



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



# **DETERMINAÇÃO DE ABUNDÂNCIAS QUÍMICAS EM ESTRELAS ANALISANDO ESPECTROS ÓPTICOS A MÉDIA RESOLUÇÃO ESPECTRAL**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Beatriz Carvalho da Silva (UNIVAP, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [beatriz\\_alpinopolis@hotmail.com](mailto:beatriz_alpinopolis@hotmail.com)

Dr. André de Castro Milone (DAS/CEA/INPE, Orientador)  
E-mail: [andre.milone@inpe.br](mailto:andre.milone@inpe.br)

Julho de 2015





MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



# **DETERMINAÇÃO DE ABUNDÂNCIAS QUÍMICAS EM ESTRELAS ANALISANDO ESPECTROS ÓPTICOS A MÉDIA RESOLUÇÃO ESPECTRAL**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Beatriz Carvalho da Silva (UNIVAP, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: beatriz\_alpinopolis@hotmail.com

Dr. André de Castro Milone (DAS/CEA/INPE, Orientador)  
E-mail: andre.milone@inpe.br

Julho de 2015

## Sumário

<b>1.0 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2.0 RESUMO.....</b>	<b>3</b>
2.1 Resumo do plano inicial para a nova etapa do projeto iniciada em agosto de 2014.....	3
<b>3.0 Resumo das etapas já descritas em relatórios anteriores.....</b>	<b>3</b>
<b>4.0 Resumo das atividades realizadas a partir de agosto de 2014.....</b>	<b>9</b>
4.1 Escolha das linhas do Ca.....	10
4.2 Ajustes dos espectros.....	10
4.3 Escolha dos contínuos.....	10
4.4 Normalização dos espectros.....	10
4.5 Cálculo dos espectros teóricos.....	12
4.6 Determinação da abundância do cálcio para a linha Ca I $\lambda$ 6162 Å.....	15
4.7.1 Comparação entre pEW e LPF por gráficos.....	16
4.8 Análise dos resultados com relação aos parâmetros fotosféricos.....	20
4.9 Comparação e calibração dos valores.....	20
<b>5.0 Conclusões.....</b>	<b>25</b>
<b>6.0 Perspectivas.....</b>	<b>26</b>
<b>7.0 Referências Bibliográficas .....</b>	<b>26</b>

## 1.0 Introdução

A inspeção de abundâncias de elementos em espectros de média resolução espectral é um bom método para a análise química de fotosferas estelares. Este método é muito empregado em levantamentos espectrofotométricos de diferentes populações estelares entre outras investigações, com o objetivo de estudar parâmetros fotosféricos fundamentais como temperatura efetiva, gravidade superficial e metalicidade.

Neste trabalho pretende-se contribuir para uma caracterização química mais completa das estrelas do banco de espectros MILES com objetivo de se construir um conjunto de modelos de populações estelares simples dentro de um projeto do qual o Dr. Milone participa.

Especificamente estamos investindo esforços para revisar, aprimorar e aplicar ao elemento químico cálcio (Ca) a metodologia já empregada por Milone et. al. (2011, MNRAS, 414, 1227) na determinação da abundância elemental realizada em média resolução espectral.

## 2.0 Resumo

Este trabalho, iniciado em agosto de 2013, tem como objetivo obter a abundância química do cálcio (Ca) em estrelas da base de espectros empíricos MILES (Mid-resolution Isaac Newton Telescope Library of Empirical Spectra) por meio de uma análise espectroscópica em média resolução espectral; e comparar os resultados obtidos com outras análises em alta resolução usando estrelas em comum. As técnicas utilizadas nesse trabalho são as mesmas empregadas, por A. Milone, na determinação da abundância do magnésio em estrelas de MILES. Este trabalho insere-se num projeto de longo prazo que visa construir modelos de populações estelares simples que estendam a caracterização química a outros elementos químicos além do ferro. A primeira etapa do trabalho consistiu em determinar a abundância do cálcio via análise de sua linha em absorção no comprimento de onda 8500 Å, por meio dos métodos largura equivalente e ajuste de perfil de linha. O primeiro método baseia-se no cálculo da área entre a linha e o contínuo espectral, e o segundo compara a forma da linha entre o espectro observado e espectros sintéticos via cálculos de *rms*. Os resultados dos dois métodos foram comparados entre si e analisados com relação aos parâmetros fotosféricos das estrelas. As abundâncias médias foram calibradas contra aquelas obtidas em outros trabalhos. Conseguimos recuperar para um dado conjunto de estrelas a abundância do Ca. No entanto, encontramos certa limitação ao perfazer a calibração dos nossos resultados advindos de uma única linha do Ca contra dados da literatura. Por este motivo, estendemos nossa análise para outra linha do cálcio a fim de obter sua abundância com maior confiabilidade. Nesta segunda etapa do trabalho, a região de 6000 a 7000 Å foi inspecionada com a finalidade de buscar linhas mensuráveis do Ca I com o uso dos atlas solares THE SOLAR FLUX ATLAS FROM 296 NM TO 1300 NM (Kurucz et al. 1984) e SOLAR ATLAS BASS ON-LINE ([http://bass2000.obspm.fr/solar\\_spect.php](http://bass2000.obspm.fr/solar_spect.php)), além da tabela de linhas no espectro do Sol THE SOLAR SPECTRUM 2935 Å TO 8770 Å – SECONDRÉVISION OF ROWLAND'S PRELIMINARY TABLE OF SOLAR SPECTRUM WAVELENGTHS (Moore et al. 1966). As linhas selecionadas do Ca I foram:  $\lambda 6122$  Å,  $\lambda 6162$  Å e  $\lambda 6169$  Å. Os espectros empíricos da base MILES, que estamos estudando, foram recortados para a região 5900-6700 Å, a qual compreende as linhas escolhidas. Diversos pontos de contínuo foram escolhidos e os espectros foram normalizados em fluxo. Os espectros teóricos foram calculados para a região 6100-6190 Å e foi feita a uniformização de escalas de comprimento de onda e fluxo de todos os espectros para a região das linhas escolhidas. Após a medição das larguras equivalentes para as três linhas nos espectros empíricos, selecionamos a linha Ca I  $\lambda 6162$  Å. Recuperamos a abundância do Ca para esta linha em estrelas anãs, em média resolução baseado em ajustes de síntese espectral aplicando aqueles dois métodos. Por fim, transformamos nossos resultados para um sistema homogêneo definido por medidas a alta resolução espectral já compiladas de trabalhos publicados na literatura da área.

## 2.1 Resumo do plano inicial para a nova etapa do projeto iniciada em AGOSTO de 2014

A fim de se estender a análise para outra linha do cálcio (Ca I  $\lambda 6162 \text{ \AA}$ ) e assim obter mais indicadores para sua abundância foi necessário cumprir as seguintes etapas:

- 1) seleção de linhas proeminentes do Ca I segundo a resolução dos espectros MILES (ex.  $\lambda 6102,73 \text{ \AA}$  e  $\lambda 6122,27 \text{ \AA}$ ),
- 2) normalização do contínuo espectral na região ou regiões das linhas selecionadas do cálcio,
- 3) cálculo de espectros teóricos para as regiões das linhas selecionadas com o código MOOG,
- 4) uniformização das escalas de comprimento de onda e fluxo dos espectros sintéticos e empíricos nessas regiões (c/uso do IRAF),
- 5) medição de larguras equivalentes das linhas selecionadas nos espectros sintéticos e empíricos,
- 6) comparação dos perfis das linhas selecionadas entre espectros teóricos e empíricos,
- 7) obtenção de abundâncias em média resolução baseado em ajustes de síntese espectral a partir das linhas selecionadas, e
- 8) calibração das abundâncias derivadas de cada linha do Ca para um sistema homogêneo definido por medidas a alta resolução espectral já compiladas de trabalhos publicados na literatura da área.

## 3.0 Resumo das etapas já descritas em relatórios anteriores

### Metodologia

Dentre as etapas inicialmente programadas, somente as etapas citadas logo adiante foram concluídas para uma única de linha de absorção do cálcio, visto que já havia espectros sintéticos calculados para região dessa linha.

- A. Medição de larguras equivalentes da absorção dominada pela linha do Ca I  $\lambda 5513 \text{ \AA}$  tanto em espectros sintéticos como nos da base MILES (via programas livres LECTOR e INDEXF).
- B. Comparação do perfil da linha do Ca I  $\lambda 5513 \text{ \AA}$  entre espectros teóricos e empíricos com confecção de gráficos e ilustrações (c/software gráfico SM).
- C. Obtenção de abundâncias em média resolução baseada em ajustes de síntese espectral.
- D. Calibração dos resultados para um sistema homogêneo definido por medidas realizadas a alta resolução, compiladas de trabalhos publicados na literatura da área (somente para estrelas anãs).

A seguir são descritos alguns detalhes das etapas realizadas.

Os parâmetros que descrevem a fotosfera de uma estrela são:

- (i) Temperatura efetiva ( $T_{ef}$ ), que é a temperatura de um corpo negro que possui o mesmo fluxo integrado em  $\lambda$  da estrela,
- (ii) Gravidade, que é uma relação entre a massa da estrela e seu raio superficial:

$$\text{Gravidade (g): } g = G M/R^2 \quad (1.0)$$

Onde  $M$  é a massa da estrela,  $R$  seu raio superficial e  $G$  a constante gravitacional. No campo da Astrofísica, costuma-se expressar a gravidade numa escala logarítmica tal que  $g$  é apresentado em unidades do sistema cgs. No caso Sol,  $\log g = 4,44$ .

- (iii) Metalicidade ou  $[Fe/H]$ , que é uma medida da abundância numérica de átomos de ferro com relação àquela de átomos de hidrogênio na escala logarítmica relativa ao Sol:

$$[Fe/H] = \log_{10} \left( \frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_{estrela} - \log_{10} \left( \frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_{Sol} \quad (2.0)$$

onde  $n(X)$  é a abundância numérica do elemento  $X$ .

Aplicamos à linha Ca I  $\lambda 5513 \text{ \AA}$  dois métodos para determinar a abundância do cálcio:

- 1- O **Método da Largura Equivalente (pEW)**, o qual representa um cálculo do fluxo absorvido pela linha espectral em si.

