24$
1279	4750	2,7	1,55	$-0,04 \pm 0,05$	3,00	$0,05 \pm 0,23$
1016	4350	2,1	1,50	$-0,13 \pm 0,06$	3,00	$-0,38 \pm 0,25$
978	4200	1,9	1,55	$-0,11 \pm 0,07$	3,00	$-1,00 \pm 0,27$

A figura (5.4) mostra o fator de diluição¹ para as estrelas de M67, desde a seqüência principal, com os dados obtidos de Jones et al. (1999) e Randich et al. (2002), até os estágios mais evoluídos, representados pelas estrelas da nossa amostra. Também apresentamos nesta figura o fator de diluição previsto teoricamente por Iben (1967a,b) a partir do modelo evolucionário padrão para estrelas da seqüência principal, subgigantes e gigantes, considerando a diluição do Li em estrelas do campo com massa $1,25 M_{\odot}$. Podemos observar que as estrelas de M67 possuem um fator de diluição muito superior ao previsto por Iben (1967a,b) ao longo dos diferentes estágios evolutivos.

Para comparação com o traçado de Iben (1967a,b), calculamos um ajuste polinomial de segunda ordem, como representado pela curva vermelha da Fig. (5.4). No entanto, retiramos desta análise a estrela S978, a mais evoluída da amostra, com uma temperatura efetiva de $4200K$ e $A_{Li} = -1,0$. Estes parâmetros foram determinados a partir de um único espectro de baixa resolução, implicando, desta forma, erros relativamente altos. O valor de A_{Li} para esta estrela, em relação à abundância cósmica, $A_{Li} = 3,0$, indica um fator de diluição da ordem de 10000, o que influenciaria a estimativa global dos fatores de diluição das estrelas de M67. Uma breve análise da Fig. (5.4) mostra claramente que o Li em M67 é substancialmente mais diluído do que o previsto pela teoria padrão da evolução estelar.

¹Ele é calculado a partir da razão entre a abundância de Li cósmica ($A_{Li} \sim 3,0$) e a abundância de Li atual da estrela, da seguinte forma:

$$F_{Li} = \frac{10^3}{10^{A_{Li}}}.$$

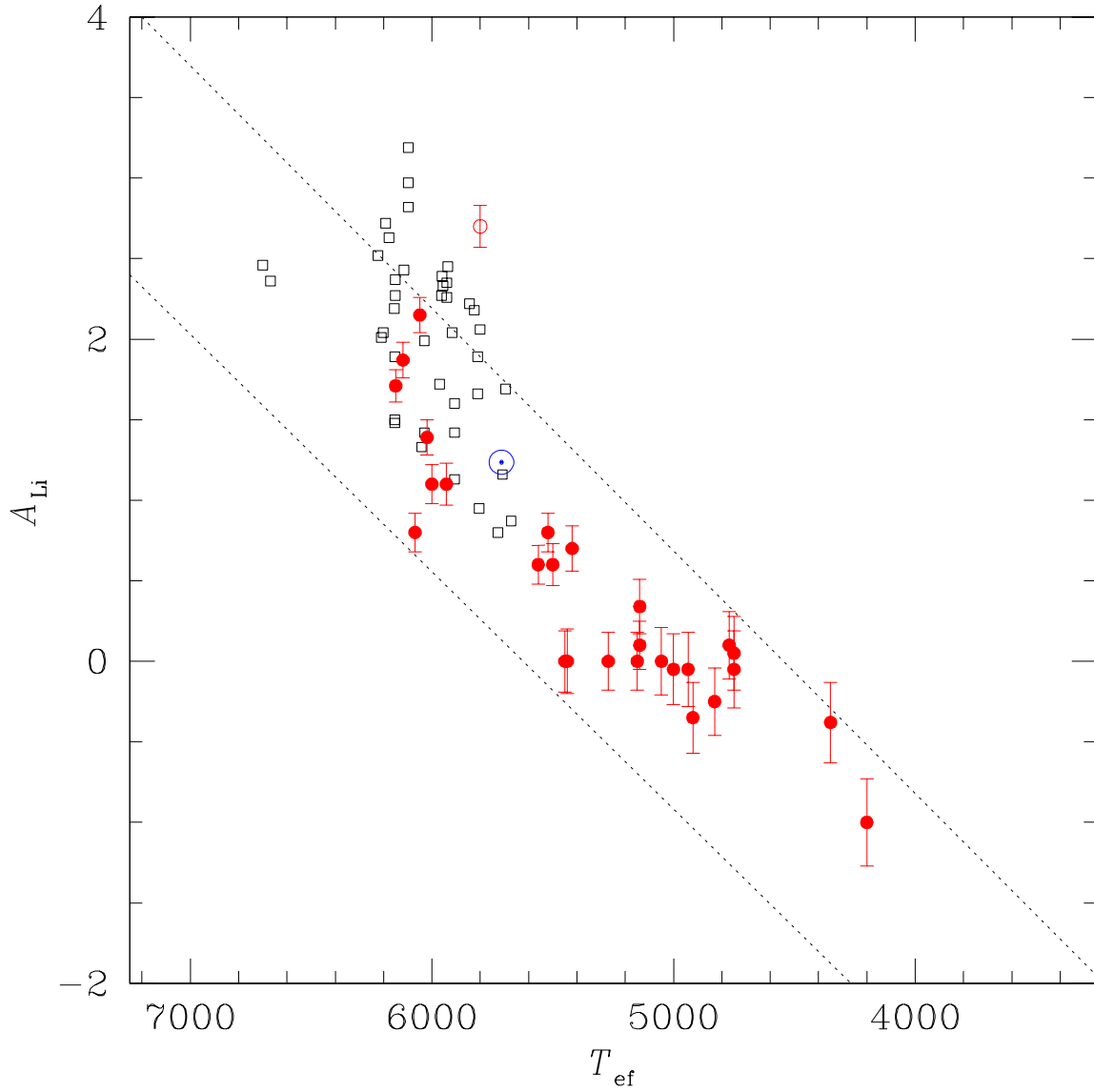


Figura 5.3: Abundância de lítio em função da temperatura efetiva de M67. As estrelas de nossa amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242. As estrelas da seqüência principal de M67 obtidas de Jones et al. (1999) e Randich et al. (2002) são representadas por quadrados e os valores do Sol por \odot . As linhas tracejadas representam os limites inferior e superior para as estrelas de nossa amostra.

Para quantificar o resultado acima, apresentamos na Tab. (5.2) os fatores de diluição médios das estrelas da presente amostra, para determinadas temperaturas, comparados com os valores previstos por Iben(1967a,b) para as mesmas temperaturas. Desta forma,

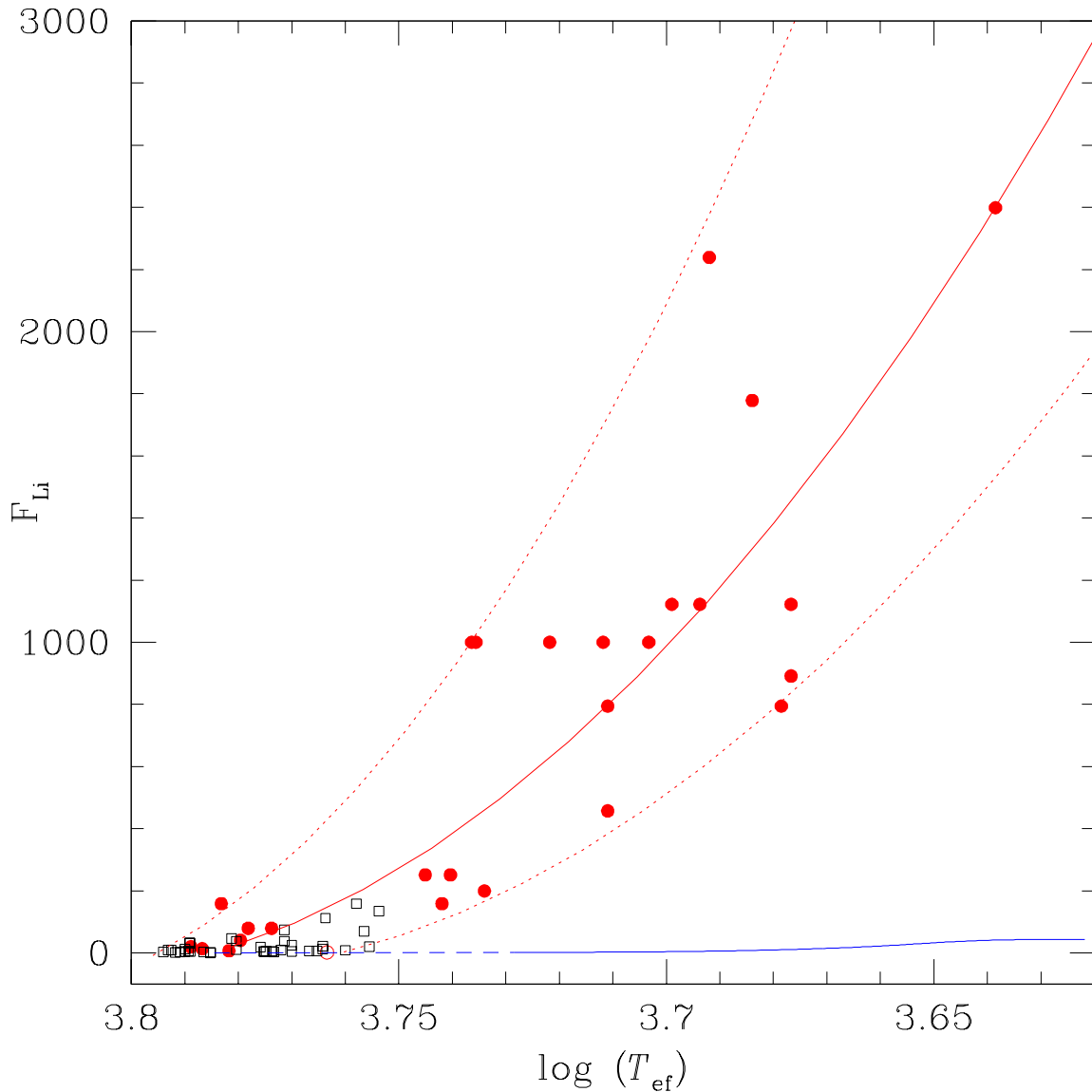


Figura 5.4: Diluição do Li em função da temperatura efetiva para as estrelas de M67 que compõem a nossa amostra, representadas por círculos vermelhos, e as estrelas de tipo-solar de M67 obtidas de Jones et al. (1999) e Randich et al. (2002), representadas por quadrados abertos. O traçado azul é a curva teórica prevista para a diluição do Li para estrelas do campo com massa $1,25 M_{\odot}$, previsto por Iben (1967a,b). O traçado vermelho foi gerado a partir de um ajuste polinomial de segunda ordem para as estrelas de M67. As linhas tracejadas representam os limites inferior e superior para as estrelas de nossa amostra.

verificamos uma grande diferença entre estes valores, o que indica, para as estrelas de M67, um processo de mistura muito mais eficiente do que aquele associado unicamente à convecção. Com base no valor médio do fator de diluição do Li para estrelas com $T_{ef} = 4350K$, obtemos um fator de diluição para as estrelas gigantes superior a 2300 vezes, relativo à abundância inicial $A_{Li} = 3,0$, portanto dramaticamente superior ao previsto por Iben (1967a,b). Nesta mesma região de temperaturas Iben (1967a,b) prediz um fator de diluição de 40 vezes em relação à abundância cósmica (ver Tab. 5.2).

Tabela 5.2: Fator de diluição médio do Li para diferentes valores de $\log(T_{ef})$ para as estrelas de M67 comparados com os valores preditos teoricamente por Iben (1967a,b).

$\log(T_{ef})$	F_{Li}^{Iben}	F_{Li}^{M67}
3,78	3,1	3,1
3,74	3,3	378,4
3,71	3,3	818,5
3,68	10,5	1366,6
3,64	40,0	2355,0

Apresentamos na Fig. (5.5) as abundâncias de Li para M67 e para uma amostra de estrelas do campo de tipo solar com massas entre 1,0 e 1,5 M_{\odot} . Tal procedimento tem como objetivo analisar a diluição de Li em M67 de forma comparativa com as estrelas do campo. As estrelas de M67 estão representadas por círculos vermelhos fechados (com exceção de S1242, que está representada por um círculo vermelho aberto e que será discutida posteriormente), enquanto que as estrelas do campo estão representadas por cruzeiras pretas. As linhas tracejadas indicam os limites superior e inferior para as estrelas de M67. Já na Fig. (5.6), são representadas somente as estrelas do campo com metalicidades variando entre -0,15 e +0,15 *dex* de forma a aproximarmos esta amostra daquela de M67, pelo menos em massa e metalicidade. Podemos observar a partir destas duas figuras que existe um decréscimo gradual das abundâncias de Li com a temperatura, tanto para as estrelas de M67 quanto para as estrelas do campo, o que confirma os resultados obtidos em estudos anteriores sobre o comportamento do Li em estrelas evoluídas do campo (Brown et al

1989; de Medeiros et al. 1997; Lèbre et al. 1999; do Nascimento et al. 2000; de Medeiros et al. 2000; Costa et al. 2002). Outro resultado observado a partir dessas figuras é que a diluição do Li para as estrelas de M67 mostra uma tendência a ser mais acentuada do que nas estrelas do campo, indicando que o processo de diluição em estrelas evoluídas de M67 é mais eficiente do que nas estrelas evoluídas de campo, tal como sugerido por Pasquini et al. (1997). Para evidenciarmos tal tendência, aplicamos o método dos mínimos quadrados para as estrelas de M67, assim como para as estrelas do campo com metalicidades variando entre $-0,15$ e $+0,15$ dex e obtemos as seguintes relações para as estrelas de M67 (Eq. 5.1) e estrelas do campo (Eq. 5.2):

$$A_{Li} = -6,098 + 0,00123 \times T_{ef}, \quad (5.1)$$

e

$$A_{Li} = -5,195 + 0,00114 \times T_{ef}, \quad (5.2)$$

com um coeficiente de correlação $r = 0,90$ e um desvio padrão $\sigma = 0,33$ para as estrelas de M67 e $r = 0,87$ e $\sigma = 0,68$ para as estrelas do campo, indicando, que realmente o processo de diluição em estrelas evoluídas do aglomerado aberto M67 é mais eficiente do que em estrelas evoluídas do campo.

5.1.1 Lítio *versus* rotação em M67

A partir das informações listadas na Tab. (5.1) e de dados de estrelas evoluídas de campo encontrados na literatura, construímos a Fig. (5.7), onde apresentamos as abundâncias de Li em função da velocidade rotacional, tanto para as estrelas de M67, representadas por círculos vermelhos fechados (com exceção da estrela S1242 que está representada por um círculo vermelho aberto) como para as estrelas evoluídas de campo, representadas por cruces pretas. As linhas tracejadas indicam os limites superior e inferior na relação abundância de Li *versus* rotação para as estrelas de M67.

A partir desta figura podemos observar que, para uma dada abundância de Li, as

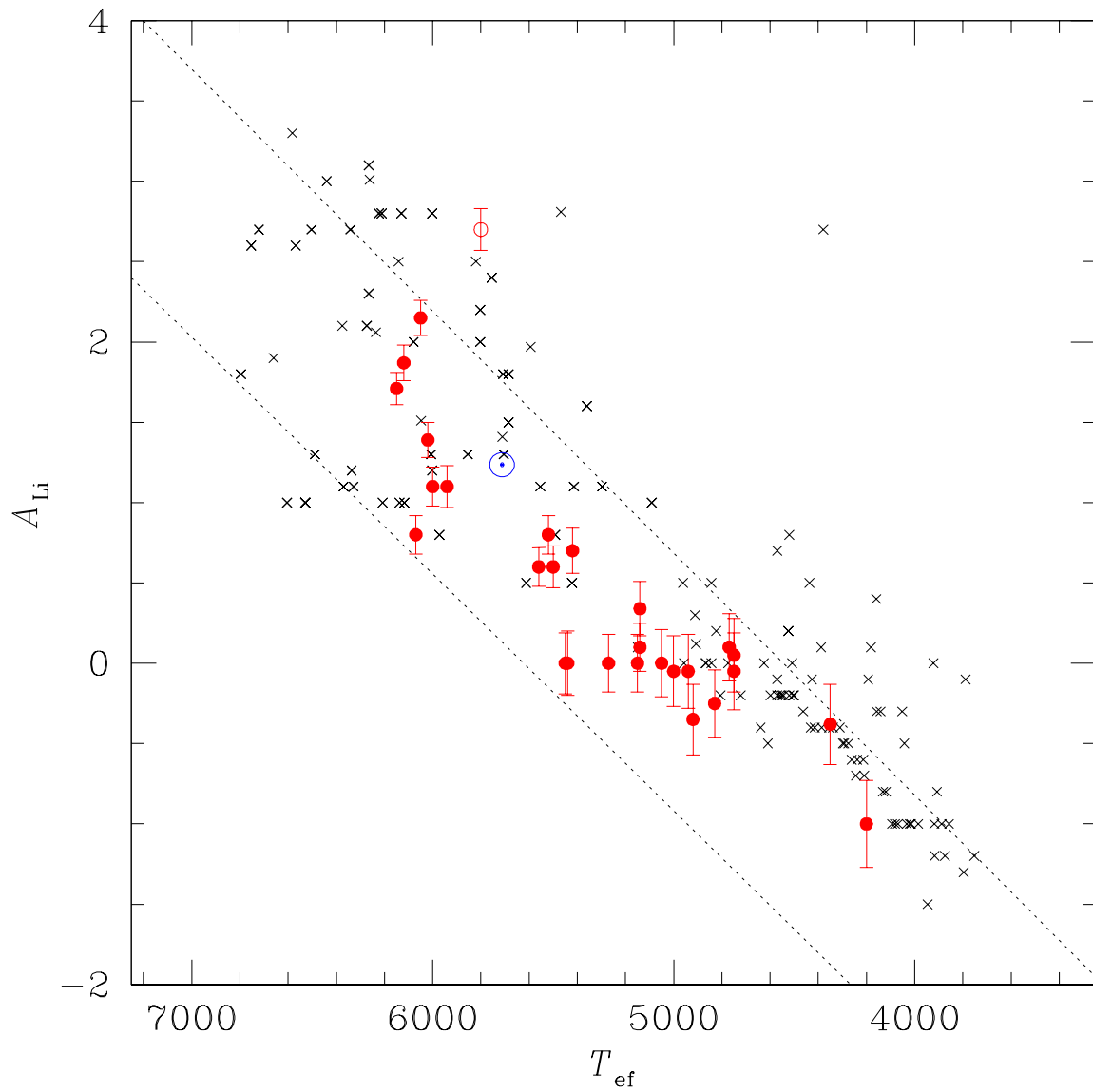


Figura 5.5: Abundância de Li em função da temperatura efetiva. As estrelas de nossa amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242. As estrelas do campo, por cruces pretas e os valores do Sol, por \odot . As linhas tracejadas são as mesmas da Fig. (5.3)

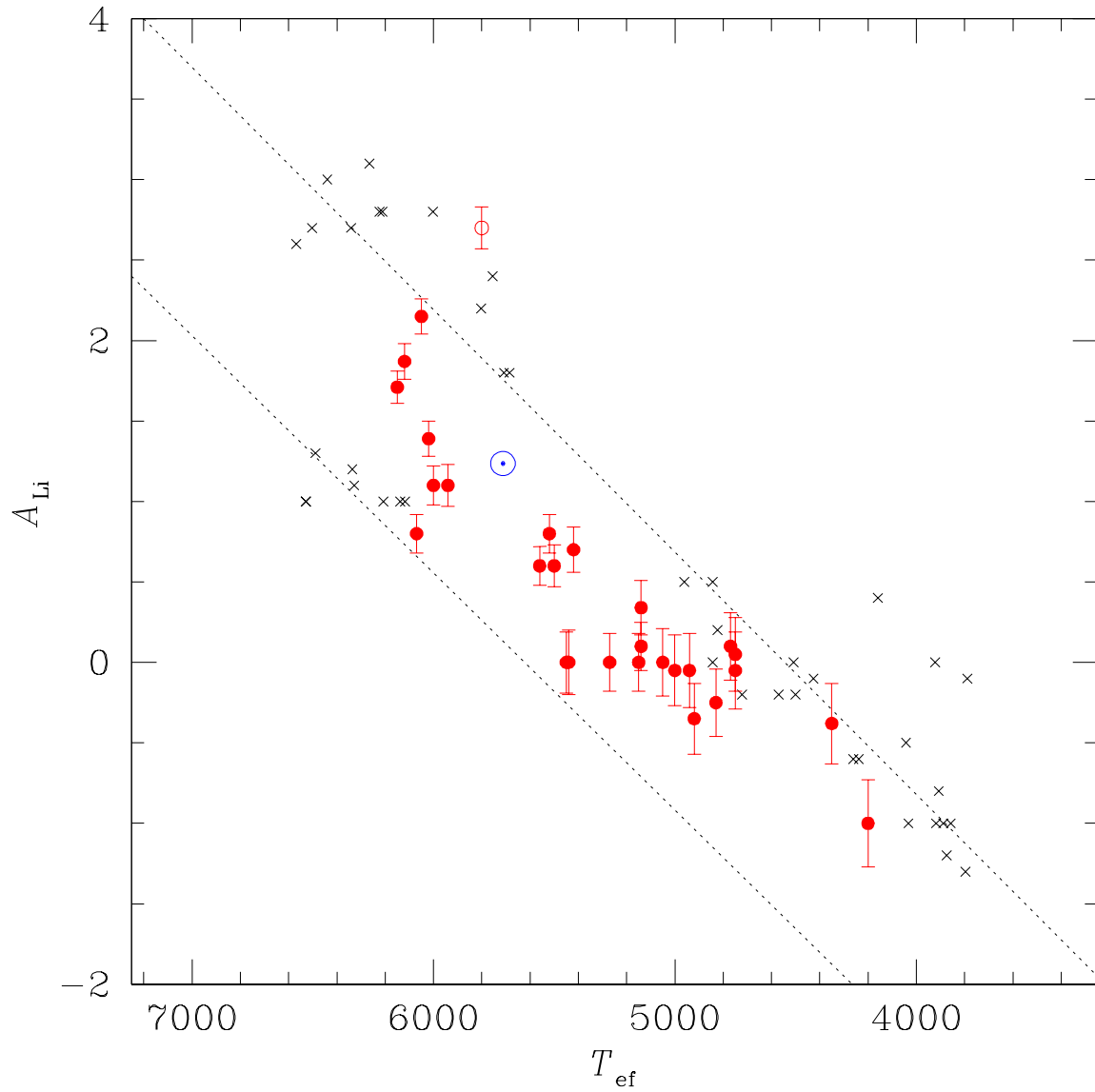


Figura 5.6: Abundância de lítio em função da temperatura efetiva. As estrelas de nossa amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242. As estrelas do campo estão representadas por cruzeiros e os valores do Sol, por \odot . Nesta figura estão representadas apenas as estrelas do campo com metalicidade variando entre $-0,15 \text{ dex}$ e $+0,15 \text{ dex}$. As linhas tracejadas são as mesmas da Fig. (5.5).

