



Observatório Nacional – MCT

Programa de Pós-Graduação em Astronomia

Tese de Doutorado

**C-J Ricas em Silicato: Binaridade,
Discos de Poeira e seu Lugar no
Universo das Estrelas Carbonadas**

Ana Beatriz de Mello

Orientadora

Silvia Lorenz Martins

Agradecimentos

À minha família, bichos e amigos pelo apoio, ajuda e confiança.

À Dra. Silvia Lorenz Martins pela proposição do tema e sua orientação.

Aos amigos e funcionários do Observatório do Pico dos Dias sem os quais parte desse trabalho não poderia existir.

Ao Dr. Cláudio Bastos pelas observações em alta resolução no telescópio ESO.

Ao Observatório Gemini pela concessão das missões de observação nos anos de 2007 e 2009.

Este trabalho recebeu auxílio, através da concessão de bolsa de doutorado, do Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) de abril de 2008 até janeiro de 2010, quando a bolsa foi cancelada devido a minha contratação em 01/02/2010 no Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

Resumo

As estrelas carbonadas C-J são objetos desafiadores para a teoria da evolução estelar, que se destacam por um considerável enriquecimento em carbono isotópico e por não apresentarem sobre-abundâncias de elementos do processo-s. Além disso, alguns desses objetos apresentam, ainda, um excesso de emissão em seus espectros no infravermelho em $9,8 \mu m$ e $18 \mu m$, condizentes com a presença de um envoltório rico em grãos de silicato, material oxigenado e que não é, portanto, compatível com o cenário usual para estrelas carbonadas. Esse grupo de estrelas peculiares, as C-J ricas em silicato, contava com poucos objetos confirmados. Diversas teorias foram propostas para explicar a dupla química presente nesses sistemas, sendo as mais bem sucedidas, até o momento, baseadas na presença de uma companheira binária e um disco de poeira circumbinário ou circunstelar à companheira, responsável pelo armazenamento dos grãos de silicato. Neste trabalho, estudamos uma amostra de estrelas C-J, tanto comuns quanto ricas em silicato, empregando espectroscopias no visível e no infravermelho e modelos circunstelares que descrevem seus ambientes externos. Foram classificadas 28 estrelas segundo suas estruturas espectrais fotosféricas e de seu envoltório; 6 foram avaliadas sob a ótica da evolução, em um intervalo de mais de 20 anos, de seus envoltórios circunstelares; e 4 novas velocidades radiais foram calculadas, visando a avaliar a possibilidade de binaridade. Como o resultado deste estudo foram apresentadas 7 novas candidatas a sistemas binários capazes de sustentar um disco de acreção e foram estabelecidos vínculos observacionais com a sequência evolutiva especial proposta para as estrelas C-J, em 2007. Contribuindo, assim, com novas pistas para a solução do enigma das C-J ricas em silicatos.

Palavras-chave: estrela, carbonada rica em silicato, C-J, envoltório circunstelar, poeira, infravermelho

Abstract

C-J carbon stars pose as a challenge to stellar evolution theory, being objects enriched in isotopic carbon but not in s-process elements. Furthermore, some of these stars present radiation excess in their infrared spectra, at $9.8 \mu m$ and $18 \mu m$, characteristic of a circumstellar envelope of silicate grains — O-rich material and, therefore, incompatible with the normal carbon star scenario. This class of peculiar stars, the silicate-rich C-J stars, comprises only a small number of objects, so far. Different theories were presented to explain the occurrence of double chemistry in these systems, the more successful being based on the existence of a companion star and either a circum-binary or a circum-companion dust disk that would store the silicate grains. We present the results of research with a sample of normal and silicate-rich C-J stars, from both optical and infrared spectroscopy and modeling of their circumstellar environments. 28 stars were classified according to both photospheric and envelope-originated spectroscopic features; an assessment of envelope evolution in a timescale of over 20 years was made for 6 objects; and radial velocities were estimated for 4 objects, in order to track candidates for binary systems. Through this multiple-approach investigation of the objects, we presented 7 new candidates to a binary system that might support circumstellar disks and established observational links with the spectral sequence proposed to C-J stars, in 2007. Thus, it provided new clues to the riddle of silicate-rich C-J star.

Keywords: star, silicate carbon star, C-J, circumstellar shell, dust, infrared

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Conhecendo as Estrelas Carbonadas	1
1.2	Conhecendo as Estrelas C-J	3
1.3	Os Possíveis Modelos Evolutivos das C-J	6
1.3.1	Cool Bottom Processing	8
1.3.2	C-R como Progenitoras	10
1.4	Formação dos Envoltórios das Estrelas Carbonadas	11
1.4.1	Mecanismos de Expansão	12
1.5	Formação de Grãos	14
1.6	Estrelas Carbonadas C-J Ricas em Silicato	16
1.6.1	Indícios de Binaridade	17
2	Detalhes da Amostra	21
2.1	Observações no Gemini South	22
2.2	Observações no OPD-LNA	27
2.3	Observações no ESO - La Silla	28
3	NSCC	31
3.1	Índices Fotosféricos	32
3.2	Índices do Envoltório Circunstelar	39
3.3	Classificação Final	44
4	Análise do Envoltório Circunstelar	47
4.1	Fase Gás	48
4.2	PAHs	49

Conteúdo

4.3	Fase Sólida	50
4.4	Modelagem do Envoltório Circunstelar	52
4.5	Resultados dos Modelos	55
4.5.1	MC79 2-11: C-J6 C ₂ 6 j6 τ 2 JPec	58
4.5.2	IRAS 11311-6355: C-J:5 τ 2 Jpec	60
4.5.3	IRAS 16001-4851: C-J:6 τ 3 Jpec	61
4.5.4	IRAS 16103-4929: C-J:3 MS3 τ 2 JPec	62
4.5.5	VX Aql: C-J2 C ₂ 4 j7 τ 2 Jpec	62
4.5.6	C* 2837: C-J4 C ₂ 7 j6 τ 2 Jpec	63
4.5.7	IRAS 09425-6040: C-J:5 τ 2 Jpec	65
4.5.8	Estrelas Carbonadas Ordinárias ou Normais	67
5	Velocidades Radiais	69
5.1	Metodologia Empregada	71
5.2	Análise dos resultados	75
6	Conclusões	81
6.1	Considerações por Objeto	81
6.2	Considerações finais	90
	Bibliografia	95
	Anexo A: T-ReCs Data of Silicate Carbon Stars	105
	Resumo	105
	Anexo B: NSCC – New Scheme of Classification of C-Rich Stars Devised from Optical and Infrared Observations	115
	Resumo	115

1 Introdução

C-J: Estrelas Carbonadas Nada Convencionais

As estrelas carbonadas compõem um estágio mais evoluído de estrelas que, quando na Sequência Principal, possuíam baixa massa ou massa intermediária de até cerca de $4 M_{\odot}$. As estrelas de baixa massa possuem massas no intervalo $0,8 M_{\odot} < M < 2,3 M_{\odot}$ e podem ser definidas como aquelas que desenvolvem um núcleo de hélio degenerado após a fase da sequência Principal. Por sua vez, as de massa intermediária possuem massas no intervalo $2,3 M_{\odot} < M < 9 M_{\odot}$ e podem ser definidas como as que iniciam a queima do hélio, nesse caso com núcleo não-degenerado e desenvolvem, em seguida, um núcleo de carbono-oxigênio degenerado (Iben & Renzini, 1983). Esses limites de massa não são muito precisos por só poderem ser estabelecidos com exatidão a partir da composição química inicial da estrela.

1.1 Conhecendo as Estrelas Carbonadas

As estrelas carbonadas recebem esse nome por serem ricas em carbono, isto é, são estrelas do ramo assintótico das gigantes (AGB - *Asymptotic Giant Branch*) que por possuírem em suas atmosferas abundância maior de carbono do que de oxigênio, a maior parte do seu oxigênio se liga a átomos de carbono para formar moléculas de CO e, conseqüentemente, as demais moléculas oxigenadas passam a ser raras nesses meios. Essas estrelas carbonadas estão localizadas no topo do ramo assintótico das gigantes e podemos sintetizar suas características conforme abaixo:

- Razão $C/O > 1$, carbono é o elemento mais abundante
- Temperatura efetiva média: cerca de 2500 — 3000 K

- Raio estelar médio: cerca de $400 R_{\odot}$
- Magnitude bolométrica: -1 — -3 mag
- Massa da estrela progenitora: $1,2 — 4 M_{\odot}$

Deve-se observar, que acima do limite de massa descrito, a estrela também torna-se uma AGB. No entanto, a partir desse limite ela não chegará a se transformar em uma estrela AGB carbonada, que é o objeto de estudo deste trabalho. A figura 1.1, extraída de Herwig (2005), apresenta uma distribuição de massa associada às fases evolutivas de uma estrela.

As estrelas carbonadas são objetos evoluídos, ricos em moléculas complexas (poliatômicas) em suas fotosferas e envoltórios. Além de gás frio, observa-se também a presença de poeira quente em seus envoltórios. Como o meio interestelar é mais rico em oxigênio do que em carbono, a inversão da razão C/O nas estrelas carbonadas só pode acontecer devido ao

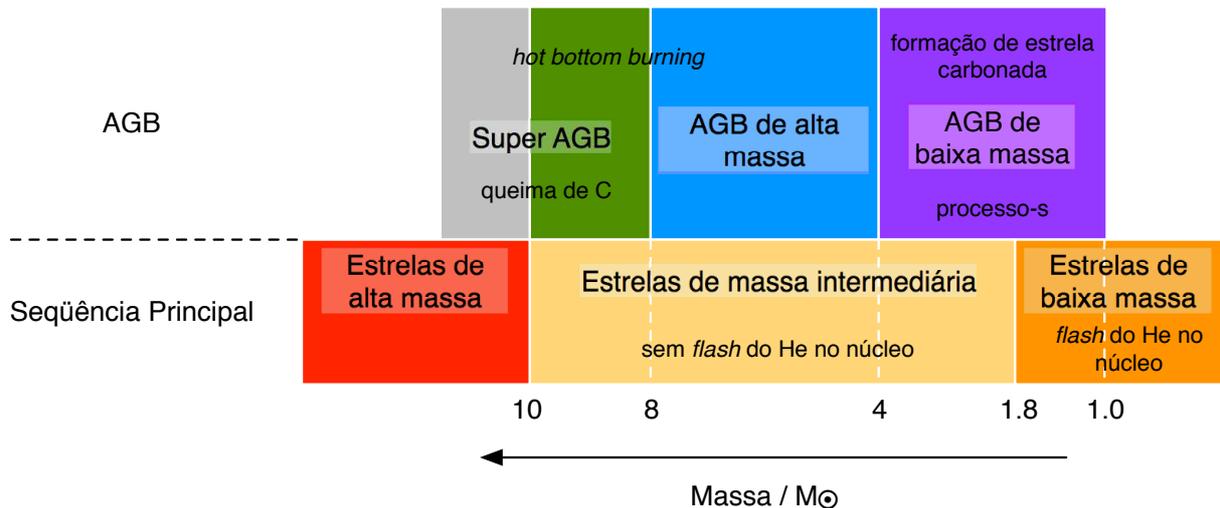


Figura 1.1: Classificação por massa de estrelas na sequência Principal — parte de baixo do diagrama — e na fase AGB — parte de cima. A parte de baixo contém a designação de acordo com a massa inicial, isto é, a divisão em estrelas de baixa, intermediária ou alta massa. Por outro lado, a parte de cima contém a classificação por massa na fase AGB. Nota-se que apenas estrelas com até cerca de $3-4 M_{\odot}$ tornam-se estrelas C, isto é, AGB ricas em carbono. Os limites de massa não são muito precisos, pois dependem da composição química inicial da estrela. [Diagrama adaptado de Herwig (2005)]

enriquecimento interno (evolução, processos de dragagem - característicos de carbonadas intrínsecas) ou a processos externos (interação com o meio - característico de carbonadas extrínsecas). A opacidade molecular e a grande escassez de linhas no azul conspiram contra a classificação por temperatura e luminosidade nesse intervalo de comprimento de onda. Mas, apesar desses impasses, as estrelas carbonadas são reconhecidas em 4 grupos espectrais principais - R, N, CH e J (segundo a classificação de Keenan (1993)) - e ainda outros pequenos grupos raros como as estrelas carbonadas que apresentam deficiência de hidrogênio - Hd. A característica básica das estrelas tipo R é o fluxo relativamente intenso na região azul-violeta do espectro óptico e uma força moderada das bandas isotópicas. Elas também não apresentam linhas dos elementos gerados pelo processo s, ou seja, assim como as J, não são enriquecidas por esses elementos. As estrelas tipo N apresentam uma absorção intensa no azul (fluxo na região é muito fraco), bandas isotópicas variando de fracas a inexistentes e apresentam também um aumento da intensidade das linhas de elementos gerados pelo processo s, como é o caso do Ba. As estrelas tipo CH são caracterizadas por bandas intensas da molécula de CH.

Há grupos de estrelas carbonadas em que o enriquecimento de carbono não provém de processos de dragagem, não resulta da evolução ao longo do ramo das AGB e, sim, da transferência de matéria de uma companheira próxima, ou seja, sua abundância de carbono é resultado de seu meio. Há ainda estrelas carbonadas que não se enquadram claramente em nenhum dos dois cenários: são as chamadas estrelas carbonadas C-J.

1.2 Conhecendo as Estrelas C-J

Certas estrelas carbonadas se distinguem das demais por apresentar intensidade incomum das bandas moleculares em absorção ricas em carbono isotópico (^{13}C). O termo “estrela J” foi pela primeira vez empregado por Bouigue (1954) para designar essas estrelas ricas em ^{13}C . Esse grupo compreende hoje cerca de 15% das estrelas carbonadas conhecidas. Gordon (1971) definiu as estrelas J como sendo aquelas em que a intensidade

da banda isotópica $^{13}\text{C}^{12}\text{C}$ $\lambda 6168$ Å corresponde a, no mínimo, metade da intensidade da banda normal $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ $\lambda 6122$ Å. Essa sobre-abundância de carbono isotópico resulta em baixos valores para a razão $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ (< 9 , Ohnaka & Tsuji, 1999).

Além da já citada grande intensidade das bandas isotópicas, outras estruturas espectrais que diferenciam as estrelas carbonadas tipo J das carbonadas ordinárias ou normais, na região vermelha do espectro, são:

- Linhas D do sódio fracas
- H em absorção ou não visível
- Bandas (0,1), (0,2), (1,3) e (2,4) de $^{13}\text{C}^{12}\text{C}$ intensas
- Bandas (4,0), (5,1) e (6,2) de $^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ fracas
- Linha do ScI $\lambda 6259$ Å fraca
- Linhas do LaI ($\lambda 6249,9$; $\lambda 6325,7$; $\lambda 6394,2$; $\lambda 6454,5$ e $\lambda 6456,0$ Å) fracas, similares às presentes nas estrelas carbonadas tipo R.
- Linha LiI $\lambda 6708$ Å notavelmente intensa

Presume-se que a abundância de carbono em estrelas AGB, isto é, $^{13}\text{C} + ^{12}\text{C}$, aumente ao longo da sequência espectral $\text{M} \rightarrow \text{MS} \rightarrow \text{S} \rightarrow \text{SC} \rightarrow \text{C}$ durante sua evolução tradicional. No entanto, o grande enriquecimento de ^{13}C das C-J não é observado nem em estrelas C-N (carbonadas com altos valores da razão C/O) nem em SC (estrelas em transição de oxigenadas para carbonadas). As estrelas SC costumavam ser classificadas como tipo C-J, mas revisões das classificações (Ohnaka & Tsuji, 1996) mostraram que a razão $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ de 15 objetos SC era maior que 10 e essas, portanto, foram excluídas da lista de C-J, que apresentam valores de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ainda mais baixos.

A maioria das estrelas carbonadas possui razões $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ em torno de 20-35. A figura 1.2 mostra um histograma com o valor médio encontrado para estrelas C-N, $\langle ^{12}\text{C}/^{13}\text{C} \rangle =$

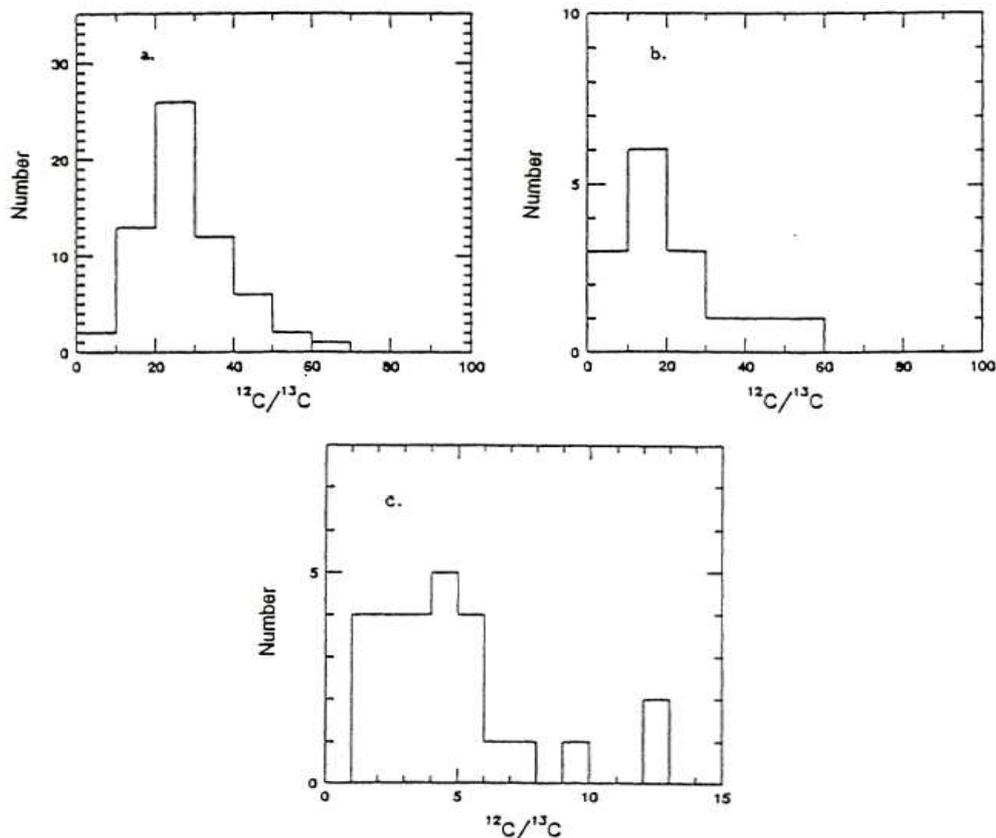


Figura 1.2: Histograma de razões $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ obtido para estrelas (a) C-N, (b) SC e (c) C-J. [Extraído de Ohnaka & Tsuji (2000)]

24 ± 13 , enquanto que para as SC o valor corresponde a $\langle ^{12}\text{C}/^{13}\text{C} \rangle = 21 \pm 19$ e para as C-J o obtido é $\langle ^{12}\text{C}/^{13}\text{C} \rangle = 6 \pm 3$ (Ohnaka & Tsuji, 2000). Esses valores estão de acordo com os obtidos no trabalho de Abia & Isern (1997), mas contrastam com os resultados encontrados por Lambert et al. (1986), que observaram que 30 estrelas C-N tinham essa razão variando de 100 - 30, com uma média de 55.

Ao longo da evolução na fase das AGB, outra importante consequência da 3^a dragagem¹, além do aumento da abundância de carbono, é o enriquecimento do envelope estelar com elementos gerados pelo processo-s. Portanto, se as estrelas C-J devem sua inversão da razão C/O à 3^a dragagem, então, também deveriam apresentar algum enriquecimento

¹A Dragagem ocorre quando a base do envelope convectivo se expande para o interior e traz à tona o material processado naquela região. Esse movimento é seguido de uma mistura da matéria da fotosfera com aquela recém trazida do interior estelar, de modo que, as abundâncias superficiais são alteradas.

de elementos do processo-s, tais como, *Y*, *Zr* e *Ba*. No entanto, ao contrário de estrelas carbonadas C-N e as em transição SC, as estrelas C-J não exibem estruturas espectrais decorrentes desses elementos (Utsumi, 1985).

Outra particularidade é que, nos últimos 30 anos, importantes progressos teóricos e observacionais foram alcançados no que diz respeito à compreensão das abundâncias de Li em estrelas do ramo assintótico das gigantes (AGB). Observações das Nuvens de Magalhães (Smith & Lambert, 1989, 1990; Plez et al., 1993) indicaram que a maior parte das AGB ricas em Li são estrelas oxigenadas, gigantes vermelhas tipo M ou S que exibem bandas de óxidos metálicos como TiO, ZrO. A grande maioria delas apresenta luminosidades dentro do curto intervalo de $-7,2 \leq M_{bol} \leq -6,0$, fator indicativo de massa intermediária para esses objetos.

No entanto, na nossa galáxia, a presença de linhas fortes do Li, como a LiI $\lambda 6708 \text{ \AA}$, é frequente entre as estrelas carbonadas. Em um *survey* na galáxia em busca de Li, Boffin et al. (1993) encontraram 30 estrelas ricas em Li entre 250 estrelas carbonadas. Estas 30 estrelas representam 70% das estrelas C-J da amostra. Em sua maior parte, as estrelas com baixas razões $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} < 10$ são ricas em Li ($\log \epsilon_{\text{Li}} > 1$) e algumas são ainda super-ricas em Li ($\log \epsilon_{\text{Li}} > 4$), como se pode observar na figura 1.3 (extraída de Abia & Isern, 1997). Estrelas carbonadas C-J ricas em Li foram também encontradas nas Nuvens de Magalhães, porém em menor quantidade do que as oxigenadas (Brewer et al., 1996).

1.3 Os Possíveis Modelos Evolutivos das C-J

Dessa forma, a localização das estrelas C-J na sequência evolutiva das estrelas AGB é incerta, já que, teoricamente, não é fácil obter uma estrela AGB carbonada com as peculiaridades químicas apresentadas pelas estrelas C-J. Os mecanismos de formação das estrelas carbonadas ordinárias, como as C-N, não podem ser aplicados para reproduzir o enriquecimento de ^{13}C e a falta de elementos gerados por processo-s ao mesmo tempo, em estrelas carbonadas C-J. O mecanismo chamado *hot bottom burning* (HBB) é capaz

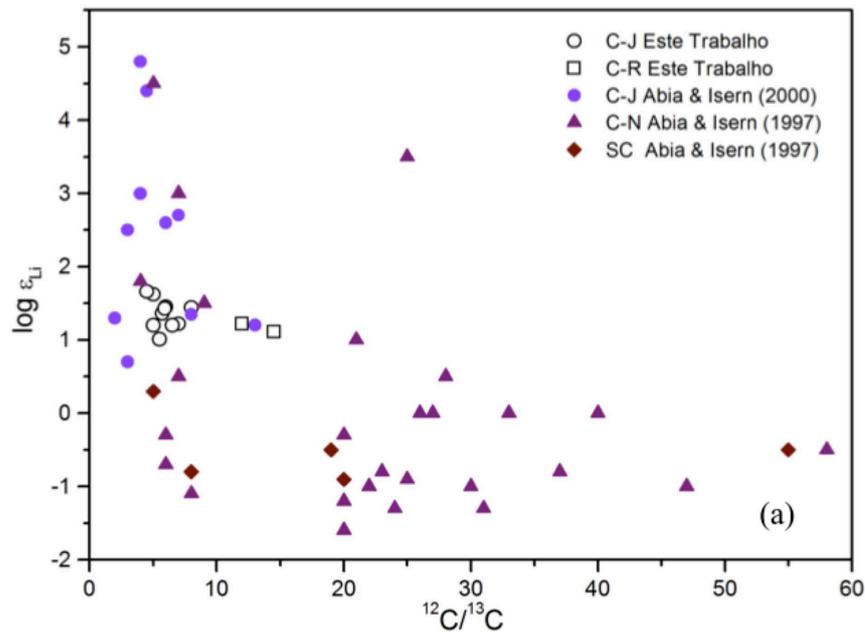


Figura 1.3: Abundância de Li em comparação com a razão $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ para estrelas carbonadas C-J, C-N e SC. Dados de Abia & Isern (1997) junto De Mello (2007)

de reproduzir em estrelas AGB, simultaneamente, as baixas razões $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ e as sobre-abundâncias de ^7Li para estrelas com massa $M \geq 4M_{\odot}$. No entanto, esse mecanismo resulta na destruição do ^{12}C , inviabilizando que a estrela permanecesse como carbonada. Além disso, as observações indicam que a maioria das estrelas carbonadas da nossa galáxia são objetos de baixa massa $M \leq 2M_{\odot}$ (Claussen et al., 1987).