A largura equivalente é uma medida global da linha. É a largura de uma “linha retangular”, cuja área é igual a área compreendida entre o contínuo espectral local e a própria linha real. A intensidade de uma linha espectral em absorção depende essencialmente do número de partículas absorvedoras e da temperatura do meio absorvedor, além de propriedades intrínsecas do elemento ou íon considerado. Portanto, a partir dos espectros observados podemos em princípio obter informações sobre as abundâncias dos elementos responsáveis pelas linhas espectrais e a

estrutura de temperatura do meio.

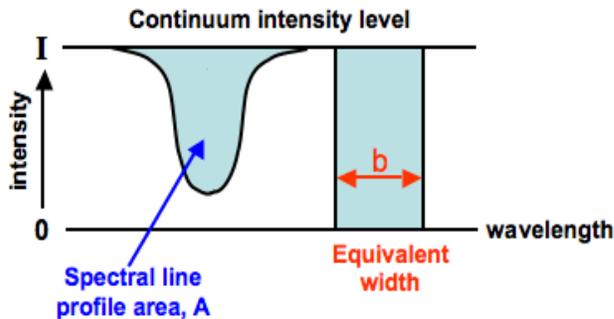


Figura 1- Representação da EW.

$$EW = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{F_c - F(\lambda)}{F_c} d\lambda$$

(3.0)

Fórmula da largura equivalente (EW):  $F_c$ : fluxo do contínuo;  $F(\lambda)$ : fluxo do espectro em  $\lambda$ ;  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ : respectivamente comprimentos de onda inicial e final da janela da linha.

- 2- O Método do Ajuste do Perfil de Linha (LPF) em que são feitos cálculos *rms* para comparações realizadas entre espectros sintéticos e o espectro empírico de cada estrela na região da linha Ca I  $\lambda 5513 \text{ \AA}$ .

$$rms = \sqrt{\sum_i^n \frac{(y - y_{sint.})^2}{N}}$$

(4.0)

Cálculo *rms*.  $y$ : fluxo do espectro observado,  $y_{sint.}$ : fluxo do espectro sintético.  $N$ : número inteiro de comprimentos de onda dentro da janela da linha para os quais há fluxo observado e calculado.

A seguir são mostrados espectros e gráficos que compreendem a linha Ca I  $\lambda 5513 \text{ \AA}$  para uma estrela anã e gigante.

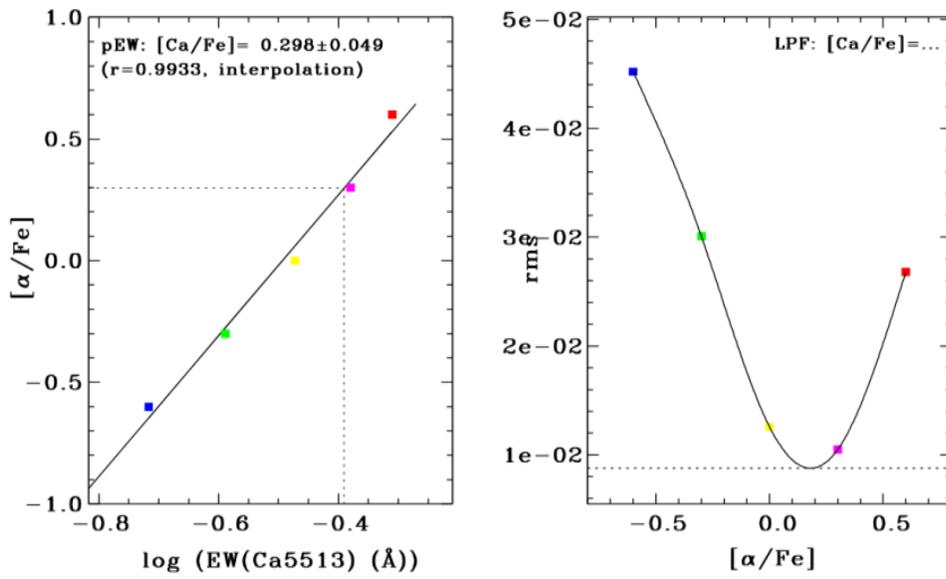
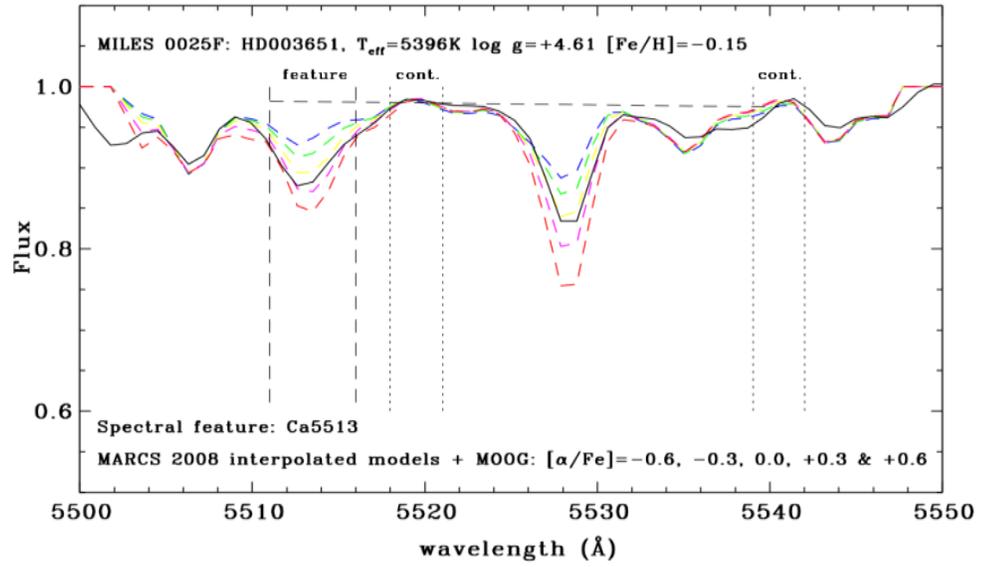


Figura 2 – Espectros e gráficos de uma estrela anã.

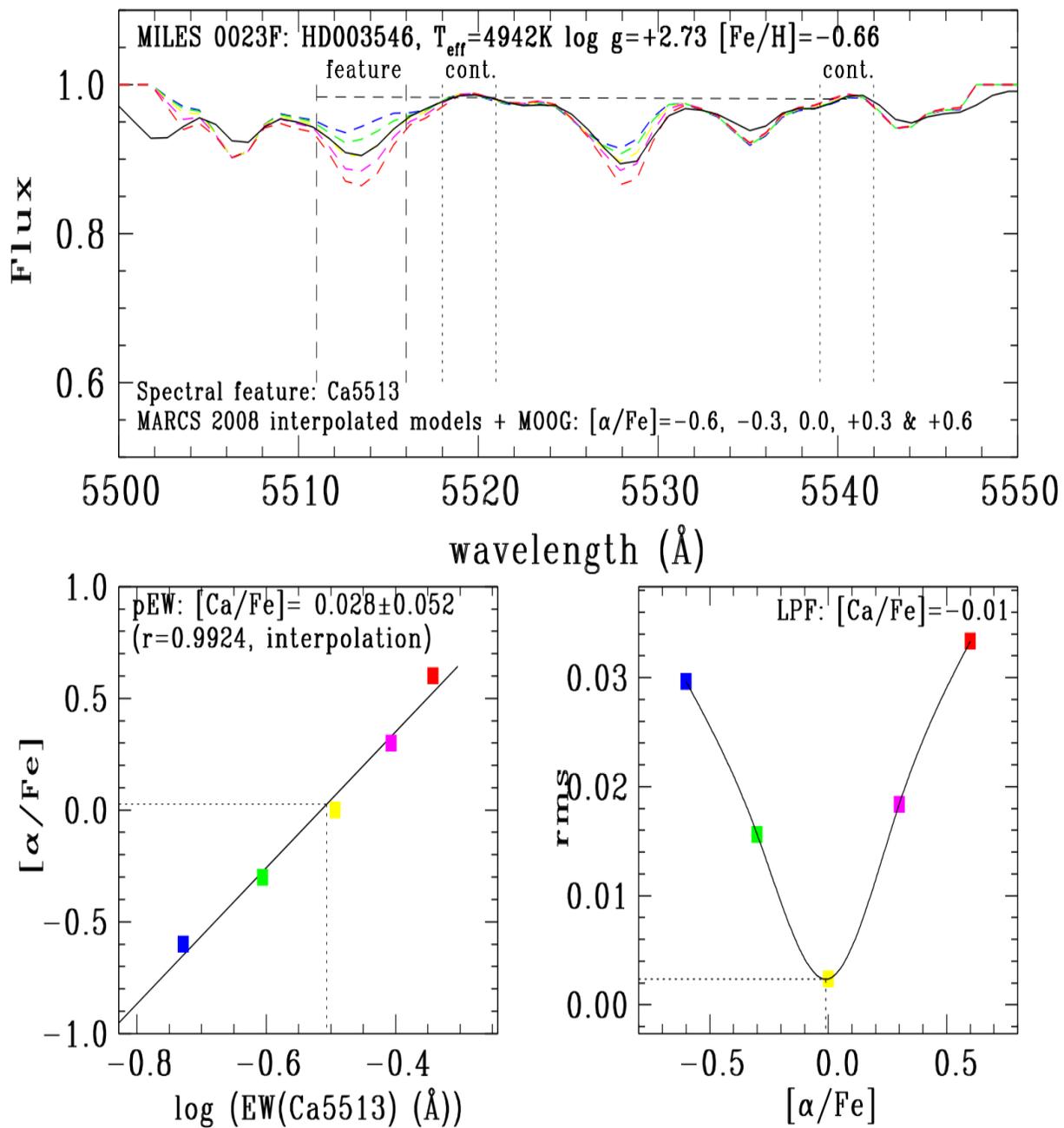
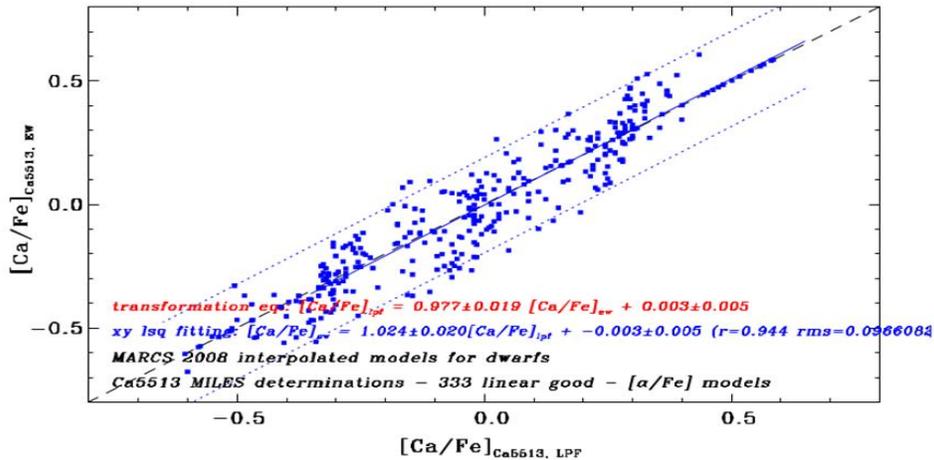