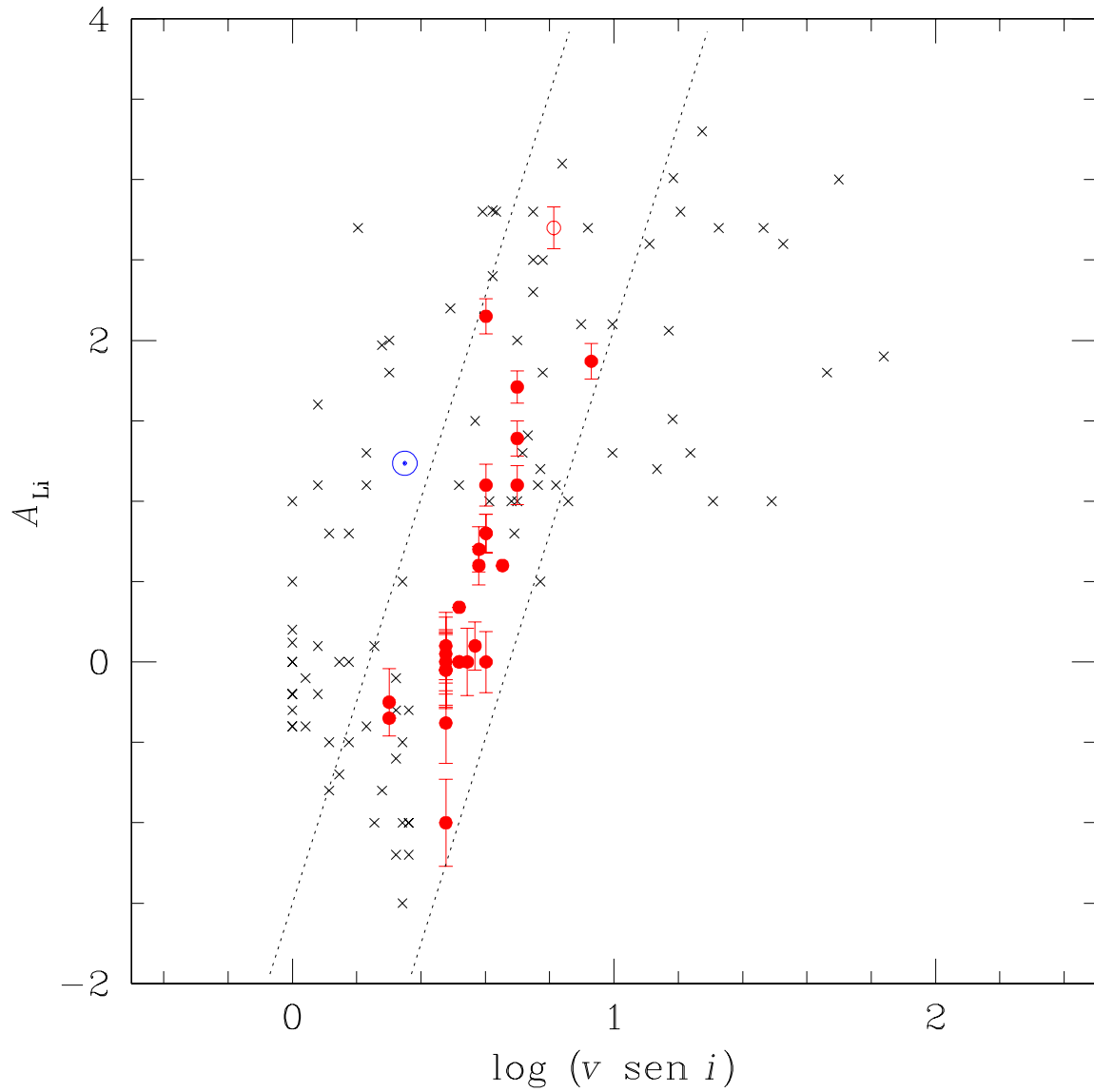


Figura 5.7: Abundância de lítio em função da velocidade rotacional. As estrelas de M67 estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242, e as estrelas do campo, por cruces pretas. Os valores do Sol estão representados nesta figura por \odot . As linhas tracejadas indicam o limite superior e inferior para as estrelas de M67.

estrelas de M67 apresentam uma dispersão nos valores da rotação menor do que o observado para as estrelas do campo. Também, a partir da Fig. (5.7), podemos verificar que existe uma tendência para uma correlação entre a abundância do Li e a rotação em estrelas evoluídas de M67 bem mais clara do que para as estrelas do campo. Aplicando o método dos mínimos quadrados para as estrelas de M67, sem levar em consideração a estrela S1242, obtemos a seguinte relação:

$$A_{Li} = -2,161 + 4,66 \times \log(vseni), \quad (5.3)$$

com um coeficiente de correlação $r = 0,78$ e um desvio padrão $\sigma = 0,48$, indicando, assim, uma boa correlação entre o conteúdo de Li e a rotação em estrelas evoluídas do aglomerado aberto M67.

É importante sublinhar que a tendência de correlação abundância de Li *versus* rotação para M67 muito mais acentuada do que para as estrelas do campo pode ser um indicativo de que diferentes parâmetros estelares, tais como metalicidade, massa e idade podem efetivamente influenciar tal conexão em estrelas do campo, como sugerido por vários autores (Herbig 1965; Duncan 1981; Soderblom, 1983, Pallavicini et al. 1987; Spite & Spite 1982; Randich et al. 1994). A fim de realizar alguns testes que contribuam com respostas para tal questão, apresentamos o comportamento das abundâncias de Li *versus* rotação nas Figs. (5.9), (5.10) e (5.12), da mesma forma como foi apresentada a Fig. (5.7), porém, levando em conta os parâmetros de metalicidade, massa e idade das estrelas do campo, comparativamente com as estrelas de M67.

Primeiramente, na Fig. (5.8), mostramos a metalicidade em função da temperatura efetiva para as estrelas de M67, assim como para as estrelas do campo, representadas da mesma forma como na Fig. (5.7). A linha sólida representa a metalicidade média para as estrelas evoluídas de M67, $[Fe/H] = -0,03 \pm 0,04 dex$, a mesma encontrada por Tautvaisiene et al. (2000), enquanto que a linha tracejada indica a metalicidade média para as estrelas de campo, $[Fe/H] = +0,08 \pm 0,04 dex$. Essa figura mostra que, apesar das estrelas de campo terem basicamente metalicidade solar, $-0,4 dex \lesssim [Fe/H] \lesssim +0,4 dex$,

há uma nítida dispersão na metalicidade das mesmas em relação a M67.

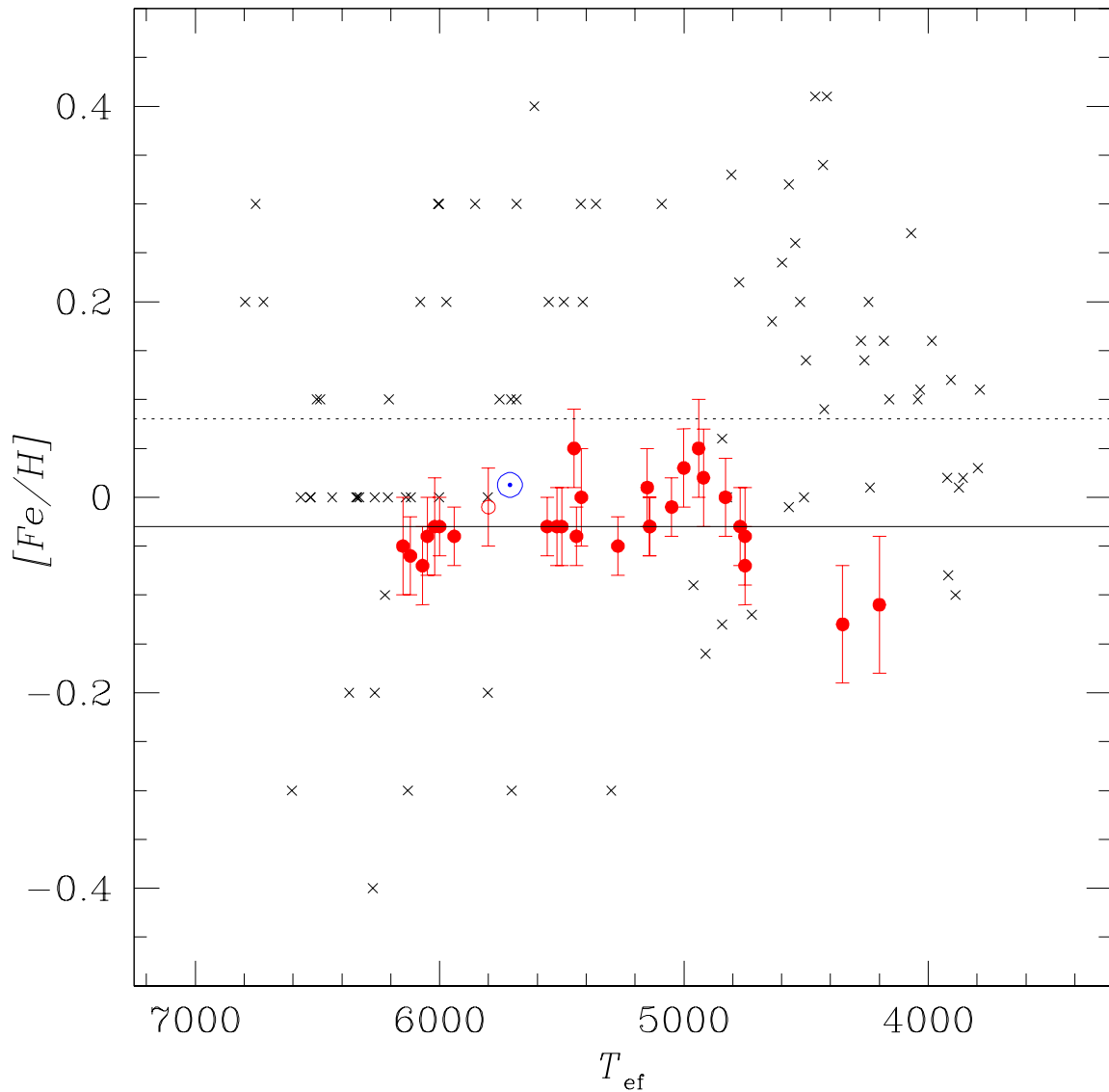


Figura 5.8: Metalicidade em função da temperatura efetiva. As estrelas da presente amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242, e as estrelas do campo, por cruces pretas. A posição do Sol também está indicada nesta figura por \odot . A linha tracejada representa o valor médio da metalicidade das estrelas do campo (0,08 dex) enquanto que a linha sólida indica o valor médio para as estrelas de nossa amostra de M67 (-0,03 dex).

Na figura (5.9), apresentamos as abundâncias de Li em função da velocidade rotaci-

onal, da mesma forma como na Fig. (5.7). No entanto, somente estrelas do campo com metalicidade variando entre $-0,15$ e $+0,15$ *dex* estão presentes. Observamos que mesmo refinando o intervalo de metalicidade, aproximando da metalicidade de M67, a relação entre a abundância de Li *versus* velocidade rotacional continua apresentando uma dispersão muito maior do que para as estrelas de M67.

Considerando agora o papel da massa estelar sobre a relação abundância de Li *versus* velocidade rotacional, apresentamos na Fig. (5.10) a mesma amostra da Fig. (5.7), no entanto, segregando as estrelas de campo em intervalos de massa. Estrelas com massa menor do que $1,2 M_{\odot}$ estão representadas por triângulos abertos, os círculos pretos representam estrelas com massas entre $1,2$ e $1,4 M_{\odot}$ e os quadrados abertos são estrelas com massa maior do que $1,4 M_{\odot}$. Podemos observar nesta figura que existe uma nítida dispersão no espectro de massa das estrelas de campo em relação às estrelas de M67. Além disso, observa-se que as estrelas de campo com massas da ordem da massa do *turn-off* de M67, tipicamente $1,25 M_{\odot}$ (Sandquist 2004), estão distribuídas em diferentes regiões do plano abundância de Li *versus* velocidade rotacional e não apenas na faixa definida para M67. Na figura (5.11), apresentamos as abundâncias de Li em função da velocidade rotacional, da mesma forma como na Fig. (5.10), porém somente com estrelas do campo com massa variando entre $1,24$ e $1,36 M_{\odot}$. Observamos nesta figura que as estrelas do campo com massa próxima às massas das estrelas de M67 ($\sim 1,3 M_{\odot}$) apresentam uma tendência mais acentuada para uma correlação entre a abundância de Li e a velocidade rotacional. Apesar disso, tal correlação é claramente mais pobre do que em M67.

Por fim, dividimos as estrelas do campo por idade, como ilustrado na Fig. (5.12). Na presente situação, observa-se claramente que, exceto por um objeto (HD 197373, com $A_{Li} = 1,0$ e $v \sin i = 30,9 \text{ km s}^{-1}$) as estrelas do campo no intervalo de idades em torno da idade de M67 seguem a mesma tendência da relação abundância de Li *versus* velocidade rotacional apresentada por M67. Tal fato parece indicar que dentro de um mesmo intervalo de idades, rotação e Li em estrelas do campo e no aglomerado M67 relacionam-se por uma mesma lei.

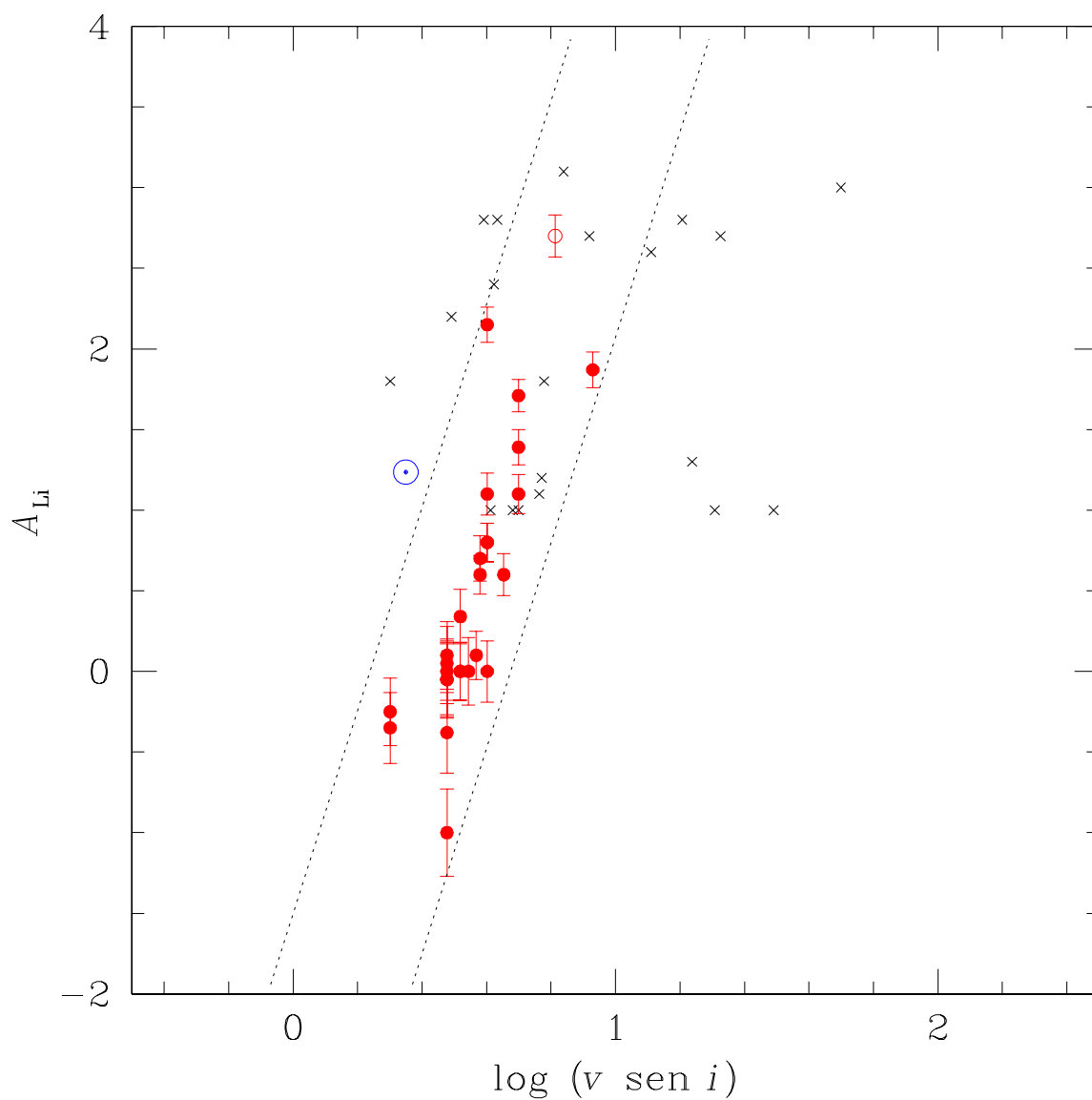


Figura 5.9: Abundância de lítio em função da velocidade rotacional. As estrelas de nossa amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242. Somente estrelas do campo com metalicidades variando entre $-0,15$ e $+0,15$ *dex*, representadas por cruces pretas, estão presentes. Os valores do Sol também estão representados nesta figura por \odot . As linhas tracejadas são as mesmas da Fig. (5.7).