De fato, alguns autores localizam esses objetos em uma sequência evolutiva diferente das estrelas carbonadas ordinárias (Chen & Kwok, 1993). Ao analisar as abundâncias de estrelas carbonadas C-R (Dominy, 1984) percebe-se, assim como nas C-J, uma deficiência de elementos do processo-s e sobre-abundância de ^{13}C . Esses dois tipos de estrelas carbonadas apenas se diferenciam na abundância de Li e levemente na razão $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$. Conforme observar-se-á ao longo deste trabalho, é possível existir uma ligação entre as estrelas C-R e C-J. De modo que é possível que as C-J tenham se originado das C-R, e que evoluíram e ficaram mais frias (Evans, 1986; De Mello, 2007).

É notável que a maioria das estrelas C-J sejam também ricas em ^7Li , pois isto sugere a existência de um único mecanismo responsável pelo enriquecimento tanto de ^{13}C quanto

de ${}^7\text{Li}$ nas atmosferas das estrelas carbonadas (Abia et al., 1993). Pode-se ainda observar na figura 1.3 que este enriquecimento simultâneo também é encontrado para estrelas carbonadas tipo C-N, apesar de em menor quantidade. No entanto, não é verificado para as estrelas SC, que não parecem ser enriquecidas com Li, sugerindo que as SC não sejam as progenitoras das C-J, reforçando ainda uma sequência evolutiva diferenciada, como proposto por Dominy (1984).

Ora, se nenhum modelo evolutivo de carbonadas normais é capaz de produzir essas características espectrais das estrelas C-J, então qual mecanismo poderia produzir tais enriquecimentos de Li e ${}^{13}\text{C}$?

1.3.1 Cool Bottom Processing

Estudos das abundâncias de Li e razões ${}^{12}\text{C}/{}^{13}\text{C}$ em estrelas gigantes tipo K e tipo M (da Silva, de La Reza, & Barbuy, 1995) mostram haver um pequeno percentual dessas estrelas ricas em ${}^7\text{Li}$ com razões ${}^{12}\text{C}/{}^{13}\text{C}$ baixas, em contraste com o previsto na teoria, pela 1ª dragagem. Essas observações sugerem um mecanismo não tradicional de queima, responsável pela produção, e de mistura, capaz de levar à superfície estelar esses elementos às estrelas gigantes vermelhas de baixa massa conforme ascendem no ramo das gigantes vermelhas (RGB - *Red Giant Branch*). Um mecanismo extra de mistura foi proposto por Wasserburg et al. (1995) e que explicaria baixas razões de ${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$, ${}^{12}\text{C}/{}^{13}\text{C}$ e sobre-abundância de ${}^{14}\text{N}$, modelando profundas circulações de corrente abaixo da base do envoltório convectivo de estrelas AGB de baixa massa (1 - 2 M_{\odot}). Essas correntes transportariam matéria de uma região sem queima, da base do envoltório convectivo, para baixo em direção às regiões onde estaria ocorrendo queima por ciclo CNO. Esse processo chama-se *Cool Bottom Processing*, CBP.

Algumas das estrelas C-J apresentadas em Abia & Isern (1997) são ligeiramente enriquecidas em ${}^{14}\text{N}$ e apresentam baixas razões ${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ (Harris & Lambert, 1987). Sackmann & Boothroyd (1992) mostraram que o mecanismo CBP também pode produzir estrelas

AGB de baixa massa ($M \geq 1,2M_{\odot}$) ricas em Li e ^{13}C de forma análoga a como o HBB atua em estrelas de massa intermediária. No entanto, nestes modelos, o HBB e o CBP ocorrem em um curto período após o pulso, quando a estrela alcança um pico de luminosidade de $M_{bol} \approx -5,5$. A produção de Li passa a ser bastante sensível ao fluxo de massa na região da estrela onde ocorre o mecanismo extra de mistura, isto é, onde acontece a troca de massa entre a fria base do envelope convectivo e a região onde a queima por ciclo CN acontece, próxima à camada de queima do H. Estudos realizados por Straniero et al. (1997) sustentam um modelo de 3ª dragagem ocorrendo em objetos AGB de baixa massa ($M \leq 3 M_{\odot}$). Se esse resultado for confirmado, ficará claro como estrelas com progenitoras de baixa massa se tornam carbonadas, restando resolver o porquê de estrelas C-J não apresentarem nenhum enriquecimento de elementos gerados pelo processo-s.

Se for sustentado o fato de que as estrelas J são uma fase intermediária no caminho evolutivo de uma estrela S (rica em oxigênio) para uma estrela C-N (as mais evoluídas no grupo das carbonadas), isto pode sugerir que este mecanismo extra de mistura só é eficiente (em relação ao ^7Li e ^{13}C) logo que a estrela se torna uma carbonada. Assim, depois de progressivos episódios de pulsos térmicos e da 3ª dragagem, a estrela começará a se enriquecer de elementos gerados pelo processo-s e em ^{12}C e acabará destruindo o ^{13}C através da reação



e do ciclo CN, e também o ^7Li . Assim, uma estrela AGB seria rica em Li por um tempo limitado apenas, o que explicaria o baixo percentual encontrado de estrelas carbonadas ricas em Li.

Wasserburg et al. (1995) mostraram que as razões $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ caem para ≈ 4 em modelos com $1 M_{\odot}$ que experimentaram este mecanismo CBP extra de mistura durante a fase de pulsos térmicos. Essa predição é consistente com os valores de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ encontrados em Ohnaka & Tsuji (1999).

1.3.2 C-R como Progenitoras

Outro possível cenário para a formação de estrelas carbonadas C-J estabelece que estas tenham evoluído a partir de estrelas C-R, que também apresentariam valores baixos de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ (≈ 9 , Dominy, 1984). As estrelas C-R apresentam luminosidades $\approx 100 L_{\odot}$ e temperaturas tão altas quanto 3000 - 4500 K, isto é, sua localização no diagrama H-R corresponde ao ramo horizontal. Dominy (1984) sugere ainda que a mistura que ocorre com o *flash* do núcleo de He seja capaz de transformar uma atmosfera estelar rica em oxigênio em rica em carbono.

Dearborn et al. (2006) estimaram anomalias nas abundâncias superficiais causadas pelos diferentes *flashes* do He modelados. Eles mostraram que o principal material misturado acima da camada de H é o ^{12}C , de modo que o enriquecimento em carbono intrínseco dessas estrelas não é derivado apenas dos pulsos térmicos e da 3ª série de dragagens, e encontra explicação nesse cenário de mistura após o *flash* do He. Outros produtos importantes obtidos nesses modelos são os elementos resultantes de captura α que também estaria ocorrendo durante o *flash* tais como ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si e ^{32}S e, dependendo da temperatura alcançada na camada de H durante o fenômeno, também ^{14}N .

De Mello (2007) mostrou, para uma amostra reduzida, que as C-J também possuem enriquecimento nesses elementos α , reforçando a suposição de que as estrelas C-R são

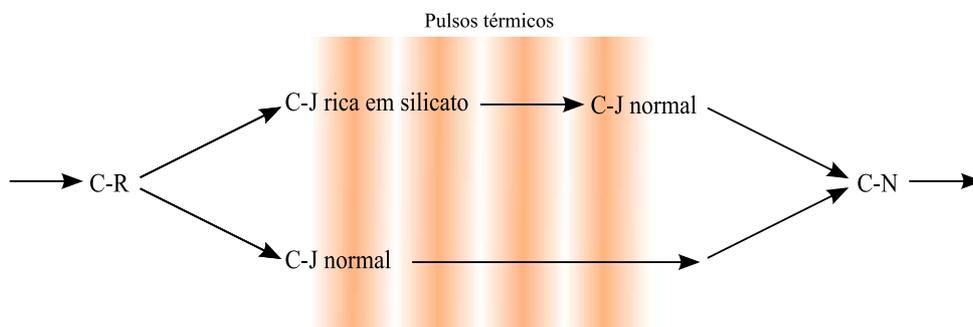


Figura 1.4: Seqüências evolutivas sugerida por De Mello (2007) para as estrelas C-J. A ocorrência ou não de binaridade e das demais condições para a sustentação de um disco de acreção determinam qual dos caminhos a estrela irá percorrer.

suas progenitoras. Lembrando, ainda, que as C-R já apresentam duas importantes características observadas nas C-J: as baixas razões $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ e a falta de enriquecimento em elementos gerados pelo processo-s de captura de nêutrons (^{85}Rb , ^{89}Y , ^{91}Zr , ^{99}Tc , ^{137}Ba , dentre outros). Nesse cenário sugerido por De Mello (2007), as estrelas C-R teriam percorrido uma sequência evolutiva diferente das AGB carbonadas usuais, e, ao atingirem o final da fase E-AGB, teriam se tornado estrelas carbonadas C-J (ver figura 1.4). Ao ingressarem no início da fase TP-AGB, possivelmente, o mecanismo extra *Cool Bottom Processing* estaria atuando junto com os mecanismos da 3ª série dragagens, aumentando ainda mais as razões $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ e as sobre-abundâncias de Li. Por ser ainda o início da fase TP-AGB, as dragagens não teriam sido eficientes a ponto de enriquecer a atmosfera com elementos gerados pelo processo-s de captura de nêutrons.

1.4 Formação dos Envoltórios das Estrelas Carbonadas

Os envoltórios circunstelares das estrelas carbonadas são outra parte da estrutura estelar (além da fotosfera) que merece atenção nos estudos desses objetos. Eles são o resultado da ejeção de matéria (vento), que, se expande, esfria e condensa grãos. A maior parte das estrelas produz ventos estelares, isto é, uma ejeção de gás contínua de sua atmosfera em direção ao meio interestelar. No entanto, em algumas etapas da evolução estelar, a perda de massa torna-se um fenômeno importante, tanto do ponto de vista dos processos intrínsecos à própria estrela, quanto para o enriquecimento do meio ao seu redor. Em particular, o estudo da perda de massa em estrelas de baixa massa e de massa intermediária, durante a fase AGB, é essencial para a compreensão da formação de seus envoltórios circunstelares.

O processo de perda de massa é especialmente relevante, ocorrendo a taxas elevadas na fase AGB. Esse enriquecimento do meio interestelar modifica as abundâncias químicas da vizinhança e afeta a formação de novas estrelas ou, ainda, a evolução de uma eventual companheira binária que irá absorver parte da matéria ejetada, por exemplo.

A estrela carbonada, na fase AGB, está cercada por material que pode ser dividido em três zonas distintas (Habing & Olofsson, 2003). A primeira se refere às camadas mais internas da grande atmosfera estelar (zona inicial), onde se pode observar um decréscimo exponencial da densidade e da temperatura da matéria com a distância radial. Essa região é localmente modificada pelas ondas de choque que se propagam devido aos pulsos estelares.

No extremo oposto, está o envoltório circumstelar propriamente dito, ou zona final, que pode ser definida como a região onde o vento estelar alcança sua velocidade final de expansão para fora da estrela. Ignorando as pequenas estruturas dentro do envoltório circumstelar — que acontecem devido à variações nas taxas de expansão da matéria em escalas de tempo de alguns poucos pulsos (causadas, por exemplo, por formação episódica de poeira), assim como devido às variações no vento estelar em escalas de tempo da evolução ao longo da fase — o cenário geral do envoltório circumstelar reúne uma expansão estacionária com distribuição de densidades variando com o inverso do quadrado da distância à fotosfera da estrela.

Por fim, entre a zona inicial e final, encontra-se uma região de transição com estrutura complexa, a zona intermediária. É nessa região que as condições da perda de massa se estabelecem e o vento estelar é formado e acelerado.

Apesar de existir uma divisão estrutural entre as zonas intermediária e a final, é praticamente impossível determinar o limite entre as regiões inicial e intermediária. Teoricamente, pode-se descrever este limite como o ponto em que “não há retorno”, isto é, o local a partir do qual o gás é acelerado acima da sua velocidade local de escape, formação de ventos.

1.4.1 Mecanismos de Expansão

Durante a fase AGB, a maior parte da massa *ZAMS* remanescente, isto é, da massa inicial da estrela, é perdida por ventos intensos, apesar de lentos, se comparados com os de

outros objetos estelares. Enquanto a velocidade típica de expansão dos ventos estelares de AGB está entre as mais baixas observadas, da ordem de $u \approx 20 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, a taxa de perda de massa típica desses objetos é bastante elevada, variando de 10^{-7} até $10^{-4} M_{\text{solar}}/\text{ano}$. Estas duas propriedades juntas implicam em altas densidades do gás em expansão, indicando, assim, que o vento se origina em ambientes relativamente densos.

O vento estelar, para ser impulsionado, requer uma fonte de momento linear, isto é, uma força direta de expansão capaz de se sobrepor à força gravitacional. O material precisa ser trazido à superfície estelar, vencendo o potencial gravitacional da estrela (zona inicial) e tem que ser acelerado acima de sua velocidade de escape, para ser ejetado da fotosfera (zona intermediária em direção à zona final).

De acordo com a natureza da força de expansão predominante, os ventos estelares podem ser divididos basicamente em dois grupos: ventos térmicos e ventos impulsionados pela poeira. Os ventos térmicos são aqueles acelerados pelo aumento da pressão do gás (ou pelo gradiente desta pressão) o que requer altas pressões na zona de formação do vento, que podem ser criadas, por exemplo, pela dissipação de ondas sonoras ou pelo aquecimento do gás através da radiação estelar. Os ventos impulsionados pela poeira, por sua vez, são aqueles que além desta força de pressão, são impulsionados pela transferência direta do momento linear do campo de radiação da estrela, isto é, o vento é acelerado conforme os grãos absorvem ou espalham os fótons que saem diretamente da estrela — pressão de radiação — e arrastam o gás junto com eles para fora da estrela. Uma outra possibilidade de mecanismo de aceleração do gás para fora da superfície estelar é através de ondas: ondas sonoras, ondas de choque, ondas magnetohidrodinâmicas e entre outras. Estas tendem a ser ineficientes para impulsionar o vento através de uma troca direta de momento linear. No entanto, como dito, estas ondas podem contribuir consideravelmente para a criação de ventos térmicos, aumentando a temperatura e a pressão do gás. Podem ainda contribuir para a expansão por pressão de radiação, pois, ao induzirem o aumento da densidade das camadas mais externas da atmosfera, possibilitam que certas espécies

moleculares e grãos de poeira sejam formados de forma mais eficiente.

Além disso, os campos magnéticos, a rotação estelar e a presença de uma componente sub-estelar companheira (estrela de baixa luminosidade, anã marrom ou planeta massivo), mesmo com a sua importância moderada, podem ser destacados como mecanismos indiretos que contribuem para a expansão das camadas atmosféricas das AGB impulsionadas pela poeira.

1.5 Formação de Grãos

O aspecto mais complexo da teoria de ventos impulsionados pela poeira é o processo de formação e a sobrevivência dos grãos nos envoltórios circumstelares. No entanto, uma vez que um aglomerado de cerca de 10 ou mais átomos se forme, é provável que qualquer molécula condensável que com este colida, se acrete ao grão (Gail & Sedlmayr, 1987). Entretanto, se a temperatura de equilíbrio radiativo dos grãos exceder a temperatura de condensação, então o grão estará muito quente e irá sublimar ao invés de crescer.

A temperatura de equilíbrio radiativo dos grãos depende do balanço entre o aquecimento radiativo proveniente da absorção dos fótons emitidos pela estrela e o resfriamento radiativo devido às emissões térmicas do próprio grão. A temperatura resultante deste balanço é determinada, principalmente, pela opacidade do grão, sua distância à estrela, e a temperatura efetiva da mesma. A figura 1.5 é um esquema proposto por Sedlmayr (1994) que ilustra o comportamento qualitativo da temperatura, densidade, a região de formação e crescimento dos grãos em função da distância radial à estrela dentro dos envoltórios circumstelares. Observa-se que não há grãos localizados próximos à estrela devido às altas temperaturas — existe uma distância mínima na qual o grão estará mais frio que a temperatura de condensação e poderá ser nucleado, independentemente da densidade do gás. O regime de nucleação ocorre numa zona de 1300 - 1700 K e o regime de crescimento dos grãos se estende até uma distância ainda mais afastada, terminando onde a matéria a ser condensada já foi significativamente consumida ou está muito diluída no

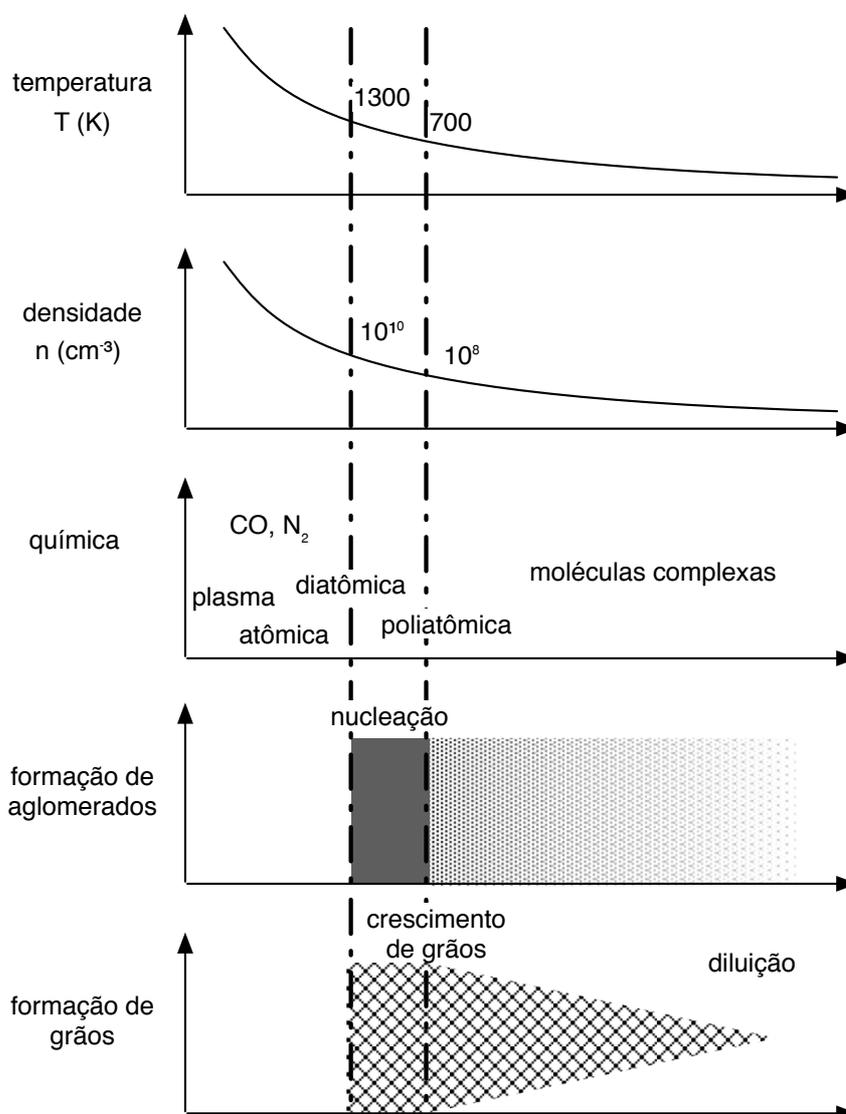


Figura 1.5: Esquema simplificado dos parâmetros físicos do envoltório em função da distância radial à estrela. [Adaptado de Sedlmayr (1994)]

meio. Naturalmente, essas temperaturas variam de acordo com a natureza do grão.

Quando os sólidos se condensam a partir do gás atmosférico, a opacidade que bloqueia o fluxo de radiação emitido pela estrela aumenta. A absorção de um fóton estelar pode ocorrer de duas maneiras: o grão pode adquirir a energia do fóton, $h\nu$, e, portanto, aquecer ou, ainda, o grão pode receber momento linear de algum fóton que foi espalhado por outro grão de poeira. Os grãos possuem, em geral, intervalos de tamanhos entre $0,05\mu\text{m}$ - $0,1\mu\text{m}$ de raio. A composição dos grãos irá depender da composição da fase de gás: grãos de

silicato são formados ao redor de estrelas oxigenadas, onde o gás possui razão $C/O < 1$, enquanto os grãos carbonáceos são formados ao redor de estrelas carbonadas, onde o gás possui $C/O > 1$. Esta dicotomia entre grãos ricos em carbono ou em oxigênio ocorre porque os átomos de O tendem a se ligar aos de C formando a molécula de CO, altamente estável, e apenas os átomos que sobram, de um ou de outro tipo, irão constituir a química predominante da nucleação e do processo de crescimento dos grãos. As estrelas carbonadas tendem a ter grãos heterogêneos de carbono amorfo junto com outros componentes que se condensam como o SiC, MgS ou o Fe na fase sólida.

1.6 Estrelas Carbonadas C-J Ricas em Silicato

Um dos tipos mais incomuns de objetos descobertos através do catálogo IRAS é a classe de estrelas carbonadas com silicato (Figura 1.6). Essas estrelas foram pela primeira vez reconhecidas por Little-Marenin (1986) ao verificar um excesso de emissão nos espectros no infravermelho em $9,8 \mu m$ e $18 \mu m$. Essas estruturas são condizentes com envoltórios de estrelas tipo M, e não com estrelas carbonadas ordinárias.

Evans (1990) constatou que essas estrelas carbonadas com envoltórios ricos em silicato possuíam uma baixa razão $^{12}C/^{13}C$ e classificou-as como estrelas tipo J. Um número significativo (5% - 10% segundo Lloyd Evans, 1991) de estrelas carbonadas C-J exibem uma emissão característica em $9,8 \mu m$, um resultado inesperado uma vez que, sendo essas estrelas C-J carbonadas, pensava-se que elas deveriam apresentar características dessa classe no infravermelho. Assim, a emissão característica em $11,3 \mu m$ típica não é algo comum a todas as estrelas carbonadas tipo C-J.