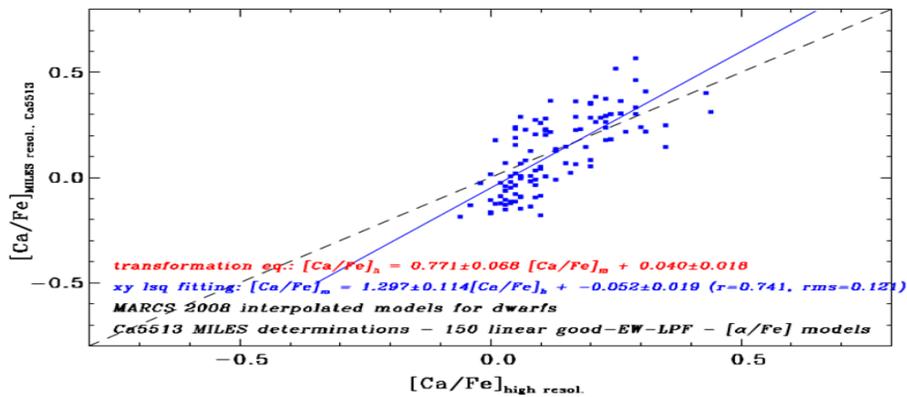
Figura 3 – Espectros e gráficos de uma estrela gigante.

Após a determinação da abundância do Ca (razão [Ca/Fe]) pelos dois métodos pEW e LPF, os resultados obtidos foram comparados entre si (Fig.4).



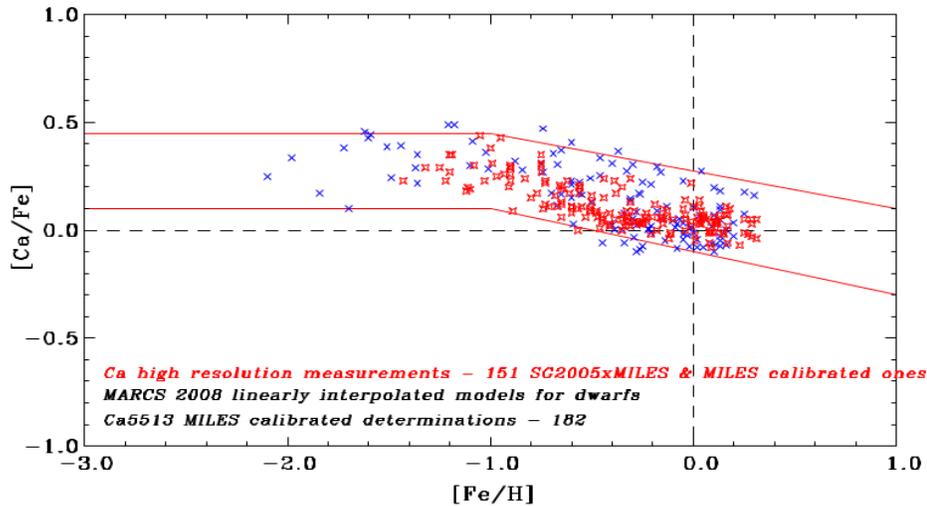
**Figura 4** – Comparação entre os dois métodos: [Ca/Fe] pEW vs. [Ca/Fe] LPF .

Os valores médios de [Ca/Fe] ( $[Ca/Fe]_m$ ) obtidos pelos dois métodos para as estrelas anãs precisaram ser comparados com medidas obtidas por meio de análises espectroscópicas de alta resolução coletadas da literatura ( $[Ca/Fe]_h$ ). Isso objetivou realizar uma calibração dos nossos resultados derivados a média resolução espectral (Fig. 5)



**Figura 5** - Comparação  $[Ca/Fe]_m$  vs.  $[Ca/Fe]_h$ .

Os valores calibrados de  $[Ca/Fe]$  obtidos para as estrelas anãs estão apresentados na Figura 6 em função dos valores de  $[Fe/H]$ , como são usualmente analisados para estrelas da vizinhança do sol.



**Figura 6** –  $[Ca/Fe]$  vs.  $[Fe/H]$ .

Obtivemos medidas de largura equivalente da absorção dominada pela linha do Ca I  $\lambda 5513$  Å tanto para espectros sintéticos como para os espectros da base empírica MILES, assim como comparamos o perfil dessa absorção por entre os espectros observados e teóricos. Recuperamos para as estrelas anãs e gigantes a abundância do cálcio a partir da nossa análise feita em média resolução espectral com base em dois métodos (largura equivalente e perfil de linha). No entanto, encontramos certa limitação ao perfazer a calibração dos nossos resultados advindos de uma única linha do Ca contra dados da literatura derivados de análises em alta resolução. Por este motivo, empenhamos esforços para estender a nossa análise para outra linha do cálcio (Ca I  $\lambda 6162$  Å), e obter assim, mais resultados para determinar sua abundância com maior confiabilidade.

## 4.0 Resumo das atividades realizadas a partir de AGOSTO de 2014

### 4.1 Escolha das linhas do Ca

Para dar continuidade ao trabalho, foi preciso procurar outras linhas do Ca que fossem proeminentes nos espectros de média resolução da base MILES. Com uso dos atlas solares The Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å e Solar Atlas Bass on-line ([http://bass2000.obspm.fr/solar\\_spect.php](http://bass2000.obspm.fr/solar_spect.php)), a região de 6000 a 7000 Å foi inspecionada à procura de linhas mensuráveis do Ca I. Encontramos as linhas nos comprimentos de onda 6122,23 Å, 6162,18 Å, 6169,56 Å, 6439,08 Å e 6449,60 Å. O critério utilizado para a escolha das linhas foi observar no The Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å a largura equivalente de cada linha do Ca e fazer uma inspeção visual nos espectros de 3 estrelas MILES na região de cada comprimento de onda para averiguar se linhas de outros elementos poderiam interferir na linha do Ca de acordo com a resolução dos espectros MILES.

Depois de feitas as inspeções, que serão citadas a seguir, foi escolhida uma linha do Ca dentre aquelas selecionadas, para a qual aplicamos toda a metodologia empregada à linha Ca I 5513 Å.

### 4.2 Ajustes dos espectros

Os espectros empíricos do conjunto de estrelas, anãs e gigantes, da base MILES que estamos estudando, foram recortados para a região 5900- 6700 Å, a qual compreende as linhas escolhidas.

### 4.3 Escolha dos contínuos

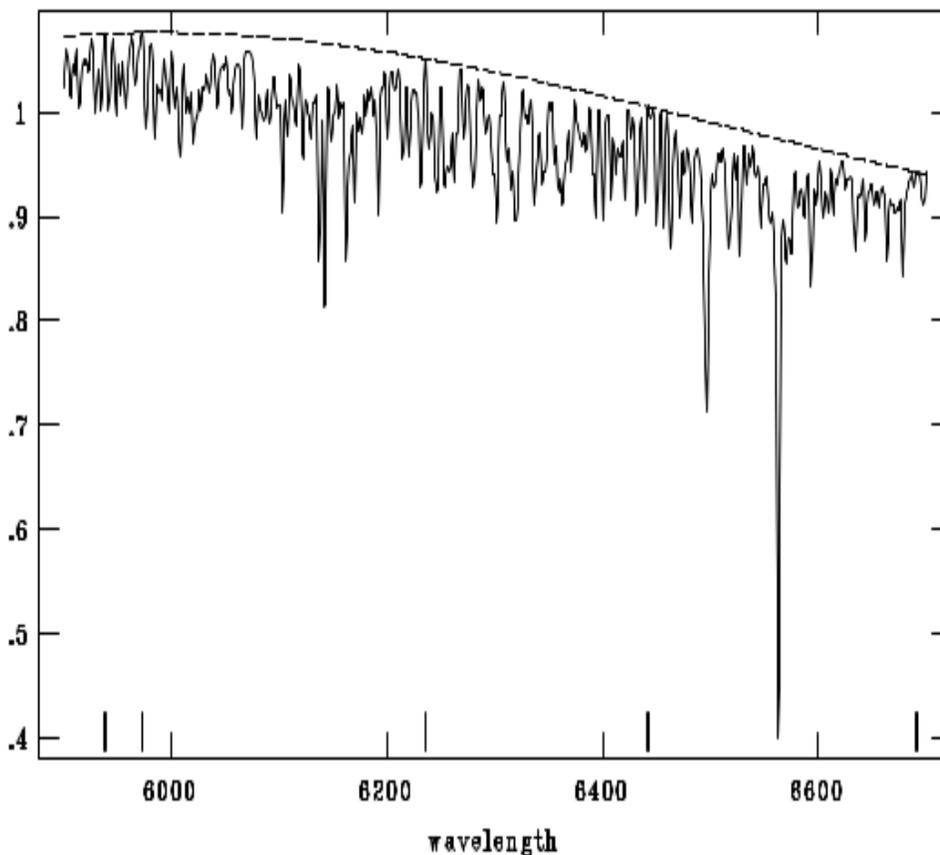
Para a normalização dos espectros recortados foram escolhidos alguns pontos de contínuos. Estes pontos foram escolhidos com base no Atlas do Fluxo Solar, Atlas Bass on-line e pela comparação com três tipos de estrelas: uma estrela com propriedades semelhantes ao Sol (#0176); uma estrela mais quente e mais pobre em metais do que o Sol (#0089); e uma estrela mais fria e mais rica em metais do que o Sol (#0322).