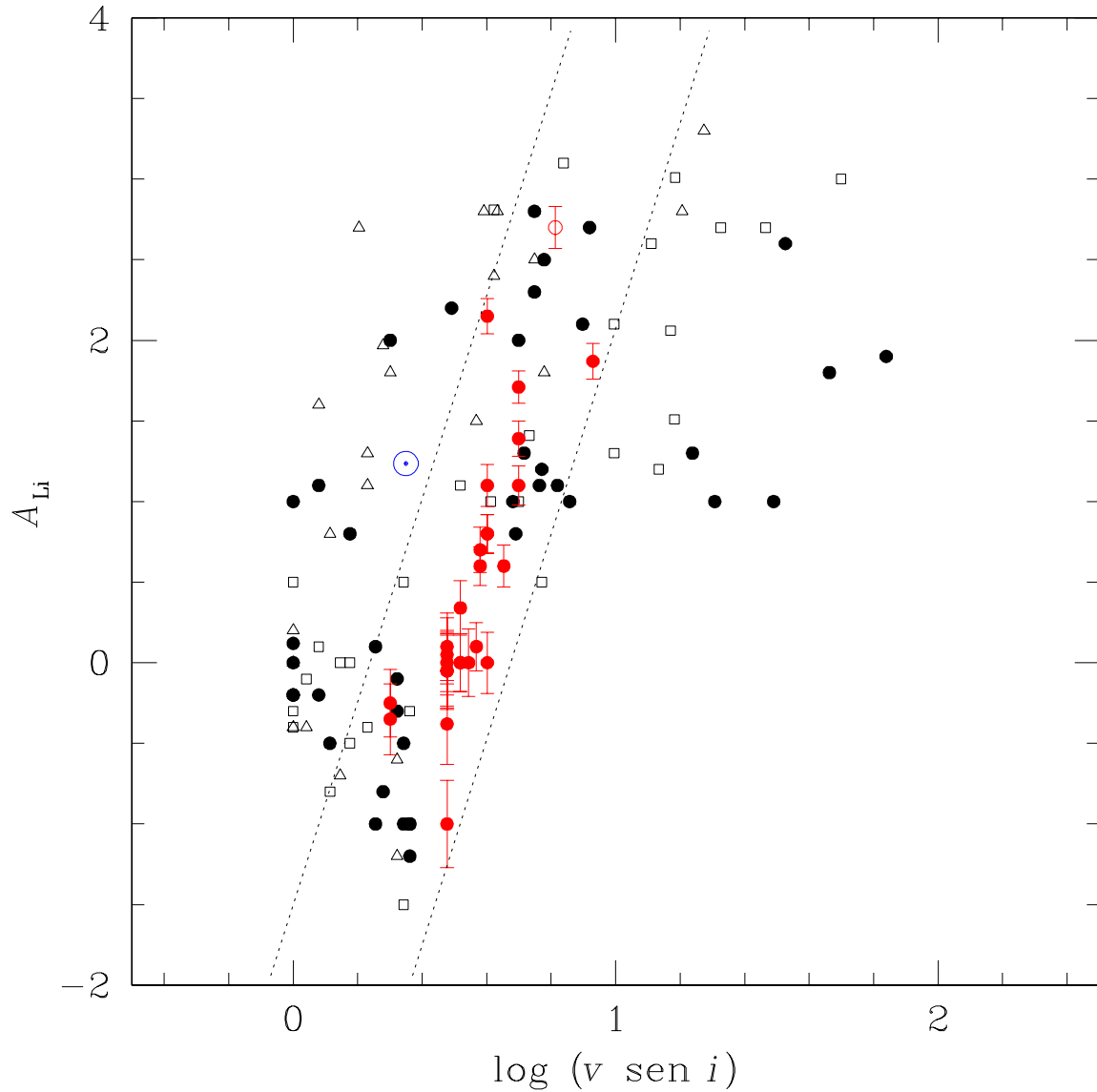


Figura 5.10: Abundância de lítio em função da velocidade rotacional. As estrelas de nossa amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242. Para as estrelas do campo, os triângulos abertos representam estrelas com $M_*/M_\odot < 1,2$, os círculos pretos fechados com $1,2 \leq M_*/M_\odot < 1,4$ e os quadrados abertos são estrelas com $M_*/M_\odot \geq 1,4$. Os valores do Sol também estão representados nesta figura. As linhas tracejadas são as mesmas da figura 5.7.

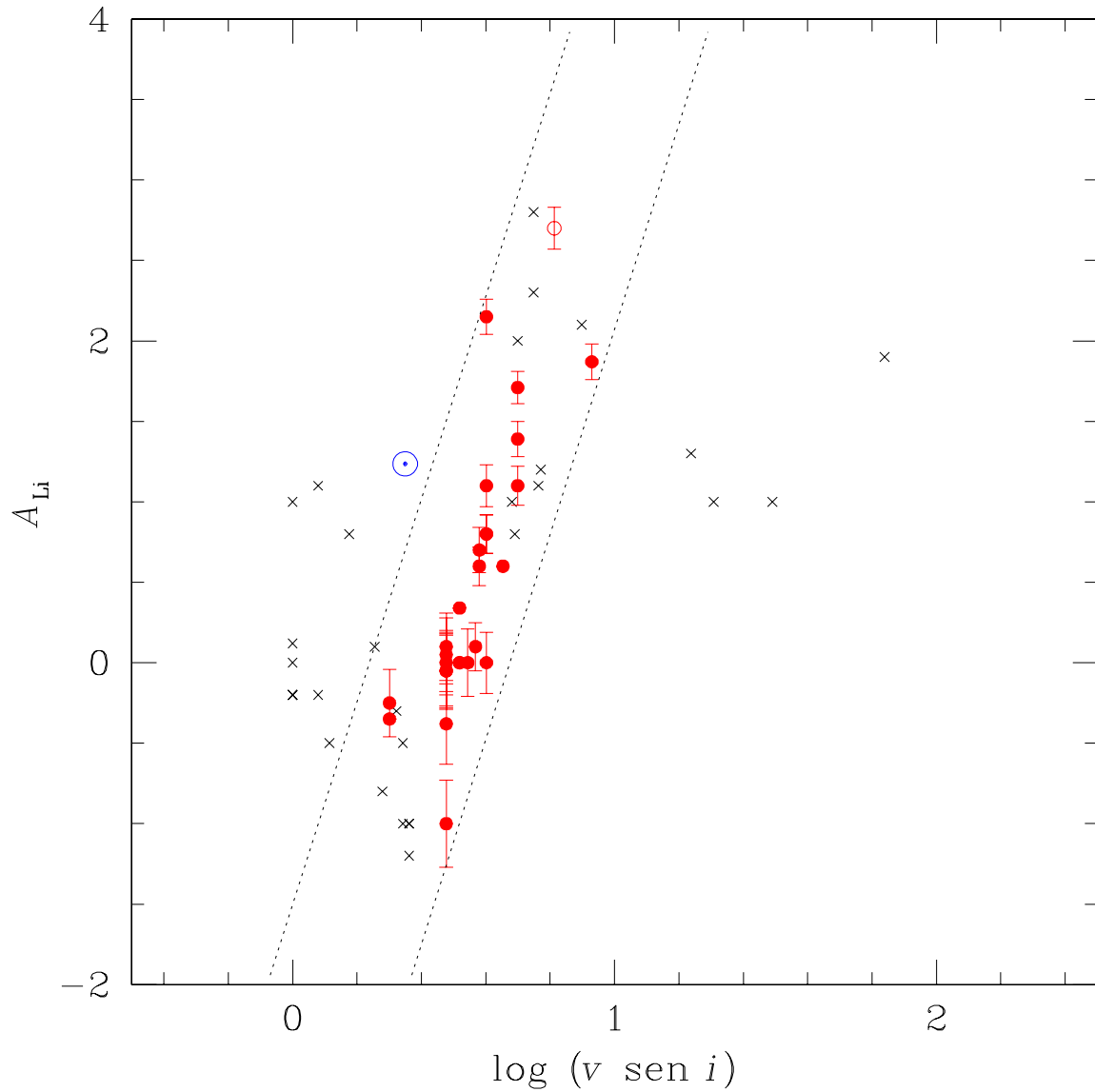


Figura 5.11: Abundância de lítio em função da velocidade rotacional. As estrelas de nossa amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242. Para as estrelas do campo, somente estrelas com massa variando entre $1,24 \leq M_*/M_\odot \leq 1,36$ estão presentes e são representadas por cruces pretas. Os valores do Sol também estão representados por \odot . As linhas tracejadas são as mesmas da figura 5.7.

Em síntese, a análise da influência da massa, metalicidade e idade sobre a relação abundância de Li *versus* rotação aponta para dois aspectos bastante claros: (i) a massa estelar influencia fortemente a relação abundância de Li *versus* rotação, no sentido de que quanto maior a dispersão em massa, maior a dispersão em tal relação e (ii) num mesmo intervalo de idade o comportamento da relação abundância de Li *versus* rotação segue a mesma tendência de correlação entre as estrelas do campo e as estrelas de M67. A análise sobre o papel da metalicidade mostrou-se pouco conclusivo, talvez devido ao estreito intervalo de metalicidade aqui apresentado.

5.1.2 S1242: um Laboratório Particular

Das estrelas de nossa amostra, somente uma delas é binária. A estrela subgigante S1242 é membro de um sistema binário excêntrico, sendo a massa da componente principal da ordem de $1,25 M_{\odot}$, enquanto que a da companheira está entre $0,14$ e $0,94 M_{\odot}$, segundo Mathieu et al. (1990). Estes autores determinaram também uma órbita com excentricidade de $0,66$ e um período orbital de $31,8$ dias.

Com relação à sua atividade, Belloni et al. (1998) relataram S1242 como sendo uma fonte de raio-X, com base em observações feitas com o ROSAT PSPC. Já a atividade cromosférica foi detectada a partir de emissões nas linhas de CaII H e K e da linha de H_{α} (Pasquini & Belloni 1998; van den Berg et al 1999). S1242 também mostra variabilidade fotométrica, detectada por Gilliland et al (1991), com um período de $4,88$ dias. Tal período fotométrico foi sugerido por van den Berg et al. (1999) como estando relacionado a uma corotação com a órbita no periastro. Esses autores também sugeriram que as atividades coronal e cromosférica para esta estrela são devidas a uma rápida rotação induzida por interação de marés ocorrendo nesta fase orbital específica. Estes mesmos autores propuseram que este sistema binário está em uma fase de transição de uma órbita excêntrica para uma órbita circular.

Seguindo o procedimento de síntese espectral, descrito no capítulo anterior, obtivemos para esta estrela uma abundância de Li $A_{Li} = 2,7 \pm 0,13 dex$. Tal medida revelou-se cla-

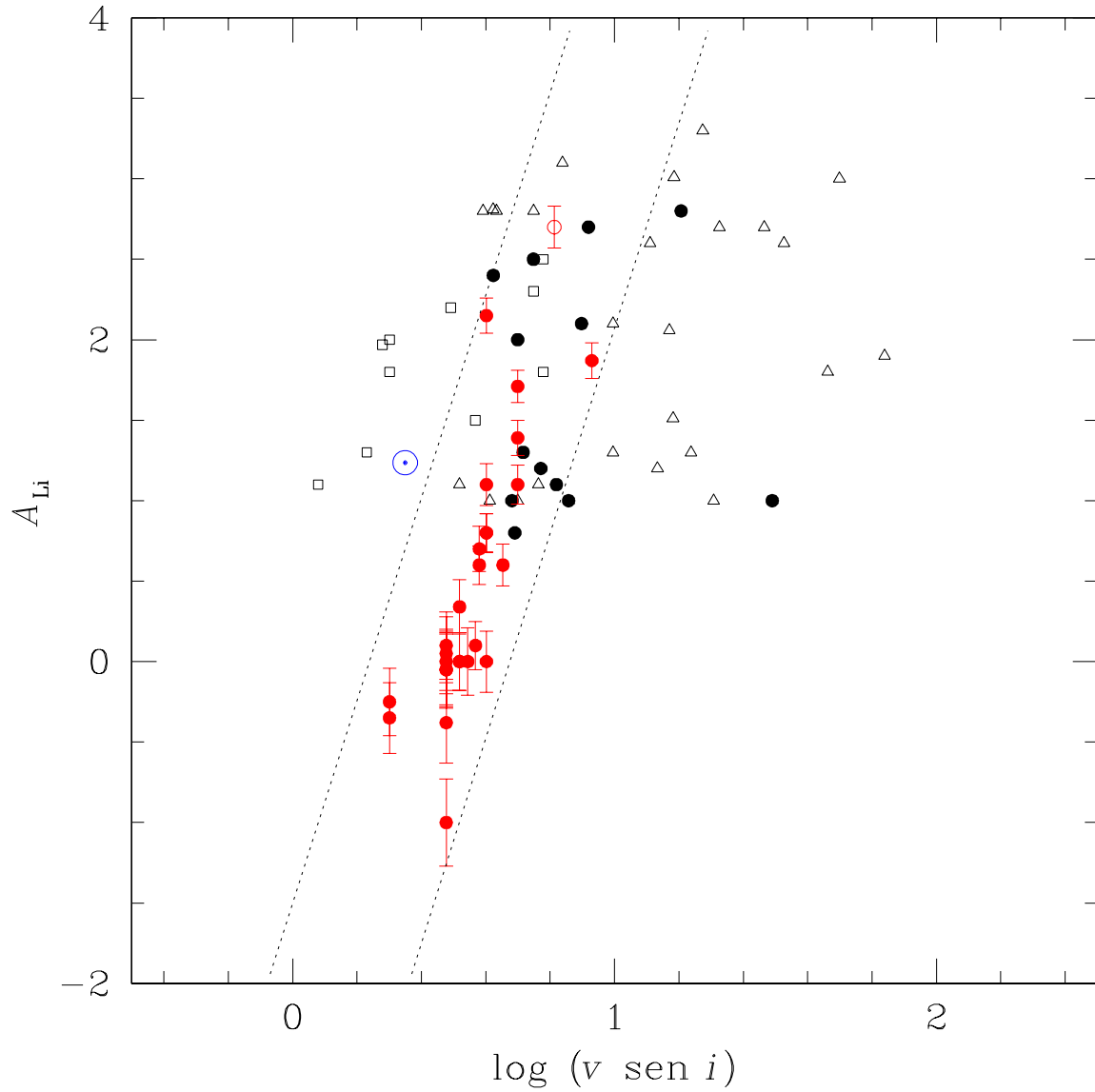


Figura 5.12: Abundância de lítio em função da velocidade rotacional. As estrelas de nossa amostra estão representadas por círculos vermelhos, onde o círculo aberto representa a estrela S1242. Para as estrelas do campo, os triângulos abertos representam estrelas com Idade < 3 Giga-anos, os círculos pretos fechados com $3 \text{ Giga-anos} \leq \text{Idade} < 5 \text{ Giga-anos}$ e os quadrados abertos são estrelas com Idade ≥ 5 Giga-anos e os valores do Sol por \odot . As linhas tracejadas são as mesmas da figura 5.7.

ramente como sendo a mais elevada abundância de Li, até hoje medida para uma estrela evoluída de M67. A Fig. (5.13) mostra o resultado do tratamento de síntese espectral para S1242.

Para poder explicar esta abundância anômala sugerimos dois processos físicos, efeitos de maré gravitacional e difusão atômica. O primeiro tem como base o *status* de binaridade de S1242. Zahn (1994) propôs um cenário onde efeitos de maré poderiam contribuir para a preservação do Li presente no *turn-off*. De acordo com este autor, sistemas binários gravitacionalmente ligados no início da seqüência principal, também sofrem um torque de maré, o qual tende a sincronizar seus movimentos rotacional e orbital. Como resultado, estas estrelas trocam menos momentum angular entre suas camadas do que as estrelas simples, retendo então mais do seu lítio original. No caso de S1242, a abundância elevada de Li encontrada pode ser explicada caso tais efeitos estejam produzindo uma pseudo-sincronização no periastro. Estes efeitos teriam força e duração suficientes para preservar a abundância de Li presente no *turn-off* ($A_{Li} \sim 2,5$). Além disso, a presença de efeitos de maré em S1242 é reforçada pela sua alta velocidade rotacional ($v \sin i = 6,5 \text{ km s}^{-1}$), em adição ao alto nível de atividade coronal e cromosférica.

Também analisamos o comportamento evolucionário do Li para estrelas com massas em torno da massa de S1242, levando em consideração os efeitos da difusão atômica, da mesma forma como foi apresentado por Michaud et al. (2004). A Fig. (5.14), retirada de Canto Martins et al. (2006), mostra a evolução de A_{Li} para três diferentes modelos estelares com massa $1,33 M_{\odot}$, levando em consideração a difusão atômica e diferentes parametrizações de mistura, de acordo com modelos apresentados e discutidos por Richard et al. (2002). Durante a evolução na seqüência principal, a difusão atômica reduz o Li encontrado na superfície em cerca de $\sim 0,2 \text{ dex}$ quando a envoltória convectiva alcança o seu menor tamanho. O comportamento da abundância do Li produzido por difusão aumenta da superfície para a profundidade onde as reações nucleares são altas o suficientes para queimar o Li (Sills & Deliyannis 2000). Quanto mais profundo, mais rapidamente o Li diminui. Quando a estrela evolui, a sua envoltória convectiva se aprofunda e draga o Li até que ela alcance a profundidade onde a abundância de Li é máxima. Isto acontece

no ramo das subgigantes para uma temperatura efetiva próxima à temperatura de S1242 (Sills & Deliyannis 2000; Michaud et al. 2004). Mais tarde, o Li começa a diminuir novamente. Isto pode ser observado na Fig. (5.14), linha sólida, onde a difusão atômica pode reproduzir o aumento na abundância de Li ocorrendo próxima a uma temperatura efetiva como a estimada para S1242. Como resultado, um conteúdo alto de lítio no estágio de subgigante pode ser devido à combinação de variações da profundidade da envoltória convectiva e da difusão atômica.