Outra descoberta importante, dessa vez por meio da análise das observações SWS com o satélite ISO (1996), foi a existência de silicatos cristalinos juntos com emissões de PAHs nos envoltórios de algumas dessas estrelas. Os silicatos cristalinos não haviam sido ainda detectados, pois sua emissão no infravermelho médio coincide com o intervalo

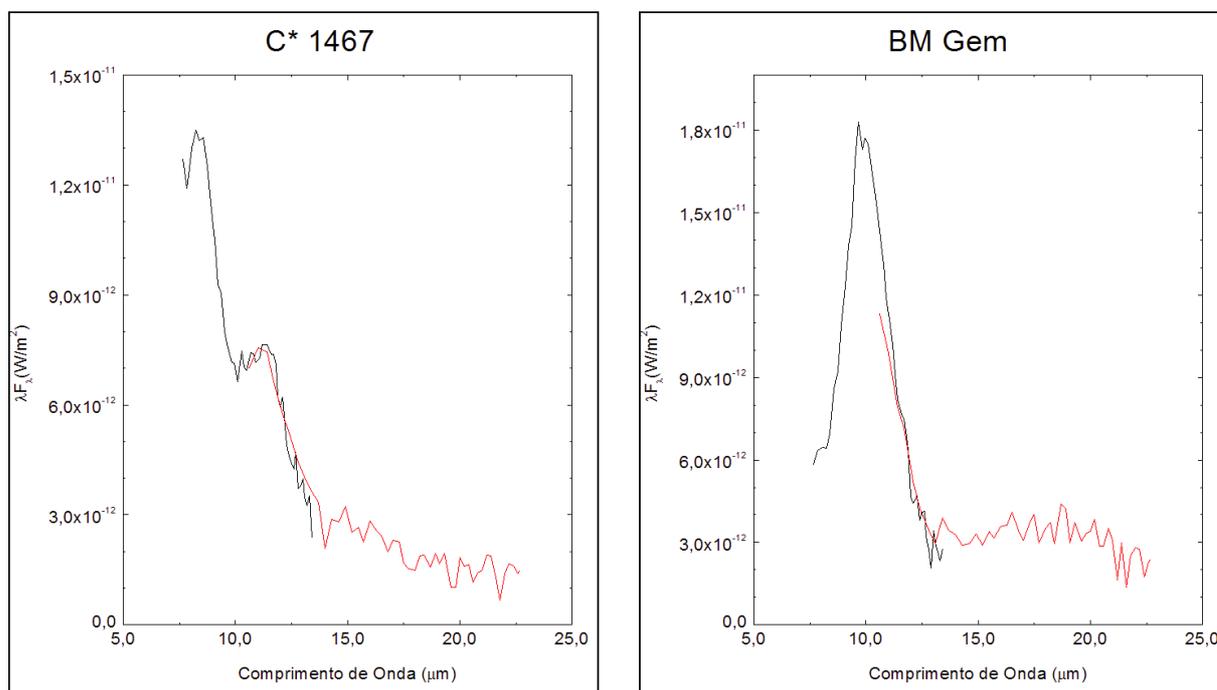


Figura 1.6: Espectro LRS-IRAS da estrela U Ant (esquerda), uma C-J normal e BM Gem (direita), estrela C-J rica em silicato, com a emissão característica em 9,8 μ m.

de comprimento de onda das emissões dos silicatos amorfos, que acabam mascarando a emissão do cristalino. No entanto, os espectros ISO-SWS possuem uma cobertura espectral maior que os espectros LRS-IRAS, permitindo a detecção de outras regiões em emissão: 26 e 33 μ m, por exemplo. A dupla-química foi encontrada para objetos em diferentes estágios evolutivos: pós-AGB ricas em carbono, Red Rectangle e Roberts 22; nebulosas planetárias, M2-43; e para uma carbonada C-J, IRAS 09425-6040, que apresenta a maior abundância de silicato cristalino já detectada (Molster et al., 2001). Para todos esses objetos a presença de um disco foi proposta a fim de explicar a formação de silicatos cristalinos.

1.6.1 Indícios de Binaridade

Mais de 25 anos se passaram desde sua descoberta e, no entanto, a origem e evolução dessas estrelas permanece incerta. Algumas sugestões para explicar essas anomalias observadas foram propostas. Um dos cenários menos prováveis é o de uma evolução rápida

de uma estrela M para C como proposto por Chan & Kwok (1991). O tempo de trânsito da matéria através do envoltório circunstelar é da ordem de anos, o que é menor que o tempo de trânsito de $M \rightarrow S \rightarrow C$ ($\approx 10^5$ anos). Assim, é difícil sustentar que se esteja observando o material ejetado por uma estrela M recém transformada em carbonada. Até o presente, o cenário mais plausível parece ser o de um sistema binário.

Little-Marenin (1986) sugeriu que esse fosse composto por uma estrela gigante rica em carbono e outra rica em oxigênio. No entanto, esta possibilidade parece improvável, uma vez que, nenhuma evidência de gigantes oxigenadas foi encontrada em estrelas carbonadas ricas em silicato (Lambert et al., 1990a; Engels, 1994), normal ou cristalino. A explicação atual, mais condizente com as observações, é a configuração de um sistema binário com um disco de poeira: a matéria rica em oxigênio teria sido ejetada, possivelmente durante a fase do *flash* do núcleo de He por uma estrela primária rica em oxigênio (tipo M) e armazenada em um disco de acreção circumbinário (Morris, 1987; Evans, 1990) ou ao redor da companheira secundária de baixa luminosidade (Yamamura et al., 2000) até que a primária se tornasse uma estrela rica em carbono.

De fato, existem algumas evidências de binaridade e discos circunstelares em C-J carbonadas ricas em silicato:

- Medidas de velocidades radiais para dois objetos, BM Gem e EU And, consistentes com o movimento de sistemas binários (Barnbaum et al., 1991).
- Reservatórios de gás de longa duração orbitando os mesmos dois objetos, cujas existências foram inferida por meio de linhas de CO em emissão (Kahane et al., 1998; Jura & Kahane, 1999).
- Companheira de baixa luminosidade circundada por um disco de acreção evidenciada no espectro violeta da BM Gem (Izumiura, 2003).
- Disco em rotação ao redor de V778 Cyg inferido por meio de mapas de masers de H₂O (Szczerba et al., 2006).

- Dados interferométricos de ampla resolução angular e cálculos de transferência radiativa, para a estrela C* 1003, suportam o cenário de material rico em oxigênio armazenado em um disco circumbinário ao sistema (Ohnaka et al., 2006). O mesmo cenário foi evidenciado por meio de observações interferométricas no infravermelho médio para a estrela FJF 270 (Deroo et al., 2007).
- Observações interferométricas no infravermelho médio também apontaram para um disco ao redor da companheira da estrela BM Gem (Ohnaka et al., 2008). O mesmo foi confirmado por meio de observações VLBA do maser de H₂O para a estrela EU And (Ohnaka & Boboltz, 2008).
- Ejeção de matéria com pelo menos 400 km · s⁻¹ para BM Gem. Foi evidenciada, tanto nos contínuos de Balmer e Paschen em emissão, como nas linhas da série de Balmer com perfil P-Cygni (H γ - H23), a existência de absorções com desvio para o azul na parte violeta do espectro da estrela (Izumiura et al., 2008).

Dessa forma, existem evidências observacionais suficientes para afirmar que, ao menos, a estrela BM Gem pertence a um sistema binário com um disco de poeira oxigenada ao redor da companheira de baixa luminosidade. Assim, esse pode ser apenas o primeiro exemplo que venha a confirmar esse cenário complexo de duas estrelas com um disco seja circumbinário ou ao redor da companheira dependendo do afastamento entre essas estrelas.

Até agora, 39 estrelas carbonadas ricas em silicato, incluindo silicato cristalino, foram descobertas e outras 12 candidatas, recentemente propostas como de mesma natureza, aguardam confirmação (Chen & Shan, 2011), sendo este o universo de estudo desta tese. Dessas carbonadas ricas em silicato, apenas 14 tiveram seu status como estrelas C-J comprovado espectroscopicamente. Uma quantidade maior de estrelas C-J ricas em silicato disponíveis para estudo é importante não apenas para que se possa não só estimar a escala de tempo de evolução dessa classe e o seu exato estágio evolutivo, mas também para uma análise da origem e evolução das estrelas C-J de um modo geral.

As estrelas carbonadas C-J são objetos desafiadores para a teoria da evolução estelar, em particular, devido à produção de Li, às baixas razões $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ e à ausência de sobre-abundâncias de elementos do processo-s nestas estrelas. Os cenários evolutivos tradicionais não reproduzem o observado e as alternativas propostas carecem de uma análise amostral mais significativa a fim de confirmar os modelos sugeridos.

Neste presente estudo, trabalhamos com as estrelas C-J empregando espectroscopia no visível e no infravermelho e modelos circunstelares que descrevem esses ambientes externos. Uma descrição detalhada da amostra encontra-se no capítulo 2. As C-J da amostra foram inicialmente classificadas segundo suas estruturas espectrais fotosféricas e do envoltório circunstelar (ver capítulo 3). Em seguida, foi realizado um estudo sobre a evolução dos envoltórios circunstelares, em um intervalo de mais de 20 anos, no capítulo 4. Velocidades radiais foram calculadas no capítulo 5 e utilizadas para, através de análises de sua variação, avaliar a possibilidade de binaridade. Esse estudo teve como foco as estrelas C-J ricas em silicato da amostra, a fim de se tentar sustentar a hipótese da existência de um disco circunstelar/circumbinário em cada sistema. O capítulo 6, por fim, descreve as conclusões deste trabalho.

Assim, o objetivo desse estudo foi contribuir para um maior entendimento das estrelas carbonadas C-J. A utilização de dados em uma grande cobertura espectral, inclusive espectroscopia Gemini inéditas para os objetos da amostra, permitiu desenvolver uma descrição detalhada das classes de estrelas C-J normais e ricas em silicato, além de apresentar possíveis candidatas à esses sistemas. Com isso, espera-se lançar uma nova luz sobre os processos de formação e evolução desses objetos.

2 Detalhes da Amostra

Seleção das Estrelas e Tratamentos Empregados

As particularidades espectroscópicas das estrelas carbonadas C-J tornam difícil situar esse grupo de estrelas em qualquer sequência evolutiva tradicional conhecida. No entanto, algumas propostas de sequências evolutivas têm sido apontadas (Dominy, 1984; De Mello, 2007). A fim de compreender melhor a origem e evolução das estrelas C-J, normais ou ricas em silicato, um estudo mais amplo desses objetos se faz necessário.

A atual discussão de cenários binários capazes de sustentar um ambiente de dupla química, agregando, ainda, discos circunstelares tem sido considerada como a melhor descrição dos ambientes das estrelas C-J ricas em silicato, mesmo baseando-se em um pequeno grupo de objetos analisados com profundidade. As publicações existentes de estudos de variabilidade de velocidades radiais, observações interferométricas e discussões de evolução para estrelas carbonadas ricas em silicato se restringem a um grupo de 5 objetos dessa classe e a confirmação desse cenário ocorreu apenas para 1 objeto, valor inferior a 5% do universo de estrelas C-J peculiares conhecidas. Por outro lado, a quantidade de C-J ricas em silicato confirmadas continua crescendo, conforme estudos recentes de busca de novas candidatas (Chen & Shan, 2011).

Buscando, portanto, ampliar o estudo na área de estrelas carbonadas C-J, normais e ricas em silicato, reuniram-se neste estudo 30 objetos observados com três instrumentos diferentes. Dessa forma, são apresentadas, a seguir, três amostras que apesar de possuírem alguns objetos em comum, não foram todas estudadas nas três técnicas apresentadas. As observações empregadas permitiram que se discutissem os possíveis cenários e mecanismos de mistura que podem ocorrer nas estrelas carbonadas C-J. Neste trabalho, foram empregados espectros óticos tanto em alta resolução quanto em intermediária, além de espectros

no infravermelho Gemini T-ReCS, LRS-IRAS e ISO-SWS.

Foram selecionadas, como objetos de estudo neste trabalho, estrelas carbonadas com baixas razões isotópicas, descritas como estrelas (ou candidatas) C-J ou C-R na literatura. De fato, poucos desses objetos possuem uma classificação bem estabelecida ou velocidades radiais calculadas. A seleção foi feita com o objetivo de se fazer um estudo abrangente dessas estrelas, de forma que para os objetos incluídos, em sua maioria, estão disponíveis espectros LRS-IRAS, que também foram analisados neste trabalho. A amostra consiste apenas em estrelas observáveis do hemisfério sul, brilhantes e não muito frias, permitindo que se obtivessem espectros com uma alta relação sinal/ruído (S/R).

2.1 Observações no Gemini South

Foi selecionada uma amostra de estrelas C-J carbonadas ricas em silicato que também apresentassem indícios de uma dupla química em seus envoltórios. Essa amostra foi estudada no infravermelho, com espectros observados no *Gemini South Observatory* a fim de se determinar a natureza química de seus envoltórios circumstelares. Essa pequena amostra integra o projeto “*The Nature of Silicate Carbon Stars*” liderado por S. Lorenz-Martins com colaboração de A. B. De Mello e D. N. Epitácio Pereira e foi observada nos anos de 2007 e 2009. Essas estrelas são discutidas no capítulo 4.

Os espectros foram obtidos utilizando o espectrógrafo T-ReCS acoplado ao telescópio de 8,0m do *Gemini South*. O T-ReCS é um espectrógrafo próprio para o uso no infravermelho médio e proporciona resolução um pouco superior que os espectros LRS-IRAS, isto é, $R = 113$ (os espectros LRS-IRAS possuem $R \approx 60$). Durante a primeira parte do projeto, no ano de 2007, foram observados quatro objetos. Essas estrelas foram observadas em torno da banda N', 10,30 μm , com uma fenda de 0,36" de largura, proporcionando uma cobertura espectral de 5,27 μm (7,70 - 12,97 μm), uma vez que a intenção era analisar a presença ou não da estrutura em 9,8 μm devida ao silicato. Nesta amostra, foi constatado o início de uma suposta estrutura em absorção no fim da banda N' para dois objetos:

MC79 2-11 e C* 2837. Na segunda etapa do projeto, em 2009, outras quatro estrelas foram observadas com a mesma configuração na banda N e uma nova configuração foi solicitada para estudar a estrutura observada, em 2007, nos dois objetos citados, dessa vez na banda Q. O filtro Q (*broad*) empregado foi centrado em 20,8 μm , com uma fenda de 0,66" de largura, proporcionando uma cobertura espectral de 8,10 μm (17,41 - 25,40 μm). Apesar de nem o filtro N, nem o Q (*broad*) cobrirem toda a possível estrutura em absorção isoladamente, quando empregados em conjunto é possível analisar o comportamento deste componente.

A tabela 2.1 apresenta os detalhes da observação desses 8 objetos, todos estrelas C-J. As colunas 1, 2 e 3 contêm o nome e coordenadas das estrelas (ascensão reta e declinação); a coluna 4 informa o filtro empregado em cada observação e as colunas 5 e 6 listam os fluxos IRAS dos objetos em F12 μm e F25 μm , ambos medidos em Jy; a coluna 7 indica a padrão utilizada na redução de cada uma das estrelas e a coluna 8 o ano da missão associada a cada observação. A possível natureza oxigenada dos envoltórios desses objetos foi sugerida através do estudo dos espectros LRS-IRAS.

Tabela 2.1: Amostra de estrelas C-J observadas no observatório *Gemini South*, empregadas ineditamente neste trabalho.

Objeto Nome	Coordenada (2000.0)			Filtro	Fluxos IRAS (Jy)		Padrão	Ano da Missão
	α	δ			F(12 μm)	F(25 μm)		
MC79 2-11	08 58 54,50	-60 47 38		N	9,52	9,16	SAO 237067	GS-2007A
				Q				GS-2009A
IRAS 09425-6040	09 44 01,70	-60 54 25		N	26,82	55,53	HD 82668	GS-2007A
IRAS 11311-6355	11 33 24,80	-64 11 56		N	10,97	7,01	HD 98118	GS-2009A
C* 2123	13 47 47,00	-61 26 12		N	-	-	HD 163376	GS-2007A
IRAS 16001-4851	16 03 47,80	-48 59 15		N	18,01	25,96	HD 146051	GS-2009A
IRAS 16103-4929	16 14 05,40	-49 36 58		N	21,81	11,56	HD 146051	GS-2009A
VX Aql	19 00 09,61	-01 34 56		N	16,14	5,61	SAO 228578	GS-2009A
C* 2837	20 01 05,19	-07 21 51		N	6,49	7,12	HD 186791	GS-2007A
				Q				GS-2009A

As estrelas listadas na tabela 2.1 foram então reduzidas com o auxílio do sistema *Image Reduction and Analysis Facility* (IRAF) e tratadas manualmente, uma vez que o tratamento automático disponibilizado tende a introduzir, sistematicamente, anomalias

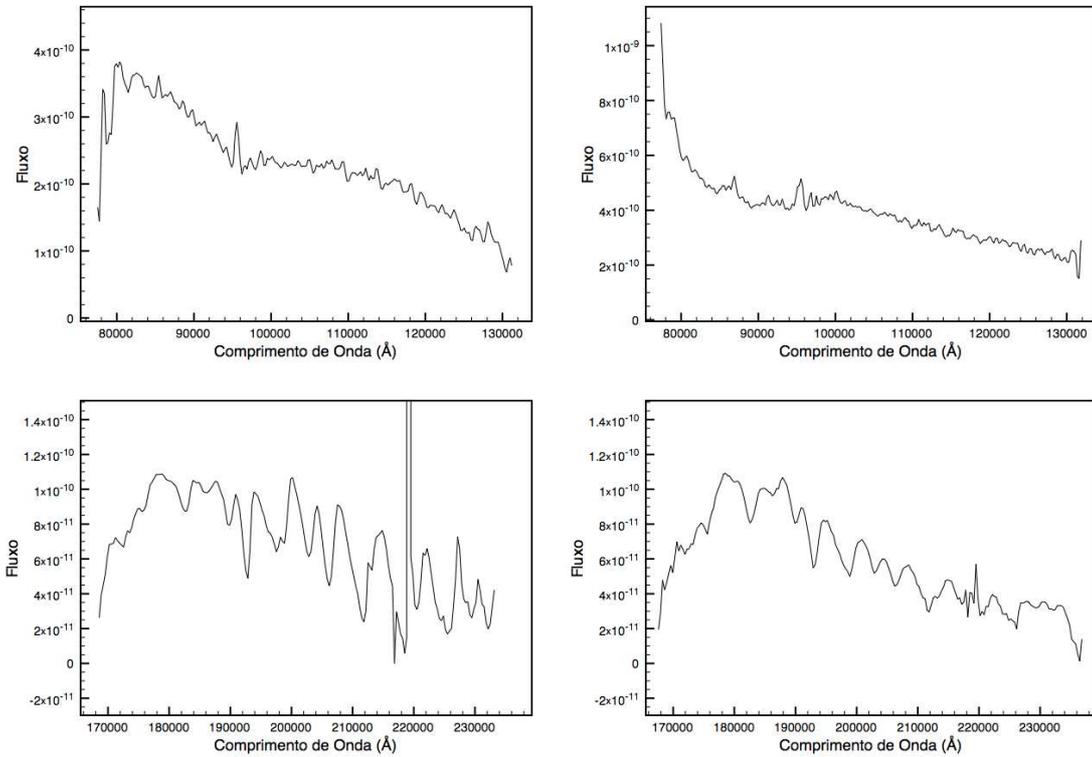


Figura 2.1: Amostra Observada na Missão GS-2009A na banda N': IRAS11311-6355 (em cima à esquerda), IRAS18575-0139 (em cima à direita); e na banda Q: C* 2837 (embaixo à esquerda) e MC79 2-11 (embaixo à direita). É possível observar que a banda N' é mais afetada por padrões de interferência do que na banda Q, que por sua vez é, mais fortemente contaminada pela emissão das linhas telúricas do que as observações na banda N'.

nos extremos das imagens. O processo redução de espectros T-ReCS possui algumas peculiaridades em relação ao comumente adotado para espectros na região visível.

Primeiramente, não são feitas para esse instrumento correções de *bias* ou *flat-field*, já que esses efeitos são considerados desprezíveis nesse caso. Além disso, o conjunto de dados relativos a cada objeto consiste em espectros tanto da fonte em si quanto do céu a sua volta. O espectro do objeto é extraído como a diferença entre as duas componentes e o espectro do céu é usado para a calibração em comprimento de onda, já que não é possível a calibração por lâmpadas no infravermelho médio. Para essa calibração pelo espectro do céu, faz-se a identificação das estruturas em emissão observadas no céu com as tabeladas e disponibilizadas pelo observatório.

Espectros T-ReCS tendem, ainda, a ser muito afetados por efeito de franjas, o que é corrigido através de uma filtragem no espaço de Fourier. Nota-se que as estrelas observadas na banda N' são mais afetadas pelos padrões de interferência do que as estrelas observadas na banda Q, em particular os objetos IRAS11311-6355 e IRAS18575-0139, como pode ser observado na figura 2.1. No entanto, após o processo de filtragem, a intensidade desses padrões de interferência passa a ser desprezível para efeitos de modelagem do envoltório circumstelar.

A amostra observada na banda Q, por sua vez, foi mais fortemente afetada pela emissão das linhas telúricas do que as estrelas observadas na banda N', conforme pode ser observado na figura 2.1. Apesar de terem sido aplicados os procedimentos recomendados para a remoção dessas estruturas espectrais, não foi possível remover completamente as linhas telúricas presentes no espectro da estrela C* 2837, conforme figura 2.1 (\approx a $22\mu m$).

A última etapa foi, portanto, a correção de linhas telúricas e a calibração em fluxo que foram realizadas com o uso de uma estrela padrão de espectro conhecido (ver tabela 2.1). Todos esses passos foram realizados com a ajuda de tarefas da coleção de pacotes Gemini-IRAF, disponibilizada pelo observatório Gemini. Os espectros T-ReCS reduzidos podem ser vistos na figura 2.2.

Detalhes da Amostra

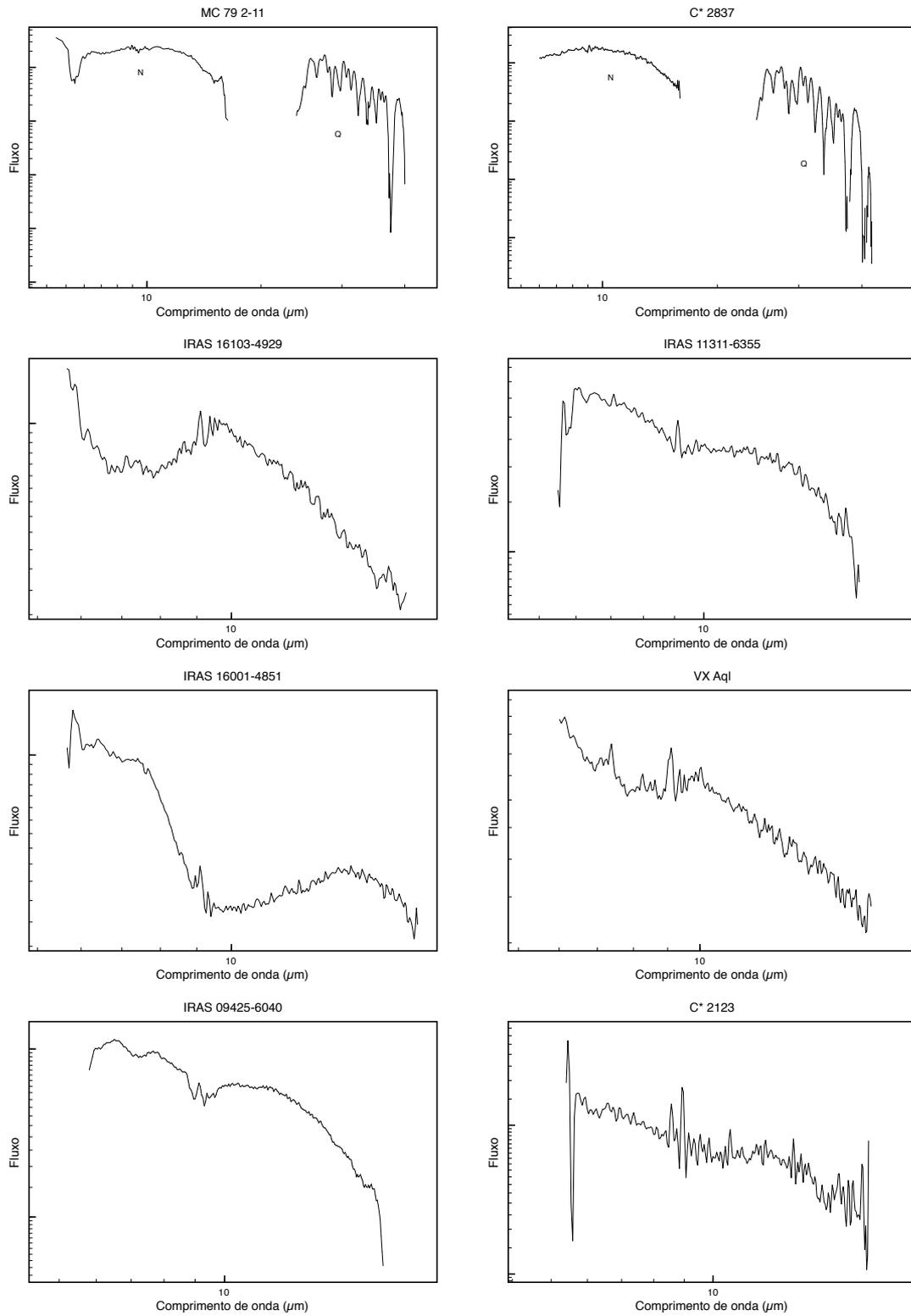


Figura 2.2: Espectros reduzidos da amostra observada na Missão GS-2007A e 2009A na banda N' e Q.