### 4.4 Normalização dos espectros

Foi realizada a normalização dos espectros, que consiste em uma divisão do espectro por uma função polinomial em  $\lambda$  representando o fluxo do contínuo espectral. A normalização de fluxo é um trabalho árduo e rigoroso, que demanda algum tempo e cuidado (veja um exemplo na Figura 7). Cada espectro estelar individual tem seu fluxo normalizado a uma unidade, abrangendo estrelas anãs e gigantes de

diversos tipos espectrais e metalicidades.

```
NOAO/IRAF V2.16 milone@sony-vaio-milone Thu 15:22:29 05-Feb-2015
func=spline3, order=1, low_rej=2, high_rej=0, niterate=10, grow=1
total=890, sample=9, rejected=0, deleted=0, RMS=0.00103
m0797V_5900_6700.fits, [1,1]
MILES spectrum v 9.0
```



**Figura 7** – Espectro de uma estrela gigante em fase de normalização de fluxo. Os traços verticais ao longo do eixo x representam as regiões de contínuo escolhidas para se fazer o ajuste polinomial do contínuo estelar.

Depois que todos os 985 espectros (de estrelas anãs e gigantes) foram normalizados, foi gerado um espectro médio, e a partir deste, escolhemos pontos de contínuo para as linhas do Ca pré-escolhidas (6122,23 Å, 6162,18 Å, 6169,56 Å). Estes pontos de contínuo foram analisados a partir de uma comparação com o uso do Atlas

do Fluxo Solar e uma inspeção visual em cada uma das estrelas anãs e gigantes. Foram escolhidos os seguintes intervalos de contínuos:

Para a Ca I  $\lambda$  6122,23 Å:  $\lambda$  6112,7 -  $\lambda$  6115,4 e  $\lambda$  6143,3 -  $\lambda$  6147,8.

Para Ca I  $\lambda$  6162,18 Å e Ca I  $\lambda$  6169,56 Å:  $\lambda$  6143,3 -  $\lambda$  6147,8 e  $\lambda$  6181,1 -  $\lambda$  6185,6.

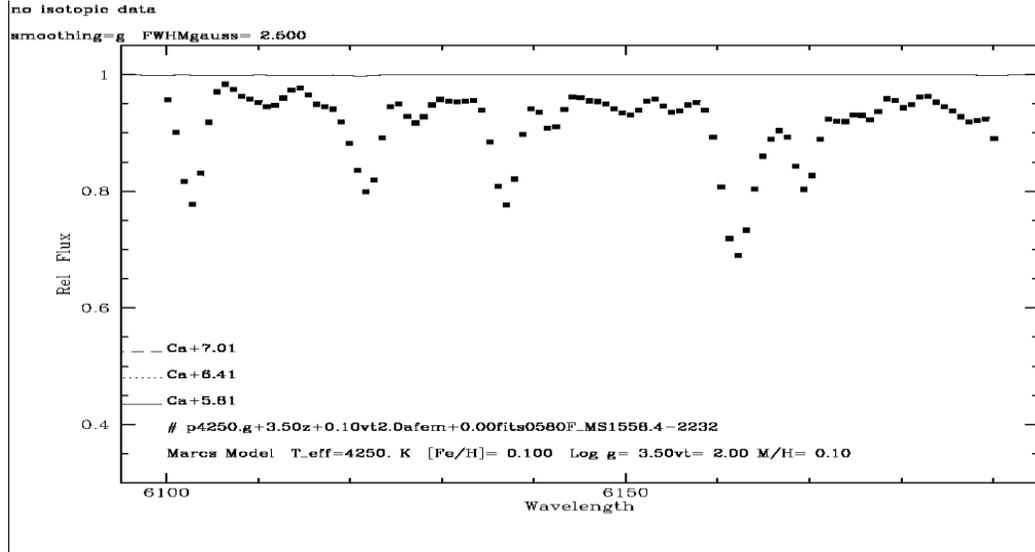
Para se eleger uma linha e aplicar a metodologia já utilizada anteriormente, foram realizadas as medidas de largura equivalente (EW) para as três linhas através dos programas Lector e Indexf. As medidas obtidas por estes programas foram analisadas e foi escolhida a linha Ca I  $\lambda$  6162,18 Å, por esta ser mais intensa e apresentar melhores medidas de largura equivalente do que as demais.

#### 4.5 Cálculos dos espectros teóricos

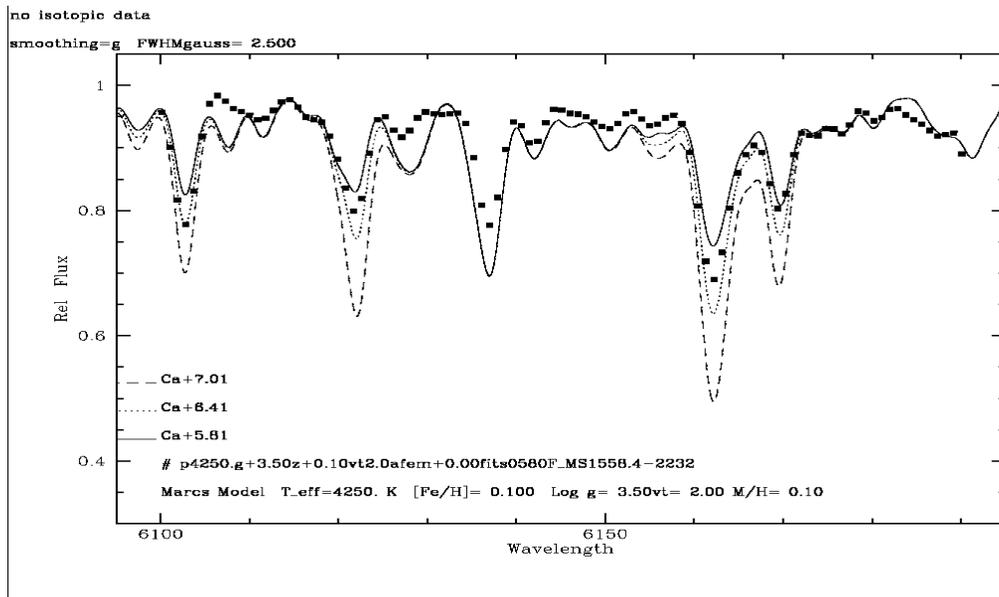
Para o cálculo dos espectros teóricos necessitou-se eleger algumas linhas atômicas e moleculares que estão presentes na região espectral em estudo. Estas linhas foram escolhidas tomando como base linhas mensuráveis para esta região no Sol (nossa principal referência), por meio de catálogos da literatura, e estas foram aplicadas para alguns tipos de estrelas em estudo: uma estrela com propriedades semelhantes ao Sol (#0176); uma estrela mais quente e mais pobre em metais do que o Sol (#0089); e uma estrela mais fria e mais rica em metais do que o Sol (#0322).

Linhas moleculares, como por exemplo, CN e C<sub>2</sub>, e linhas atômicas foram aplicadas para todas as estrelas. Porém, percebeu-se a necessidade de eleger outras linhas, como TiO e MgH, para estrelas mais frias (com temperaturas abaixo de 4250 k). Dessa forma, os espectros teóricos foram calculados com o código MOOG, em quatro etapas. Cálculo de espectros teóricos para: anãs com temperaturas abaixo de 4500 k; anãs com temperaturas acima de 4500 k; gigantes com temperaturas abaixo de 4500 k; gigantes acima de 4500k.

A seguir são mostrados exemplos da predominância destas linhas para uma estrela fria (#0580) no intervalo de  $\lambda$  6095 Å a  $\lambda$  6195 Å. Nas figuras, o espectro pontilhado representa o espectro observado, e as linhas representam as linhas atômicas ou moleculares.



**Figura 8** – Espectro observado e linha do  $C_2$  para uma estrela fria.



**Figura 9** – Espectro observado e linhas atômicas para uma estrela fria.

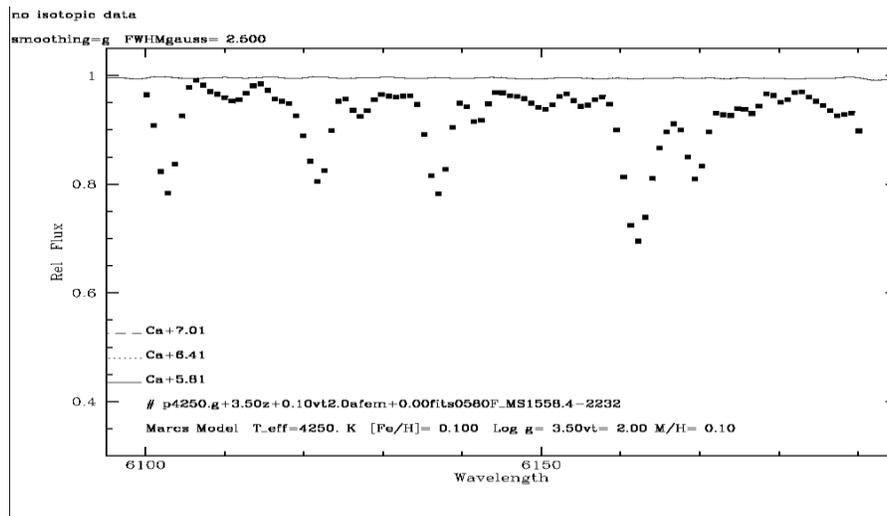


Figura 10 - Espectro observado e linha do CN para uma estrela fria.