5.2 Evolução do momentum angular em M67

O estudo da evolução do momentum angular em M67 teve seu início efetivo com o trabalho de Melo et al. (2001). Estes autores determinaram velocidades rotacionais para uma amostra de 28 estrelas em diferentes estágios evolutivos, desde a seqüência principal, passando pelo *turn-off*, até o ramo das gigantes. Eles encontraram que as estrelas se comportam de maneira bastante regular, dependendo da posição no diagrama CM. Também verificaram que estrelas pertencentes à seqüência principal possuem velocidades duas vezes maiores do que a do Sol, enquanto que estrelas do *turn-off* são aquelas com as velocidades mais elevadas. Ao longo do ramo das gigantes, as rotações sofrem um decrescimento suave, embora para estrelas com $(B-V) \gtrsim 1,0$ tenham sido determinados somente limites superiores. Melo et al. (2001) mostram também que as estrelas de M67 provavelmente obedecem a diferentes leis de evolução do *momentum* angular na seqüência principal e ao longo do ramo das gigantes: enquanto na seqüência principal alguma desaceleração é necessária para a conservação do *momentum* angular, ao longo do ramo das gigantes os dados são bem representados por uma lei $I\Omega = C$ (onde C é uma constante, I é o momento de inércia e Ω a velocidade angular). Pace & Pasquini (2004), com base em espectros de alta resolução, obtiveram fluxos cromosféricos a partir da linha K de Ca II em 35 estrelas anãs G de 5 diferentes aglomerados abertos (Hyades, Praesepe, IC 4651, NGC 3680 e M67), a fim de determinarem relações entre idade, atividade e rotação. Para a rotação, eles encontraram que a velocidade rotacional média nestes aglomerados mostra um decrescimento dramático em torno de 1,5 Giga-anos, da mesma maneira como

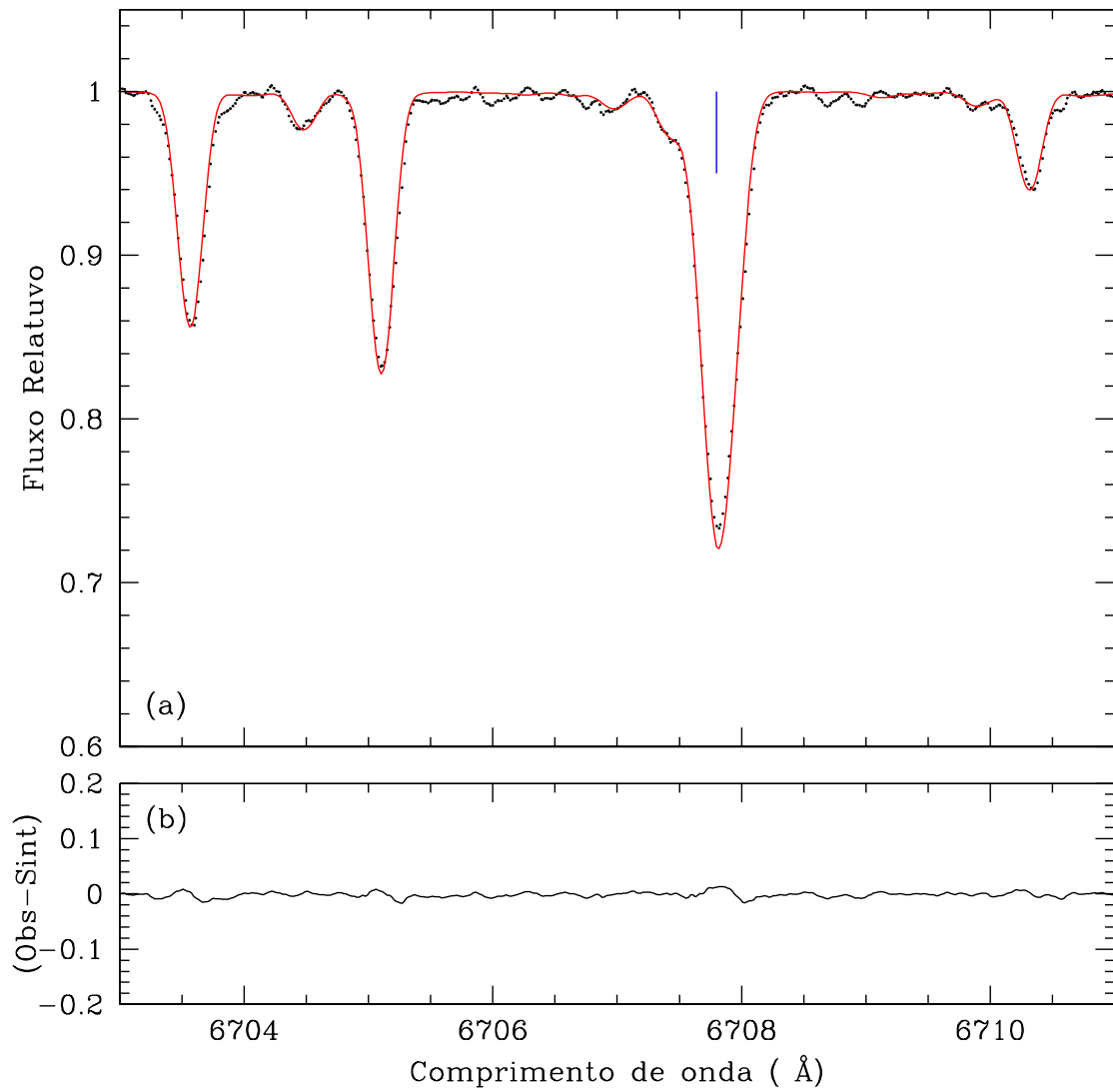


Figura 5.13: **(a)** Região do Li para S1242. O espectro observado está indicado como uma linha pontilhada preta e o espectro sintético, por uma linha sólida vermelha. A linha vertical azul indica a linha do Li em 6707,78 Å. **(b)** Diferença residual entre o melhor espectro sintético ($A_{Li} = 2,7dex$) e o espectro observado.

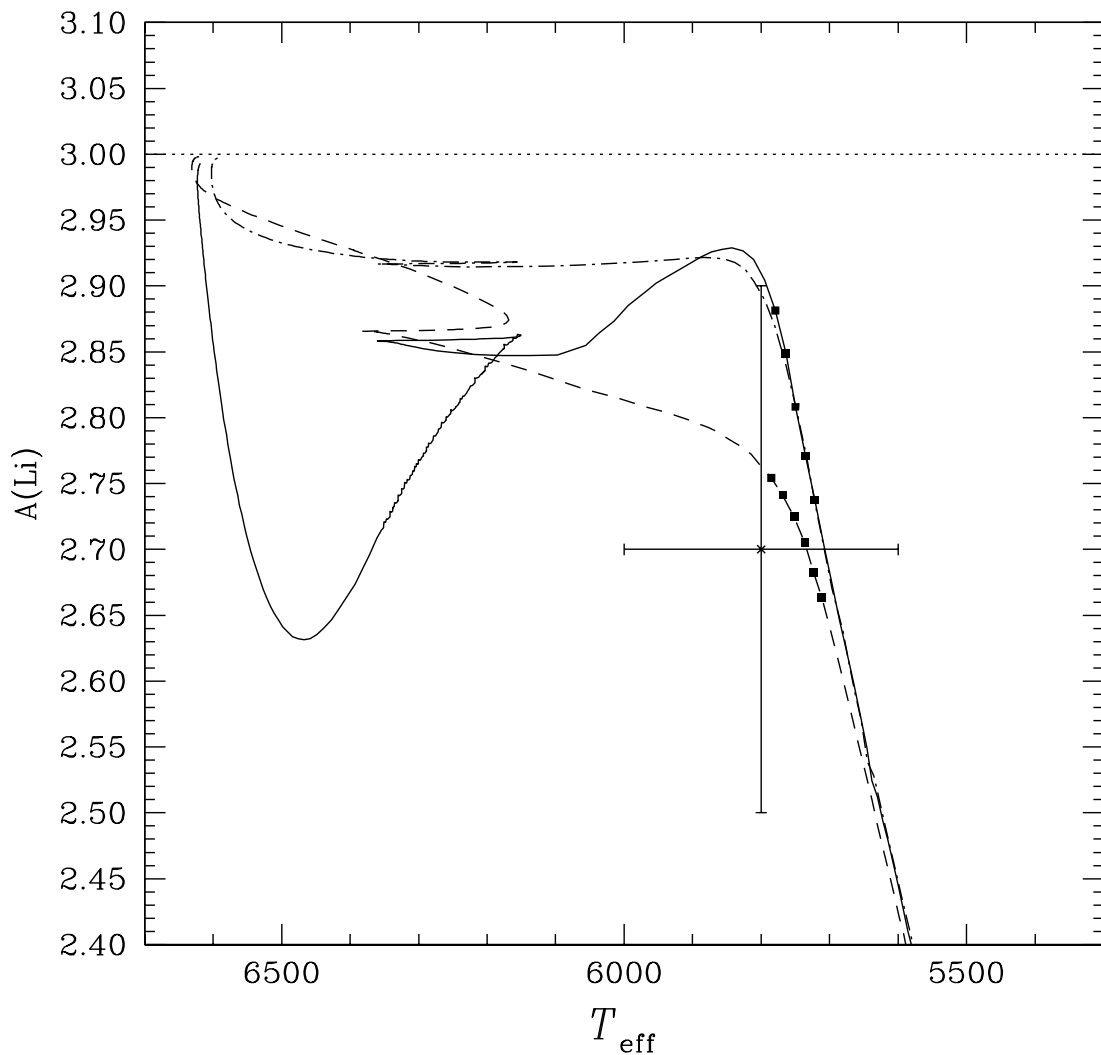


Figura 5.14: Evolução de A_{Li} para três modelos estelares de $1,33 M_{\odot}$. A linha pontilhada representa a evolução para um A_{Li} inicial, de 3,0 no início da seqüência principal, onde a destruição do Li na Pré-Seqüência Principal não foi considerada. As três curvas diferentes correspondem a diferentes modelos, levando em consideração a difusão atômica (linha sólida) e duas diferentes parametrizações de mistura (linhas tracejadas e ponto-tracejadas). Para uma descrição dos modelos, ver Richard et al. (2002). Os pontos pretos representam as abundâncias superficiais de Li previstas pelos modelos de 3,6 e 3,9 Giga-anos. A estrela S1242 está representada por uma cruz (x) e as barras de erro para a temperatura (100 K) e A_{Li} (0,13 dex). (Canto Martins et al. 2006)

observado para o índice de atividade cromosférica.

A figura (5.15) apresenta o diagrama cor-magnitude de M67. As estrelas que compõem nossa amostra, representadas por círculos, assim como as estrelas de Melo et al. (2001), representadas por triângulos, e as de Pace & Pasquini (2004), representadas por quadrados, estão mostradas nesta figura, onde o tamanho dos símbolos são proporcionais ao valor de $v \sin i$. Podemos observar, nesta figura, que nossas medidas de velocidade rotacional apresentam um comportamento bastante regular, dependendo da posição da estrela no diagrama CM, similar ao encontrado por Melo et al. (2001). Desta forma, os dados de velocidade rotacional para estrelas evoluídas de M67 presentes nesta Tese, além de confirmarem os resultados obtidos por Melo et al. (2001), também ampliam estatisticamente a amostra de estrelas evoluídas de M67 com rotações, sendo um importante complemento para estudos dedicados especialmente à evolução do *momentum* angular nesse laboratório estelar.

A figura (5.16) mostra a distribuição da velocidade rotacional média de estrelas do campo próximas à vizinhança solar, comparada com a velocidade rotacional média para estrelas anãs simples pertencentes aos aglomerados abertos Hyades, Praesepe, IC 4651, NGC 3680 e M67 (de Freitas et al. 2007, e referências contidas). A velocidade rotacional do Sol, $v \sin i = 2,2 \text{ km s}^{-1}$, também é representada na figura. Na Tab. (5.3), apresentamos os valores médios da velocidade rotacional para as estrelas de M67 de Melo et al. (2001), assim como para as estrelas de nossa amostra, de onde se observa um acordo, dentro do desvio padrão, entre as duas amostras.

Como citado anteriormente, Pace & Pasquini (2004) verificaram que a velocidade rotacional média para diferentes aglomerados diminui com o aumento da idade. Podemos observar na Fig. (5.16) que isto é verdade tanto para as estrelas do campo como para os aglomerados abertos, com a diferença de que as velocidades rotacionais médias para as estrelas do campo, a uma determinada idade, são significativamente mais elevadas do que para os aglomerados abertos (de Freitas et al. 2007). Como o aglomerado M67 é o mais velho entre aqueles analisados por Pace & Pasquini (2004), espera-se que a rotação média

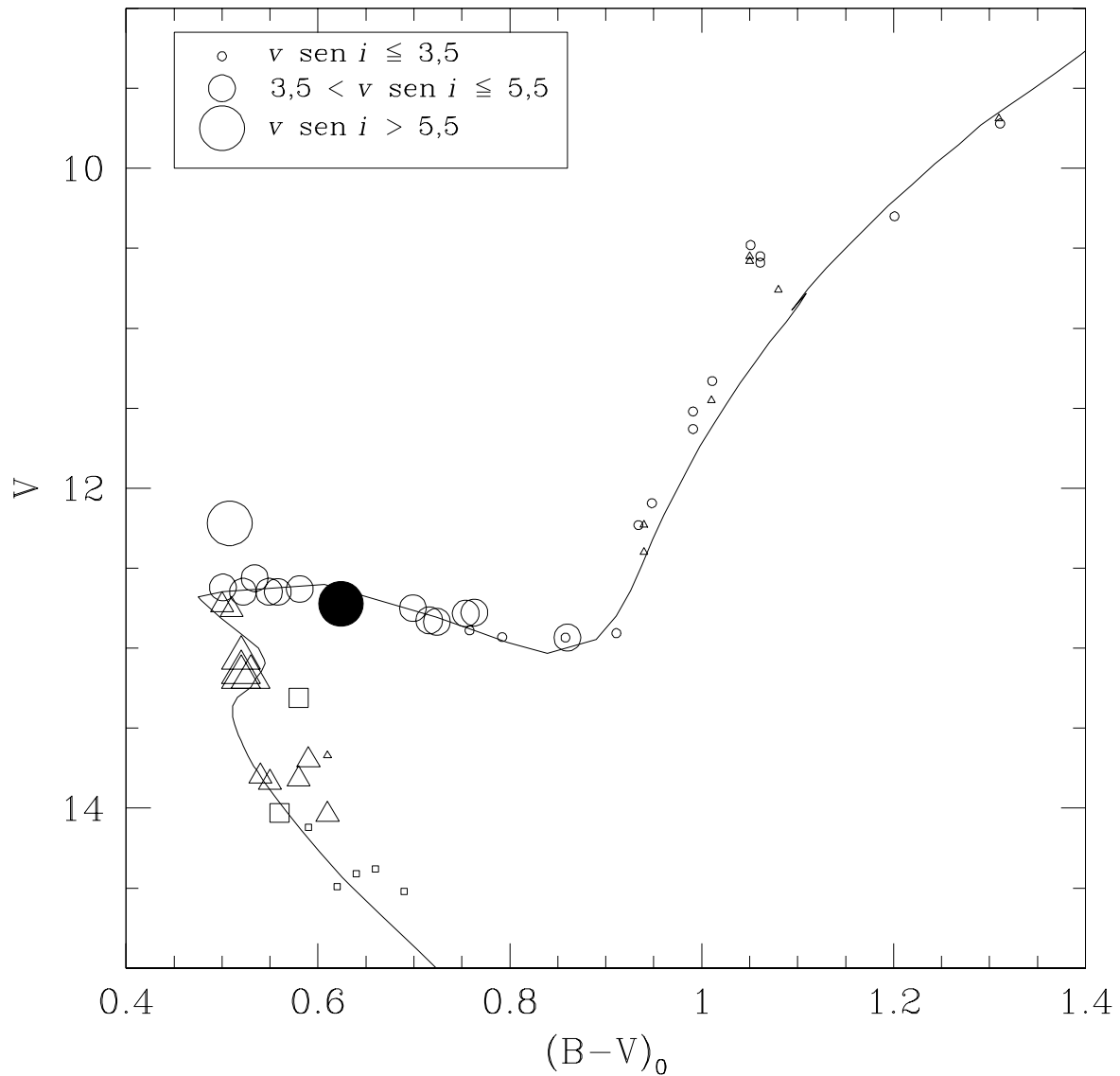


Figura 5.15: Diagrama CM para as estrelas de M67 observadas por diferentes trabalhos. As estrelas do presente trabalho estão representadas por círculos; já as estrelas de Melo et al. (2001) são os triângulos e as estrelas estudadas por Pace & Pasquini (2004) estão representadas por quadrados. Os tamanhos dos símbolos representam diferentes intervalos de velocidade rotacional. A estrela S1242, única estrela binária de nossa amostra, está representada por um círculo fechado.

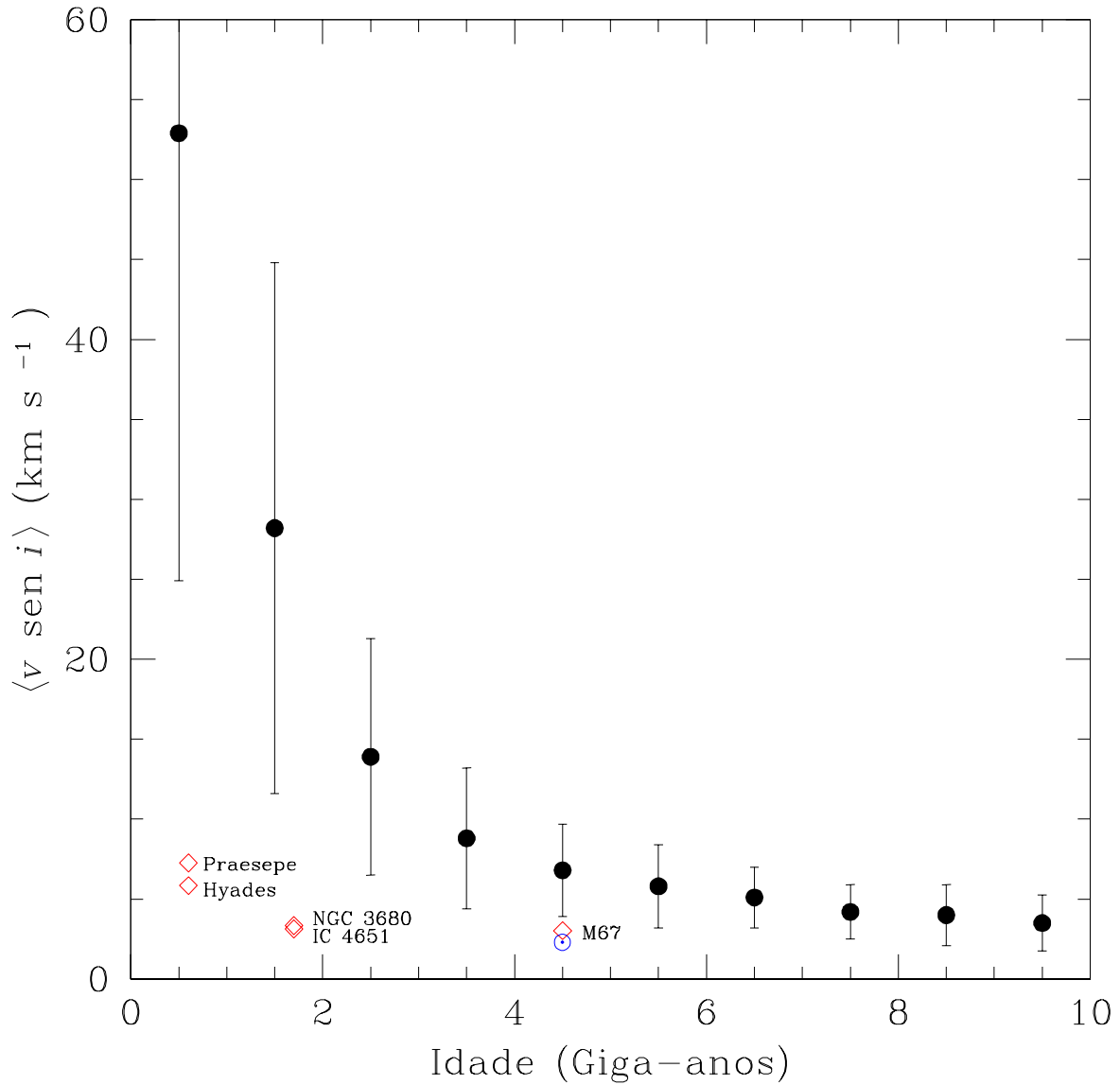


Figura 5.16: Distribuição da velocidade rotacional média $\langle v \sin i \rangle$ como função da idade para as estrelas simples de campo na vizinhança solar, representadas por círculos pretos (de Freitas et al. 2007), e para as estrelas em aglomerados abertos de Pace & Pasquini (2004), representadas pelos losangos abertos vermelhos. As barras de erro representam o espalhamento pico-a-pico na velocidade rotacional nas estrelas do campo, separadas por intervalos de 1 Giga-ano. A rotação do Sol está representada por \odot .

Tabela 5.3: Valores médios da velocidade rotacional para estrelas de M67 em diferentes estágios evolutivos para as estrelas de Melo et al. (2001) e as estrelas que compõem a nossa amostra.

Estágio evolutivo	$\langle v \text{ sen } i \rangle_{Melo}$ ($km \text{ s}^{-1}$)	$\langle v \text{ sen } i \rangle_{Nosso}$ ($km \text{ s}^{-1}$)
Seqüência Principal	4,02	–
<i>Turn-off</i>	5,9	5,1
Subgigantes	–	3,9
Gigantes	1,56	2,8

dessas estrelas seja menor do que as velocidades médias em aglomerados mais jovens. de Freitas et al. (2007) também mostraram que a conexão rotação–idade para estrelas do campo segue qualitativamente a mesma lei de decaimento apresentada pelas estrelas de aglomerados, tipicamente $v \text{ sen } i \propto (\text{idade})^{-\alpha}$, porém com um expoente α bastante diferente daqueles até então apresentados. Na realidade, tal expoente α depende fortemente da massa estelar, de forma que a relação $v \text{ sen } i \propto (\text{idade})^{-\alpha}$ não pode ser considerada como contínua ao longo da idade estelar. A Fig. (5.16) ilustra também o já estabelecido fato observacional de que estrelas do campo de tipo solar com a idade do Sol apresentam uma velocidade rotacional média cerca de 2 vezes superior à rotação solar.