2.2 Observações no OPD-LNA

Conforme descrito anteriormente, foram empregados também nesse estudo, dados no visível. Espectros de baixa resolução foram obtidos durante a missão de observação no Observatório do Pico dos Dias, do Laboratório Nacional de Astrofísica (OPD - LNA), nos dias 27, 28 e 29 de abril de 2009 e são parte do projeto “Estudo sobre a Evolução de Estrelas C-J”, liderado por S. Lorenz-Martins. As observações foram realizadas por A. B. de Mello (ON / MCT), A. F. P. Sánchez (OV / UFRJ) e T. C. Khouri Silva (OV / UFRJ). Foram selecionadas 18 candidatas a C-J ou C-R (supostas progenitoras das C-J), porém só foi possível observar 12 objetos. Essa amostra difere da empregada em observações do ESO e Gemini e é apresentada no capítulo 3, onde se expõe um estudo dos objetos a partir de seus índices de classificação de acordo com o trabalho de De Mello et al. (2009) (em Anexo). Conforme discutido nesse capítulo, essa classificação pode ser obtida a partir de espectros de resoluções baixa e intermediária, no ótico, em conjunto com espectros infravermelhos.

Os espectros foram obtidos por meio do espectrógrafo Coudé, acoplado ao telescópio de 1,60m do LNA, em conjunto com a rede 600 linhas/mm e o CCD 105, com observações em 1ª ordem direta. Duas regiões espectrais foram observadas: $\lambda 5700 - \lambda 6300 \text{ \AA}$, que foi empregada a fim de calcular os índices de classificação C_2 e j ; e $\lambda 4300 - \lambda 5300 \text{ \AA}$, empregada para obter os outros dois índices fotosféricos (índice-MS e indicador de população).

A amostra composta por 12 estrelas observadas em baixa resolução está listada na tabela 2.2. As colunas 1 e 2 designam os usuais nomes e numeração no catálogo IRAS para esses objetos, as colunas 3 e 4 fornecem a ascensão reta e a declinação (J2000.0) da estrela, a coluna 5 (M_v) informa a magnitude aparente na banda V. Por fim, a coluna 6, contém os comprimentos de onda centrais das regiões espectrais observadas, uma vez que não foi possível observar todas as estrelas em ambas as regiões. Os objetos da amostra são bastante dispersos em ascensão reta e têm magnitudes no intervalo de $m_V=5$ a $m_V=12$.

Tabela 2.2: Amostra de estrelas de baixa razão isotópica observadas no observatório *OPD* - *LNA*, empregadas ineditamente neste trabalho.

Nome	Objeto	Coordenada (2000.0)			m_V	λ_c
	IRAS	α	δ	Observado		
	09411-5933	09 42 36,4	-59 47 40,0	10,6	$\lambda 6200$	
HD 100764	11331-1418	11 35 42,7	-14 35 36,6	8,73	$\lambda 4800, \lambda 6200$	
C* 2123		13 47 47,0	-61 26 12,0	11,9	$\lambda 6200$	
	14286-4706	14 31 57,7	-47 19 45,0		$\lambda 6200$	
NW Lib	15013-0239	15 04 00,5	-02 51 05,1	10,1	$\lambda 4800, \lambda 6200$	
RV TrA	15278-6223	15 32 05,6	-62 33 18,6	9,3	$\lambda 4800, \lambda 6200$	
	16103-4929	16 14 05,4	-49 36 58,2	10,69	$\lambda 4800$	
C* 2365		16 47 24,7	23 12 57,5	9,0	$\lambda 6200$	
RS Tel	18151-4634	18 18 51,2	-46 32 53,4	9,9	$\lambda 4800, \lambda 6200$	
VX Aql	18575-0139	19 00 09,6	-01 34 56,8	12,2	$\lambda 6200$	
V1942 Sgr	19162-1600	19 19 09,6	-15 54 30,0	6,86	$\lambda 4800, \lambda 6200$	
C* 2837	19583-0730	20 01 05,2	-07 21 51,9	10,6	$\lambda 4800, \lambda 6200$	

Esses espectros foram empregados na classificação dos objetos segundo suas fotosferas. A classificação dos envoltórios circunstelares, por sua vez, foi obtida através de espectros infravermelhos LRS-IRAS (e T-ReCS nos casos em que este era disponível). As estrelas NW Lib, RS Tel e C* 2365 não possuem espectros LRS-IRAS e, portanto, não foi possível classifica-las de forma completa, como discutido no capítulo 3.

O tratamento desses dados foi feito com o sistema IRAF. Optou-se por um tratamento parcial dos espectros obtidos, isto é, apenas foram realizados os procedimentos básicos (*bias* e *flat*) de redução espectroscópica e calibrados os espectros em comprimento de onda, mas não em fluxo. Isto porque os índices calculados para essa amostra são descritos em termos de razões de medidas de intensidades e de larguras equivalentes. Medidas de lâmpada incandescente de HeAr e também de campo plano foram feitas no intuito de realizar a calibração em comprimento de onda. Desse modo a amostra da tabela 2.2 é apresentada em unidades de fluxo relativo.

2.3 Observações no ESO - La Silla

Foram empregados dados em alta resolução na região visível do espectro, visando obter

medições das velocidades radiais das estrelas. A intenção do estudo, da amostra observada nesta resolução, é buscar maior fundamentação ao cenário evolutivo atualmente aceito para as estrelas carbonadas ricas em silicato, isto é, que elas integram um sistema binário.

Para isso, foram utilizados espectros óticos observados em quatro anos diferentes no Observatório do ESO (*European Southern Observatory*), em La Silla. As missões de observação ocorreram em 1999, 2001, 2002 e 2009, e foram realizadas pela Dra. Silvia Lorenz-Martins (Observatório do Valongo - UFRJ), durante os três primeiros anos, e pelo Dr. Cláudio Bastos Pereira, no último ano, durante a vigência do acordo de cooperação ON-ESO. A tabela 2.3 exhibe a amostra observada, onde as colunas 1 e 2 designam os nomes usuais e os números de referência dos objetos no catálogo IRAS. As colunas 3 e 4 fornecem a ascensão reta e a declinação (J2000.0) dos objetos; a coluna 5 (m_V) contém a magnitude aparente na banda V e a coluna 6 lista as datas nas quais cada estrela da amostra foi observada.

Os espectros foram obtidos utilizando o espectrógrafo FEROS (*Fiber-fed Extended Range Optical Spectrograph* – Kaufer et al., 1999) acoplado ao telescópio ESO 1,52m. O FEROS é um espectrógrafo *echelle* alimentado por uma fibra ótica que distribui a cobertura espectral de $\lambda 3560 - \lambda 9200 \text{ \AA}$ em 39 ordens, mantendo um poder resolutor aproximadamente constante $R = 48000$. O CCD disponível para uso com o FEROS possui 2048×4096 pixels de $15 \mu\text{m}$. Os espectros FEROS, quando obtidos, são processados automaticamente (redução *on-line*) e disponibilizados já reduzidos e calibrados em comprimento de onda e com suas diversas ordens compostas em um único espectro linearizado de grande cobertura.

Nem todos os objetos de estudo desta tese puderam ser observados no Observatório *ESO - La Silla* por meio do espectrógrafo FEROS. No total, foram 14 as estrelas que compuseram a amostra do capítulo 5 para a obtenção das velocidades radiais. Todos os objetos desta amostra possuem, também, espectros LRS-IRAS com exceção dos marcados com [†] na tabela, isto é, C* 745 e V 433 Pup, que possuem apenas fotometria IRAS.

Detalhes da Amostra

Tabela 2.3: Amostra de estrelas de baixa razão isotópica observadas no observatório ESO - *La Silla* utilizadas tanto por De Mello (2007) quanto pela primeira vez neste trabalho (observações de 2009).

Nome	Objeto	Coordenada (2000.0)		m_V	Data da Missão
	IRAS	α	δ		
C* 447	06017+1011	06 04 31,4	+10 10 55	...	jan 2002 jul 2009
DH Gem	06280+1230	06 30 53,55	+12 28 45,6	9,82	jan 1999
NP Pup	06528-4218	06 54 26,68	-42 21 56,1	6,36	jan 1999 jan 2002
V 614 Mon	06585-0310	07 01 01,95	-03 15 09,1	7,27	jan 2002
BM Gem	07179+2505	07 20 59,01	+24 59 58,1	8,43	jan 1999 jan 2002
C* 745	07210-2121 [†]	07 23 11,45	-21 27 14,1	11,70	jan 1999
BE CMa	07215-2252	07 23 38,57	-22 58 10,8	8,67	jan 1999
C* 749	07221-0431	07 24 39,2	-04 37 55 2	13,50	jan 2002
C* 1003	08002-3803	08 02 05,01	-38 11 52,3	10,30	jan 1999 jan 2001 jan 2002
V 433 Pup	08174-1806 [†]	08 19 43,09	-18 15 52,9	9,45	jan 1999 jan 2002
MT Hya	08180+0520	08 20 41,35	+05 11 21,7	9,86	jan 2001 jan 2002 jul 2009
MC79 2-11	08577-6035	08 58 54,5	-60 47 38	11,40	jan 1999 jan 2002
FO Ser	18164-1538	18 19 21,8	-15 36 46,1	8,50	abr 2009
C* 2837	19583-0730	20 01 05,2	-07 21 51,9	10,21	abr 2009

Os espectros no infravermelho são estudados no capítulo 3. As estrelas dessa amostra são carbonadas com baixas razões isotópicas de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, sendo 10 estrelas C-J e 2 classificadas como C-R por (De Mello et al., 2009). Muito pouco se sabe sobre a maioria das estrelas dessa amostra: a estrela C* 447, por exemplo, sequer possui uma magnitude aparente na banda V definida.

3 NSCC

Novo Sistema de Classificação de Estrelas Carbonadas

Um bom sistema de classificação de estrelas carbonadas deve ser capaz de, apenas por meio de uma simples notação, fornecer informações sobre o ambiente estelar, sua evolução e de sua interação com o meio interestelar. Estrelas carbonadas, ou frias de um modo geral, possuem intensa opacidade molecular e baixas temperaturas, que tornam o trabalho de classificação difícil de ser executado. Além disso, muitos dos parâmetros que descrevem com sucesso as estrelas até a classe espectral M são ineficientes para descrever objetos com a razão $C/O > 1$. O “Novo Sistema de Classificação de Estrelas Carbonadas” (daqui em diante NSCC), apresentado por De Mello et al. (2009), foi desenvolvido com o propósito de facilitar o trabalho de classificação de estrelas carbonadas.

O NSCC reúne alguns dos elementos mais bem sucedidos de sistemas no ótico e algumas novas implementações visando melhorar e padronizar os sistemas de classificação. Os autores utilizaram não apenas espectros na região visível, mas também dados no infravermelho, para estabelecer esse novo sistema. Assim, o NSCC é suficientemente completo a ponto de fornecer, em uma simples notação, diversas informações a respeito das fotosferas e dos envoltórios circunstelares das estrelas. Lloyd Evans (2010) menciona, em uma revisão de sistemas de classificação para carbonadas, o NSCC como um esquema que combina sistemas de classificação baseados em elementos puramente espectroscópicos com índices de temperatura e envoltório obtidos por modelagem da distribuição de energia espectral no intervalo de comprimentos de onda de 500nm a 100 μ m.

De Mello et al. (2009) apresentaram um novo sistema de classificação, desenvolvido durante o mestrado da autora e refinado posteriormente, de classificação para 51 estrelas observadas no ESO e OPD. Já nesta etapa atual, foi realizada uma classificação prévia

dos objetos das amostras descritas no capítulo 2 de acordo com os critérios do NSCC. Tal classificação indica a temperatura efetiva da estrela e estimativas das abundâncias de carbono normal e isotópico, que são parâmetros empregados na entrada dos modelos de envoltórios circumstelar e nas análises evolutivas discutidas nos capítulos 4 e 5. O estudo em conjunto dos vários parâmetros de classificação obtidos fornece, ainda, um primeiro indício de quais mecanismos estão ocorrendo no interior estelar.

Na seção 3.1, apresentamos a classificação referente aos espectros óticos e na seção 3.2, todos os objetos que possuem espectros LRS-IRAS, T-ReCS e/ou ISO-SWS são analisados e têm sua classificação de envoltório ou revisada ou determinada pela primeira vez. Uma discussão mais profunda dos modelos calculados será apresentada no capítulo 4.

3.1 Índices Fotosféricos

O NSCC foi desenvolvido a partir de um método empírico e compreende, quanto à análise do espectro ótico, quatro índices fotosféricos: o indicador de população (R, N, J ou CH) e os índices $-C_2$ (estimativa de abundância de carbono), $-j$ (estimativa de abundância de carbono isotópico) e $-MS$ (baseado na intensidade da banda SiC_2 , $\lambda 4977 \text{ \AA}$). Os detalhes de metodologia de aquisição dos índices e descrição dos intervalos de atuação estão descritos em De Mello et al. (2009), em anexo.

Dentre as estrelas da amostra deste trabalho (capítulo 2), para apenas 7 não foi possível obter índices de classificação segundo sua fotosfera, a saber: $C^* 447$, V614 Mon, $C^* 745$ e V433 Pup, da amostra da tabela 2.3; e IRAS 11311-6355, IRAS 16001-4851 e IRAS 09425-6040, da amostra da tabela 2.1, por não ter sido possível obter espectros óticos de baixa resolução. As demais foram analisadas de acordo com a metodologia de classificação NSCC na região visível do espectro (tabela 2.2). Deve-se notar que, com exceção da estrela $C^* 2837$, os demais objetos da tabela 2.3 tiveram sua classificação divulgada em De Mello (2007), porém também são apresentados neste trabalho.

O primeiro índice calculado foi o de excesso de carbono sobre oxigênio, o índice- C_2 .

Este é obtido em regiões onde o efeito da opacidade molecular é menos intenso a partir da força das bandas de Swan. De acordo com a metodologia do NSCC, a soma das intensidades relativas a um pseudocontínuo local das bandas $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ $\lambda 6192$ Å e $^{13}\text{C}^{12}\text{C}$ $\lambda 6168$ Å corresponde a um parâmetro primário, e a largura equivalente de uma completa absorção na região de $\lambda 5722 - \lambda 6202$ Å, a um secundário.

A distribuição dos valores dos parâmetros primários e secundários que foram obtidos para as estrelas nesse trabalho de doutorado e para os objetos da tabela 2.3 (De Mello et al., 2009), podem ser vistos na figura 3.1, em sua parte esquerda. As linhas tracejadas transversais delimitam os intervalos para cada valor do índice $-C_2$ final. Os círculos fechados são os objetos da tabela 2.2 e os abertos são os publicados em (De Mello et al., 2009).

Infelizmente, as observações no OPD obtidas em 2009, deste trabalho, exceto FO Ser, não englobam o intervalo de comprimentos de onda do parâmetro secundário. Assim, para cada objeto em análise, o parâmetro primário define diretamente o indicador médio, o qual é empregado, por sua vez, para definir o valor do índice C_2 . O uso do parâmetro primário, isoladamente, para a obtenção do índice- C_2 é possível porque os dois parâmetros tendem a ser equivalentes e foram estabelecidos já prevendo a possibilidade de restrições observacionais. Na figura 3.1, esses objetos foram representados sobre a linha sólida vermelha porque seu indicador médio corresponde ao próprio valor do parâmetro primário. Para as demais estrelas da amostra, círculos abertos, os parâmetros primário e secundário foram obtidos sem grandes problemas.

A estrela IRAS 16103-4929 foi observada apenas na região centrada em $\lambda 4700$ Å. Desse modo, não foi possível obter para esse objeto nem o índice $-C_2$ nem o $-j$.

Pode-se observar que as estrelas V1942 Sgr, C* 2365 e RV TrA apresentam o maior valor do índice- C_2 calculado, $C_2 8$, aparentando ser, portanto, os objetos com a maior abundância de carbono da amostra. As estrelas NP Pup, VX Aql e DH Gem, por outro lado, com $C_2 3$ são as que apresentam a razão C/O mais baixa.

A seguir, obtivemos o índice- j , que fornece uma estimativa da abundância de carbono

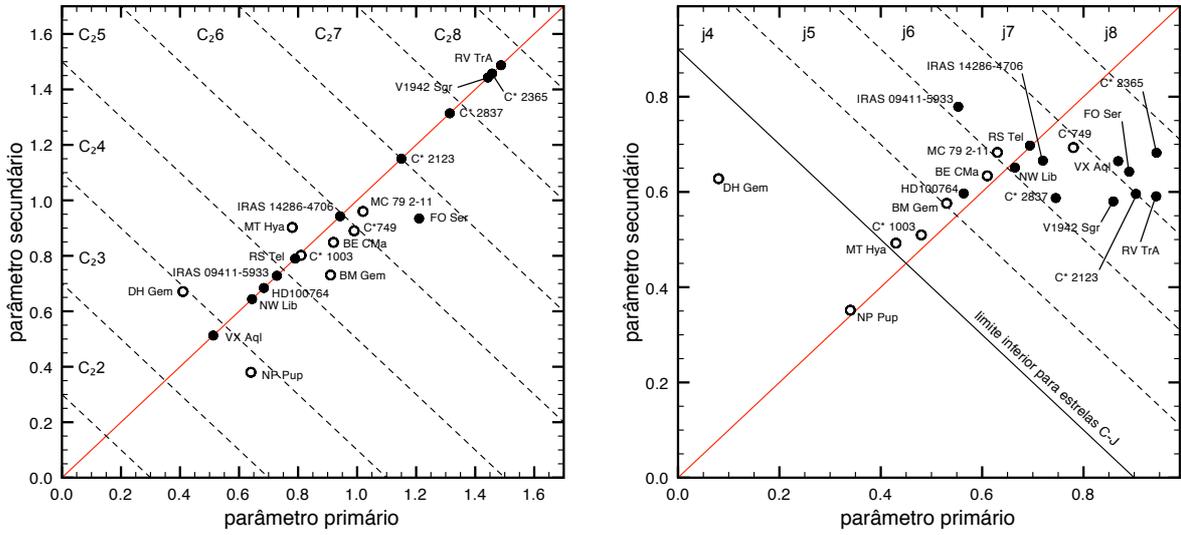


Figura 3.1: À esquerda está a distribuição dos valores obtidos para os parâmetros primários e secundários relativos ao índice C_2 medidos para cada estrela. A linha sólida central (vermelha) marca a situação em que os parâmetros primário e secundário têm o mesmo valor, enquanto que as tracejadas transversais delimitam os intervalos para cada valor do índice- C_2 . As coordenadas da projeção do valor obtido para cada estrela sobre a linha sólida fornecem o indicador médio empregado para estabelecer o índice. À direita está a distribuição para o índice j calculado para cada estrela. Neste gráfico, a linha preta contínua marca o limite entre estrelas classificadas como ricas em ^{13}C , isto é C-J, e as demais. Os círculos fechados são as observações de 2009 no OPD, enquanto os abertos são as publicadas em De Mello et al. (2009).

isotópico na estrela. É este índice que define se a estrela é ou não uma carbonada C-J. O índice- j foi calculado também a partir de dois parâmetros. O parâmetro primário corresponde às mesmas bandas utilizadas no índice- C_2 , no entanto, aplica-se a razão das intensidades das bandas $^{13}\text{C}^{12}\text{C}$ $\lambda 6168 \text{ \AA}$ e $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ $\lambda 6192 \text{ \AA}$. Já o secundário corresponde à razão entre as larguras equivalentes das bandas $^{13}\text{C}^{14}\text{N}$ $\lambda 6260 \text{ \AA}$ e $^{12}\text{C}^{14}\text{N}$ $\lambda 6206 \text{ \AA}$.

Para este índice, ambos os parâmetros foram calculados para todas as estrelas da amostra. Seguindo a metodologia do NSCC, aplicou-se uma transformação linear no parâmetro secundário a fim de compatibilizar as escalas de ambos os parâmetros, para que em seguida, se pudesse obter o indicador médio através de uma média simples. E são esses valores do indicador médio que determinam em que escala do índice- j está cada estrela.

Os valores dos parâmetros primário e secundário obtidos podem ser vistos na figura

3.1, em sua parte direita. A linha sólida central (vermelha) marca a situação em que os parâmetros têm o mesmo valor e as tracejadas transversais a esta delimitam os intervalos para cada valor do índice- j . Graficamente, o indicador médio de cada objeto é dado pelas coordenadas da projeção perpendicular do ponto referente a ele sobre a linha vermelha. Os círculos fechados são os objetos da tabela 2.2 e os abertos são os publicados em (De Mello et al., 2009). A linha sólida transversal (preta) marca o limite para as estrelas C-J. Somente aquelas que recebem índices acima de j_4 são consideradas estrelas tipo J; para as demais é realizado um estudo do indicador de população, conforme feito a seguir.

A amostra da tabela 2.2 pode ser vista na figura 3.2 que exhibe os objetos na região na qual estudamos a razão entre o carbono normal e o isotópico.

As estrelas FO Ser, VX Aql, RV TrA e C* 2365 apresentam os maiores valores do índice- j , j_7 , sendo, portanto, os objetos mais abundantes em carbono isotópico da amostra (deve-se ter em mente que quanto maior é o índice- j , menor é a razão $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ do objeto, uma vez que o índice foi obtido a partir de uma razão inversa da usual para o estudo de carbono isotópico). Dessas, incidentalmente, RV TrA e C* 2365 também foram os objetos que apresentaram o maior índice- C_2 .

Chen & Zhang (2006) sugeriram uma natureza tipo C-J para as estrelas IRAS 09411-5933, IRAS 14286-4706 e VX Aql. Essa sugestão foi confirmada, nesta presente classificação, uma vez que os valores obtidos para o índice que mede a sobre-abundância de carbono isotópico para os dois primeiros objetos foi j_6 e, para VX Aql o mais extremo obtido, j_7 . Fato, também interessante, foi a descoberta de que os objetos RS Tel e C* 2365, tratam-se de estrelas C-J. Até o presente momento, C*2365 havia sido considerada como estrela C-R (Zamora et al., 2009), embora nenhuma medida ou estimativa de sua abundância de carbono isotópico tenha sido feita. A estimativa da abundância de $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ para C*2365 calculada por meio do indicador médio, não deixa dúvida quanto a sua natureza C-J, visto que o parâmetro foi um dos mais altos calculados. O mesmo havia sido apontado para RS Tel por Knapp et al. (2001). No entanto o valor obtido para o índice- j

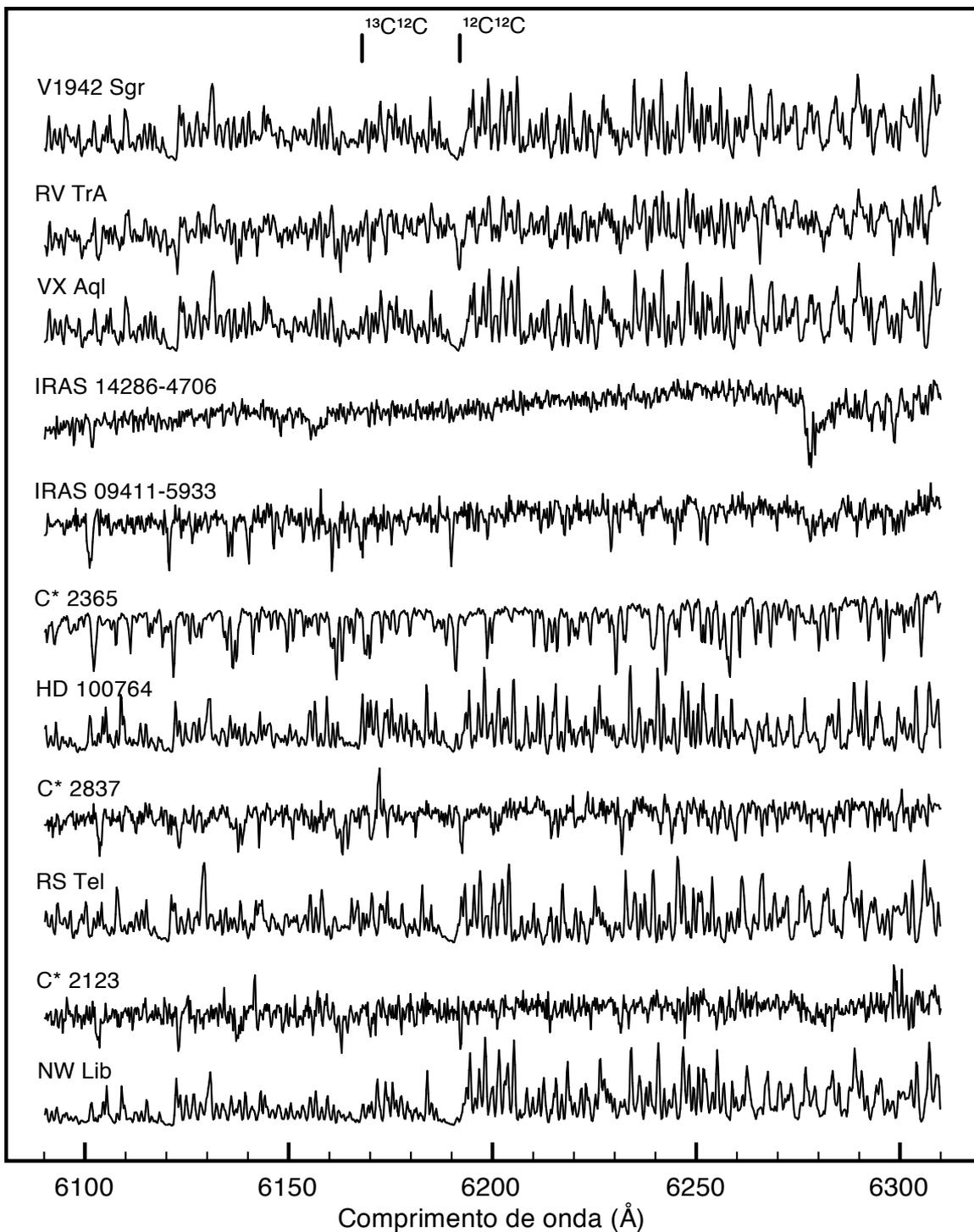


Figura 3.2: Uma das regiões analisadas das estrelas que obtiveram uma nova classificação no ótico. As duas bandas do sistema de Swan, normal e isotópica, estão em destaque.

foi j_6 , o que não deixa margem de dúvida quanto à classificação do objeto como uma C-J.