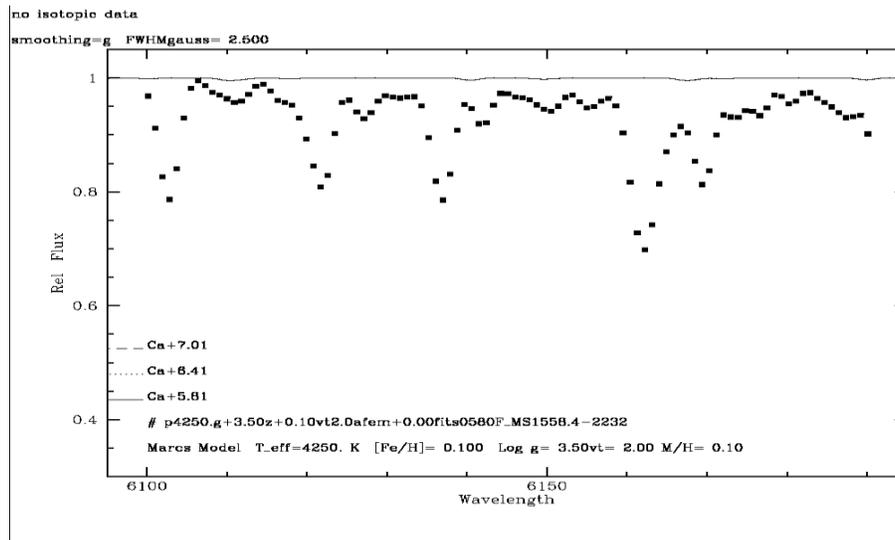
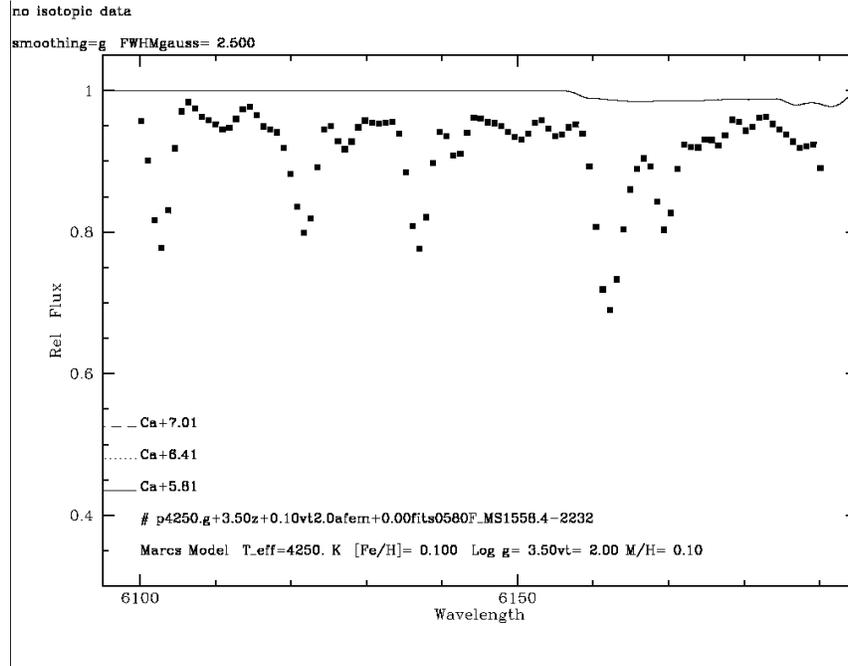


Figura 11 – Espectro observado e linha do MgH para uma estrela fria.



**Figura 12** – Espectro observado e linha do TiO para uma estrela fria.

#### 4.6 Determinação da abundância do cálcio para a linha Ca I $\lambda$ 6162 Å

Foram aplicados os dois métodos, já citados anteriormente, Método da Largura Equivalente (pEW), em que as medidas de abundância são obtidas por meio do programa Lector, e o Método do Ajuste do Perfil de linha (LPF), para determinar a abundância do Ca para a linha Ca I  $\lambda$  6162,18 Å para as estrelas anãs e gigantes.

Para o Método da Largura Equivalente (pEW), foram feitos cálculos através do programa Super Mongo para ajustar uma reta representando a razão de abundância [Ca/Fe] em função de  $\log(\text{EW})$  para cada estrela, usando medidas de EW efetuadas nos espectros sintéticos. Após a realização desses cálculos, o mesmo programa gerou os gráficos que ilustram os ajustes lineares correspondentes. Nas Fig. 13 e Fig. 14 pode ser observado um exemplo deste gráfico que corresponde ao da parte inferior esquerda. Nesse gráfico pode ser observado que o eixo das ordenadas corresponde à razão de abundância [alfa/Fe] e o eixo das abscissas corresponde ao  $\log(\text{EW})$ , e na reta, cada ponto representa um espectro sintético para a linha Ca6162. Através desses gráficos foi realizada uma inspeção visual em cada um deles, para inspecionar a interpolação e extrapolação e, assim, pôde-se observar em quais deles o método falhou.

No método de ajuste de perfil da linha, o mesmo programa Super Mongo também gerou gráficos para ilustrar os cálculos. Esse tipo de gráfico pode ser observado nas Fig. 13 e 14 na parte inferior direita. O eixo das ordenadas apresenta os valores do cálculo *rms*, citado anteriormente, e o eixo das abscissas apresenta a razão de abundância [alfa/Fe]. Através da curva polinomial ajustada, o valor mínimo em *rms* corresponde à medida da razão de abundância. Os cinco pontos que foram usados no ajuste representam os espectros sintéticos. Assim, obteve-se a razão de abundância buscando o mínimo da curva.

Foi realizada uma inspeção visual em cada um desses gráficos para cada estrela, anã e gigante, para avaliar os casos em que esse método falhou, que são os casos em que as curvas não apresentam um valor mínimo.

## 4.7 Compilação, reformatação e comparação dos dados

Após a determinação da abundância do Ca (razão [Ca/Fe]) pelos dois métodos, (pEW) e (LPF), os dados obtidos foram reunidos em arquivos para uma posterior comparação entre estes.

Foi realizada uma inspeção visual em cada conjunto de estrelas, anãs e gigantes, e foi avaliado para cada estrela se algum dos dois ou os dois métodos falharam, e estes foram separados em arquivos.

O arquivo final resultante compreendeu para cada estrela a abundância do Ca (razão [Ca/Fe]) representada por cada um dos métodos, quando possível, ou a mais confiável dado por um dos métodos.

### 4.7.1 Construção de gráficos para confrontar os resultados dos dois métodos entre si (pEW x LPF) para cada classe de estrelas

Através do arquivo em que se reuniu os valores de razão de abundância obtidos pelos dois métodos (pEW x LPF) foram gerados gráficos que compararam os resultados entre si. Esses gráficos podem ser visualizados nas figuras 15 e 16, que representam as comparações para as estrelas anãs e gigantes respectivamente. O eixo das ordenadas compreende a razão de abundância [Ca/Fe] pelo método da largura equivalente e o eixo das abscissas compreende a razão de abundância [Ca/Fe] pelo método do ajuste de perfil da linha.

Por meio destes gráficos pode-se concluir que os resultados dos dois métodos concordam entre si (segundo à relação 1:1) e, conseqüentemente, podemos derivar a razão de abundância [Ca/Fe] como uma média

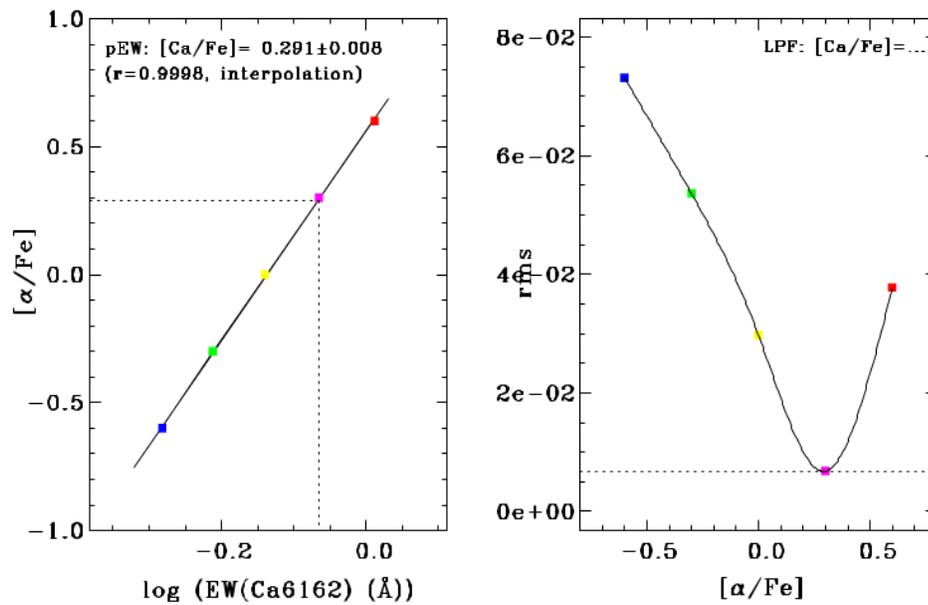
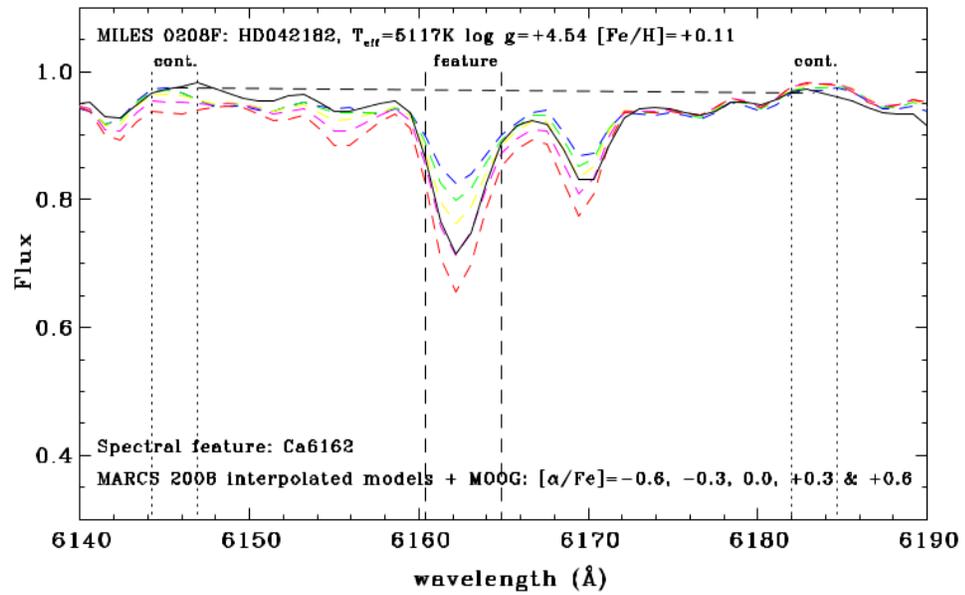


Figura 13 – Espectros e gráficos de uma estrela anã.