5.3 Conexão lítio–idade *versus* rotação–idade

Face aos resultados da seção anterior, que mostram comportamentos distintos na conexão rotação–idade em estrelas de aglomerados abertos e estrelas do campo, devemos nos perguntar se tal aspecto é também observado na conexão lítio–idade. A Fig. (5.17) apresenta valores médios de abundância de Li em função da idade para estrelas de tipos espectrais F e G de campo e estrelas dos aglomerados NGC 2264, IC 2391, IC 2602, IC 4665, α Per, NGC 2451, Pleiades, Blanco 1, NGC 2516, M34, M35, NGC 6475, Hyades, Praesepe, Coma Ber, NGC 6633, NGC 752, NGC 3680, IC 4651, M67 e NGC 188.

As abundâncias para estrelas do campo com idades menores que 2 Giga-anos foram obtidas de Duncan (1981), enquanto que para idades superiores a 2 Giga-anos, foram obtidas de Chen et al. (2001). As abundâncias para os aglomerados foram obtidas de Sestito & Randich (2005). Para M67, em particular, são dados dois valores médios representados respectivamente por i (estrelas de Sestito & Randich (2005) da seqüência principal superior) e j (estrelas do presente trabalho do *turn-off* somadas às estrelas de Sestito & Randich 2005 da seqüência principal superior). As letras a , e e k indicam, respectivamente, os aglomerados NGC 2264, NGC 2516 e NGC 188; as letras b , c , d , f , g e h indicam, respectivamente, os aglomerados IC 2391/IC 2602/IC 4665, α Per/NGC 2451, Pleiades/Blanco 1, M34/M35/NGC 6475, Hyades/Praesepe/Coma Ber/NGC 6633 e NGC 752/NGC 3680/IC 4651, onde aqui foi efetuada uma média para a abundância de Li em aglomerados localizados num mesmo intervalo de idade.

Levando em consideração o conjunto de aglomerados e somente estrelas localizadas na seqüência superior de M67, as estrelas do campo mostram uma tendência em seguir o mesmo comportamento dos aglomerados, ou seja um decrescimento exponencial das abundâncias médias de Li com a idade, pelo menos no intervalo de idades inferior a cerca de 2 Giga-anos e um comportamento relativamente constante, com um valor médio da abundância de Li $\langle A_{Li} \rangle$ em torno de 2,25, para idades superiores a cerca de 2 Giga-anos. Tal resultado segue então aquele encontrado por Sestito & Randich (2005) para o caso específico dos aglomerados estelares abertos. Apesar deste acordo, é importante sublinhar que o quadro para os aglomerados altera-se bastante se associarmos às estrelas da seqüência superior o conjunto de estrelas do *turn-off* de M67 do presente trabalho. Agora, claramente, a tendência é para que o decrescimento exponencial da abundância média de Li $\langle A_{Li} \rangle$ com o aumento da idade se estenda até cerca da idade solar. A partir desta idade, fica difícil definir um *plateau* em função de um único aglomerado. É importante também destacar que a abundância de Li solar é substancialmente mais baixa do que o valor médio observado para M67, assim como para estrelas do campo dentro do mesmo intervalo de idade.

Comparando agora o comportamento das conexões lítio–idade *versus* rotação–idade, nos deparamos com um fato de grande relevância: para idades inferiores a cerca de 2 Giga-anos, velocidades rotacionais e abundância de Li exibem um mesmo comportamento qualitativo com um decrescimento exponencial do tipo $v \text{ sen } i \propto (\text{idade})^{-\alpha}$ e $A_{Li} \propto (\text{idade})^{-\beta}$, respectivamente. Os dados atuais permitem uma determinação dos parâmetros α e β . Para o lítio o melhor ajuste dos dados dá $\beta = 1/3$, considerando os dados das estrelas de aglomerados junto com as estrelas do campo, até 2,5 Giga-anos. Tal valor é substancialmente diferente daqueles encontrados por Skumanich (1972), Barry (1987) e Pace & Pasquini (2004), respectivamente $1/2$, $2/3$ e $1,47$, para a conexão rotação–idade. Este resultado indica que a velocidade rotacional média decresce mais rápido com a idade do que a abundância média de Li superficial. A Fig. (5.17) mostra ainda que ao longo de todo o intervalo de idade considerado, estrelas do campo e de aglomerado mostram uma tendência a seguirem a mesma relação lítio–idade, portanto bem diferente do comportamento da relação rotação–idade encontrado por de Freitas et al. (2007). Para idades superiores a 2 Giga-anos, o comportamento da abundância média de Li $\langle A_{Li} \rangle$ é aparentemente distinto daquele apresentado pela velocidade rotacional média $\langle v \text{ sen } i \rangle$. Enquanto este último parâmetro apresenta ainda um decrescimento, embora muito lento, com a idade, $\langle A_{Li} \rangle$ parece mostrar um comportamento particularmente constante, com $\langle A_{Li} \rangle \sim 2,25$. Na realidade, no contexto da conexão rotação–idade, de Freitas et al. (2007) já haviam mostrado que as leis de decaimento propostas por Skumanich (1972), Barry (1987) e Pace & Pasquini (2004) não se ajustam à distribuição da velocidade rotacional com a idade para estrelas do campo.

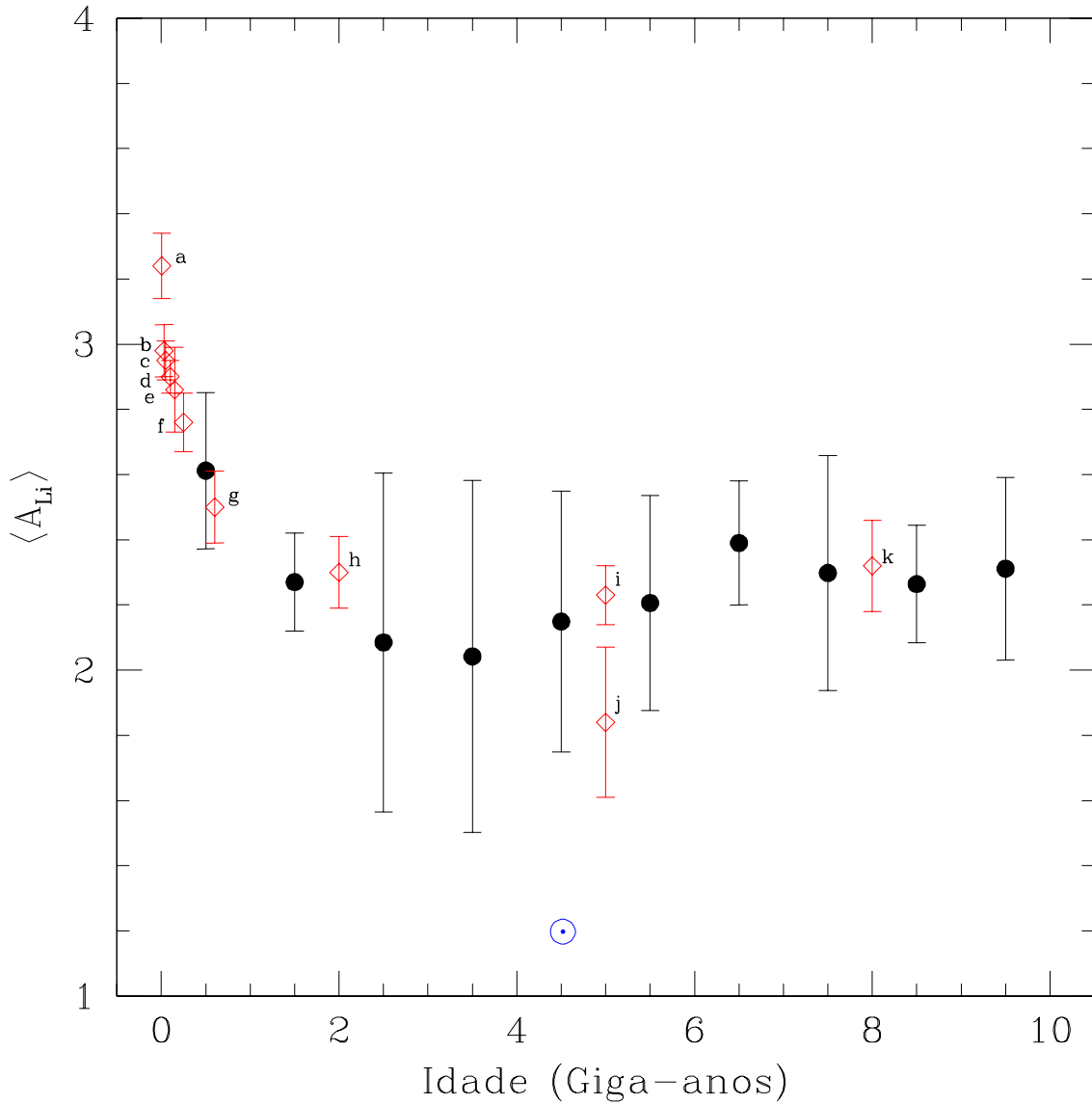


Figura 5.17: Distribuição da abundância média de Li $\langle A_{Li} \rangle$ como função da idade para as estrelas simples de campo, representadas por círculos pretos (Duncan 1981; Chen et al. 2001), e para as estrelas em aglomerados abertos de Sestito & Randich (2005), representadas pelos losangos abertos vermelhos. As letras indicam os aglomerados (ver texto). As barras de erro representam o desvio padrão na abundância de Li, tanto para as estrelas do campo quanto para as estrelas dos aglomerados. As estrelas do campo estão separadas separadas por intervalos de 1 Giga-ano. Os valores do Sol estão representados por \odot .

Conclusões e Perspectivas

Este trabalho confirma que é possível determinar abundâncias com alta precisão a partir de uma seleção cuidadosa de uma lista de linhas em combinação com a técnica baseada na síntese espectral. Uma consequência direta dos resultados obtidos é que foi possível extrair várias conclusões e algumas idéias para trabalhos futuros neste campo, que serão sintetizadas neste capítulo.

6.1 Conclusões

Apresentamos uma análise espectroscópica detalhada de 28 estrelas evoluídas com diferentes estágios evolutivos (estrelas subgigantes do *turn-off*, subgigantes e gigantes) do aglomerado estelar M67, a partir de observações feitas em alta resolução e alto S/N usando o espectrógrafo UVES+FLAMES no VLT/U2 (ESO, Chile). Usando o Sol e Arcturus como estrelas de referência, determinamos os valores dos parâmetros atmosféricos e da metalicidade para as estrelas de nossa amostra a partir de análises em ETL para a região do espectro entre 420–1100 nm. A abundância de Li foi obtida a partir da linha do lítio em 6707,78 Å.

No que diz respeito à natureza do lítio, analisamos o comportamento da abundância do Li em função da temperatura efetiva para as estrelas de M67, levando também em consideração estrelas da seqüência principal observadas por Jones et al. (1999) e Randich et al. (2002). Constatamos que a dispersão observada nas estrelas da seqüência principal também está presente para as nossas estrelas evoluídas, com um gradual de-

crescimento com a temperatura. Este resultado é compatível com aquele apresentado por Balachandran (1995) e Pilachowski et al. (1988), embora estes autores tenham determinado basicamente limites superiores para A_{Li} .

O decrescimento gradual da abundância de Li com a temperatura, para as estrelas de M67 seguem qualitativamente aquele observado por autores diversos para as estrelas evoluídas de campo (Brown et al 1989; de Medeiros et al. 1997; Lèbre et al. 1999; do Nascimento et al. 2000; de Medeiros et al. 2000; Costa et al. 2002). No entanto, observamos que a diluição do Li em estrelas de M67 se apresenta de forma mais acentuada do que nas estrelas do campo, indicando um processo de mistura mais eficiente em estrelas de M67 do que em estrelas do campo. As estrelas evoluídas de M67 possuem um fator de diluição muito superior ao previsto por Iben (1967a,b). Encontramos que, para estrelas gigantes de M67, com temperaturas efetivas em torno de 4350 K, o fator de diluição é maior do que 2300 vezes em relação à abundância inicial, $A_{Li}=3,0$, muito superior, portanto, ao previsto pela teoria padrão de evolução estelar para uma estrela de campo com massa $1,25 M_{\odot}$.

Analizamos a relação entre abundância de Li e velocidade rotacional tanto para as estrelas de M67, como para as estrelas evoluídas de campo. Observamos que as estrelas de M67, para uma dada abundância de Li, apresentam uma dispersão nos valores de velocidade rotacional menor do que em comparação com as estrelas do campo. Também observamos a tendência para uma correlação entre estes dois parâmetros em estrelas de M67 de forma mais clara e mais acentuada que para as estrelas de campo. Analizamos também como diferentes parâmetros estelares, tais como metalicidade, massa e idade, poderiam influenciar tal relação. Observamos que mesmo refinando a metalicidade das estrelas do campo, fazendo com que elas se aproximem da metalicidade de M67, a relação abundância de Li *versus* velocidade rotacional continua apresentando uma grande dispersão, muito maior do que para as estrelas de M67. Em relação à massa, apesar de observamos uma dispersão no espectro de massa das estrelas do campo, verificamos que estrelas com massas próximas às massas das estrelas de M67 ($\sim 1,3M_{\odot}$) apresentam uma tendência mais acentuada para uma correlação entre abundância de Li e a velocidade ro-

tacional. Com relação à idade, observamos que, exceto por um objeto (HD 197373), todas as estrelas do campo com idades em torno da idade de M67 seguem a mesma tendência apresentada por M67, parecendo indicar que a relação abundância de Li *versus* velocidade rotacional em estrelas do campo e em M67 relacionam-se por uma mesma lei. Tais resultados indicam que a massa estelar e a idade influenciam fortemente a relação abundância de Li *versus* velocidade rotacional.

Descobrimos, dentre as estrelas de nossa amostra, uma estrela subgigante, rica em Li, S1242, membro de um sistema binário com excentricidade $e = 0,66$ e período orbital $P_{orb} = 31,8$ dias. A abundância superficial de Li determinada para esta estrela é $A_{Li} = 2,7 \pm 0,13$ dex, sendo a mais elevada abundância de Li até hoje medida entre as estrelas evoluídas de M67. Sugerimos dois processos físicos que podem explicar este conteúdo anômalo de Li: (i) preservação da abundância de Li no estágio pós-*turn-off* devido a efeitos de maré gravitacional, mostrando que, em particular, a teoria proposta por Zahn (1994) se aplica a esta estrela, e (ii) uma dragagem eficiente do Li presente nas camadas abaixo da zona convectiva através de difusão atômica em estágios pós-*turn-off*.

Estudamos também a evolução do momentum angular em estrelas evoluídas de M67. Observamos que nossas medidas de velocidade rotacional apresentam um comportamento bastante regular, dependendo da posição da estrela no diagrama CM, similar ao encontrado por Melo et al. (2001). Observamos também um ótimo acordo entre os valores médios de velocidade rotacional, para estágios evolutivos distintos, entre as estrelas de M67 analisadas por Melo et al. (2001) e as estrelas presentes neste trabalho. Tais resultados, não somente confirmam os resultados de Melo et al. (2001) como também ampliam a amostra de estrelas de M67 com valores de velocidade rotacional medidos.

Por fim, analisamos o comportamento da distribuição da abundância de Li em função da idade e observamos que esta distribuição, para estrelas do campo, mostra uma tendência de forma a seguir o mesmo comportamento apresentado para os aglomerados abertos. Podemos descrever tal comportamento como um decrescimento exponencial da abundância média de Li com a idade da forma $\langle A_{Li} \rangle \propto (idade)^{-\beta}$, para idades menores

do que cerca de 2,5 Giga-anos. Após esta idade, a abundância média de Li se comporta de forma aparentemente constante, com um valor médio em torno de 2,25 *dex*, similar ao resultado encontrado somente para os aglomerados por Sestito & Randich (2005). Este resultado é alterado quando adicionamos estrelas do *turn-off* de M67 analisadas nesta Tese. Esta adição faz com que o decaimento exponencial se estenda até idades em torno da idade do Sol ($\sim 4,5$ Giga-anos). Observamos também que a abundância de Li solar é significativamente mais baixa do que o valor médio para as estrelas de M67, assim como para as estrelas do campo no mesmo intervalo de idade.

Comparamos também as conexões lítio–idade e rotação–idade e observamos que um mesmo comportamento qualitativo é apresentado para idades inferiores à 2 Giga-anos, tanto para a velocidade rotacional quanto para a abundância de Li. Ambas as conexões apresentam um decaimento exponencial do tipo $v \sin i \propto (\text{idade})^{-\alpha}$ e $A_{Li} \propto (\text{idade})^{-\beta}$. No caso do Li, encontramos a partir do melhor ajuste, tanto para dados de aglomerados quanto para as estrelas do campo com idades até 2,5 Giga-anos, um valor de $\beta = 1/3$. Tal valor é substancialmente diferente daqueles encontrados por Skumanich (1972), Barry (1987) e Pace & Pasquini (2004) para a conexão rotação–idade. Também observamos que para idades superiores à 2 Giga-anos, o comportamento da abundância média de Li se apresenta de forma aparentemente constante, em torno de $\langle A_{Li} \rangle \sim 2,25$, enquanto que a velocidade rotacional média apresenta um lento decaimento com a idade.

6.2 Perspectivas

Diversas perspectivas se abrem a partir dos resultados apresentados nesta Tese. Listamos abaixo aquelas consideradas mais relevantes:

- Ampliar o espectro de tipos evolutivos de estrelas de M67 para aumentar a base de dados de abundância de Li e velocidade rotacional, em particular com a inclusão de estrelas *Blue-Stargglers*. Tal trabalho poderia, antes de tudo, servir para solidificar e ampliar os resultados apresentados nesta Tese.
- Efetuar o mesmo estudo observacional para outros elementos leves, tais como o berílio e o boro e suas relações com o próprio comportamento do Li e da rotação

em estrelas evoluídas de M67. Um estudo deste tipo é fundamental para melhor explicar a teoria de mistura em estrelas evoluídas do aglomerado aberto M67, assim como para aumentar o nosso conhecimento sobre a nucleossíntese estelar, uma vez que Be e B queimam a temperaturas superiores àquela do Li.

- A determinação de abundâncias químicas de outros elementos, tais como o C, N, O e outras espécies químicas em torno do pico do ferro, e também elementos dos processos *s* e *r*, irá nos auxiliar na detecção de anomalias nas abundâncias destes elementos. Este estudo poderia confirmar os processos de difusão atômica no interior das estrelas de M67, além de verificar de forma mais precisa os efeitos da rotação sobre tais abundâncias.
- Ampliar também o número de aglomerados estelares abertos, com diferentes idades, massas e metalicidades, para verificarmos mais solidamente qual o papel real desses parâmetros sobre os processos de diluição do Li.
- Efetuar um estudo mais amplo sobre as conexões rotação–idade e lítio–idade, aumentando o número de aglomerados com idades superiores à solar e de estrelas do campo mais jovens do que o Sol.

Apêndice A

Parâmetros fundamentais

Apresentamos na Tabela (A.1) a lista de linhas de Fe I e Fe II utilizadas na determinação dos parâmetros atmosféricos da nossa amostra de estrelas. A legenda da Tabela (A.1) tem o seguinte significado:

- Elemento: indica qual elemento (Fe I ou Fe II);
- $\lambda(\text{\AA})$: Comprimento de onda, dado em angstroms;
- χ_{exc} : o potencial de excitação;
- $\log gf$: força de oscilador;
- $LE_{\odot}(m\text{\AA})$: largura equivalente medida para o Sol;
- $LE_{Arcturus}(m\text{\AA})$: largura equivalente medida para Arcturus;

Tabela A.1: Parâmetros atômicos e medidas da largura equivalente do Sol e de Arcturus para as linhas de Fe I e Fe II usadas na análise espectral.