Ao se projetar NP Pup e DH Gem sobre a linha sólida central, na figura 3.1 (à direita), observa-se que os índices obtidos para essas estrelas foi j_2 e j_3 , respectivamente. Essa situação os coloca abaixo do limite para estrelas carbonadas C-J, e seus índices de população (C-R ou C-N) serão discutidos ao fim da seção.

O terceiro índice ótico fornece uma estimativa da intensidade das bandas de Merrill-Sanford, relativas à molécula de SiC_2 . Essas bandas não são observadas na maior parte das estrelas carbonadas, porém, quando presentes em seus espectros, mostram-se bastante intensas. Elas podem ser encontradas na região espectral entre $\lambda 4300 - \lambda 5000 \text{ \AA}$ e o índice-MS é obtido a partir da qualificação relativa da banda $\text{SiC}_2 \lambda 4977 \text{ \AA}$ em fraca (MS1), média (MS2) e forte (MS3). Os índices obtidos encontram-se na tabela 3.4 junto à classificação completa obtida para as amostras.

A ausência de um índice-MS nem sempre indica a ocorrência de bandas muito fracas de SiC_2 , já que pode resultar também da dificuldade em se analisar esses objetos nessa região devido a intensas opacidades moleculares. Foi mostrado ainda por De Mello (2005) que as estrelas que apresentam os maiores índices-MS também apresentam elevados índices- C_2 , conforme também pôde-se constatar neste trabalho no caso da estrela RV TrA que obteve $\text{C}_2 8$, j_7 e MS3 e FO Ser com $\text{C}_2 6$, j_7 e MS3.

De fato, os únicos objetos da amostra aos quais foi atribuído um índice -MS foram: RS Tel, IRAS 16103-4929, RV TrA e V1942 Sgr. As estrelas RV TrA e IRAS 16103-4929, observadas no OPD em 2009, podem ser vistas na figura 3.3 que exhibe esses objetos na região na qual estudamos a intensidade da banda SiC_2 , em $\lambda 4977 \text{ \AA}$.

Finalmente, determinamos, a partir dos espectros óticos, indicadores de população para os objetos. Estudamos nesta etapa somente as estrelas que não foram, a partir do índice- j , classificadas como C-J; ou seja, NP Pup e DH Gem. Ambas as estrelas apresentam fluxo intenso na região azul do espectro e baixas intensidades das linhas de Ba I e Sr I quando comparadas com as profundidades das bandas de CN próximas. Essas características são

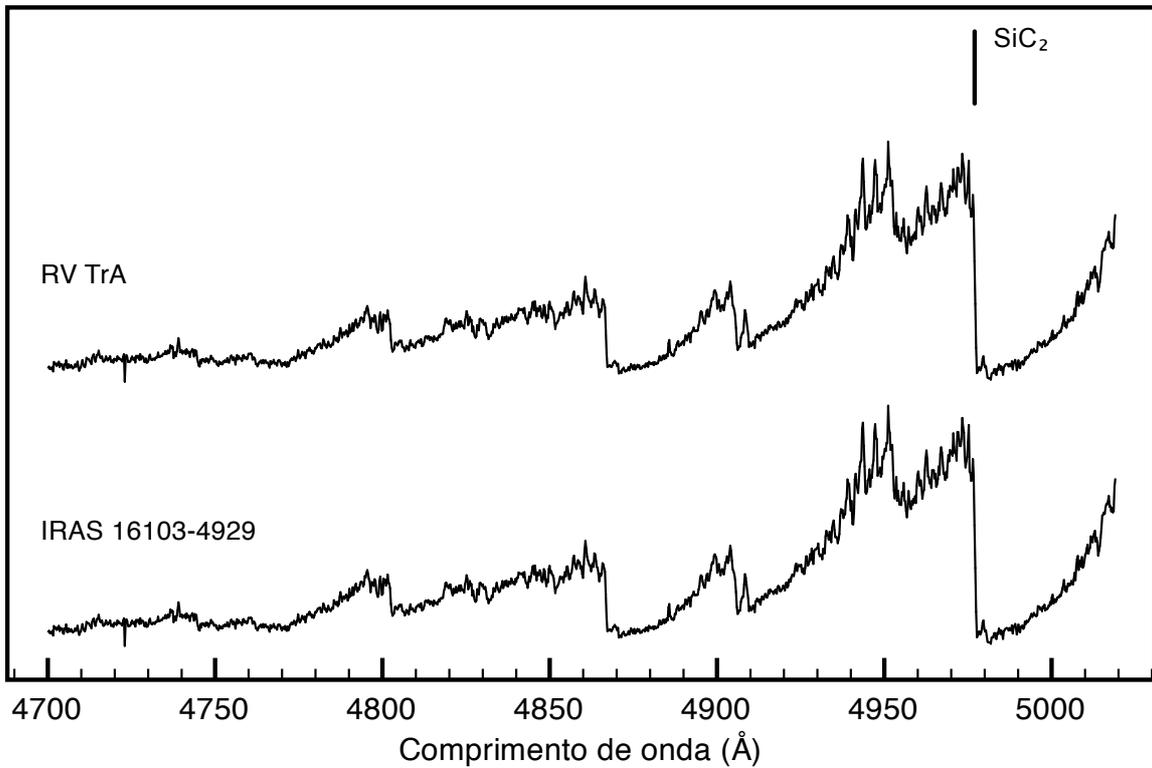


Figura 3.3: Região analisada a fim de se obter o índice -MS para as estrelas da amostra.

suficientes para que se possa atribuir a elas um índice de população C-R.

Resumidamente, a tabela 3.1 reúne os parâmetros empregados na obtenção de cada um dos índices fotosféricos calculados com base no NSCC.

Tabela 3.1: Parâmetros associados a cada índice fotosférico do NSCC.

Índice	Parâmetro	Observação
índice-C ₂	$p_1 = I^{13\text{C}^{12}\text{C}} \lambda 6168 \text{ \AA} + I^{12\text{C}^{12}\text{C}} \lambda 6192 \text{ \AA}$ $p_2 = W \lambda 5722 - \lambda 6202 \text{ \AA}$	<ul style="list-style-type: none"> • estimativa de abundância de C • excesso de C sobre O
índice-j	$p_1 = I^{13\text{C}^{12}\text{C}} \lambda 6168 \text{ \AA} / I^{12\text{C}^{12}\text{C}} \lambda 6192 \text{ \AA}$ $p_2 = W^{13\text{C}^{14}\text{N}} \lambda 6260 \text{ \AA} / I^{12\text{C}^{14}\text{N}} \lambda 6206 \text{ \AA}$	<ul style="list-style-type: none"> • estimativa de abundância de ¹³C • $j \geq 4 \rightarrow C - J$
índice-MS	$d = I \text{ SiC}_2 \lambda 4977 \text{ \AA}$	<ul style="list-style-type: none"> • estimativa da intensidade SiC₂ • \uparrow índice-MS $\rightarrow \uparrow$ índice-C₂
índice de população	extensão do fluxo na região azul-violeta do espectro I BaII ($\lambda 4554, 4934$) e I SrI ($\lambda 4607$) I CH ($\lambda 4352$)	<ul style="list-style-type: none"> • intenso \rightarrow C-R ou C-H • fraca \rightarrow C-R, forte \rightarrow C-N ou C-H • forte \rightarrow C-R ou C-H

3.2 Índices do Envoltório Circunstelar

A classificação dos envoltórios circunstelares pelo NSCC consiste na determinação de três índices: $-SiC$, estimativa de abundância da razão SiC/Carbono Amorfo ou o indicador de envoltórios de estrelas carbonadas ricas em silicato; $-\tau$, estimativa da opacidade do envoltório circunstelar; e um índice de temperatura. Obtivemos esses valores por meio de modelos calculados a partir de simulações numéricas que visam a resolver o problema do transporte radiativo em envoltórios circunstelares, que foram ajustados a espectros infravermelhos LRS-IRAS, espectros SWS-ISO ou espectros Gemini/T-ReCS e a dados de fotometria disponíveis na literatura. Essas simulações são feitas com um código que emprega o método de Monte Carlo no tratamento do transporte radiativo através do envoltório (Lorenz-Martins & Lefèvre, 1994). Essa estratégia diferencia esse sistema dos anteriores, que se baseavam apenas em uma análise do formato da estrutura em emissão perto de $11,3 \mu\text{m}$. Detalhes do método aplicado são apresentados no capítulo 4.

Dentre as estrelas da amostra desse trabalho, no capítulo 2, nem todas puderam ser classificadas segundo as características de seus envoltórios circunstelares. São seis os objetos que não possuem espectros no infravermelho disponíveis: NW Lib, C* 2365, RS Tel, da amostra da tabela 2.2, C* 745 e V433 Pup, da amostra da tabela 2.3. As estrelas da tabela 2.1 foram observadas com o espectrógrafo T-ReCS e os detalhes dos modelos calculados estão no capítulo 4. Os demais objetos da amostra possuem espectros LRS-IRAS. Esses espectros no infravermelho possuem baixa resolução, $R = 60$, e para diversos objetos da amostra eles ainda possuem qualidade muito baixa. Os modelos de envoltório circunstelar calculados para as estrelas da tabela 2.3 foram publicados em De Mello (2007); De Mello et al. (2009), porém também são apresentados neste trabalho, para efeitos de completude e para facilitar comparações entre os objetos.

O índice $-\tau$ fornece uma estimativa de quão espesso é o envoltório, de quão eficiente é o obscurecimento da estrela pelo mesmo, e ainda, em qual estágio evolutivo a estrela

carbonada se encontra. O parâmetro empregado é a opacidade de extinção do envoltório em $\lambda = 1\mu\text{m}$ obtida através do cálculo dos modelos. No caso particular das estrelas ricas em silicato, essa medida é feita em $\lambda = 9\mu\text{m}$.

O índice-SiC é um índice de abundância relativa do carbetto de silício ao carbono amorfo nos grãos do envoltório. Essa abundância é, também, um dos parâmetros de saída dos modelos de envoltório. Como será visto nas seções a seguir nem todos os objetos da amostra recebem um índice-SiC. As estrelas carbonadas ricas em silicatos recebem a notação especial “Jpec” devido a esta peculiaridade.

O índice numérico de temperatura complementa a classificação e é posicionado, na notação, logo após o índice de população. Os domínios do índice numérico de temperatura são os usuais da literatura e o determinamos para cada objeto a partir das temperaturas efetivas relativas às estrelas centrais obtidas com a modelagem.

A tabela 3.2 exhibe a combinação de parâmetros que produziu os melhores resultados na obtenção dos modelos de envoltório circunstelar. Os parâmetros dispostos na tabela são: a temperatura efetiva da estrela central (T_{ef} (K)); a fronteira interna, R_1 (R_\star), e externa, R_2 (R_\star) do envoltório; o raio empregado para os grãos de poeira, a (\AA); a opacidade do envoltório (τ_{ext}) à radiação e a razão de abundância entre carbetto de silício e carbono amorfo, SiC/CA ou o indicador Jpec, para as carbonadas ricas em silicato.

Os modelos de envoltórios das estrelas com espectros no infravermelho característicos de grãos ricos em carbono foram calculados empregando grãos simples de duas espécies diferentes: carbono amorfo (CA), cujas constantes óticas foram mensuradas por Rouleau & Martin (1991) e carbetto de silício (SiC), estudado por Pégourié (1988). Esses podem ser vistos na figura 3.4. Em cada modelo mostrado, apresenta-se o detalhe da emissão característica desses envoltórios.

Os dois parâmetros obtidos de espectros no infravermelho, isto é, o índice- τ e -SiC, podem fornecer pistas sobre o estágio evolutivo das estrelas carbonadas. Um envoltório óticamente espesso (valores de τ_{ext} maiores), normalmente sugere uma estrela no topo

do AGB, enquanto um envoltório opticamente mais fino (valores de τ_{ext} menores) sugere estrelas AGB de tipo inicial. Sabe-se, ainda, que grãos de carbono amorfo têm uma temperatura máxima de condensação em torno de 1000K (Frenklach & Feigelson, 1989), enquanto que espécies de grãos de SiC podem se formar a temperaturas um pouco mais altas, da ordem de 1300K - 1500K, e, portanto, podem se localizar em regiões mais próximas

Tabela 3.2: Resultados dos modelos de calculados a fim de se obter os índices do NSCC referente a análise do envoltório circumstelar.

Objeto	T_{eff} (K)	$R_1(R_\star)$	$R_2(R_\star)$	$a(\text{Å})$	τ_{ext}	SiC/CA	Fotometria
MC79 2-11	2300	13,0	2000	1800	3,50	Jpec	1,2,3,5
IRAS 11311-6355	2350	5,0	1000	1200	2,75	Jpec	1,4
IRAS 16001-4851	2500	3,5	1000	3500	7,00	Jpec	1,4,6
IRAS 16103-4929	2700	5,0	1000	1000	2,85	Jpec	1,4,6
VX Aql	2850	5,0	1000	1100	0,90	Jpec	1,4
C* 2837	2600	12,0	1000	1300	1,50	Jpec	1,2,4,5
C* 2123	2700	5,0	1000	1100	0,90	0,18	3,5,7
IRAS 09425-6040	2250	5,0	1000	1100	0,70	0,10	3,5,7
C* 447	2300	13,0	2000	1500	2,00	Jpec	1,5,6
DH Gem	2900	5,0	1000	1000	0,30	0,45	1,3,4,5,7
NP Pup	2750	7,5	1000	900	0,03	0,80	1,3,5,7,9,10
V 614 Mon	2900	4,0	1000	1200	0,20	0,12	1,4,5,7,8
BM Gem	2450	5,0	1000	1300	0,60	Jpec	1,5
BE CMa	2850	5,0	10000	800	0,10	0,50	1,3,4,5,7,8
C* 749	2300	15,0	1000	1800	3,00	Jpec	1,5
C* 1003	2500	10,0	1000	1700	4,30	Jpec	1,5
MT Hya	2450	5,0	1000	1300	0,60	Jpec	1,5
FO Ser	2800	4,0	1000	1000	0,30	0,10	5,7,9
IRAS 09411-5933	2550	5,0	1000	1300	3,25	Jpec	1,11
HD 100764	2800	7,0	10000	1000	0,55	0,45	1,5,6
IRAS 14286-4706	2250	5,0	1000	1300	1,75	Jpec	1,5,6,10
RV TrA	2200	5,0	10000	1400	0,30	0,15	1,5,6
V1942 Sgr	2700	5,0	10000	1100	0,10	0,11	1,5,6,10

Referências bibliográficas dos dados fotométricos: ¹IRAS Catalogue of Point Sources (Olon et al., 1986), ²Evans (1990), ³The HIPPARCOS and TYCHO catalogues (Perryman & ESA, 1997), ⁴Kharchenko et al. (2004), ⁵2MASS Catalogue (Cutri et al., 2003), ⁶Zacharias et al. (2005), ⁷MSX (Egan et al., 2003), ⁸Guglielmo et al. (1993), ⁹Morel & Magnenat (1978), ¹⁰Ducati (2002), ¹⁰Gezari et al. (1999).

da estrela central, sendo assim os primeiros a serem condensados (Lorenz-Martins et al., 2001). Assim, valores altos de SiC/CA sugerem estrelas AGB iniciais, uma vez que o grãos ricos em SiC podem ser os primeiros a se condensar nos envoltórios das estrelas carbonadas. Conforme mais carbono é ejetado, outros componentes passam a ser mais abundantes, como por exemplo o carbono amorfo. Desse modo, apesar de as AGBs mais evoluídas possuírem maiores valores de τ_{ext} , a razão SiC/CA tende a ser relativamente menor (De Mello, 2007). Apesar da amostra desse trabalho conter mais estrelas C-J ricas em silicato do que ordinárias, pode-se dizer, por exemplo, que a estrela V1942 Sgr é uma AGB carbonada em estágio inicial, com envoltório opticamente fino.

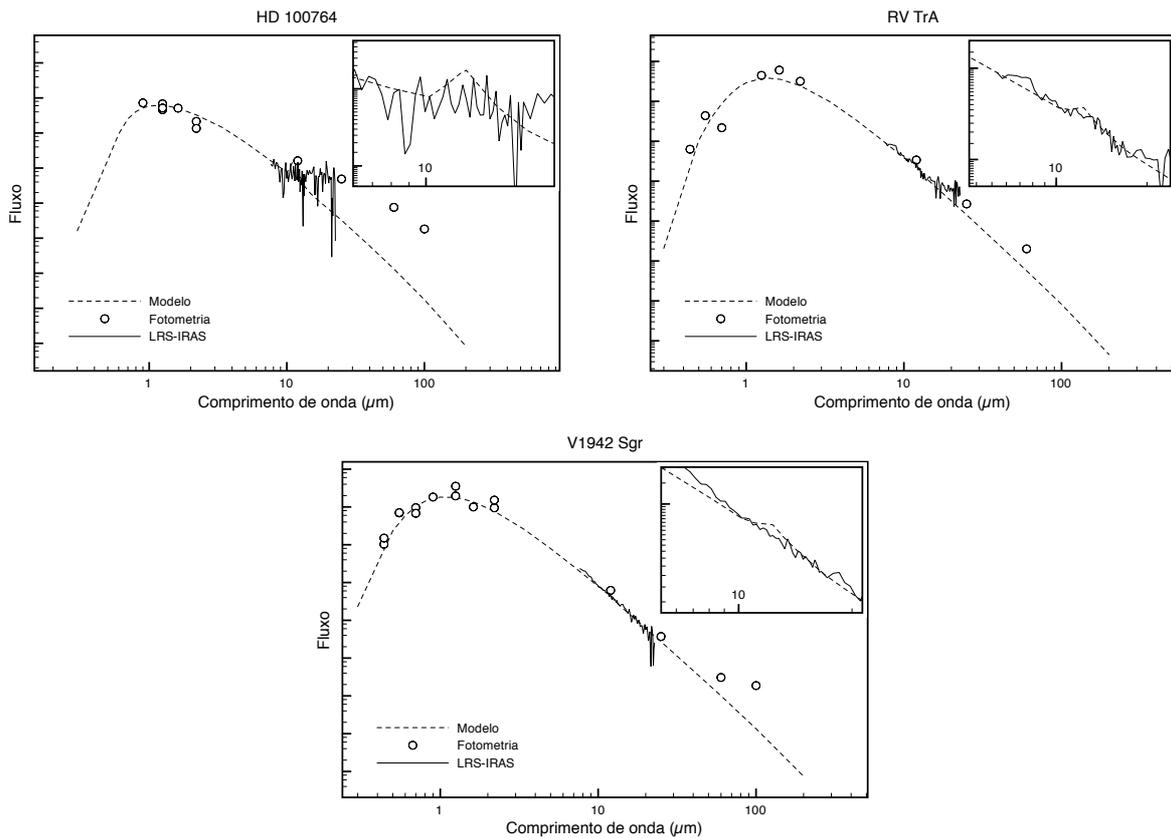


Figura 3.4: Modelos calculados com envoltórios que apresentam a emissão característica em $11,3 \mu\text{m}$, para as estrelas da amostra da tabela 2.2. Os modelos das estrelas remanescentes dessa amostra e as da tabela 2.1 estão exibidos no capítulo 4 em detalhes. Por sua vez, os demais modelos que serviram para completar a classificação da amostra desse trabalho de doutorado foram calculados em trabalhos anteriores e publicados em De Mello et al. (2009).

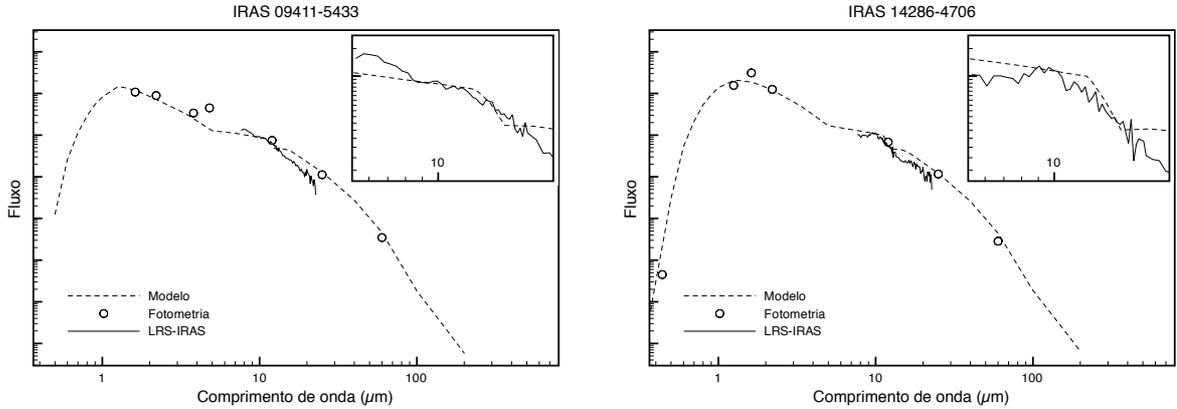


Figura 3.5: Modelos calculados com envoltórios que apresentam a emissão característica em $9,8 \mu\text{m}$, para as estrelas da amostra da tabela 2.2. Os modelos das estrelas remanescentes dessa amostra e as da tabela 2.1 estão exibidos no capítulo 4 em detalhes. Por sua vez, os demais modelos que serviram para completar a classificação da amostra desse trabalho de doutorado foram calculados em trabalhos anteriores e publicados em De Mello et al. (2009).

Por sua vez, os modelos de envoltórios das estrelas com espectros no infravermelho característicos de grãos de silicato, foram calculados empregando as constantes óticas mensuradas por David & Pégourié (1995). Esses podem ser vistos na figura 3.5. Em cada modelo mostrado, apresenta-se o detalhe da emissão característica desses envoltórios.

Ao se comparar esses dois objetos, pode-se dizer que a estrela IRAS 09411-5933 apresenta um envoltório óticamente mais espesso que a IRAS 14286-4706. Seria possível supor, então, que IRAS 09411-5933 está em uma etapa evolutiva posterior a IRAS 14286-4706. No entanto, uma discussão mais abrangente e refinada a respeito do estágio evolutivo das estrelas carbonadas ricas em silicato é apresentada no capítulo 4.

Tabela 3.3: Parâmetros associados a cada índice de envoltório do NSCC.