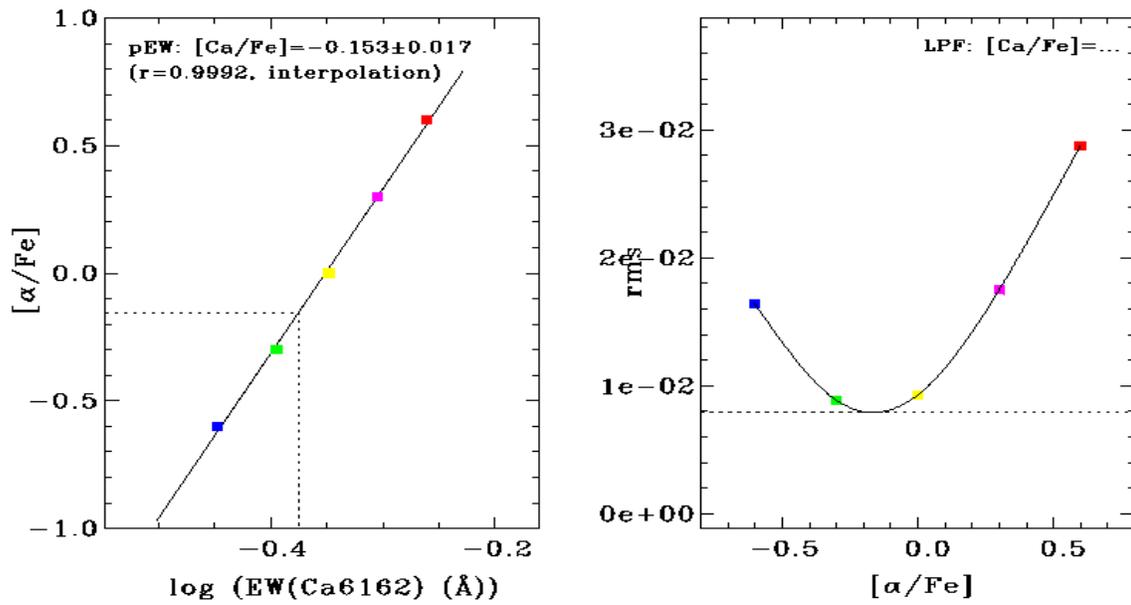
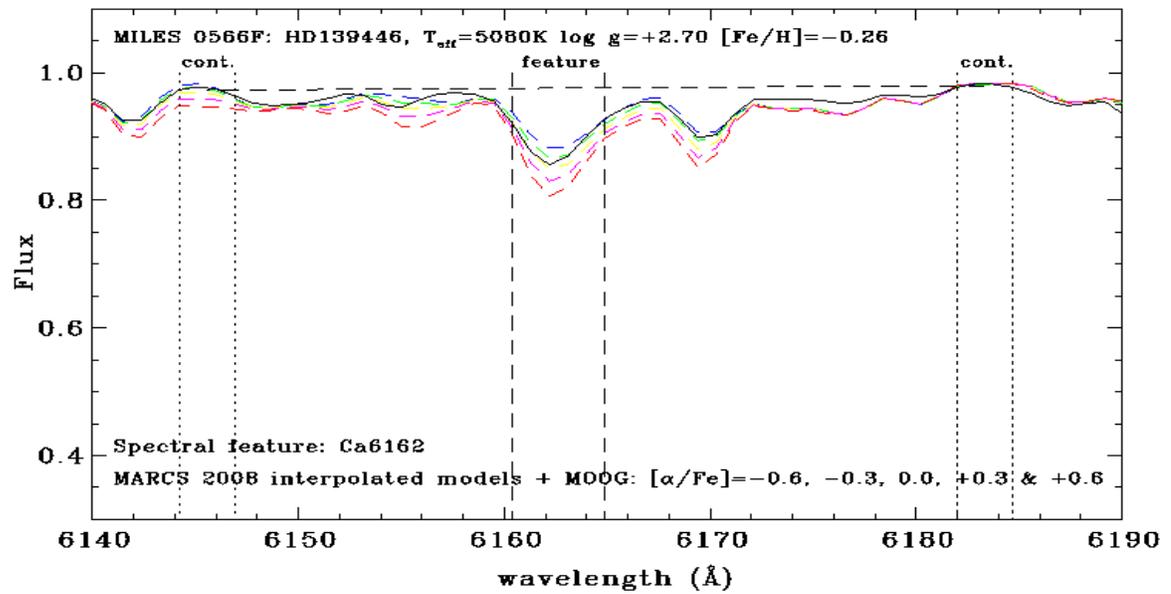
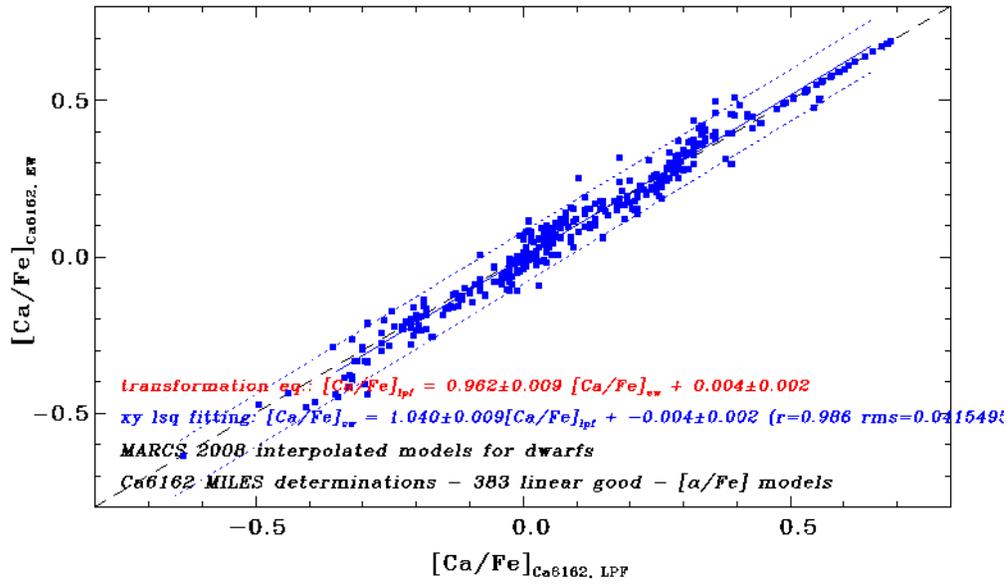
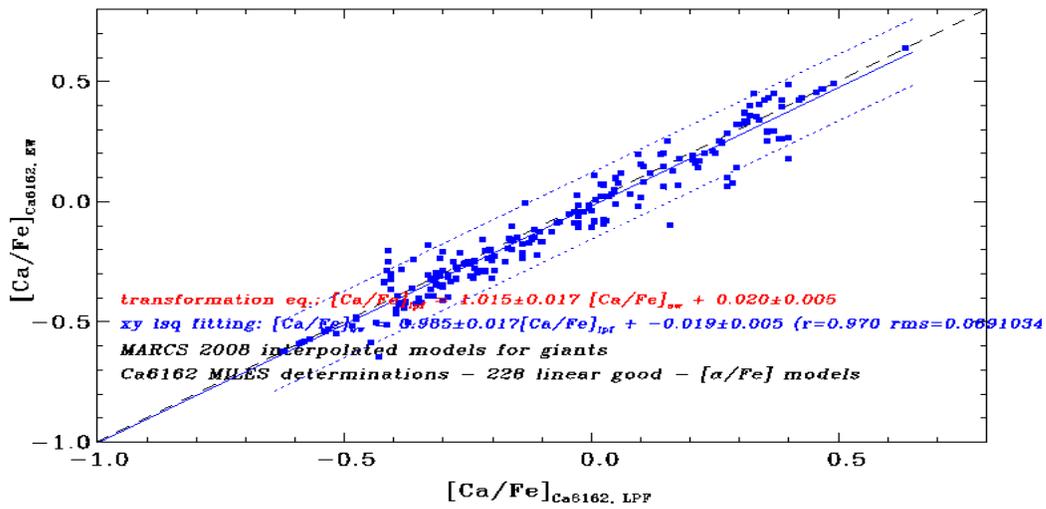


Figura 14 – Espectros e gráficos de uma estrela gigante.



**Figura 15** - Comparação entre os dois métodos:  $[Ca/Fe]$  pEW vs.  $[Ca/Fe]$  LPF de estrelas anãs.



**Figura 16** - Comparação entre os dois métodos:  $[Ca/Fe]$  pEW vs.  $[Ca/Fe]$  LPF de estrelas gigantes.

#### 4.8 Análise dos resultados com relação aos parâmetros fotosféricos das estrelas anãs e gigantes

Gráficos foram produzidos relacionando-se a diferença de abundância entre os dois métodos ( $[Ca/Fe]_{LPF} - [Ca/Fe]_{pEW}$ ) com os parâmetros fotosféricos das estrelas:  $T_{\text{ef}}$ ,  $\log g$ ,  $[Fe/H]$ . Também foi gerado um gráfico em que se relacionou a mesma diferença de abundância com  $[Ca/Fe]_{pEW}$ .

Esses gráficos podem ser observados nas Fig. 17 e 18, para estrelas anãs e gigantes respectivamente.

O primeiro painel destas figuras refere-se à relação entre a diferença de abundância (eixo das ordenadas) e  $T_{\text{ef}}$  (eixo das abscissas). Pode-se concluir através deste gráfico que a diferença não se dá em função da temperatura efetiva.

O segundo painel refere-se à relação entre a diferença de abundância e  $\log g$ . Também pode-se concluir que a diferença não depende da gravidade superficial.