Elemento	$\lambda(\text{\AA})$	χ_{exc}	$\log gf$	$LE_{\odot}(\text{m\AA})$	$LE_{Arc}(\text{m\AA})$
Fe I	5036,919	3,017	-2,938	24,3	64,8
Fe I	5044,211	2,851	-2,128	70,3	117,8
Fe I	5054,643	3,640	-2,051	38,7	65,0
Fe I	5228,377	4,220	-1,115	57,5	83,8
Fe I	5242,493	3,634	-1,007	81,2	112,8
Fe I	5247,051	0,087	-4,936	66,0	175,6
Fe I	5321,108	4,434	-1,301	40,0	59,2
Fe I	5322,041	2,279	-2,953	60,7	115,1
Fe I	5326,143	3,573	-2,211	35,8	69,9
Fe I	5373,709	4,473	-0,830	60,7	76,9
Fe I	5386,330	4,154	-1,740	31,1	51,3
Fe I	5522,444	4,209	-1,450	43,4	62,0
Fe I	5543,936	4,217	-1,080	62,0	81,8
Fe I	5618,633	4,209	-1,316	50,5	69,5
Fe I	5638,262	4,220	-0,810	75,1	97,3
Fe I	5701,547	2,559	-2,276	82,3	142,4
Fe I	5705,465	4,301	-1,492	38,4	57,8
Fe I	5741,848	4,256	-1,674	32,0	51,5
Fe I	5775,081	4,220	-1,188	59,2	81,1
Fe I	5778,453	2,588	-3,510	23,0	73,0
Fe I	5806,725	4,607	-0,975	52,0	68,1
Fe I	5811,914	4,143	-2,390	10,7	23,5
Fe I	5852,219	4,548	-1,260	39,4	
Fe I	5853,148	1,485	-5,200	7,3	62,8
Fe I	5855,077	4,608	-1,583	21,5	34,1
Fe I	5856,088	4,294	-1,615	33,5	54,5
Fe I	5858,778	4,220	-2,245	12,6	27,2
Fe I	5916,247	2,453	-2,994	55,2	112,9

Elemento	$\lambda(\text{\AA})$	χ_{exc}	$\log gf$	$LE_{\odot}(\text{m\AA})$	$LE_{Arc}(\text{m\AA})$
Fe I	5927,789	4,652	-1,105	41,7	54,1
Fe I	5934,657	3,928	-1,225	71,9	101,8
Fe I	5956,694	0,859	-4,630	52,5	148,9
Fe I	5976,777	3,943	-1,365	65,0	101,8
Fe I	5987,066	4,795	-0,556	64,1	79,2
Fe I	6003,014	3,881	-1,140	79,5	107,8
Fe I	6019,362	3,573	-3,280	5,2	17,8
Fe I	6027,051	4,076	-1,190	9,4	89,2
Fe I	6054,070	4,371	-2,245	9,4	17,9
Fe I	6056,005	4,733	-0,490	69,7	81,7
Fe I	6079,009	4,652	-1,050	45,7	
Fe I	6105,128	4,548	-2,000	11,1	21,2
Fe I	6120,249	0,915	-5,910	5,3	66,7
Fe I	6151,618	2,176	-3,359	50,6	113,9
Fe I	6157,728	4,076	-1,270	61,7	92,7
Fe I	6159,373	4,607	-1,920	12,0	
Fe I	6165,358	4,143	-1,535	44,9	66,9
Fe I	6180,204	2,727	-2,736	54,7	108,5
Fe I	6187,988	3,943	-1,735	46,3	74,2
Fe I	6226,736	3,883	-2,145	28,1	
Fe I	6229,226	2,845	-2,970	37,2	86,0
Fe I	6240,646	2,223	-3,353	48,9	
Fe I	6265,136	2,176	-2,700	83,2	160,2
Fe I	6270,225	2,858	-2,670	51,9	102,2
Fe I	6271,277	3,332	-2,776	23,4	58,3
Fe I	6297,795	2,223	-2,871	73,4	143,3
Fe I	6315,809	4,076	-1,683	40,9	66,9
Fe I	6380,743	4,186	-1,396	50,6	
Fe I	6392,539	2,279	-3,990	17,5	

Elemento	$\lambda(\text{\AA})$	χ_{exc}	$\log gf$	$LE_{\odot}(\text{m\AA})$	$LE_{Arc}(\text{m\AA})$
Fe I	6498,939	0,958	-4,701	46,1	144,3
Fe I	6574,228	0,990	-4,940	33,1	125,7
Fe I	6575,018	2,588	-2,765	64,6	
Fe I	6581,208	1,485	-4,730	20,2	97,5
Fe I	6608,026	2,279	-4,010	17,3	74,5
Fe I	6627,543	4,548	-1,560	27,2	42,1
Fe I	6646,932	2,608	-4,015	9,3	50,0
Fe I	6653,851	4,154	-2,470	9,9	23,6
Fe I	6699,140	4,593	-2,179	8,3	15,2
Fe I	6703,568	2,758	-3,080	38,5	89,5
Fe I	6704,480	4,217	-2,650	6,4	14,0
Fe I	6705,102	4,607	-1,136	46,3	61,0
Fe I	6707,420	4,610	-2,245	6,3	
Fe I	6710,318	1,485	-4,865	16,3	89,2
Fe I	6713,045	4,607	-1,553	24,2	
Fe I	6713,190	4,143	-2,475	10,2	21,3
Fe I	6713,740	4,795	-1,465	21,4	28,4
Fe I	6715,382	4,607	-1,535	26,5	
Fe I	6716,233	4,580	-1,875	15,3	
Fe I	6725,357	4,103	-2,250	17,7	35,4
Fe I	6726,665	4,607	-1,129	47,1	59,9
Fe I	6733,149	4,638	-1,485	26,9	38,2
Fe I	6739,520	1,557	-4,929	12,4	76,9
Fe I	6752,705	4,638	-1,314	35,7	54,7
Fe I	6786,858	4,191	-1,950	25,3	44,7
Fe I	6806,845	2,727	-3,167	35,2	89,7
Fe I	6810,261	4,607	-1,068	49,0	65,1
Fe I	6971,932	3,018	-3,475	12,8	47,4
Fe I	7112,167	2,990	-3,035	31,6	31,6
Fe I	7189,150	3,071	-2,761	36,5	36,5

Elemento	$\lambda(\text{\AA})$	χ_{exc}	$\log gf$	$LE_{\odot}(\text{m\AA})$	$LE_{Arc}(\text{m\AA})$
Fe I	7401,680	4,186	-1,625	39,9	39,9
Fe I	7710,362	4,220	-1,231	62,2	62,2
Fe I	7723,204	2,279	-3,542	37,8	37,8
Fe I	7941,087	3,274	-2,550	41,9	41,9
Fe II	4993,354	2,807	-3,772	38,0	
Fe II	5100,627	2,807	-4,260	17,3	37,4
Fe II	5132,664	2,807	-4,130	21,5	16,8
Fe II	5136,794	2,844	-4,440	10,0	
Fe II	5197,570	3,230	-2,450	74,5	71,1
Fe II	5234,625	3,221	-2,390	78,3	78,8
Fe II	5264,805	3,230	-3,205	44,9	38,8
Fe II	5325,553	3,221	-3,310	42,0	38,6
Fe II	5414,070	3,221	-3,677	25,5	22,5
Fe II	6084,103	3,199	-3,808	20,3	20,9
Fe II	6369,458	2,891	-4,253	18,1	19,2
Fe II	6416,923	3,892	-2,790	38,1	35,4
Fe II	6456,383	3,903	-2,075	60,6	46,7
Fe II	7224,475	3,889	-3,317	19,1	19,1

Apêndice B

Medidas de largura equivalente

Apresentamos nas Tabelas (B.1), (B.2), (B.3) e (B.4), as medidas de largura equivalente para as estrelas de nossa amostra. A descrição dos cálculos das larguras equivalentes é feita na seção 4.2.1.

Tabela B.1: Medidas das larguras equivalentes para as estrelas evoluídas de M67 analisadas neste trabalho.

Elemento	λ (Å)	S1607	S1273	S1268	S1275	S1034	S2207	S1487	S1242
Fe I	5036,919	19,2	20,4	22,3	22,2	24,4	25,5	24,8	27,5
Fe I	5044,211	64,1	63,3	66,9	66,7	70,6	71,9	72,3	75,6
Fe I	5054,643	26,1	24,7	28,8	29,6	30,8	32,9	34,3	36,3
Fe I	5228,377	53,9	59,2	54,5	56,9	61,3	60,2	60,7	62,4
Fe I	5242,493	81,5	82,4	80,8	88,6	87,2	87,4	88,1	88,4
Fe I	5247,051	49,6	52,3	57,7	55,6	62,0	61,1	65,4	72,2
Fe I	5321,108	32,0	33,6	34,0	35,6	37,8	37,5	39,0	43,7
Fe I	5322,041	48,9	50,4	54,1	52,9	57,4	57,0	60,0	64,6
Fe I	5326,143	25,9	26,5	28,3	31,0	31,2	32,2	32,6	41,2
Fe I	5373,709	56,4	55,3	56,4	55,8	59,8	59,3	62,9	63,7
Fe I	5386,330	21,6	22,9	24,0	24,4	26,9	28,4	29,4	29,4
Fe I	5522,444	31,7	33,4	33,0	33,3	35,9	37,1	37,9	39,3
Fe I	5543,936	54,0	54,2	55,5	56,6	59,9	60,8	61,2	62,7
Fe I	5618,633	38,0	41,4	41,1	42,6	45,3	45,8	46,7	49,1
Fe I	5638,262	66,9	68,0	69,4	71,3	72,4	72,3	73,4	75,1
Fe I	5701,547	75,5	76,6	76,6	78,0	82,9	81,2	83,2	86,6
Fe I	5705,465	29,3	30,9	29,3	32,0	34,2	36,5	35,4	39,6
Fe I	5741,848	22,8	23,1	24,8	28,8	28,8	25,0	28,5	31,9
Fe I	5775,081			0,0					
Fe I	5778,453			0,0					
Fe I	5806,725			0,0					
Fe I	5811,914			0,0					
Fe I	5852,219	29,9	30,1	33,9	34,0	36,0	36,5	39,5	43,2
Fe I	5853,148	7,2		0,0			8,1		11,0
Fe I	5855,077	17,7	16,2	19,6	19,4	19,4	19,8	19,4	22,6
Fe I	5856,088	27,1	24,6	28,9	28,7	27,0	30,0	32,0	37,5
Fe I	5858,778	12,1		10,2		8,7	13,4	12,6	13,7
Fe I	5916,247	36,0	35,5	42,8	43,2	45,6	45,6	49,6	54,9

Elemento	λ (Å)	S1607	S1273	S1268	S1275	S1034	S2207	S1487	S1242
Fe I	5927,789	31,5	36,7	35,8	37,3		37,3	38,2	43,5
Fe I	5934,657	60,4	62,4	63,3	64,2	67,3	67,1	68,9	72,1
Fe I	5956,694	28,5	28,0	34,1	33,1	36,7	38,7	40,9	47,6
Fe I	5969,562			0,0					
Fe I	5976,777	54,3	54,7	56,9	57,2	60,1	59,7	62,8	64,2
Fe I	5987,066	54,4	58,4	57,9	58,7	61,9	61,3	63,5	65,1
Fe I	6003,014	69,2	70,1	69,1	70,3	74,5	75,8	76,3	78,1
Fe I	6019,362			0,0					
Fe I	6027,051	56,8	54,5	57,8	58,5	61,9	63,5	63,4	64,1
Fe I	6054,070	8,4		0,0	7,4				8,8
Fe I	6056,005	17,6	71,1	70,4	67,3	70,6	70,2	70,0	74,9
Fe I	6079,009	33,1	34,0	35,0	36,5	36,3	38,5	40,8	43,3
Fe I	6105,128	9,6	8,5	0,0	8,8	7,4	9,5		11,6
Fe I	6120,249			0,0					
Fe I	6151,618	33,2	32,7	38,7	36,9	39,2	41,4	44,5	48,6
Fe I	6157,728	50,3	52,6	54,3	53,9	56,7	56,7	58,2	61,0
Fe I	6159,373	7,2	7,9	8,2	9,2	8,2	8,0	9,1	11,8
Fe I	6165,358	34,8	32,4	35,8	38,0	41,1	38,4	42,3	43,7
Fe I	6180,204	38,2	41,7	0,0	46,1	49,9	47,7	50,9	56,6
Fe I	6187,988	32,9	34,1	35,2	35,4	39,1	39,1	39,0	43,8
Fe I	6226,736	17,0	18,7	18,8	20,0	21,4	22,5	23,3	27,1
Fe I	6229,226	24,3	25,1	0,0		28,0			36,7
Fe I	6240,646	30,8	32,3	34,4	37,0	37,1	39,4	41,6	48,0
Fe I	6265,136	75,0	72,1	75,9	76,9	79,9	78,5	82,0	85,0
Fe I	6270,225	35,7	41,0	38,4	40,1	43,8	45,0	46,8	48,9
Fe I	6271,277		14,4	13,9	16,6	17,6			
Fe I	6297,795	71,3	84,9	0,0		87,3	77,9	79,6	
Fe I	6315,809	29,5	34,7	33,1	32,9	36,9	35,9	37,1	40,5
Fe I	6380,743	39,2	41,9	43,3	42,2	45,3	46,3	48,5	49,2
Fe I	6392,539		8,7	7,6				11,9	13,7

Elemento	λ (Å)	S1607	S1273	S1268	S1275	S1034	S2207	S1487	S1242
Fe I	6498,939	24,6	24,4	28,4	29,6	31,4	32,9	38,4	44,8
Fe I	6574,228	26,9	44,3	33,7	37,0	46,2	29,6	33,0	46,2
Fe I	6575,018	52,2	48,0	53,5	54,2	55,9	58,2	60,0	70,9
Fe I	6581,208	15,3	14,9	14,9	16,7	14,4		19,0	19,3
Fe I	6591,313		6,1	6,3	5,5	5,7	5,8	8,4	8,6
Fe I	6608,026		6,0	7,0	8,6	8,6	10,3	11,0	12,1
Fe I	6627,543	15,9	16,1	17,5	18,3	18,2	19,3	21,0	23,7
Fe I	6646,932			6,1	6,7		5,8	6,7	9,8
Fe I	6653,851		6,2	10,7	6,4	5,4	5,9		
Fe I	6699,140			0,0			6,5		
Fe I	6703,568	18,3	19,2	22,4	24,1	24,0	28,5	27,5	31,2
Fe I	6704,480			0,0					
Fe I	6705,102	31,2	31,7	33,5	34,1	34,3	36,6	38,0	39,3
Fe I	6707,420		5,5	5,7					
Fe I	6710,318	6,0	5,6	8,2	8,4	7,0	9,3	8,6	12,1
Fe I	6713,080	18,1	17,0	22,4	18,4	20,2	19,8	21,7	
Fe I	6713,190			0,0					
Fe I	6713,740	12,8	11,7	12,9	13,5	13,8	16,1	14,3	
Fe I	6715,382	15,0	16,3	17,0	18,9	18,8	20,2	21,7	20,9
Fe I	6716,233	9,2	7,7	9,5	9,6	10,4		11,5	12,0
Fe I	6725,357	9,2		0,0			10,8		
Fe I	6726,665	31,7		0,0			38,1	39,4	
Fe I	6733,149	16,1	16,6	17,1	17,2	26,7		19,5	24,3
Fe I	6739,520		6,2	0,0	10,7			6,0	12,0
Fe I	6752,705	25,2	26,5	24,1	31,8	26,3	29,6	28,7	34,1
Fe I	6786,858	17,5	22,2	22,4	19,9	19,6	19,3	24,6	26,0
Fe I	6806,845		20,7	0,0	29,4				43,7
Fe I	6810,261		35,8	0,0	45,5	44,6			59,5
Fe I	6971,932			6,9	6,5	6,1			9,3
Fe I	7189,150		26,7	28,8	30,3	34,5			42,4

Elemento	λ (Å)	S1607	S1273	S1268	S1275	S1034	S2207	S1487	S1242
Fe I	7401,680		33,5	31,3	33,0	33,2			42,2
Fe I	7710,362		49,8	58,0	56,0	57,9			65,5
Fe I	7723,204		33,4	30,3	29,9	33,8			39,5
Fe I	7941,087		27,6	36,5	39,3	40,2			46,7
Fe II	4993,354	55,6	48,4	51,1	51,1	51,1	53,9	52,7	45,9
Fe II	5100,627			0,0					
Fe II	5132,664	33,7	31,5	33,3	31,3	35,8	35,9	34,6	31,3
Fe II	5136,794	18,7	11,6	0,0		20,3			
Fe II	5197,570	102,2	101,7	99,5	99,3	102,4	101,0	99,4	97,1
Fe II	5234,625	106,5	108,2	105,0	104,0	108,4	105,7	106,6	106,3
Fe II	5264,805	68,1	69,6	66,7	65,4	67,3	66,5	66,8	61,4
Fe II	5325,553	63,9	64,7	63,1	62,0	64,5	63,2	63,6	59,3
Fe II	5414,070	39,7	40,2	41,6	40,7	42,9	42,2	42,5	37,9
Fe II	6084,103	30,9	30,2	30,0	29,6	33,2	31,3	30,6	27,8
Fe II	6369,458	25,3	28,0	27,6	26,6	30,8	31,0	29,4	25,4
Fe II	6416,923	49,3	46,1	48,1	48,5	49,3	48,5	49,2	44,2
Fe II	6456,383	81,8	85,0	79,8	80,5	83,4	79,1	81,6	77,6
Fe II	7224,475		33,5	34,3	31,3	34,0			31,3

Tabela B.2: Medidas das larguras equivalentes para as estrelas evoluídas de M67 analisadas neste trabalho.

Elemento	λ (Å)	S1239	S1323	S1000	S806	S1438	S2208	S774	S1231
Fe I	5036,919	34,6	35,2	37,5	37,0	34,4	38,7	36,8	42,8
Fe I	5044,211	82,7	83,7	81,2	85,6	84,4	86,0	87,2	92,6
Fe I	5054,643	45,8	49,1	49,0	51,9	50,1	51,4	52,2	57,2
Fe I	5228,377	71,1	72,9	69,7	77,2	71,5	71,8	72,5	75,9
Fe I	5242,493	94,6	94,0	88,8	95,4	95,2	95,2	94,5	97,4
Fe I	5247,051	84,1	87,5	85,3	93,2	91,8	92,7	97,2	106,2
Fe I	5321,108	49,2	50,9	51,6	55,3	52,5	49,5	52,3	57,5
Fe I	5322,041	74,8	75,9	76,6	79,9	77,9	79,5	80,0	88,3
Fe I	5326,143	46,2	48,5	49,8	56,0	52,4	51,4	55,3	63,2
Fe I	5373,709	70,0	68,2	67,2	73,8	71,4	70,6	71,0	75,8
Fe I	5386,330	39,4	39,4	40,5	44,6	43,8	41,3	43,3	47,5
Fe I	5522,444	49,0	49,7	49,5	54,5	51,9	51,0	52,6	56,2
Fe I	5543,936	69,8	71,7	68,5	73,9	72,7	73,0	72,9	77,8
Fe I	5618,633	57,7	58,7	57,5	61,8	58,8	59,9	60,5	64,0
Fe I	5638,262	83,8	85,7	84,0	88,1	86,6	88,1	87,5	91,9
Fe I	5701,547	96,6	97,0	98,2	101,7	101,0	101,1	104,4	110,8
Fe I	5705,465	46,5	49,0	48,7	51,7	50,8	51,0	50,8	55,9
Fe I	5741,848	39,2	39,7	44,0	52,8	43,1	44,5	45,7	47,8
Fe I	5775,081								
Fe I	5778,453								
Fe I	5806,725								
Fe I	5811,914								
Fe I	5852,219	47,2	47,6	49,9	55,4	51,6	50,6	54,7	60,5
Fe I	5853,148	13,9	13,1		20,8		20,0	27,3	32,1
Fe I	5855,077	27,6	27,8	30,8	34,8	29,4	30,0	33,9	37,2
Fe I	5856,088	41,3	40,0	45,0	49,7	46,1	44,0	48,4	54,8
Fe I	5858,778	16,5	19,2		23,2	21,1	19,9	25,3	25,9
Fe I	5916,247	63,4	65,7	65,8	74,1	71,0	70,1	75,7	80,7