Índice	Parâmetro	Observação
índice-SiC	n° de grãos SiC / n° de grãos CA	<ul style="list-style-type: none"> • estimativa da abundância SiC/CA • \uparrow SiC/CA \rightarrow inicial • \downarrow SiC/CA \rightarrow final • C-J ricas em silicato \rightarrow Jpec
índice- τ	opacidade de extinção em $\lambda = 1\mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> • estimativa da opacidade do envoltório • $\uparrow \tau \rightarrow$ espesso • $\downarrow \tau \rightarrow$ fino
índice-T	temperatura efetiva da estrela central, T_{eff}	

Resumidamente, a tabela 3.3 reúne os parâmetros empregados na obtenção de cada um dos índices referente ao envoltório circumstelar calculados com base no NSCC.

3.3 Classificação Final

Os índices calculados a partir dos espectros óticos e no infravermelho, de acordo com a metodologia do NSCC (De Mello et al., 2009), foram reunidos numa classificação final para as estrelas da amostra deste trabalho, que pode ser vista na tabela 3.4. Deve-se notar que não foi possível obter a classificação NSCC completa para todos os objetos. Para os objetos para os quais não havia espectros disponíveis na região visível, a classificação da fotosfera foi prejudicada. Esses estão evidenciados na tabela pela notação ^a. Para aqueles para os quais não foi possível obter espectroscopia no infravermelho, marcados com notação ^b, a classificação do envoltório circumstelar, bem como o índice numérico de temperatura não puderam ser obtidos. E, ainda, ocorreram dois casos extremos em que não foi possível obter nem espectros de baixa resolução na região visível, nem no infravermelho: C* 745 e V433 Pup. Esses objetos receberam a notação ^c e sua classificação como C-J foi sugerida por De Mello (2007), por meio de cálculos de síntese espectral da abundância de carbono isotópico. Portanto, faltam ainda para esses objetos a confirmação e o complemento de sua classificação NSCC, de modo que receberam o indicador de incerteza (:), após o indicador de população. Assim, das 28 classificações listadas abaixo, 23 foram obtidas ao longo do trabalho de doutorado e as demais 5 foram publicadas em De Mello et al. (2009) (BE CMa, C* 745, C* 749, C* 1003 e V433 Pup), referente a um cálculo prévio.

Tabela 3.4: Classificação final da amostra segundo o NSCC

MC79 2-11	C-J5	C ₂₆	j6		τ 3	Jpec
IRAS 11311-6355 ^a	C-J:5				τ 2	Jpec
IRAS 16001-4851 ^a	C-J:6				τ 3	Jpec
IRAS 16103-4929 ^a	C-J:3			MS3	τ 2	Jpec
VX Aql	C-J2	C ₂₄	j7		τ 2	Jpec
C* 2837	C-J4	C ₂₇	j6		τ 2	Jpec
IRAS 09425-6040 ^a	C-J:5				τ 2	Jpec
C* 2123	C-J3	C ₂₈	j6		τ 2	SiC2
C* 447 ^a	C-J:5				τ 2	Jpec
DH Gem	C-R2	C ₂₃			τ 2	SiC4
NP Pup	C-R3	C ₂₃			τ 0	SiC1
V 614 Mon ^a	C-J:2				τ 1	SiC2
BM Gem	C-J4	C ₂₅	j5		τ 2	Jpec
BE CMa	C-J2	C ₂₅	j5	MS1	τ 0	SiC4
C* 745 ^c	C-J:					
C* 749	C-J5	C ₂₅	j6	MS2	τ 2	Jpec
C* 1003	C-J4	C ₂₅	j4		τ 3	Jpec
V433 Pup ^c	C-J:					
MT Hya	C-J4	C ₂₅	j4		τ 2	Jpec
FO Ser	C-J3	C ₂₆	j7	MS3	τ 2	SiC1
IRAS 09411-5933	C-J4	C ₂₄	j6		τ 3	Jpec
HD 100764	C-J3	C ₂₄	j5		τ 2	SiC4
NW Lib ^b	C-J	C ₂₆	j7	MS3		
IRAS 14286-4706	C-J5	C ₂₆	j6		τ 2	Jpec
RV TrA	C-J6	C ₂₈	j7	MS3	τ 2	SiC2
RS Tel ^b	C-J	C ₂₅	j6	MS1		
V1942 Sgr	C-J3	C ₂₈	j6	MS1	τ 0	SiC2
C* 2365 ^b	C-J	C ₂₅	j6	MS1		

4 Análise do Envoltório Circunstelar

T-ReCS × LRS-IRAS: Uma Análise Temporal dos Envoltórios

A poeira circunstelar, que é aquecida absorvendo radiação emitida pela estrela central, re-irradia essa energia em comprimentos de onda maiores, criando assim um excesso de fluxo no infravermelho. Estrelas com altas taxas de perda de massa possuem envoltórios circunstelares opticamente espessos, pois a velocidade do vento não ultrapassa $v \approx 30\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ (casos extremos), favorecendo o acúmulo de matéria. Esses ventos são compostos por gás e poeira e, portanto, essas estrelas são muito pouco luminosas na região visível do espectro, mas emitem fortemente em comprimentos de onda no infravermelho. Isso ocorre pois, grande parte da radiação emitida nos comprimentos de onda da região visível e do infravermelho próximo é em algum momento absorvida pela poeira e, posteriormente, re-emitida em comprimentos de onda maiores. Em geral, as taxas de perda de massa em estrelas carbonadas não chegam a níveis tão extremos, de forma a ainda ser possível que se estude tanto a fotosfera da estrela quanto seu envoltório.

A missão do satélite IRAS – *Infrared Astronomical Satellite* – (1985) disponibilizou uma grande quantidade de dados de qualidade, relativamente uniformes, no infravermelho médio e profundo: com fotometria e espectros de baixa resolução. A missão cobriu praticamente todo o céu, tornando assim possível analisar de forma sistemática características de grupos de estrelas. Até hoje, o banco de dados IRAS ainda é a única fonte de informações no infravermelho para muitas fontes AGBs carbonadas. Para a maioria das estrelas observadas, o fluxo medido nas bandas IRAS ($12\ \mu\text{m}$, $25\ \mu\text{m}$, $60\ \mu\text{m}$ e $100\ \mu\text{m}$) é emitido apenas pelo envoltório circunstelar. As missões dos satélites ISO – *Infrared Space Observatory* – (1992) e SPITZER *Space Telescope* (lançado em 2003 e ainda em atividade) foram revolucionárias ao disponibilizarem espectros de alta resolução, no caso

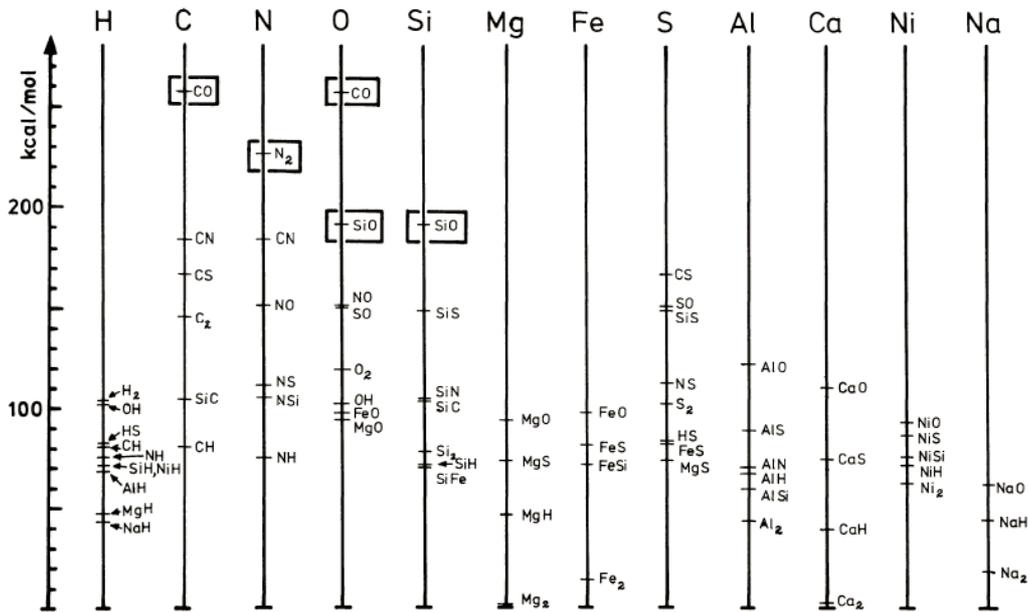


Figura 4.1: Energia de ligação de moléculas diatômicas. [Extraído de Gail & Sedlmayr (1986)]

do ISO, com uma grande cobertura espectral. No entanto, não puderam nem de longe observar a quantidade de objetos estudados pelo satélite IRAS. Hoje, existem opções em solo para a obtenção de espectros infravermelhos de alta qualidade como os fornecidos pelo instrumento *T-ReCS* e *Michele* do *GEMINI Observatory*. Mesmo com um intervalo de comprimento de onda inferior ao fornecido pelos satélites IRAS e ISO, é possível fazer estudos sobre as condições físicas e análise da evolução dos envoltórios circunstelares de AGBs carbonadas, como pode ser visto neste capítulo.

4.1 Fase Gás

Nas partes mais internas do envoltório circunstelar, onde basicamente apenas existe a fase gás, não se observam grandes abundâncias de HI ou Cl. Acredita-se que todo o Cl observado mais adentro no envoltório seja, de fato, proveniente de fotodissociações da molécula C₂H₂. O gás, que deixa a atmosfera estelar em direção ao envoltório circunstelar, chega a esse ambiente já em sua forma molecular. As moléculas mais observadas em envoltórios de estrelas carbonadas são as de compostos simples de carbono: CO, molécula

mais estável nesses ambientes (ver figura 4.1) e HCN (Olofsson et al., 1998). A seguir, serão descritos alguns compostos importantes nesses meios.

- **Hidrocarbonetos**

A molécula base dos envoltórios circunstelares de estrelas carbonadas é o acetileno, C_2H_2 . O acetileno e seus produtos são espécies muito reativas, em particular umas com as outras. A grande variedade de combinações possíveis de junções da molécula base com seus produtos e entre os produtos entre si é que garantem um crescimento eficiente dos hidrocarbonetos. Por exemplo, a estrela carbonada IRC+10216 apresenta uma “preferência” pela formação de hidrocarbonetos com muitos átomos de carbono, chegando até a espécies com 8 átomos.

- **Compostos com Silício**

Um grande número de moléculas compostas por átomos de silício pode ser encontrado em envoltórios circunstelares de carbonadas, tais como SiS, SiC, SiC_2 , SiC_3 , SiC_4 , SiH_4 e SiCN, sendo algumas mais abundantes do que outras (Habing & Olofsson, 2003). A molécula base SiC_2 é capaz de produzir diretamente o SiC por meio de fotodissociação. No entanto, fato curioso, é que o SiC_2 é mais abundante nas partes mais externas do envoltório circunstelar que nas mais internas, indicando algum processo de formação deve também estar ocorrendo (Habing & Olofsson, 2003).

4.2 PAHs

Dada a sua composição, os envoltórios circunstelares de carbonadas são ambientes propícios à formação de grandes moléculas e pequenos grãos carbonados, os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, PAHs (compostos com 2 ou mais anéis aromáticos fundidos). É comumente aceito que os PAHs sejam uma das possíveis ligações entre as moléculas da fase gás e os grãos da fase sólida nos envoltórios circunstelares. Os grãos de carbono

podem ter se formado a partir da conversão de moléculas de acetileno em PAHs, seguida por uma série de aglomerações até que essas moléculas se tornassem grãos macroscópicos.

Mesmo sendo comuns em espectros de pós-AGBs e nebulosas planetárias, o PAH raramente é visível nos espectros de estrelas AGBs carbonadas. Isto acontece porque o PAH necessita de radiação ultravioleta para que seja detectado em emissão nos espectros infravermelhos. No entanto, a maioria das estrelas carbonadas não possui campos de radiação UV fortes o suficiente para estimular a molécula, não significando que não esteja presente.

4.3 Fase Sólida

As cores no infravermelho das estrelas carbonadas e oxigenadas diferem entre si devido às diferentes opacidades dos grãos de carbono (amorfo ou grafite) e de silicato. Grãos de carbono são opacos em comprimentos de onda no visível, enquanto que grãos de silicato não. Como resultado, as estrelas carbonadas são muito mais obscurecidas do que as oxigenadas, a uma mesma taxa de perda de massa, e apresentando um excesso ainda maior no infravermelho (Speck, 1998).

A natureza química da poeira presente nos envoltórios circunstelares, a princípio, reflete a composição química da fotosfera da estrela que ele recobre, e essa composição, por sua vez, reflete a quantidade de material processado e dragado à superfície da estrela na fase de pulsos térmicos. Estima-se que diversos tipos de condensados podem se formar nessas estrelas como, por exemplo, o grafite e o carbono amorfo. No entanto, a assinatura das carbonadas nos espectros infravermelhos é uma estrutura em emissão observada perto de $11,3 \mu\text{m}$, habitualmente associada a grãos de carvão de silício (SiC). Porém, conforme apresentado no capítulo 1, as estrelas carbonadas ricas em silicato possuem uma emissão em $9,8 \mu\text{m}$, característica de envoltórios ricos em oxigênio.

- **Carbono Amorfo – C.A.**

Os grãos de carbono amorfo desempenham um papel fundamental no estudo dos espectros infravermelho das estrelas carbonadas, pois são os responsáveis pelo contínuo emitido pelo

envoltório circunstelar de poeira, isto é, são os responsáveis pela distribuição espectral de energia (SED) dessas estrelas no intervalo de 1 - 1000 μm . A temperatura máxima de condensação dos grãos de carbono amorfo é em torno de 1000 K (Frenklach & Feigelson, 1989).

- **Carbeto de Silício – SiC**

Existem cerca de 70 formas diferentes de carbetos de silício conhecidas, e uma grande quantidade de trabalhos foram publicados discutindo qual dessas formas se ajustaria melhor à estrutura em emissão característica observada em 11,3 μm . Estas 70 formas diferentes podem se dividir em 2 grupos básicos: α -SiC ou β -SiC (Bechstedt et al., 1997). O α -SiC têm forma hexagonal, estrutura cristalina, e é bastante estável a $T < 2200$ K. O β -SiC possui forma cúbica e sua temperatura ótima de condensação no vácuo é $T < 1400$ K. O β -SiC pode se transformar em α -SiC a temperaturas acima de 1700 K mas é termodinamicamente improvável que esse processo ocorra no sentido inverso. Apesar de a diferença entre essas duas formas ser pequena, tanto estruturalmente como termodinamicamente (abaixo de 1500 K), elas podem ser diferenciadas claramente através da posição de sua emissão característica no espectro infravermelho: α -SiC manifesta um pico de emissão em 11,3 μm , enquanto o β -SiC fica próximo a 11,0 μm .

Considerando que os grãos de SiC se condensam a temperaturas um pouco mais altas que os grãos de C.A., cerca de 1300 K - 1500 K, então, conclui-se que os grãos de SiC podem se localizar em regiões mais próximas à estrela central, sendo os primeiros a serem condensados (Lorenz-Martins et al., 2001) nesses ambientes.

- **Silicatos**

Grãos de silicato de ferro e magnésio, apesar de normalmente encontrados ao redor de estrelas oxigenadas evoluídas, foram detectados, também, ao redor de carbonadas e apenas 10% do silicato observado está em sua forma cristalina, predominantemente amorfo (Waters et al., 1998). Os silicatos são os condensáveis mais estáveis obtidos a partir de

elementos de O, Si, Mg e Fe: Mg_2SiO_4 (forsterita) e Fe_2SiO_4 (faialite). A emissão característica desses sólidos ao redor de estrelas carbonadas ocorre de forma bastante intensa em 9.8 e $18\mu\text{m}$.

4.4 Modelagem do Envoltório Circunstelar

Após a aquisição das observações T-ReCS e do tratamento dos dados, como descrito no capítulo 2, o passo seguinte foi a obtenção de modelos de envoltório circunstelar para as estrelas observadas na tabela 2.1 (missões GS-2007A e GS-2009A) na banda N'. Para obtenção desses modelos foram realizadas simulações numéricas com o intuito de resolver o problema do transporte radiativo nesses ambientes. Os modelos foram calculados buscando, ora se ajustar aos espectros infravermelhos T-ReCS/Gemini reduzidos, ora aos espectros LRS-IRAS, disponíveis na literatura para essas mesmas estrelas. Estas simulações foram feitas com auxílio de um código que emprega o método de Monte Carlo no tratamento do transporte radiativo através do envoltório circunstelar (Lorenz-Martins & Lefèvre, 1994).

O tratamento numérico para a solução do problema do transporte radiativo aplicado a envoltórios circunstelares de simetria esférica que foi empregado na análise desta tese foi publicado em detalhes no trabalho dos autores Lorenz-Martins & Lefèvre (1994). É apresentada brevemente, a seguir, a conceituação do código de simulação numérica aplicado às estrelas da amostra para efeito de completude.

A propagação da energia da estrela e da energia radiada pelos grãos de poeira do envoltório estelar é simulada fóton a fóton através da metodologia de Monte Carlo. A opacidade total do envoltório é descrita como:

$$\tau(\lambda) = \int_0^l N(r)\pi a^2 Q_{ext}(\lambda) dr, \quad (4.1)$$

onde a é o raio definido para o grão de poeira, $Q_{ext}(\lambda)$ é a eficiência de extinção do grão

associado e $N(r)$ é a densidade numérica a uma distância r do centro da estrela. As eficiências de absorção, de espalhamento e de extinção (Q_{abs} , Q_{sc} e Q_{ext}) e a função de espalhamento são calculadas para cada comprimento de onda utilizando a teoria de Mie.

Os fótons simulados emitidos pela estrela central interagem com grãos de poeira em posições distribuídas aleatoriamente no envoltório circunstelar de acordo com a distribuição de probabilidades associada à opacidade específica do envoltório simulado. Em cada interação fóton-grão, uma fração da energia recebida pelo grão é armazenada no próprio grão (absorvida) e a parte restante é espalhada. A energia absorvida é calculada utilizando o Q_{abs} apropriado e a nova direção de espalhamento é gerada de acordo com a correspondente função de espalhamento.

A radiação estelar, portanto, é responsável pela distribuição de temperatura inicial da poeira e, em seguida, a radiação térmica dos grãos é simulada pelo código empregado. Após algumas interações, é alcançada uma temperatura de equilíbrio nesse sistema.

O número total de grãos de poeira é definido pela opacidade de extinção calculada ao longo de uma direção radial entre o raio interno do envoltório R_1 e seu raio externo R_2 em $\lambda = 1\mu\text{m}$. A densidade numérica empregada varia com r^2 , o que corresponde a uma expansão em velocidade constante. Dessa forma, as quantidades físicas necessárias a se estabelecer para que se proceda com a simulação descrita, são as listadas a seguir:

- a **temperatura efetiva** da estrela central, T_{eff} ;
- os **raios internos e externos do envoltório circunstelar**, R_1 and R_2 . Neste caso, assume-se que independente da variedade de grãos simulados no envoltório, todos estão presentes em todo o envoltório.;
- o **raio do grão** e o **índice de refração** em todos os comprimentos de onda. É utilizada uma matriz com 30 comprimentos de onda;
- a **opacidade de extinção** em $\lambda = 1\mu\text{m}$.

A simulação computacional, por sua vez, fornece como resultado a distribuição espectral do fluxo total e seus respectivos componentes, isto é, a radiação direta emitida pela estrela central, a radiação espalhada e a radiação emitida pelos grãos de poeira, e a lei de temperatura dos grãos de poeira. Assim, a origem da radiação emergente em qualquer comprimento de onda pode ser facilmente recuperada (radiação estelar direta, espalhada ou emitida pela poeira). O modelo que melhor se ajusta aos dados observacionais empregados como referência fornece a temperatura efetiva da estrela central, τ e o tamanho dos grãos.

As eficiências de absorção e de espalhamento, e o albedo dos grãos foram calculados empregando a teoria de Mie e utilizando as constantes óticas para cada tipo de grão de poeira disponíveis na literatura. Na modelagem de estrelas carbonadas ricas em silicato, foram empregadas as constantes óticas publicadas por David & Pégourié (1995), uma vez que essas foram calculadas para um amplo intervalo de energia de acordo com as relações de Kramers-Kronig para silicatos amorfos.

Como se observou na seção 4.5, as estrelas C* 2123 e IRAS 09425-6040 não puderam ser modeladas com as constantes óticas do silicato amorfo. No lugar dessas, foram empregadas as constantes publicadas por Rouleau & Martin (1991) referentes a grãos de carbono amorfo (C.A.) e as de Pégourié (1988) referentes a grãos de carvão de silício (SiC). Como foram utilizados, para esses objetos, dois tipos de grãos na modelagem, o caminho médio percorrido pelos fótons é definido, em qualquer que seja a direção, através da opacidade total

$$\tau_{ext}(\lambda) = \tau_1(\lambda) + \tau_2(\lambda), \quad (4.2)$$

onde a opacidade de cada grão é descrita pela equação 4.1, de acordo com as características específicas do grão (raio, eficiência de extinção e função de densidade numérica). As eficiências e as funções de espalhamento são calculadas isoladamente para cada tipo de grão.

Assume-se que a seguinte razão da mistura $N_1(r)/N_2(r)$ é constante, independentemente da posição no envoltório circunstelar.

Durante as simulações em envoltórios com mistura de grãos, o tipo de grão que interage com a radiação é também selecionado aleatoriamente. Nessas interações fóton-grão, que ocorrem a uma distância r da estrela central, a probabilidade de que um grão de tipo i esteja envolvido é

$$P_i(\lambda) = a_i^2 Q_{ext_i} N_i(r) / \sum_j a_j^2 Q_{ext_j} N_j(r). \quad (4.3)$$

Neste trabalho, considera-se que a razão da mistura de grãos $N_1(r)/N_2(r)$ é constante, independentemente da posição no envoltório circunstelar. O algoritmo numérico que simula o problema de transferência radiativa em envoltórios circunstelares usando a metodologia de Monte Carlo foi aplicado aos objetos descritos na tabela 2.1. Obteve-se, para cada estrela da amostra, um ajuste de envoltório calculado com base em espectros infravermelhos e fotometria distribuída em um amplo intervalo espectral e publicada por diversos autores.

4.5 Resultados dos Modelos

Os espectros T-ReCS possuem uma resolução um pouco superior aos espectros LRS-IRAS, $R = 113$, o que permite que se observem mais detalhes no espectro infravermelho. No entanto, o espectrógrafo T-ReCS abrange um intervalo de comprimentos de onda inferior ao LRS-IRAS. A figura 4.2 mostra uma comparação entre o espectro LRS-IRAS e o T-ReCS para a MC79 2-11.