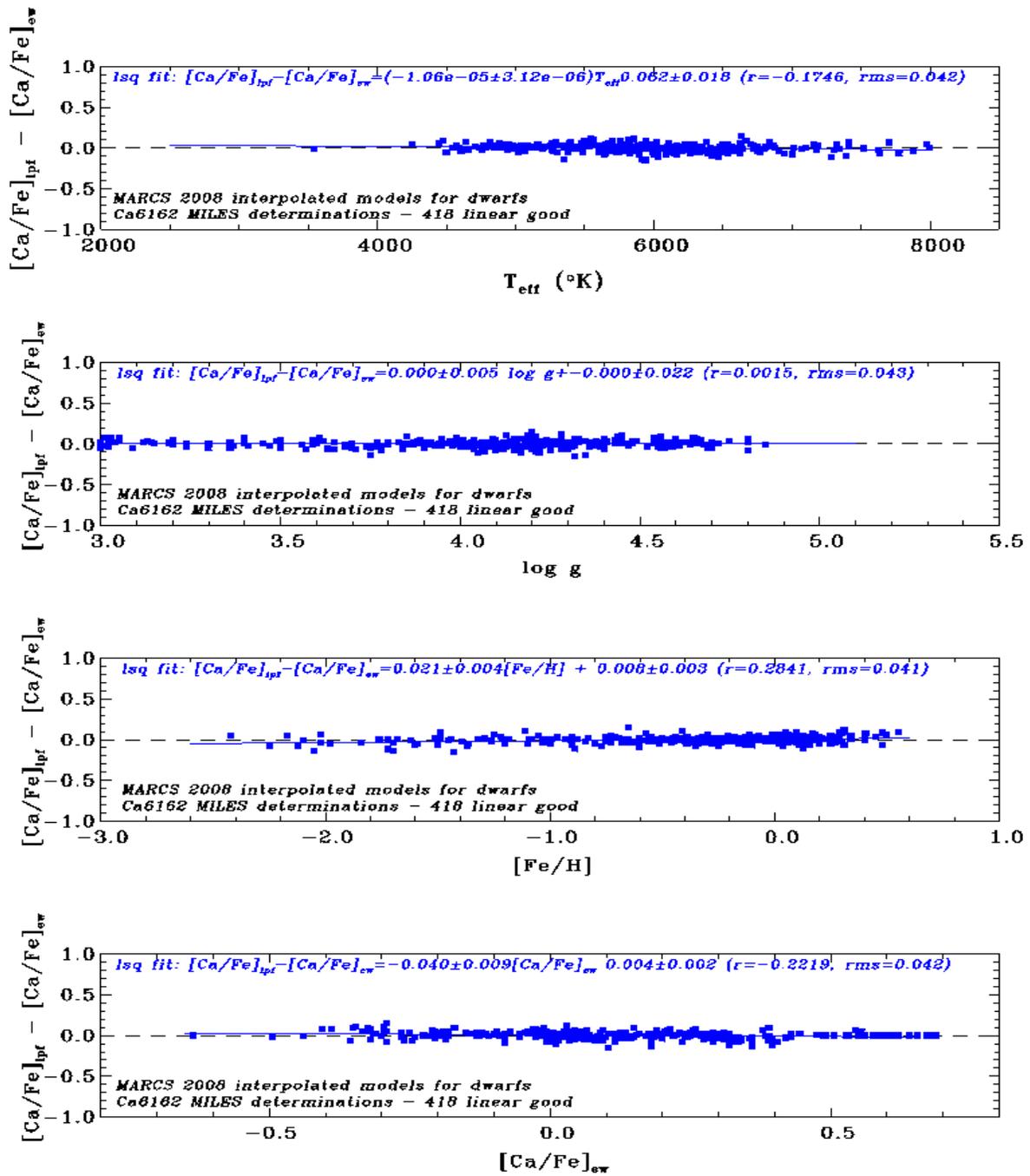
O mesmo pode-se concluir para o gráfico do terceiro painel. A diferença entre as razões de abundâncias pelos dois métodos não tem dependência com a metalicidade  $[Fe/H]$ .

O quarto painel mostra que a diferença residual em  $[Ca/Fe]$  dada pelos dois métodos flutua em torno de zero por toda escala de razão de abundância com um rms comparável com o erro típico da própria razão de abundância.

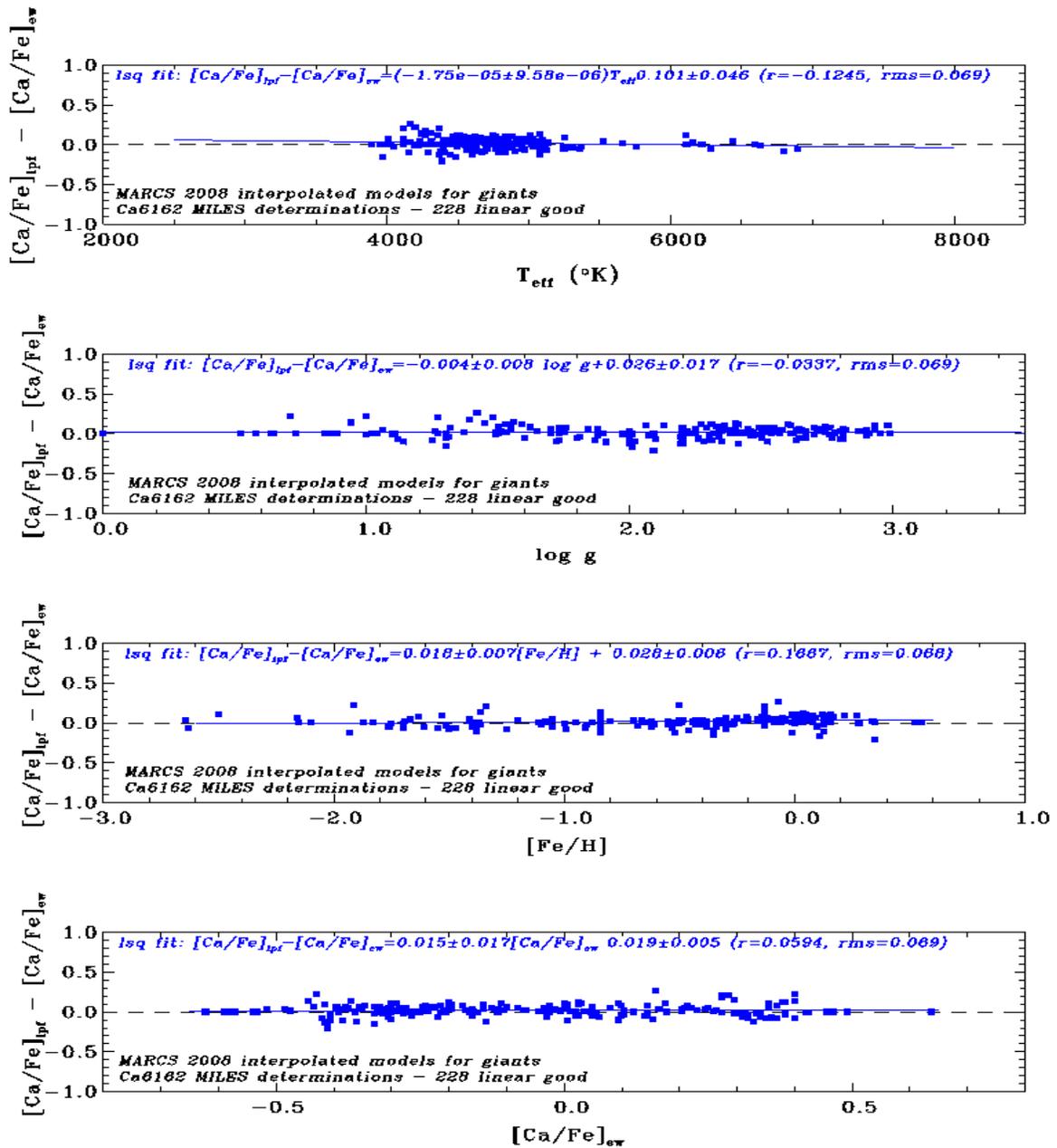
#### 4.9 Comparação e calibração dos valores de médio de $[Ca/Fe]$ em média resolução com medidas de alta resolução coletadas da literatura

Os valores de  $[Ca/Fe]$  obtidos aqui para as estrelas anãs precisaram ser comparados com medidas obtidas por meio de análises espectroscópicas de alta resolução coletadas da literatura. Isso objetiva realizar uma calibração dos nossos resultados derivados a média resolução espectral.

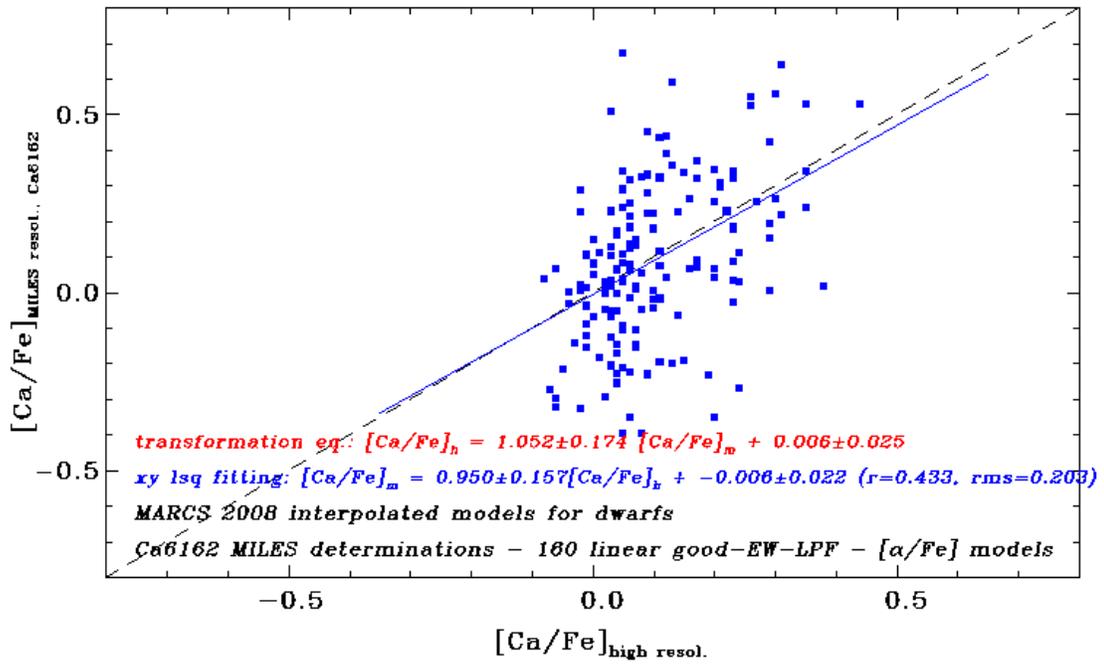
Na Figura 19 é mostrada a comparação de  $[Ca/Fe]$  obtidas em média resolução contra valores da literatura (alta resolução) para estrelas anãs em comum. Esta comparação fornece uma calibração linear para nossos resultados conforme apresentado no gráfico desta figura. Notamos que nossos resultados para  $[Ca/Fe] < -0.2$  dex não seguem a calibração linear global e tiveram que ser desconsiderados. Está sendo feita uma inspeção visual, para analisar a dispersão encontrada nesse gráfico.