Elemento	λ (Å)	S1239	S1323	S1000	S806	S1438	S2208	S774	S1231
Fe I	5927,789	49,7	50,3		55,1	49,8	51,7	51,7	55,8
Fe I	5934,657	79,3	75,8	81,6	87,6	84,2	83,4	85,5	90,0
Fe I	5956,694	63,9	63,0	67,9	73,3	72,5	72,2	76,6	84,3
Fe I	5969,562				7,5	5,6		5,1	
Fe I	5976,777	72,6	73,5	75,2	81,6	78,8	77,4	78,3	82,9
Fe I	5987,066	71,1	70,9	72,6	80,5	76,2	72,5	72,3	79,6
Fe I	6003,014	86,3	89,2	84,7	92,8	90,2	92,9	91,1	96,1
Fe I	6019,362	5,1		7,2	8,6	8,4	8,7	10,4	12,9
Fe I	6027,051	72,5	73,2	73,1	76,2	74,7	73,2	74,7	79,7
Fe I	6054,070	11,9		14,0	16,0	13,7	17,3	16,5	19,2
Fe I	6056,005	78,4	81,4	76,9	84,6	80,5		80,8	85,6
Fe I	6079,009	49,0	51,2	49,4	54,3	49,8	51,1	52,9	57,0
Fe I	6105,128	14,1			18,7			15,9	
Fe I	6120,249	7,9	7,2	11,0	13,5	11,1	12,3	17,8	24,5
Fe I	6151,618	58,7	61,0	62,6	67,0	65,6	67,4	70,7	76,8
Fe I	6157,728	69,1	69,7	70,6	74,3	71,2	69,9	74,4	79,3
Fe I	6159,373	14,6	16,7	14,5	19,1	15,7	17,7	18,3	22,2
Fe I	6165,358	52,8	54,8	51,7	58,9	57,0	56,4	56,4	61,5
Fe I	6180,204	65,4	67,5	68,8	75,4	70,9	69,8	80,1	82,6
Fe I	6187,988	52,0	55,4	50,8	60,3	56,6	58,8	59,4	65,9
Fe I	6226,736	33,1	34,5	35,2	41,6	37,8	37,0	38,8	45,3
Fe I	6229,226	47,7	49,5	50,6	55,8	53,0	54,2	56,9	62,2
Fe I	6240,646	57,3	60,2	60,6	68,4	64,0	63,9	68,9	75,1
Fe I	6265,136	94,0	95,7	95,5	100,7	101,0	99,6	104,2	112,7
Fe I	6270,225	60,6	59,5	65,4	67,6	64,8	65,3	67,6	74,8
Fe I	6271,277	29,7	31,8	34,2	36,4	36,1	34,6		43,1
Fe I	6297,795	100,1	99,4	98,1	99,6	97,1	104,6	98,9	103,0
Fe I	6315,809	49,1	46,2	50,6	55,2	54,6	52,1	53,4	59,1
Fe I	6380,743	57,9	59,5	58,1	61,7	61,0	61,1	61,8	67,5
Fe I	6392,539	22,4	25,3	19,8	29,5	29,7	30,4	33,1	40,9

Elemento	λ (Å)	S1239	S1323	S1000	S806	S1438	S2208	S774	S1231
Fe I	6498,939	57,6	56,3	58,2	68,7	68,8	66,9	74,8	80,0
Fe I	6574,228	54,9	56,4		60,8	54,0	72,7	67,2	74,6
Fe I	6575,018	71,0	73,4	74,6	79,8	77,7	85,8	81,5	88,1
Fe I	6581,208	27,2	26,3	33,0	36,8	34,5	43,6		53,4
Fe I	6591,313	10,2	7,6	11,6	13,3	11,7	13,3	12,5	16,4
Fe I	6608,026	20,8	20,1	24,1	30,4	26,5	32,4	32,6	40,3
Fe I	6627,543	28,6	29,5	31,5	34,7	32,5	38,4	36,4	40,6
Fe I	6646,932	13,5	14,4	14,8	18,8	18,0	19,2	20,4	26,7
Fe I	6653,851	11,5	10,9	16,3	20,7	13,0	11,9	15,0	18,6
Fe I	6699,140	6,1	8,0	8,7	8,7	8,6	9,9	9,4	9,9
Fe I	6703,568	42,5	43,5	45,7	50,1	49,6	55,6	52,4	58,0
Fe I	6704,480	6,3		9,5	6,3	7,1	10,7	7,3	9,8
Fe I	6705,102	48,1	49,9	49,2	53,0	53,8	58,5	50,2	55,5
Fe I	6707,420								
Fe I	6710,318	21,1	20,5	26,5	29,7	27,9	34,4	31,7	42,1
Fe I	6713,080	32,4	34,0	32,0	36,8	37,5		37,2	43,4
Fe I	6713,190								
Fe I	6713,740	23,2	21,8	26,7	27,9	25,2	30,6	25,7	28,1
Fe I	6715,382	30,4		32,1	35,4		40,5	33,8	44,9
Fe I	6716,233	15,5	21,5	21,1	20,6	22,1	26,0		
Fe I	6725,357			22,4		24,0			
Fe I	6726,665			50,1		52,0			
Fe I	6733,149	29,8	29,9	30,0	34,6	32,8	36,1	34,0	36,4
Fe I	6739,520	12,2	16,7	16,4	23,6	20,6	22,9	25,6	37,4
Fe I	6752,705	38,1	40,2	44,4	45,1	44,3	49,0	44,7	48,9
Fe I	6786,858	30,3	30,7	30,9	40,5	38,0	39,3	43,5	40,7
Fe I	6806,845	48,8	41,4	42,9	66,0	47,4			69,3
Fe I	6810,261	59,5	54,2	53,2	73,0	54,1			68,6
Fe I	6971,932	14,1	10,2		23,4		18,0	24,1	29,0
Fe I	7189,150	50,0	54,9		59,0		57,1	56,6	67,1

Elemento	λ (Å)	S1239	S1323	S1000	S806	S1438	S2208	S774	S1231
Fe I	7401,680	46,5	55,3		54,6		47,9	53,6	59,3
Fe I	7710,362	73,5	72,9		78,9		75,2	74,8	84,7
Fe I	7723,204	53,3	58,2		65,3		63,7	63,5	73,5
Fe I	7941,087	55,6	60,4		62,9		61,1	60,2	68,6
Fe II	4993,354	47,1	46,9	43,9	45,2	41,5	39,1	36,6	36,8
Fe II	5100,627								
Fe II	5132,664	33,8	35,1	32,4	34,0	32,9	27,8	29,1	28,3
Fe II	5136,794								
Fe II	5197,570	89,3	89,7	84,5	86,2	84,0	76,9	74,4	71,8
Fe II	5234,625	98,0	98,3	91,1	92,2	90,5	85,8	82,0	78,3
Fe II	5264,805	60,4	58,5	52,1	56,6	53,3	48,0	46,9	45,8
Fe II	5325,553	56,7	56,8	54,3	53,1	52,2	47,9	45,3	42,7
Fe II	5414,070	41,0	39,7	37,4	37,1		30,2		
Fe II	6084,103	29,2	27,2	28,3	24,9	24,7	22,6	21,6	20,7
Fe II	6369,458	26,4	27,9	22,4	24,2	23,6	21,9	20,0	18,7
Fe II	6416,923	43,9	44,9	40,8	45,2	41,0	39,0	36,9	36,7
Fe II	6456,383	71,6	76,8	67,5	67,0	65,6	62,0	54,7	52,9
Fe II	7224,475	27,5	27,0		26,9		23,0		

Tabela B.3: Medidas das larguras equivalentes para as estrelas evoluídas de M67 analisadas neste trabalho.

Elemento	λ (Å)	S1319	S1245	S1305	S1293	S1277	S1254	S1288	S1074
Fe I	5036,919	44,5	42,6	51,1	54,1	55,7	56,4	58,8	64,3
Fe I	5044,211	93,4	91,7	99,8	102,1	108,8	109,4	112,2	119,7
Fe I	5054,643	57,1	58,2	59,8	61,9	65,6	66,4	66,0	71,8
Fe I	5228,377	76,3	77,3	84,0	85,4	89,0	90,8	91,3	99,6
Fe I	5242,493		99,5	104,2	105,2	107,8	108,0	110,9	117,9
Fe I	5247,051	107,1	106,1	119,1	125,6				
Fe I	5321,108	55,1	56,2	59,9	62,0	65,1	63,7	65,7	70,6
Fe I	5322,041	87,3	87,8	95,0	99,4	104,2	105,5	107,5	118,0
Fe I	5326,143	62,6	61,5	69,5	71,3	75,9	78,1	80,0	87,0
Fe I	5373,709	77,2	76,5	80,1	82,1	85,6	84,8	85,6	90,5
Fe I	5386,330	48,1	48,2	52,3	54,7	57,3	57,8	60,3	64,4
Fe I	5522,444	58,1	56,3	62,7	63,2	67,6	65,7	68,4	73,8
Fe I	5543,936	79,2	78,0	81,1	81,9	85,2	87,7	86,6	93,7
Fe I	5618,633	65,4	65,8	71,5	73,1	74,7	74,6	76,1	82,8
Fe I	5638,262	92,6	93,8	97,0	99,1	104,4	102,1	105,2	112,1
Fe I	5701,547	113,0	111,6	121,6	123,2	132,1	129,7	134,5	143,6
Fe I	5705,465	57,1	55,1	61,4	63,3	67,2	66,6	67,6	73,5
Fe I	5741,848	50,4	50,1	53,0	58,2	60,4	58,0	60,2	65,7
Fe I	5775,081								
Fe I	5778,453								
Fe I	5806,725								
Fe I	5811,914								
Fe I	5852,219	61,6	57,2	63,7	65,1	73,3	75,1	77,0	76,6
Fe I	5853,148	32,5	27,5	34,2	37,7	47,7	50,6	52,0	52,9
Fe I	5855,077	37,9	36,4	36,7	38,9	43,6	46,6	46,0	44,0
Fe I	5856,088	53,2	51,1	54,4	56,6	63,6	61,8	65,5	65,1
Fe I	5858,778	28,7	25,4	28,8	29,5	35,5	36,0	36,8	36,2
Fe I	5916,247	80,6	79,7	89,8	91,8	101,6	99,6	102,8	112,6

Elemento	λ (Å)	S1319	S1245	S1305	S1293	S1277	S1254	S1288	S1074
Fe I	5927,789	52,5	56,9	58,7	61,6	60,0	62,6	62,5	68,1
Fe I	5934,657	91,6	91,1	97,0	98,6	102,7	100,2	101,2	111,4
Fe I	5956,694	86,7	85,4	97,3	100,7	107,9	110,4	114,1	127,8
Fe I	5969,562			9,8		9,1	11,3	13,6	13,1
Fe I	5976,777	84,7	84,1	88,5	90,2	93,3	93,9	94,5	102,5
Fe I	5987,066	81,3	80,2	86,0	87,9	93,0	91,7	93,8	100,4
Fe I	6003,014	98,6	98,6	103,3	104,1	108,2	107,9	110,3	116,4
Fe I	6019,362		12,8	16,5	18,2	22,3	21,2	24,1	24,5
Fe I	6027,051	79,4	78,7	83,8	84,6	90,1	88,9	91,8	99,0
Fe I	6054,070	19,8	21,6	21,0	21,3	25,3	25,7	26,1	26,1
Fe I	6056,005	85,1		87,2	89,6	92,3	90,7	93,3	98,3
Fe I	6079,009	58,3	57,6	59,2	61,3	65,8	64,0	67,0	71,2
Fe I	6105,128	22,2		25,0	26,4		28,6	28,9	31,2
Fe I	6120,249	23,4	22,4	31,0	33,7	42,7	43,7	46,6	53,9
Fe I	6151,618	76,6	76,0	81,4	84,3	92,6	93,5	95,8	105,0
Fe I	6157,728	77,4	78,8	84,3	86,4	93,5	93,0	94,4	103,4
Fe I	6159,373	21,5	21,9	24,4	26,6	31,3	29,7	32,6	33,5
Fe I	6165,358	62,6	63,2	66,5	67,3	72,0	70,7	72,1	78,3
Fe I	6180,204	81,1	80,7	88,6	99,2	99,1	97,5	101,1	111,9
Fe I	6187,988	65,2	65,1	68,8	72,0	75,6	76,7	77,7	85,5
Fe I	6226,736	44,8	44,9	50,3	50,3	54,4	54,1	56,1	61,4
Fe I	6229,226	63,8	63,7	70,6	73,0	79,3	78,2	81,3	90,7
Fe I	6240,646	75,3	73,7	82,3	86,5	95,0	93,1	96,7	107,0
Fe I	6265,136	111,3	112,3	123,4	127,5	135,1	137,0	141,8	155,0
Fe I	6270,225	74,1	75,1	81,1	84,7	89,5	90,6	92,6	102,2
Fe I	6271,277	44,4	43,9	49,1	52,5	55,9	55,3	58,4	65,8
Fe I	6297,795	105,8	113,2	115,2	123,1	122,4	119,4	125,4	142,6
Fe I	6315,809	59,9	58,4	63,2	65,9	70,2	68,6	70,3	76,8
Fe I	6380,743	68,9	67,6	72,6	75,6	81,8	81,5	82,3	88,7
Fe I	6392,539	40,8	39,9	48,9	51,7	57,6	57,6	62,0	67,5

Elemento	λ (Å)	S1319	S1245	S1305	S1293	S1277	S1254	S1288	S1074
Fe I	6498,939	83,6	80,7	94,8	97,9	108,7	108,7	113,9	126,6
Fe I	6574,228	71,8	75,4	81,6	89,9	89,9	93,1	96,9	107,1
Fe I	6575,018	91,5	87,3	99,6	99,8	106,0	110,6	112,2	122,3
Fe I	6581,208	55,1	49,8	65,8	64,9	77,4	74,3	79,9	88,7
Fe I	6591,313	15,6	15,3	19,8	18,9	21,1	20,5	22,5	25,4
Fe I	6608,026	41,0	39,8	48,2	50,6	58,4	57,9	60,6	68,3
Fe I	6627,543	40,9	38,7	46,1	46,1	50,0	49,3	50,4	53,9
Fe I	6646,932	29,2	23,8	34,5	37,0	43,6	44,2	45,5	51,0
Fe I	6653,851	19,6	17,1	21,4	23,1	26,8	26,3	31,4	26,9
Fe I	6699,140	12,4	11,0	15,3	15,1	18,9	18,5	19,1	16,1
Fe I	6703,568	58,9	58,7	66,2	69,0	74,9	75,4	77,6	81,1
Fe I	6704,480	9,9	9,5	11,7	13,8	14,7	14,9	14,8	13,3
Fe I	6705,102	58,4	56,4	61,9	64,5	67,3	67,4	68,8	70,9
Fe I	6707,420								
Fe I	6710,318	45,7	41,6	57,3	60,0	69,5	69,0	73,8	80,0
Fe I	6713,080	43,8	44,2	49,8	52,7	58,3	56,7	58,4	62,0
Fe I	6713,190								
Fe I	6713,740	29,1	27,8	32,3	33,5	35,6	36,5	37,1	36,5
Fe I	6715,382		41,4	46,7	58,2	52,5	55,1	56,7	57,7
Fe I	6716,233		24,3			34,1			
Fe I	6725,357	30,0		31,5					
Fe I	6726,665	57,0		59,6					
Fe I	6733,149	38,5	37,3	41,5	43,2	47,6	46,5	45,9	48,2
Fe I	6739,520	34,2	31,7	42,5	50,6	55,6	53,7	57,4	61,9
Fe I	6752,705	45,7	49,0	51,9	55,0	60,8	59,9	61,2	67,5
Fe I	6786,858	42,0	39,9	45,2	51,3	46,6	48,4	49,7	57,7
Fe I	6806,845	58,8		70,1	79,7	76,8		81,0	110,4
Fe I	6810,261	58,7		61,0	73,2	69,8			92,6
Fe I	6971,932		24,4		40,1	41,1	39,4	47,9	53,4
Fe I	7189,150		61,8		73,4	78,4	77,1	83,2	89,0

Elemento	λ (Å)	S1319	S1245	S1305	S1293	S1277	S1254	S1288	S1074
Fe I	7401,680		61,3		62,7	66,7	64,1	66,7	73,1
Fe I	7710,362		84,7		88,8	95,5	94,6	98,5	105,6
Fe I	7723,204		72,0		85,2	89,7	89,4	93,5	102,0
Fe I	7941,087		73,5		78,8	80,6	78,8	81,1	92,9
Fe II	4993,354	35,0	48,2	39,4	39,8	43,8	44,7	40,6	48,9
Fe II	5100,627				30,2	33,3	34,4	34,8	
Fe II	5132,664	28,3	30,1	28,8	29,6	29,0	30,5	32,0	39,3
Fe II	5136,794						17,8		28,3
Fe II	5197,570	73,7	74,2	77,6	75,9	80,5	81,3	82,8	94,6
Fe II	5234,625	81,9	82,8	84,0	84,4	85,8	87,3	88,2	100,0
Fe II	5264,805	45,4	46,5	48,7	49,2	48,4	51,0	50,6	60,0
Fe II	5325,553	43,4	46,6	46,7	47,9	48,0	51,5	49,4	59,6
Fe II	5414,070	29,0	29,4	29,5	30,2	30,5	32,8	32,1	40,2
Fe II	6084,103	20,8	19,0	22,8	23,7	24,7	26,3	25,3	32,7
Fe II	6369,458	19,2	20,8	21,0	20,3	23,3	23,2	24,1	29,3
Fe II	6416,923	36,9	39,1	38,8	38,2	40,5	40,3	41,8	47,6
Fe II	6456,383	55,5	58,0	55,7	56,8	56,9	57,5	58,1	67,8
Fe II	7224,475		26,8						

Tabela B.4: Medidas das larguras equivalentes para as estrelas evoluídas de M67 analisadas neste trabalho.

Elemento	λ (Å)	S1279	S1010	S1016	S978
Fe I	5036,919	64,7	64,9	69,2	76,2
Fe I	5044,211	120,7	121,7	128,5	140,4
Fe I	5054,643	71,4	71,0	74,3	76,7
Fe I	5228,377	99,8	100,4	103,0	
Fe I	5242,493	118,2	118,8	116,7	116,8
Fe I	5247,051				
Fe I	5321,108	70,4	71,9	73,7	77,0
Fe I	5322,041	119,1	117,5	125,2	132,7
Fe I	5326,143	86,7	90,1	94,2	98,2
Fe I	5373,709	91,3	92,4	94,3	97,0
Fe I	5386,330	63,5	67,1	64,9	63,8
Fe I	5522,444	73,0	76,4	73,8	73,6
Fe I	5543,936	93,7	95,0	92,7	93,2
Fe I	5618,633	83,2	81,0	82,4	83,5
Fe I	5638,262	111,3	113,1	116,0	118,6
Fe I	5701,547	145,9	145,5	158,0	166,4
Fe I	5705,465	74,3	72,8	76,2	78,6
Fe I	5741,848	67,0	68,4	67,9	70,2
Fe I	5775,081				
Fe I	5778,453				
Fe I	5806,725				
Fe I	5811,914				
Fe I	5852,219	78,9	84,9		87,6
Fe I	5853,148	54,6	61,0	71,5	77,9
Fe I	5855,077	43,7	49,6	48,7	46,3
Fe I	5856,088	64,7	72,9	73,5	73,2
Fe I	5858,778	36,4	43,9	42,6	42,0
Fe I	5916,247	111,9	117,3	121,7	129,2

Elemento	λ (Å)	S1279	S1010	S1016	S978
Fe I	5927,789	66,7	65,5	67,1	68,0
Fe I	5934,657	109,6	110,2	114,9	122,7
Fe I	5956,694	128,5	128,0	142,9	158,4
Fe I	5969,562	14,1	13,3	15,8	17,0
Fe I	5976,777	101,1	102,7	103,0	103,6
Fe I	5987,066	100,5	97,3	101,7	105,6
Fe I	6003,014	115,3	115,8	117,5	121,2
Fe I	6019,362	26,6	23,3	32,0	36,8
Fe I	6027,051	97,7	100,8	100,3	104,0
Fe I	6054,070	28,2	29,6	32,5	36,0
Fe I	6056,005	98,4	99,1	97,4	100,0
Fe I	6079,009	71,1	72,3	71,6	71,7
Fe I	6105,128	32,2		36,7	38,3
Fe I	6120,249	55,6	54,0	69,8	84,0
Fe I	6151,618	105,8	111,1	114,8	122,7
Fe I	6157,728	104,2	103,9	110,4	115,7
Fe I	6159,373	34,3	33,4	38,7	41,6
Fe I	6165,358	78,0	80,3	81,1	81,3
Fe I	6180,204	111,6	111,9	119,0	125,3
Fe I	6187,988	84,4	81,4	85,4	88,4
Fe I	6226,736	61,5	62,9	64,4	66,7
Fe I	6229,226	90,7	92,3	97,3	104,6
Fe I	6240,646	107,0	110,4	116,8	126,0
Fe I	6265,136	156,2	156,9	171,0	182,7
Fe I	6270,225	102,7	103,2	106,5	112,0
Fe I	6271,277	64,9	64,9	72,9	75,9
Fe I	6297,795	136,8	137,5	160,8	157,8
Fe I	6315,809	77,5	77,9	79,1	80,1
Fe I	6380,743	89,5	93,1	94,6	97,0
Fe I	6392,539	68,1	68,9	76,7	84,8