Dois modelos foram calculados para cada estrela carbonada rica em silicato da tabela 2.1: um utilizando como referência espectros LRS-IRAS disponíveis na literatura, observados em 1986 e outro, empregando os espectros T-ReCS, obtidos nas missões de observação de 2007 e 2009 (ver capítulo 2). O primeiro modelo que utilizou os espectros

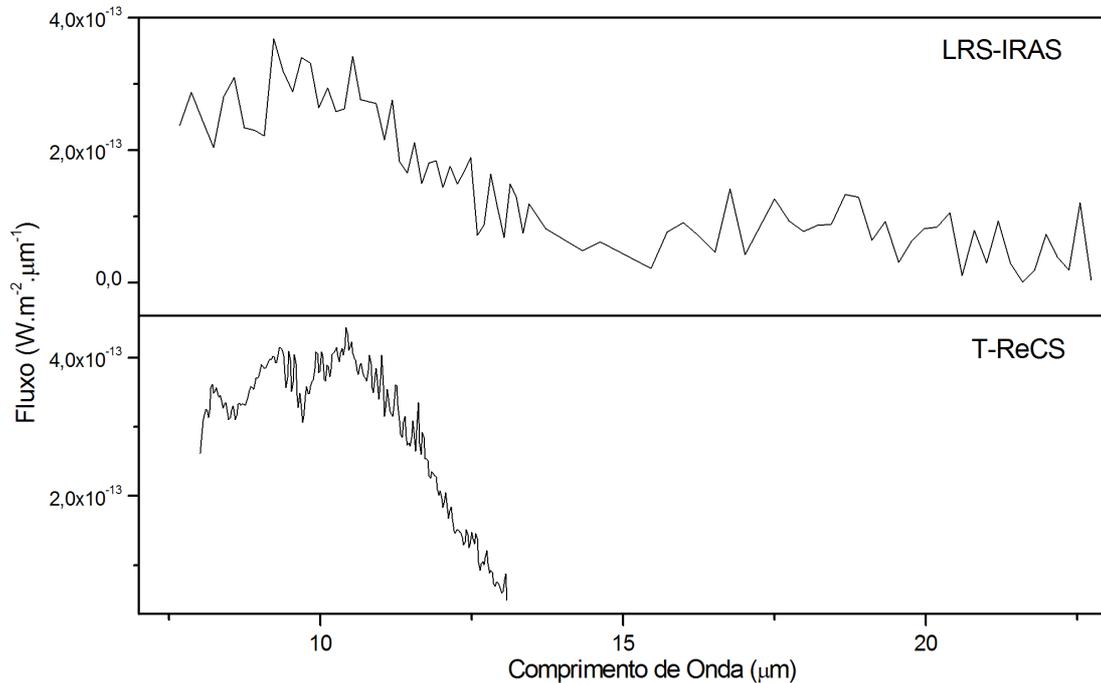


Figura 4.2: Comparação do espectro LRS-IRAS com o T-ReCS.

de maior cobertura espectral como referência, o LRS-IRAS, foi empregado para restringir os parâmetros físicos que têm uma influência global no modelo final calculado, isto é, quantidades físicas que afetam mais significativamente a distribuição espectral de energia do fluxo total calculado. Dessa forma, ao iniciar a modelagem buscou-se primeiramente fixar os parâmetros temperatura efetiva da estrela central e os raios interno e externo do envoltório circunstelar. Em seguida, o raio dos grãos presentes no envoltório foi, também, definido com base no ajuste do modelo ao espectro LRS-IRAS, uma vez que variações nesse parâmetro afetam de forma intensa e diretamente o entorno da estrutura em emissão em $9.8\mu m$. Nesta primeira modelagem, obteve-se, ainda, junto com esses parâmetros calculados, a opacidade em $\lambda = 1\mu m$ que melhor descreve o cenário do envoltório circunstelar de cada estrela, no ano de 1986. Este é o último parâmetro ajustado durante a modelagem e o mais sensível para a análise neste capítulo.

Os espectros T-ReCS foram, em seguida, empregados como referência na modelagem, apenas para estimar a opacidade desses envoltórios nos anos de 2007 e 2009, de acordo

Tabela 4.1: Resultados dos modelos de envoltório circunstelar calculados com grãos de poeira de silicato amorfo.

Objeto	Ano	T_{eff} (K)	$R_1(R_\star)$	$R_2(R_\star)$	$a(\text{Å})$	$\tau_{ext} \pm \Delta\tau_{ext}$	Fotometria
MC79 2-11	1986	2300	13.0	2000.0	1800	3.00 ± 0.15	1,2,3,5
	2007	2300	13.0	2000.0	1800	3.50 ± 0.15	
IRAS 11311-6355	1986	2350	5.0	1000.0	1200	2.30 ± 0.15	1,4
	2009	2350	5.0	1000.0	1200	2.75 ± 0.15	
IRAS 16001-4851	1986	2000	3.5	10000.0	2000	7.10 ± 0.50	1,4,6
	2009	2000	3.5	10000.0	2000	7.20 ± 0.50	
IRAS 16103-4929	1986	2700	5.0	1000.0	1000	2.45 ± 0.15	1,4,6
	2009	2700	5.0	1000.0	1000	2.85 ± 0.15	
VX Aql	1986	2850	5.0	1000.0	1100	0.90 ± 0.15	1,4
	2009	2850	5.0	1000.0	1100	0.90 ± 0.15	
C* 2837	1986	2600	12.0	1000.0	1300	2.30 ± 0.15	1,2,4,5
	2007	2600	12.0	1000.0	1300	1.50 ± 0.15	

Referências bibliográficas dos dados fotométricos: ¹IRAS Catalogue of Point Sources (Olonon et al., 1986), ²Evans (1990), ³The HIPPARCOS and TYCHO catalogues (Perryman & ESA, 1997), ⁴Kharchenko et al. (2004), ⁵2MASS Catalogue (Cutri et al., 2003), ⁶Zacharias et al. (2005).

com o objeto estudado. Não foi necessária a introdução de variações em nenhum dos demais parâmetros (de impacto global). Apenas a opacidade é que, em alguns casos, teve que ser reajustada a fim de que se obtivesse um modelo que coincidissem com a estrutura característica em emissão do espectro T-ReCS.

As opacidades calculadas em cada modelo representam o cenário da densidade do envoltório circunstelar de cada objeto da amostra em cada momento de observação, isto é, 1986, 2007 e 2009.

A tabela 4.1 exibe a combinação de parâmetros físicos que produziram os melhores resultados na obtenção dos modelos de envoltório circunstelar. Os parâmetros dispostos na tabela são nome do objeto, o ano da observação do espectro de referência de cada modelo calculado, a temperatura efetiva da estrela central (T_{eff} (K)), a fronteira interna, R_1 (R_\star), e externa, R_2 (R_\star) do envoltório, o raio dos grãos de poeira empregado, a (Å), a opacidade do envoltório (τ_{ext}) à radiação no comprimento de onda de $1\mu m$ e o erro

associado ao ajuste da mesma. A última coluna da tabela apresenta as referências dos dados fotométricos empregados junto com os espectros infravermelhos a fim de obter o melhor ajuste de modelo.

4.5.1 MC79 2-11: C-J6 C₂6 j6 τ2: JPec

A emissão característica do silicato da estrela MC79 2-11, em $9.8\mu m$, é evidente e intensa, o que tornou possível calcular um modelo para o envoltório circunstelar, mesmo quando empregou-se o espectro ruidoso e de menor resolução LRS-IRAS. Ao se analisar os dois modelos obtidos, ora com o espectro LRS-IRAS como referência, ora com o T-ReCS, verificou-se uma variação na opacidade do envoltório calculado para cada uma dessas observações. As observações LRS-IRAS (figura 4.3, esquerda) e T-ReCS (figura 4.3, direita) foram feitas com um intervalo de tempo de 21 anos, e os modelos calculados diferem apenas de $\Delta\tau_{ext\ 2007-1986} = 0.50\pm 0.15$, o que é um valor significativo se comparado com os erros envolvidos na modelagem.

Este acréscimo na opacidade sugere que a evolução do envoltório circunstelar da estrela

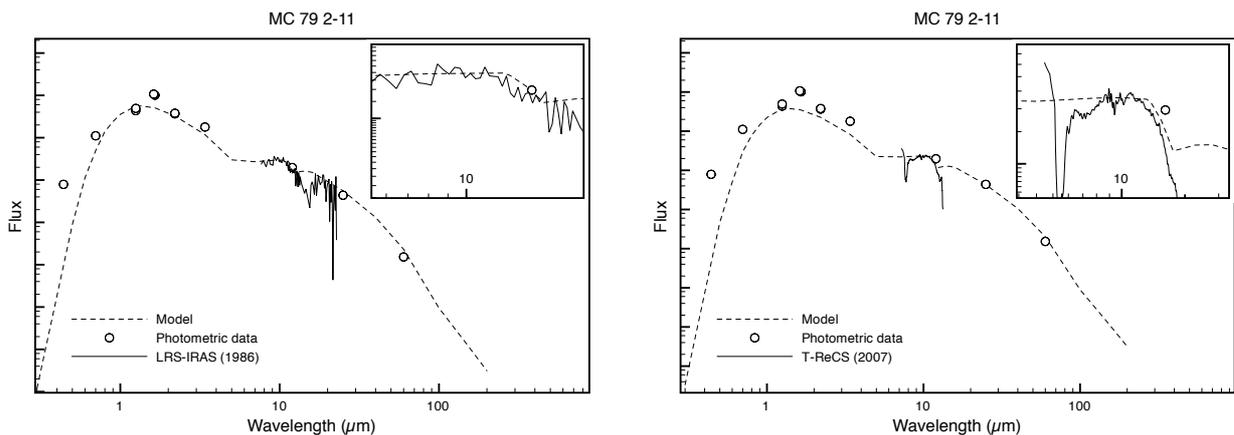


Figura 4.3: Modelo de transferência radiativa calculado com base na fotometria disponível na literatura e na estrutura de emissão em $9.8\mu m$, e seu entorno, para a estrela MC79 2-11 utilizando o espectro LRS-IRAS (1986, à esquerda) e o espectro T-ReCS (2007, à direita). Os círculos abertos representam os diversos dados fotométricos coletados na literatura, as linhas sólidas são os dados espectrais LRS-IRAS e T-ReCS e a linha tracejada é o melhor modelo ajustado a essas informações observacionais. Ambos os gráficos incluem uma visão ampliada do modelo e espectro próximo à região da estrutura em emissão.

MC79 2-11 resultou em um aumento da densidade nesse ambiente. A estrela foi estudada por De Mello (2007), que obteve, pela primeira vez, a velocidade radial do objeto: $3\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, num período de 3 anos. Esse resultado sugere fortemente um cenário de um sistema binário. O suposto sistema binário pode ou não sustentar um envoltório complexo com um disco, que em uma primeira análise parece estar adensando material rico em oxigênio. Entretanto, a dinâmica e evolução de um suposto disco da estrela MC79 2-11 precisam ainda ser investigadas em detalhes.

O espectro T-ReCS também revelou o que se acredita ser uma estrutura em absorção no final do filtro N' e no início do Q, com um comprimento de onda central em $\approx 15\mu\text{m}$. Speck et al. (2006) sugeriu que uma absorção devido a molécula de C_2H_2 que coincide com o comprimento de onda de $15\mu\text{m}$ pode estar mascarando uma emissão de SiC do envoltório circunstelar de algumas estrelas carbonadas ordinárias. Apesar do espectro LRS-IRAS ser de baixa qualidade, é possível identificar uma estrutura em absorção próximo a $15\mu\text{m}$, reforçando a idéia de que essa estrutura não é um artefato instrumental, mas sim uma estrutura real em absorção. A observação com o espectro T-ReCS na banda Q, tornou ainda mais evidente a presença desta absorção na região (figura 4.4), que pode estar também mascarando uma estrutura ainda não detectada devida a grãos ricos em carbono

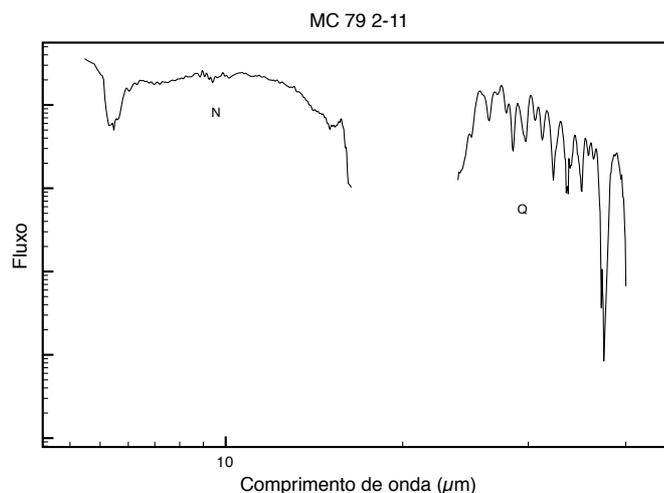


Figura 4.4: Perfil da estrutura em absorção próximo do comprimento de onda de $15\mu\text{m}$, supostamente associado à molécula de C_2H_2 .

no envoltório circumstelar das estrelas carbonadas ricas em silicato.

4.5.2 IRAS 11311-6355: C-J:5 τ 2 Jpec

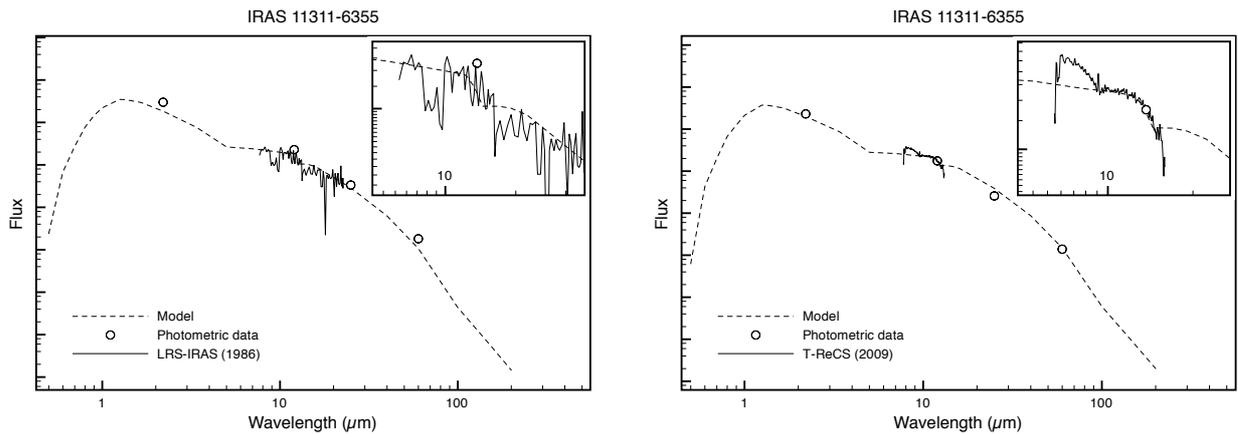


Figura 4.5: Modelo de transferência radiativa calculado com base na fotometria disponível na literatura e na estrutura de emissão em $9.8\mu m$, e seu entorno, para a estrela IRAS 11311-6355 utilizando o espectro LRS-IRAS (1986, à esquerda) e o espectro T-ReCS (2007, à direita). Ambos os gráficos incluem uma visão ampliada do modelo e espectro próximo a região da estrutura em emissão.

IRAS 11311-6355 é outra estrela que apresenta uma intensa estrutura em emissão em $9.8\mu m$. Ao se observar os dois modelos (LRS-IRAS e T-ReCS - com intervalo de 23 anos), percebe-se uma variação significativa entre a opacidade calculada para cada um deles: $\Delta\tau_{ext\ 2009-1986} = 0,45 \pm 0,15$. Apesar do espectro LRS-IRAS possuir uma baixa resolução espectral, foi possível estabelecer não só o contínuo, mas também o perfil da emissão do silicato, como pode ser visto no destaque da modelagem ampliada ao redor da estrutura em $9.8\mu m$, na figura 4.5 à esquerda.

Embora a estrela IRAS 11311-6355 não tenha sido observada na banda Q com o espectrógrafo T-ReCS, é possível inferir os mesmos indícios presentes no espectro da estrela MC79 2-11 de uma estrutura próxima a $15\mu m$, em absorção, através da brusca diminuição do contínuo que pode ser observada ao fim da banda N' (figura 4.5, direita). Naturalmente, se faz necessário um estudo ampliado a fim de definir se a natureza dessa estrutura

é um efeito instrumental ou uma real absorção. Somente, assim, será possível discutir se a existência desta estrutura é uma evidência ou não de uma dupla química presente nesse envoltório circunstelar, uma vez que a absorção na região pode mascarar a emissão usual de SiC.

4.5.3 IRAS 16001-4851: C-J:6 τ 3 Jpec

IRAS 16001-4851 é uma estrela carbonada rica em silicato que apresenta a estrutura de silicato em absorção, como pode ser visto no modelo da figura 4.6. Para esta estrela, excepcionalmente, adotou-se uma lei de densidades proporcional a $r^{-2,5}$, em lugar de r^{-2} , como usual. Essa alteração foi necessária para que se pudesse modelar apropriadamente a estrutura de auto absorção em $9,8\mu\text{m}$. Foram também calculados para ela dois modelos de envoltório que representam dois instantes de tempo distintos: 1986, com base no espectro LRS-IRAS 1986 e 2009, com base no espectro T-ReCS.

Deve-se notar que o contínuo de emissão originado pela poeira do envoltório de estrelas com baixas taxas de perda de massa não é capaz de diluir a estrutura de silicato em emissão, porém conforme as taxas de perda de massa aumentam, o envoltório torna-se

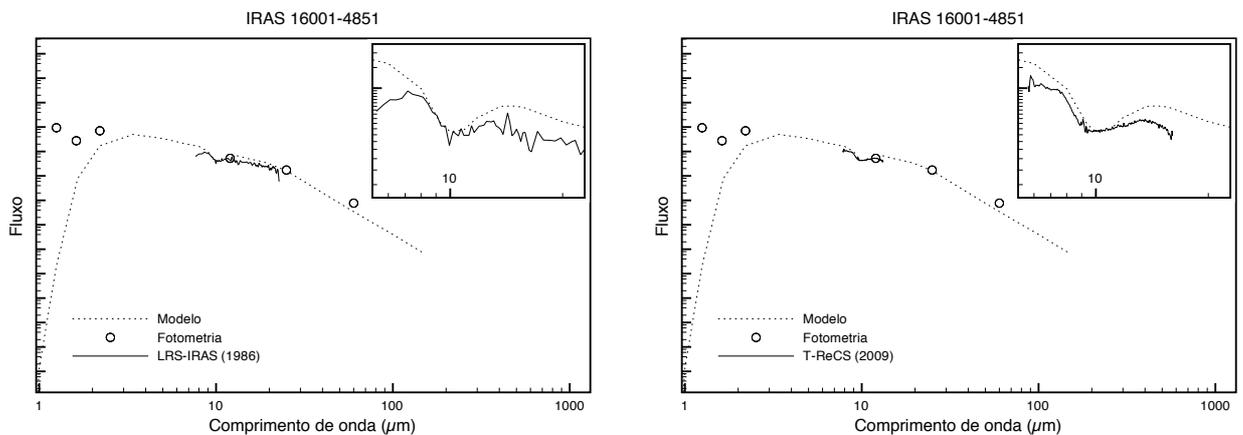


Figura 4.6: Modelo de transferência radiativa calculado com base na fotometria disponível na literatura e na estrutura em $9,8\mu\text{m}$ em absorção para IRAS 16001-4851 utilizando o espectro LRS-IRAS (1986, à esquerda) e o espectro T-ReCS (2007, à direita).

oticamente espesso e a emissão do contínuo dilui a estrutura. Com taxas de perda de massa ainda maiores, a estrutura de silicato começa ela mesma a ficar oticamente espessa e, como resultado, ocorre uma auto-absorção reduzindo o pico de emissão à intensidade da emissão do contínuo. Em situações mais extremas a estrutura passa a se apresentar como uma absorção em relação ao contínuo, como parece ser o caso da estrela IRAS 16001-4851.

No entanto, a opacidade calculada para ambos os modelos não apresentou nenhuma variação significativa, considerando os erros envolvidos na modelagem. Essa ausência de variação sugere que a estrela IRAS 16001-4851 não apresentou nenhuma mudança substancial em seu envoltório circunstelar nos últimos 23 anos, isto é, se considerarmos apenas a evolução da densidade dos grãos de silicato nesse ambiente.

4.5.4 IRAS 16103-4929: C-J:3 MS3 τ 2 JPec

IRAS 16103-4929 é mais um exemplo de carbonada rica em silicato que apresentou uma variação relevante nos parâmetros físicos calculados através da modelagem do transporte radiativo. Na análise comparativa dos modelos obtidos através dos espectros LRS-IRAS (1986, figura 4.7, esquerda) e T-ReCS (2009, figura 4.7, direita), foi detectado um aumento na opacidade em $\Delta\tau_{ext\ 2009-1986} = 0.40 \pm 0.15$, o que sugere um aumento da densidade de grãos no envoltório circunstelar.

4.5.5 VX Aql: C-J2 C₂4 j7 τ 2 JPec

VX Aql, por sua vez, não possui uma estrutura intensa em emissão em $9.8\mu m$, como pode ser observado no modelo calculado na figura 4.8. No entanto, foi possível calcular ambos os modelos (com base nos espectros LRS-IRAS e T-ReCS). Os modelos de transferência radiativa que melhor se ajustaram a esses dados espectrais revelaram os mesmos parâmetros físicos, de modo que, nenhuma variação foi detectada na opacidade do envoltório da estrela, num intervalo de tempo de 23 anos.

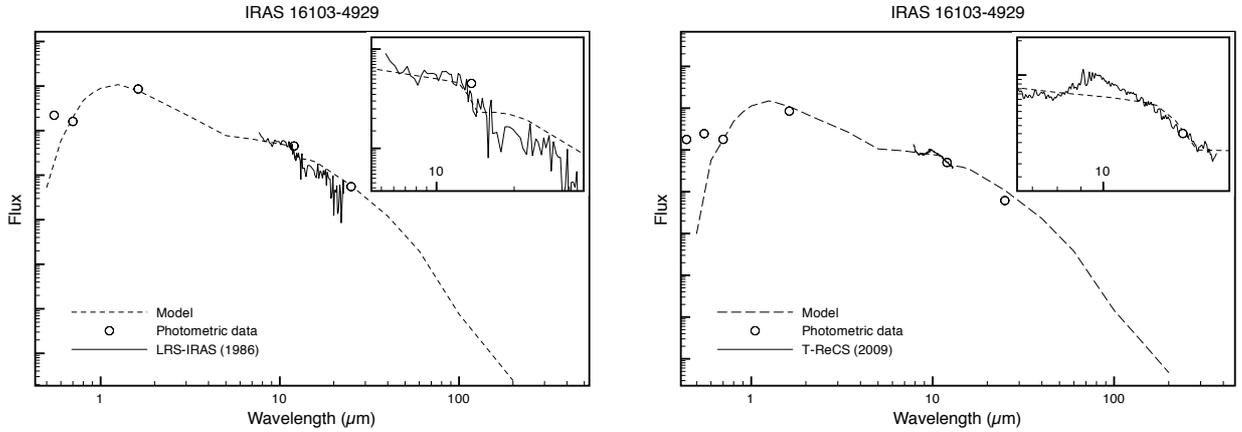


Figura 4.7: Modelo de transferência radiativa calculado com base na fotometria disponível na literatura e na estrutura de emissão em $9.8\mu m$, e seu entorno, para IRAS 16103-49291 utilizando o espectro LRS-IRAS (1986, à esquerda) e o espectro T-ReCS (2007, à direita).

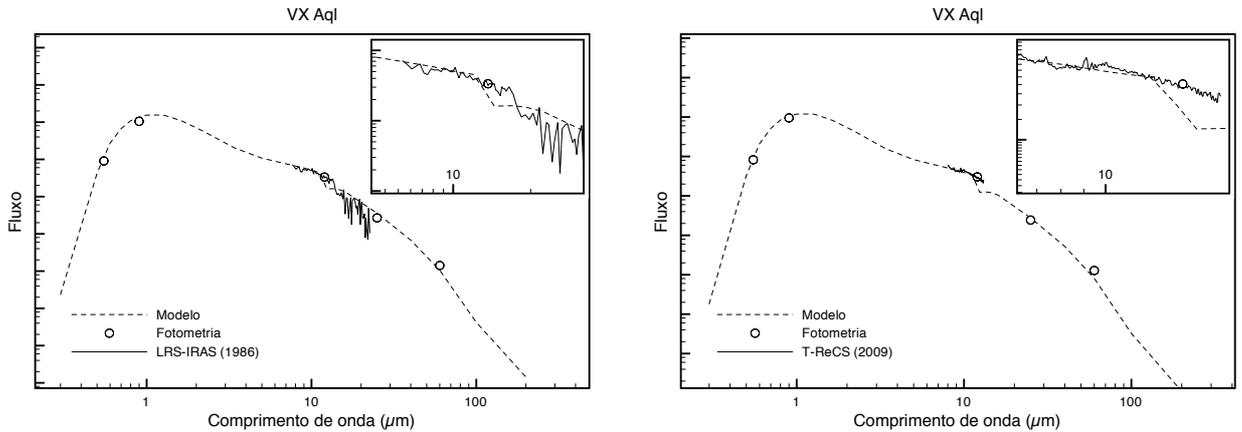


Figura 4.8: Modelo de transferência radiativa calculado com base na fotometria disponível na literatura e na estrutura de emissão em $9.8\mu m$, e seu entorno, para a estrela VX Aql utilizando o espectro LRS-IRAS (1986, à esquerda) e o espectro T-ReCS (2007, à direita).