**Figura 17** – Gráficos de estrelas anãs que confrontam a diferença de abundância entre os dois métodos ( $[Ca/Fe]_{LPF} - [Ca/Fe]_{pEW}$ ) com os parâmetros fotosféricos.



**Figura 18** – Gráficos de estrelas gigantes que confrontam a diferença de abundância entre os dois métodos ( $[Ca/Fe]$  LPF –  $[Ca/Fe]$  pEW) com os parâmetros fotosféricos.



**Figura 19** - Comparação  $[\text{Ca}/\text{Fe}]_m$  vs.  $[\text{Ca}/\text{Fe}]_h$ .

Investigamos também a diferença entre  $[\text{Ca}/\text{Fe}]$  obtidos em média resolução (m) e  $[\text{Ca}/\text{Fe}]$  da literatura (alta resolução, h) em função dos parâmetros fotosféricos, como mostrado na Figura 20. Concluiu-se que esta diferença não tem dependência com os parâmetros fotosféricos  $\log g$  e  $[\text{Fe}/\text{H}]$ , porém há uma variação em relação a  $T_{\text{ef}}$ , a qual está sendo investigada.

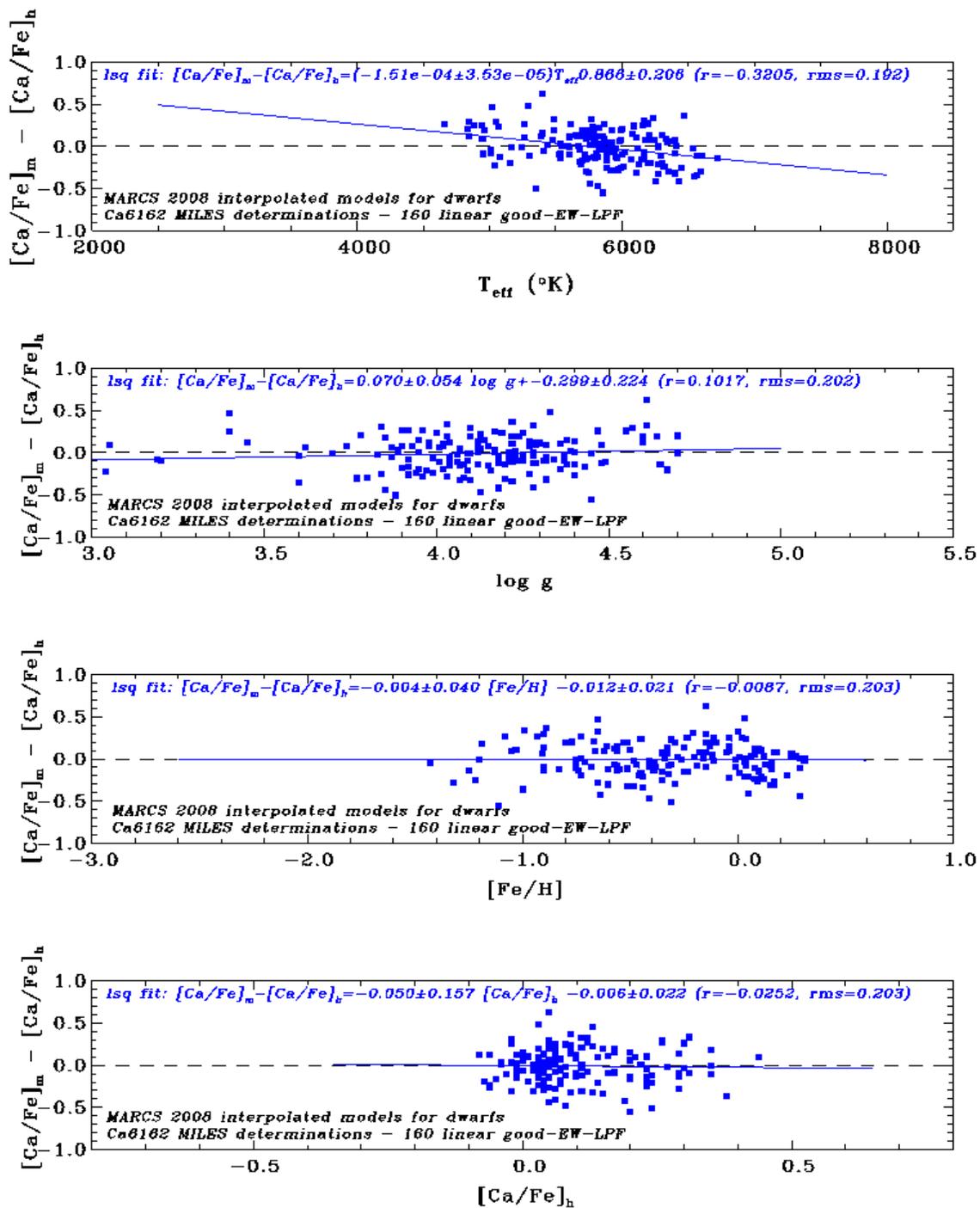


Figura 20 - Comparação de  $([Ca/Fe]_m - [Ca/Fe]_h)$  vs.  $T_{\text{ef}}$ ,  $\log g$ ,  $[Fe/H]$  e  $[Ca/Fe]_h$ .

Os valores calibrados de  $[Ca/Fe]$  obtidos para estrelas anãs estão apresentados na figura 21 em função dos valores de  $[Fe/H]$ , como são usualmente analisados para estrelas da vizinhança do sol. A dispersão encontrada também está sendo investigada.

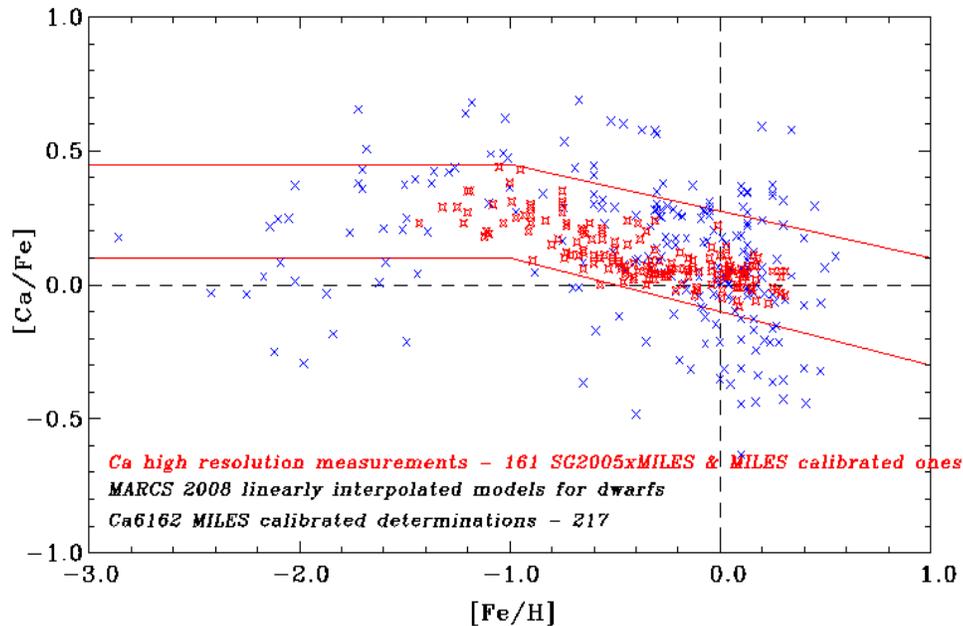


Figura 21 -  $[Ca/Fe]$  vs.  $[Fe/H]$ .

## 5.0 Conclusões

Obtivemos medidas de largura equivalente da absorção dominada por outra linha do cálcio tanto para espectros sintéticos como para os espectros da base empírica MILES, assim como comparamos o perfil dessa absorção por entre os espectros observados e teóricos. Para isso, elegemos uma linha proeminente do Ca I ( $Ca\ I\ \lambda\ 6162,18\ \text{\AA}$ ) na região de 6100 a 6200  $\text{\AA}$ , e calculamos espectros teóricos para a região desta linha. Para as estrelas anãs, calibramos as nossas medidas para um sistema homogêneo definido por medidas a alta resolução espectral compiladas de trabalhos publicados na literatura da área. Esta última etapa está sendo feita para as estrelas gigantes.

## 6.0 Perspectivas

Pretende-se estender a análise para outras linhas do cálcio e assim obter mais resultados para determinar sua abundância com maior confiabilidade. Linhas candidatas do Ca I são: 6102.73 Å, 6122,23 Å, 6169,56 Å.

## 7.0 Referências Bibliográficas

Milone, A., da Silva, R., Sansom, A., Sánchez-Blázquez, P.2012 – **Automated Spectroscopic Analysis of Stars at Medium and High Spectral Resolution**. JCIS, in press.

Milone, A. de C., Sansom, A.E., Sánchez-Blázquez, P.2012 – **Element abundances in the stars of the MILES spectral library: the Mg/Fe ratio**. MNRAS, 414, 1227.

Sánchez-Blázquez, P. et al. 2006 – Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra. MNRAS, 371, 703.

Soubiran, C., Girard, P.2005 – Abundance trends in kinematical groups of the Milky Way's disk. A&A, 438, 139.