Elemento	λ (Å)	S1279	S1010	S1016	S978
Fe I	6498,939	130,0	128,6	145,2	163,7
Fe I	6574,228	108,5	107,4	122,7	136,5
Fe I	6575,018	121,9			
Fe I	6581,208	91,7		105,8	116,5
Fe I	6591,313	25,7	24,3	29,3	29,4
Fe I	6608,026	67,5	69,1	81,8	93,0
Fe I	6627,543	55,5	56,3	58,5	58,0
Fe I	6646,932	53,5		64,8	70,6
Fe I	6653,851	30,2		36,9	35,5
Fe I	6699,140	18,5	19,9	21,4	23,5
Fe I	6703,568	83,5	85,3	91,5	98,0
Fe I	6704,480	15,9	15,5	18,1	19,7
Fe I	6705,102	72,6	75,5	74,0	73,9
Fe I	6707,420				
Fe I	6710,318	81,9	79,8	92,0	107,5
Fe I	6713,080	64,7	64,6	67,4	69,8
Fe I	6713,190				
Fe I	6713,740	39,2	37,9	40,3	40,9
Fe I	6715,382	58,9	60,6	65,4	69,7
Fe I	6716,233				
Fe I	6725,357				
Fe I	6726,665				
Fe I	6733,149	52,0	53,7	50,1	52,3
Fe I	6739,520	64,5	66,7	77,6	88,5
Fe I	6752,705	68,6	62,8		78,4
Fe I	6786,858	56,7	52,9	58,9	58,1
Fe I	6806,845	98,6	94,5		140,5
Fe I	6810,261	83,5	77,0		
Fe I	6971,932	54,9	57,4	55,1	63,7
Fe I	7189,150	92,9	92,2	93,7	98,7

Elemento	λ (Å)	S1279	S1010	S1016	S978
Fe I	7401,680	73,4	75,8	73,7	75,0
Fe I	7710,362	109,4	110,3	104,7	106,4
Fe I	7723,204	104,4	101,4	110,7	120,5
Fe I	7941,087	93,6	87,2	93,8	99,7
Fe II	4993,354	50,6	51,0		46,4
Fe II	5100,627	30,7	39,7	45,7	46,1
Fe II	5132,664	39,3	34,8	28,9	
Fe II	5136,794				
Fe II	5197,570	92,0	96,1	78,3	75,4
Fe II	5234,625	96,8	99,7	81,6	75,5
Fe II	5264,805	58,1	59,7	45,5	42,6
Fe II	5325,553	57,2	59,3	48,3	44,8
Fe II	5414,070	36,7	38,4	28,6	24,7
Fe II	6084,103	31,0	33,3	25,4	23,9
Fe II	6369,458	28,7	28,6	21,2	18,7
Fe II	6416,923	45,3	47,7	42,1	42,2
Fe II	6456,383	64,9	66,1	49,2	43,4
Fe II	7224,475				

Apêndice C

Publicações

Durante o período de desenvolvimento deste trabalho, dois artigos relacionados ao trabalho desta Tese foram publicados. Um no jornal *Astronomy and Astrophysics*, intitulado *S1242: a lithium-rich subgiant star in the open cluster M67* (Canto Martins et al. 2006, A&A, 451, 993), e outro no *International Journal of Modern Physics D*, intitulado *Lithium in the Stellar Open Cluster M67* (Canto Martins et al. 2007, IJMPD, 16, 391), anexados neste Apêndice. Além destes, mais dois artigos foram publicados durante os quatro anos de desenvolvimento desta Tese. Um referente a um catálogo de medidas de velocidade rotacional e radial para estrelas evoluídas pobres em metal (de Medeiros et al. 2006, A&A, 458, 895) e outro onde aplicamos uma lei de distribuição de máxima entropia de Tsallis, analisando o comportamento da distribuição das velocidade rotacional em vários aglomerados abertos de diferentes idades (Carvalho et al. 2007, Physica A, doi:10.1016/j.physa.2007.05.045). Um quinto artigo encontra-se em fase de preparação.

Bibliografia

- ¹ Allen, C. W. 1973, "Astrophysical Quantities", 2nd ed., London: The Athlone Press
- ² Alvarez, R., & Plez, B. 1998, A&A, **330**, 1109
- ³ Alpher, R. A., & Herman, R. C. 1953, ARNPS, **2**, 1
- ⁴ Anthony-Twarog, B. J. 1987, AJ, **93**, 647
- ⁵ Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A. J. 2005, ASPC, **336**, 25
- ⁶ Balachandran, S. 1995, ApJ, **446**, 203
- ⁷ Barnard, E. E. 1931, PYerO, **6**, 1
- ⁸ Barry, D. C. 1987, BAAS, **19**, 1030
- ⁹ Belloni, T., Verbunt, F., Mathieu, R. D. 1998, A&A, **339**, 431
- ¹⁰ Beskow, F., & Treffenberg, L. 1947, Arkiv Mat. Astron. Fysik, **34A**, N^o 13 e 17
- ¹¹ Bethe, H. A. 1939, Phys. Rev., **55**, 103 e 434
- ¹² Biemont, E., Baudoux, M., Kurucz, R. L., Ansbacher, W., Pinnington, E. H. et al. 1991, A&A, **249**, 539
- ¹³ Bode, J. E. 1777. *Ueber einige neuentdeckte Nebelsterne und einem vollständigen Verzeichnisse der bisher bekannten, von Herrn Bode. Astronomisches Jahrbuch oder Ephemeriden für das Jahr 1779. nebst einer Sammlung der neuesten in die astronomischen Wissenschaften einschlagenden Beobachtungen, Nachrichten, Bemerkungen und Abhandlungen* Berlin, p. 65-71 & Tab. IV, Fig. 1-15.

- ¹⁴ Boesgaard, A. M. 1976, *PASP*, **88**, 353
- ¹⁵ Brown, H. 1949, *RvMP*, **21**, 625
- ¹⁶ Brown, J. A. 1987, *ApJ*, **317**, 701
- ¹⁷ Brown, Jeffery A., Sneden, C., Lambert, D. L., Dutchover Jr., E. 1989, *ApJS*, **71**, 293
- ¹⁸ Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A., Hoyle, F. 1957, *Rev. Mod. Phys.* **29**, 547
- ¹⁹ Burstein, D., Faber, S. M., Gonzalez, J. J. 1986, *AJ*, **91**, 1130
- ²⁰ Canterna, R., Geisler, D., Harris, H. C., Olszewski, E., Schommer, R. 1986, *AJ*, **92**, 79
- ²¹ Canto Martins, B. L., Lèbre, A., de Laverny, P., Melo, C. H. F., Do Nascimento, J. D., Jr et al. 2006a, *A&A*, **451**, 993
- ²² Canto Martins, B. L., Do Nascimento, J. D., de Medeiros, J. R., Lèbre, A., Richard, O. et al. 2007, *IJMPD*, **16**, 391
- ²³ Carraro, G., Girardi, L., Bressan, A., Chiosi, C. 1996, *A&A*, **305**, 849
- ²⁴ Carraro, G., Bresolin, F., Villanova, S., Matteucci, F., Patat, F. et al 2004, *AJ*, **128**, 1676
- ²⁵ Chaboyer, B. 1994, *ApJ*, **432**, 47
- ²⁶ Chaboyer, B., Demarque, P., Pinsonneault, M. H. 1995, *ApJ*, **441**, 876
- ²⁷ Charbonnel, C. 1998, *IAUS*, **189**, 349
- ²⁸ Charbonnel, C., Balachandran, S. C. 2000, *A&A*, **359**, 563
- ²⁹ Charbonnel, C., Talon, S. 1999, *A&A*, **351**, 635
- ³⁰ Charbonnel, C., Däppen, W., Schaerer, D., Bernasconi, P. A., Maeder, A. et al. 1999, *A&AS*, **135**, 405
- ³¹ Chen, Y. Q., Nissen, P. E., Benoni, T., Zhao, G. 2001, *A&A*, **371**, 943

- ³² Cohen, J. G. 1980, ApJ, **241**, 981
- ³³ Costa, J. M., da Silva, L., do Nascimento, J. D., Jr., De Medeiros, J. R. 2002, A&A, **382**, 1016
- ³⁴ D'Antona, F., Matteucci, F. 1991, A&A, **248**, 62
- ³⁵ de Freitas, D. B., do Nascimento, J. D. Jr., de Medeiros, J. R. 2007, submetido ao MNRAS
- ³⁶ de Laverny, P., do Nascimento, J. D., Jr., Lèbre, A., De Medeiros, J. R. 2003, A&A, **410**, 937
- ³⁷ de Medeiros, J. R., do Nascimento, J. D., Jr., Mayor, M. 1997, A&A, **317**, 701
- ³⁸ De Medeiros, J. R., do Nascimento, J. D., Jr., Sankarankutty, S., Costa, J. M., Maia, M. R. G. 2000, A&A, **363**, 239
- ³⁹ de Medeiros, J. R., Silva, J. R. P., Do Nascimento, J. D., Jr., Canto Martins, B. L., da Silva, L., et al 2006, A&A, **458**, 895
- ⁴⁰ Deliyannis, C. P., Pinsonneault, M. H. 1997, ApJ, **488**, 836
- ⁴¹ do Nascimento, J. D., Jr., Charbonnel, C., Lèbre, A., de Laverny, P., de Medeiros, J. R. 2000, A&A, **357**, 931
- ⁴² do Nascimento, J. D., Jr., Canto Martins, B. L., Melo, C. H. F., Porto de Mello, G., De Medeiros, J. R. 2003, A&A, **405**, 723
- ⁴³ Duncan, D. K. 1981, ApJ, **248**, 651
- ⁴⁴ Einstein, A., de Sitter, W. 1932, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **18**, 312
- ⁴⁵ Fekel, F. C., Balachandran, S. 1993, ApJ, **403**, 708
- ⁴⁶ Friedman, A. 1922, Z. Phys., **10**, 377
- ⁴⁷ Friel, E. D. 1995, ARA&A, **33**, 381
- ⁴⁸ Friel, E. D., Boesgaard, A. M. 1992, ApJ, **387**, 170

- ⁴⁹ Friel, E. D., Janes, K. A. 1991, ASPC, **13**, 569
- ⁵⁰ Friel, E. D., Janes, K. A. 1993, A&A, **267**, 75
- ⁵¹ Friel, E. D., Janes, K. A., Tavarez, M., Scott, J., Katsanis, R. et al 2002 AJ, **124**, 2693
- ⁵² Garcia Lopez, R. J., Spruit, H. C. 1991, ApJ, **377**, 268
- ⁵³ Garcia Lopez, R. J., Rebolo, R., Beckman, J. E. 1988, PASP, **100**, 1489
- ⁵⁴ Gilliland, R. L., Brown, T. M., Duncan, D. K. et al. 1991, Aj, **101**, 541
- ⁵⁵ Gilroy, K. K. 1989, ApJ, **347**, 835
- ⁵⁶ Gilroy, K. K., Brown, J. A. 1991, ApJ, **371**, 578
- ⁵⁷ Girardi, L., Bressan, A., Bertelli, G., Chiosi, C., 2000, A&AS, **141**, 371
- ⁵⁸ Girardi, L., Bertelli, G., Bressan, A., Chiosi, C., Groenewegen, M. A. T. et al 2002, A&A, **391**, 195
- ⁵⁹ Goldschmidt, V. M. 1937, Skrifter Norske Videnskaps - Akad. Oslo I. Mat. - Naturv. K1, N^o 4
- ⁶⁰ Gray, D. F. 1992, The observational and analysis of stellar photospheres, New York: John Wiley & Sons
- ⁶¹ Griffin, R. F. 1975, MNRAS, **171**, 181
- ⁶² Gustafsson, B., Edvardsson, B., Eriksson, K. et al. 2007, em preparação
- ⁶³ Hayashi, C., & Nishida, M. 1956, PThPh, **16**, 613
- ⁶⁴ Herbig, G. H. 1965, ApJ, **141**, 588
- ⁶⁵ Hill, V., Plez, B., Cayrel, R., Beers, T. C., Nordström, B. et al. 2002, A&A, **387**, 560
- ⁶⁶ Hinkle, K., Wallace, L., Valenti, J., Harmer, D. 2000, Visible and Near Infrared Atlas of the Arcturus Spectrum 3727–9300 Å (San Francisco: ASP Publisher)
- ⁶⁷ Iben, I. Jr. 1967a, ApJ, **147**, 624

- ⁶⁸ Iben, I. Jr. 1967b, ApJ, **147**, 650
- ⁶⁹ Iso, K., Kodama, H., Sato, K. 1986, Phys. Letter B., **169**, 337
- ⁷⁰ Johnson, H. L., Sandage, A. R. 1955, ApJ, **121**, 616
- ⁷¹ Jones, B. F., Fischer, D., Soderblom, D. R. 1999, AJ, **117**, 330
- ⁷² Klein, O. 1947, Arkiv. Mat. Astron. Fysik **34A**, N^o 19
- ⁷³ Kolb, E. W., Turner, M. S. 1990, The Early Universe (Frontiers in Physics, Addison Wesley)
- ⁷⁴ Kupka, F., Piskunov, N., Ryabchikova, T. A., Stempels, H. C., Weiss, W. W. 1999, A&AS, **138**, 119
- ⁷⁵ Lèbre, A., de Laverny, P., de Medeiros, J. R., Charbonnel, C., da Silva, L. 1999, A&A, **345**, 936
- ⁷⁶ Lemaître, G. 1927, Ann. Soc. Sci. Brux., **1**, A47
- ⁷⁷ Loktin, A. V., Gerasimenko, T. P., Malysheva, L. K. 2001, A&AT, **20**, 607
- ⁷⁸ Mathieu, R. D., Latham, D. W., Griffin, R. F. 1990, AJ, **100**, 1859
- ⁷⁹ Mayer, M. G., Teller, E. 1949, PhRv, **76**, 1226
- ⁸⁰ Melo, C. H. F., Pasquini, L., de Medeiros, J. R. 2001, A&A, **375**, 851
- ⁸¹ Meneguzzi, M., Audouze, J., Reeves, H. 1971, A&A, **15**, 337
- ⁸² Mermilliod J.-C. 1995, "Information and On-Line Data in Astronomy", Eds D. Egret & M.A. Albrecht (Kluwer Academic Press, Dordrecht), p. 127-138 The database for galactic open clusters (BDA)
- ⁸³ Michaud, G. 1986, ApJ, **302**, 650
- ⁸⁴ Michaud, G., Charbonneau, P. 1991, SSRv, **57**, 1
- ⁸⁵ Michaud, G., Richard, O., Richer, J., Vandenberg, D. A. 2004, ApJ, **606**, 452

- ⁸⁶ Montalbán, J., Schatzman, E. 2000, *A&A*, **354**, 943
- ⁸⁷ Montgomery, K. A., Marschall, L. A., Janes, K. A. 1993, *AJ*, **106**, 181
- ⁸⁸ Neckel, H. 1986, *A&A*, **167**, 97
- ⁸⁹ Nissen, P. E.; Twarog, B. A., Crawford, D. L. 1987, *AJ*, **93**, 634
- ⁹⁰ Nordstrom, B., Mayor, M., Andersen, J., Holmberg, J., Pont, F. et al. 2004, *A&A*, **418**, 989
- ⁹¹ Pace, G., Pasquini, L. 2004, *A&A*, **426**, 1021
- ⁹² Pallavicini, R., Cerruti-Sola, M., Duncan, D. K. 1987, *A&A*, **174**, 116
- ⁹³ Pasquini, L., Belloni, T. 1998, *A&A*, **336**, 902
- ⁹⁴ Pasquini, L., Randich, S., Pallavicini, R. 1997, *A&A*, **325**, 535
- ⁹⁵ Pasquini, L., Avila, G., Blecha, A., Cacciari, C., Cayatte, V. et al. 2002, *The Messenger*, **110**, 1
- ⁹⁶ Peterson, R. C., Dalle Ore, C. M., Kurucz, R. L. 1993, *ApJ*, **404**, 333
- ⁹⁷ Penzias, A. A., & Wilson, R. W. 1965, *ApJ*, **142**, 419
- ⁹⁸ Pilachowski, C., Saha, A., Hobbs, L. M. 1988, *PASP*, **100**, 474
- ⁹⁹ Pinsonneault, M. H., Kawaler, S. D., Sofia, S., Demarque, P. 1989, *ApJ*, **338**, 424
- ¹⁰⁰ Pinsonneault, M. H., Kawaler, S. D., Demarque, P. 1990, *ApJS*, **74**, 501
- ¹⁰¹ Pinsonneault, M. H. 1992, *AAS*, **180**, 3602
- ¹⁰² Pinsonneault, M. H., DePoy, D. L., Coffee, M. 2001, *ApJ*, **556**, 59
- ¹⁰³ Plez, B. 1998, *A&AS*, **337**, 495
- ¹⁰⁴ Popper, D. M. 1954, *AJ*, **59**, 445
- ¹⁰⁵ Randich, S., Giampapa, M. S., Pallavicini, R. 1994, *A&A*, **283**, 893

- ¹⁰⁶ Randich, S., Primas, F., Pasquini, L., Pallavicini, R. 2002, A&A, **387**, 222
- ¹⁰⁷ Randich, S., Sestito, P., Primas, F., Pallavicini, R., Pasquini, L. 2006, A&A, **450**, 557
- ¹⁰⁸ Randich, S., Primas, F., Pasquini, L., Sestito, P., Pallavicini, R. 2007, A&A, **469**, 163
- ¹⁰⁹ Reeves, H., Richer, J., Sato, K., Terasawa, N. 1990, ApJ, **355**, 18
- ¹¹⁰ Reeves, H. 1994, RvMP, **66**, 193
- ¹¹¹ Richard, O., Michaud, G., Richer, J. 2002, ApJ, **580**, 1100
- ¹¹² Rûedi, I., Solanki, S. K., Mathys, G., Saar, S. H. 1997, A&A, **318**, 429
- ¹¹³ Saltz, H. 1985, Phys Letters A, **157**, 65
- ¹¹⁴ Saltz, H. 1987, Nature, **324**, 116
- ¹¹⁵ Sanders, W. L. 1977, A&AS, **27**, 89
- ¹¹⁶ Sandquist, E. L. 2004, MNRAS **347**, 101
- ¹¹⁷ Schatzman, E., Baglin, A. 1991, A&A, **249**, 125
- ¹¹⁸ Sestito, E., Randich, S. 2005, A&A, **442**, 615
- ¹¹⁹ Shapley, H. 1917, ApJ, **46**, 64
- ¹²⁰ Sills, A. I., Deliyannis, C. P. 2000, AAS, **196**, 512
- ¹²¹ Skumanich, A. 1972, ApJ, **171**, 565
- ¹²² Soderblom, D. R. 1983, ApJS, **53**, 1
- ¹²³ Spite, F.; Spite, M. 1982, A&A, **115**, 357
- ¹²⁴ Steigman, G. 1996, ApJ, **457**, 737
- ¹²⁵ Stetson, P. B., Pancino, E. 2004, em preparação
- ¹²⁶ Suess, H. E., & Urey, H. C. 1956, RvMP, **28**, 53
- ¹²⁷ Tautvaisiene, G., Edvardsson, B., Tuominen, I., Ilyin, I. 2000, A&A, **360**, 499

- ¹²⁸ Thomas, D., Schramm, D. N., Olive, K. A., Mathews, G. J., Meyer, B. S., Fields, B. D. 1994, ApJ, **430**, 291
- ¹²⁹ van den Berg, M., Verbunt, F., Mathieu, R. D. 1999, A&A, **347**, 866
- ¹³⁰ Witten, E. 1984, Phys. Rev. D, **30**, 272
- ¹³¹ Zahn, J.-P. 1992, A&A, **265**, 115
- ¹³² Zahn, J.-P. 1994, A&A, **288**, 829
- ¹³³ Zoccali, M., Barbuy, B., Hill, V., Ortolani, S., Renzini, A. et al. 2004, A&A, **423**, 507

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)