4.5.6 C* 2837: C-J4 C₂7 j6 τ2 Jpec

A última estrela carbonada rica em silicato da amostra foi a que apresentou a mais expressiva variação na opacidade calculada para o envoltório, com base nos espectros LRS-IRAS (1986) e T-ReCS (2007), vide figura 4.9. A variação encontrada foi de $\Delta\tau_{ext\ 2007-1986} = -0.80 \pm 0.15$. Com base na consideração prévia de que as estrelas MC79 2-11, IRAS 11311-

6355 e IRAS 16103-4929 tiveram a densidade de seu envoltório circumstelar aumentando nas últimas duas décadas, então, o envoltório da estrela C* 2837 está evoluindo na direção oposta, ou seja, a densidade dele diminuiu no mesmo intervalo temporal.

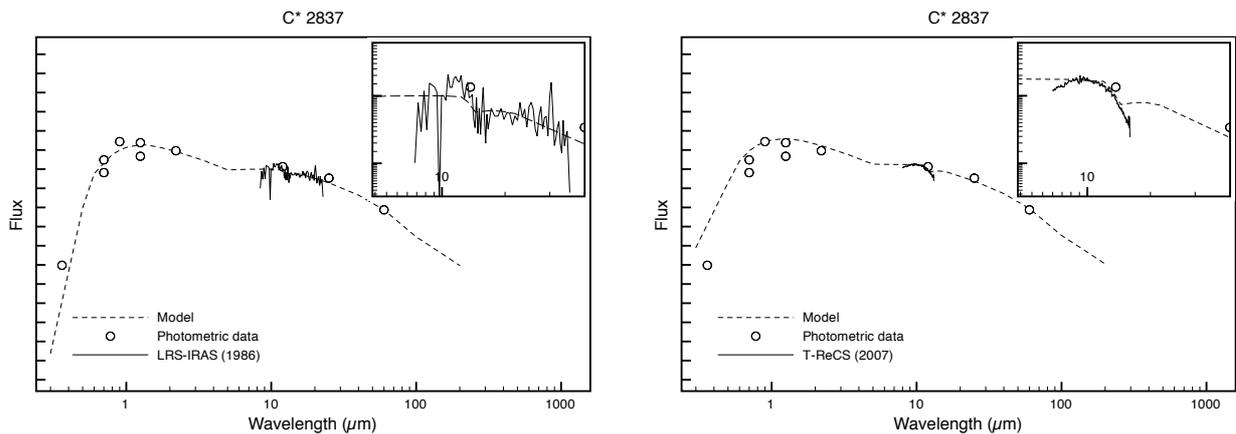


Figura 4.9: Modelo de transferência radiativa calculado com base na fotometria disponível na literatura e na estrutura de emissão em $9.8\mu m$, e seu entorno, para a estrela C* 2837 utilizando o espectro LRS-IRAS (1986, à esquerda) e o espectro T-ReCS (2007, à direita). Ambos os gráficos incluem uma visão ampliada do modelo e espectro próximo a região da estrutura em emissão.

C* 2837 foi observada na banda N' com o espectrógrafo T-ReCS, em 2007, onde foi constatada uma aparente estrutura em absorção ao fim do espectro próximo a $15\mu m$. Então, na missão de 2009, optou-se por observar essa mesma estrela na banda Q com o mesmo espectrógrafo, a fim de possibilitar um estudo mais detalhado dessa suposta absorção. Ao analisar as duas observações juntas (ver figura 4.10) foi possível constatar que trata-se de uma estrutura real e não um artefato instrumental, assim como evidenciado para a MC79 2-11. O mesmo já podia ser observado no espectro LRS-IRAS, embora extremamente ruidoso. Acredita-se que essa estrutura seja uma absorção devida à molécula de C_2H_2 , que pode estar mascarando uma estrutura em emissão devida a grãos ricos em carbono, conforme sugerido por (Speck et al., 2006) para uma outra classe de objetos.

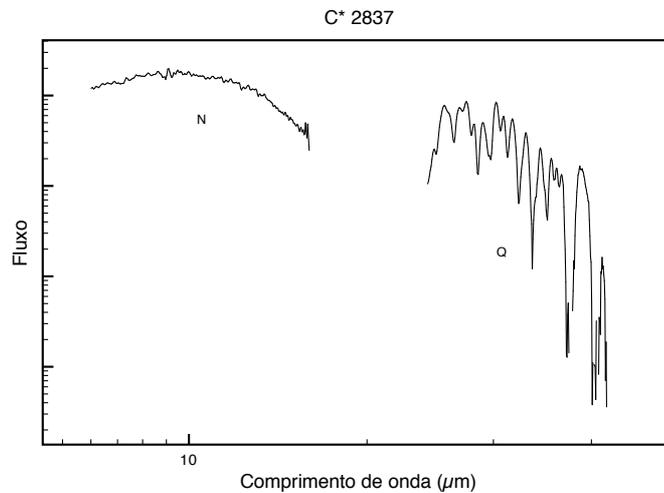


Figura 4.10: Perfil da estrutura em absorção próximo do comprimento de onda de $15\mu m$ para a estrela C*2837, supostamente associado a molécula de C_2H_2 .

4.5.7 IRAS 09425-6040: C-J:5 τ 2 Jpec

Molster et al. (2001) mostraram, através de observações com o satélite ISO-SWS, que a estrela IRAS 09425-6040 possui estruturas devidas à molécula de C_2H_2 e a grãos de SiC nos comprimentos de onda próximos ao centro da banda N. O mesmo pode ser observado nas observações com o espectrógrafo T-ReCS, em 2007, na banda N'. De fato, nessa região, o envoltório da estrela apresenta características típicas de um ambiente rico em carbono. No entanto, IRAS 09425-6040 é mais um exemplo de uma estrela carbonada rica em silicato, especificamente do tipo C-J. A natureza oxigenada de seu envoltório, por sua vez, é revelada não em $9.8\mu m$, mas em comprimentos de onda além de $15\mu m$, onde o espectro é dominado por intensas emissões de estruturas de silicato cristalino ricas em Mg. Dessa forma, IRAS 09425-6040 é a primeira e única estrela com uma assinatura de dupla química confirmada. No entanto, não há evidências da presença de silicatos amorfos nesses envoltórios. As observações T-ReCS realizadas não incluem esta faixa de comprimentos de onda.

Foi também proposto por Molster et al. (2001) que a estrela de fato seja parte de um sistema binário circundado por uma estrutura rica em material oxigenado, com geome-

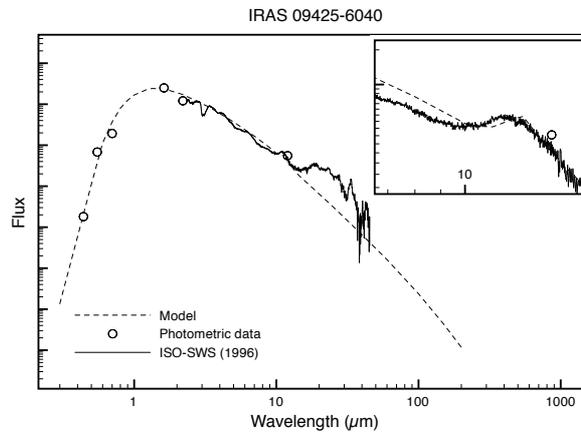


Figura 4.11: Modelo de transferência radiativa calculado com base na fotometria disponível na literatura e na estrutura de emissão em $11,3\mu m$, e seu entorno, para a estrela IRAS 09425-6040 utilizando o espectro ISO-SWS (1996). Observa-se uma banda em emissão bastante intensa no intervalo de comprimento de onda de $15-45\mu m$ devida a silicatos cristalinos ricos em Mg e pobres em Fe.

tria de disco, e que seja parte de uma classe de estrelas progenitoras de estrelas como a Retângulo Vermelho.

O mesmo estudo evolutivo do envoltório circunstelar foi realizado, com base, inicialmente, no espectro ISO-SWS (1996) para definição dos parâmetros globais e, em seguida, com o espectro T-ReCS (2007), levando em consideração o entorno da região do carvão de silício (próximo a $11,3\mu m$). Para esses modelos (ver figura 4.11), nenhuma variação foi detectada e os parâmetros físicos mais representativos obtidos para a IRAS 09425-6040 são os dispostos na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Resultados do modelo de envoltório circunstelar calculado com grãos de poeira de carvão de silício e carbono amorfo.

Objeto	$T_{eff}(K)$	$a(\text{Å})$	τ_{ext}	SiC/C.A.
C* 2123	2700	1100	0.90	0.18
IRAS 09425-6040	2250	1100	0.70	0.10

Referências bibliográficas dos dados fotométricos: 2MASS Catalogue (Cutri et al., 2003), MSX (Egan et al., 2003) and The HIPPARCOS and TYCHO catalogues (Perryman & ESA, 1997).

4.5.8 Estrelas Carbonadas Ordinárias ou Normais

C* 2123 é único objeto da amostra de estrelas observadas com o espectrógrafo T-ReCS que não é uma carbonada rica em silicato (C-J:3 τ 2 SiC3). Ela foi adicionada à lista de observações como uma possível candidata a membro desse grupo de estrela peculiares.

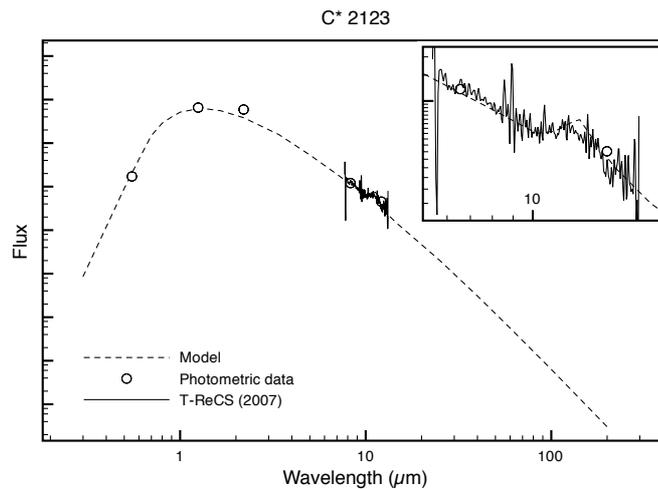


Figura 4.12: Modelo de transferência radiativa calculado com base na fotometria disponível na literatura e na estrutura e entorno da emissão em $11,3\mu m$ para a estrela C* 2123 utilizando o espectro T-ReCS (2007).

As suspeitas sobre a natureza deste objeto se originaram de um caso de mau apontamento do satélite IRAS, de modo que, inicialmente, esta foi associada à estrela IRAS 13442-6109 e tida como uma estrela carbonada rica em silicato (Deguchi et al., 1990), e posteriormente, removida desta classificação por Little-Marenin et al. (1994) e aguardava, até agora, uma confirmação da natureza química de seu envoltório. Com a observação por meio do espectrógrafo *Gemini South* T-ReCS pôde-se verificar que, de fato, a estrela C* 2123 não apresenta nenhuma estrutura típica de envoltórios ricos em oxigênio, mas sim, uma estrutura característica de grãos de carvão de silício, em $11,3\mu m$, em emissão, ainda que muito fraca. Apesar de não ter sido possível obter sua classificação referente à fotosfera neste trabalho, Evans (1990) identificou-a como uma estrela carbonada tipo J. Logo, trata-se de uma estrela C-J normal ou ordinária.

É uma estrela fraca, cujo espectro T-ReCS obtido foi de baixa qualidade (em termos

de razão sinal/ruído). Mesmo assim foi possível empregar a mesma metodologia de modelagem adotada para os demais objetos, através da qual se revelou que, de fato, esse objeto é uma estrela carbonada ordinária, ou normal, cuja estrutura em emissão próximo a $11,3\mu m$ é devida a grãos de carvão de silício. O resultado dos parâmetros físicos obtidos nessa modelagem podem ser vistos na figura 4.12 e tabela 4.2.

5 Velocidades Radiais

Buscando Indícios de Binaridade

A intrigante coexistência de materiais ricos em carbono e oxigênio nas estrelas carbonadas ricas em silicato levou à consideração de duas hipóteses que pudessem explicá-la. A primeira remete a um sistema binário, composto por uma estrela carbonada e uma gigante do tipo M, envolta por poeira circunstelar (Benson & Little-Marenin, 1987; Little-Marenin et al., 1988). A segunda consiste em considerar que as carbonadas ricas em silicatos são um estágio evolutivo intermediário de estrelas carbonadas, onde a estrela se encontra em fase de transição de rica em oxigênio para rica em carbono por meio do processo da 3ª série de dragagens, enquanto o material rico em oxigênio remanescente do envoltório permanece visível (Willems & de Jong, 1986).

A primeira hipótese foi descartada, pois não há evidências de assinaturas espectroscópicas de uma companheira luminosa do tipo M (Noguchi, 1990; Lambert et al., 1990b) ou de que ambas as estrelas do sistema binário em questão apresentem massas similares (Evans, 1990), conforme verificado em observações de interferometria no infravermelho próximo e por meio da emissão maser de H₂O. Morris (1987) buscou refinar a idéia e sugeriu outro cenário em que se tinha um sistema binário composto por uma estrela gigante vermelha e uma companheira “invisível”. Essa companheira seria uma estrela de baixa luminosidade, localizada ou na sequência principal ou na fase de anã branca, e a perda de massa da gigante vermelha seria armazenada em um disco de acreção circumbinário ao sistema.

Evans (1990), inspirado no cenário de Morris e na segunda hipótese acima apresentada, propôs que o material rico em oxigênio das estrelas carbonadas ricas em silicato teria se acumulado em um disco ao redor da companheira hipotética, quando a estrela primária ainda era uma oxigenada com perda de material, que posteriormente tornou-se uma estrela

carbonada através da 3ª série de dragagens. Este cenário reproduz o excesso observado no infravermelho e a relativa pequena extinção no espectro ótico. Engels & Leinert (1994) inferiram um raio mínimo para o reservatório molecular das estrelas V778 Cyg e EU And, através de emissões maser de H₂O. Kahane et al. (1998) e Jura & Kahane (1999) fundamentaram a existência do reservatório circumbinário no estudo do movimento kepleriano para as estrelas carbonadas ricas em silicato, BM Gem e EU And, por meio da detecção da emissão de CO J=1-0 e J=2-1. Os autores sugeriram que os grãos de silicato estariam armazenados em um reservatório, presumidamente formado ao redor de uma companheira invisível quando a estrela primária ainda era uma gigante rica em oxigênio. Yamamura et al. (2000), por sua vez, sugeriu um cenário similar ao descrito por Evans (1990), baseado em espectros ISO de outra estrela carbonada rica em silicato, V778 Cyg. Eles mostraram que para os grãos de poeira, numa região circumbinária, emitirem estruturas em silicato, seria necessário que fossem aquecidos de uma forma que acabariam por ser destruídos em menos de um período orbital. Não sendo possível a manutenção de tal reservatório, concluíram que o material rico em oxigênio é continuamente ejetado do disco ao redor da companheira pelo vento e pela pressão de radiação da estrela primária de modo a produzir as estruturas de silicato observadas.

Os cenários descritos acima, para pelo menos três estrelas carbonadas ricas em silicato, pressupõem sempre uma companheira de baixa massa e baixa luminosidade apesar de nenhuma evidência observacional direta já ter sido obtida. A mesma proposição foi feita em estudos recentes que se empenharam em definir a morfologia e posição do disco desses objetos peculiares (Ohnaka et al., 2006; Deroo et al., 2007; Ohnaka et al., 2008). A presença de um sistema binário não parece ser ingrediente necessário a todas as estrelas C-J. Porém, esta parece fundamental para aquelas que são ricas em silicato em seu envoltório.

A fim de ampliar o conhecimento a respeito das estrelas carbonadas ricas em silicato é essencial determinar se esses objetos de fato possuem uma estrela companheira. Será bastante difícil, no entanto, detectar uma suposta estrela companheira de baixa luminosidade

no ótico ou em regiões de comprimento de onda maiores, uma vez que a estrela carbonada primária é mais brilhante que a companheira em algumas ordens de magnitude nessas regiões espectrais. O estudo da velocidade radial desses objetos pode ser uma ferramenta na busca de indícios de binaridade.

No entanto, poucas são as C-J ricas em silicato encontradas até hoje e, menos ainda, os casos em que há evidências concretas de binaridade. Barnbaum et al. (1991) encontrou variações na velocidade radial compatíveis com o movimento de sistemas binários para BM Gem e EU And e V778 Cyg. Linhas indicativas da presença de uma companheira de baixa luminosidade envolta por um disco foram detectadas no espectro violeta da estrela BM Gem (Izumiura, 2003).

Nesta etapa do trabalho, procurou-se revelar por meio de estudos da variação da velocidade radial outros sistemas que apresentassem sinais de binaridade - cenário mais bem aceito capaz de sustentar um disco rico em oxigênio, justificando, assim, sua condição de C-J ricas em silicato. Para isso, neste trabalho, fez-se um estudo visando identificar variações da velocidade radial através de espectros FEROS obtidos em pelo menos duas épocas diferentes. De modo que, no futuro, os objetos em que forem evidenciadas variações possam ser estudados com mais detalhes, já que a presença de uma companheira é condição necessária, mas não suficiente, para que haja de fato um disco nesses objetos.

5.1 Metodologia Empregada

Apesar de ter sido estimada a velocidade radial para todos os 14 objetos da amostra de estrelas observadas em alta resolução (tabela 2.3), sendo 12 C-J e 2 C-R, apenas 7 foram observadas em mais de uma data, permitindo a análise da variação desse parâmetro. O presente estudo foi feito, portanto, para C* 447, NP Pup, BM Gem, C* 1003, V433 Pup, MT Hya e MC79 2-11, que foram observadas em janeiro de 1999, novembro de 2001, janeiro de 2002 e abril e julho de 2009. Deve-se notar, ainda, que outros 5 objetos tiveram

pela primeira vez a velocidade radial medida (C* 447, C* 745, C* 749, C* 1003 e MC79 2-11). Os demais objetos tiveram suas velocidades radiais obtidas por Kharchenko et al. (2004). Este trabalho de análise de velocidades radiais teve início durante o mestrado da autora (De Mello, 2007), tendo sido, ao longo do desenvolvimento deste trabalho, revisados aqueles resultados e efetuadas novas medidas de velocidade radial empregando quatro novos espectros FEROS, obtidos no ESO em abril e julho de 2009.

As estrelas carbonadas, de um modo geral, apresentam turbulências e pulsações atmosféricas, que podem induzir a falsas detecções de movimento na direção radial. Entretanto, não ocorrem grandes variações na magnitude no infravermelho para os objetos estudados neste trabalho, de modo que a variação na medida de velocidade radial devida a esses efeitos é provavelmente pequena. Determinar com precisão a velocidade radial desses objetos através da identificação de linhas específicas no espectro ótico é uma tarefa difícil, devido à confusão de linhas de absorção molecular, como por exemplo, as das bandas de C₂ e CN. Muitas das linhas atômicas acabam por ficar escondidas devido à superposição de transições moleculares.

A fim de contornar essas dificuldades, em relação às observações de janeiro de 1999, novembro de 2001, janeiro de 2002, adotou-se a seguinte metodologia: ao invés de se obter diretamente a velocidade radial dos objetos em relação ao sistema de referência do observatório, foi estimada a diferença entre as velocidades radiais de cada objeto de interesse e um ou mais objetos com velocidades radiais bem conhecidas. Isso é feito tomando-se, para o espectro de cada objeto, o deslocamento relativo que maximiza sua correlação com o espectro do objeto de referência.

Essa estratégia tem como principal vantagem o fato de utilizar a informação contida em todo o espectro, de forma que os efeitos de discrepâncias locais entre os espectros são estatisticamente contrabalançados por similaridades nas demais regiões. Outra característica importante desse método é o fato de que não apenas linhas, mas também bandas ou mesmo sistemas complexos delas, são implicitamente levados em consideração, o que o

torna mais indicado para aplicação em estrelas frias.

Para que essa estratégia seja utilizada, torna-se necessário que as estrelas de referência apresentem espectros similares aos dos objetos estudados e, também, que suas velocidades radiais possam ser consideradas constantes com o tempo. Por isso, foram tomadas, como estrelas de referência carbonadas com velocidade radial disponível na literatura e que nunca tenham sido consideradas candidatas a sistemas binários (o que exclui, a princípio, as C-J com envoltório oxigenado). A fim de minimizar os erros envolvidos na obtenção dessa velocidade relativa, adotou-se mais de uma estrela de referência por noite de observação.

Duas estrelas carbonadas C-N que não compõem a amostra foram observadas. São elas BO CMa (C-N5 C₂5 MS2 τ 1 SiC4) e U Ant (C-N3 C₂5 MS1 τ 0 SiC2), que serviram como objetos de referência. Outras estrelas de referência foram selecionadas entre os objetos da amostra. Assim, para cada observação de cada objeto, foram calculadas no mínimo duas velocidades radiais. As velocidades radiais relativas entre os objetos de referência e os demais foram obtidas, na prática, através do ajuste de uma gaussiana ao pico da correlação cruzada entre os respectivos espectros. Essa análise foi feita no espaço de Fourier, com o uso da tarefa `fxcor` do pacote `noao.rv`, do IRAF. As velocidades radiais relativas foram então convertidas ao referencial heliocêntrico usando os dados de velocidade radial das estrelas de referência. A velocidade radial final e uma estimativa de erro associado para cada observação de cada objeto foram obtidas a partir da média e da dispersão entre as várias velocidades calculadas com base nas diferentes estrelas de referência adotadas. Fizemos esse cálculo para todas as estrelas da amostra, inclusive para as que já possuem uma velocidade radial descrita na literatura.

No entanto, essa mesma metodologia não pôde ser aplicada para as observações de 2009, uma vez que, nesse caso, não foram observadas estrelas de referência. Tentou-se, então, obter diretamente a velocidade radial dos objetos em relação ao sistema de referência do observatório. Para isso empregamos no cálculo medidas da posição do centro de bandas de C₂ que não sofrem sobreposições de outras bandas moleculares e linhas atmosféricas.

Tabela 5.1: As velocidades radiais calculadas

Objeto	Data	V_{rad} (km · s ⁻¹)	σ (km · s ⁻¹)	Kharchenko et al.
C* 447	janeiro 2002	-6,5	± 1,6	...
	julho 2009	-6,8	± 2,3	
DH Gem	janeiro 1999	-9,2	± 0,7	-8,00 ± 4,3
NP Pup	janeiro 1999	33,9	± 0,6	32,00 ± 2,2
	janeiro 2002	33,8		
V 614 Mon	janeiro 2002	23,8	± 1,3	22,9 ± 2,0
BM Gem	janeiro 1999	83,9	± 0,9	93,0 ± 5,5
	janeiro 2002	81,3	± 1,3	
C* 745	janeiro 1999	100,8	± 0,9	...
BE CMa	janeiro 1999	49,7	± 0,8	44,0
C* 749	janeiro 2002	94,7	± 0,8	...
C* 1003	janeiro 1999	41,5	± 0,8	...
	novembro 2001	32,3		
	janeiro 2002	36,1	± 0,6	
V 433 Pup	janeiro 1999	24,4	± 0,9	24,0
	janeiro 2002	23,1	± 1,3	
MT Hya	janeiro 2002	10,1	± 1,6	31,0 ± 2,9
	julho 2009	13,5	± 1,3	
MC79 2-11	janeiro 1999	60,2	± 0,8	...
	janeiro 2002	57,2	± 1,1	
FO Ser	abril 2009	-18,0	± 1,1	-16,2 ± 3,5
C* 2837	abril 2009	34,0	± 4,1	47,0 ± 2,4

As bandas empregadas foram $\lambda 4737$ Å, $\lambda 6122$ Å e $\lambda 6192$ Å, todas bastante intensas e destacadas. Foi feita uma média aritmética das 3 medidas obtidas. Apesar de não tão robusto, esse método possibilitou a estimativa satisfatória de velocidades radiais a partir dessas novas observações, embora os erros associados às medidas sejam comparativamente maiores.

Na tabela 5.1 estão as velocidades radiais obtidas (V_{rad}) com seus respectivos erros associados (σ), assim como valores já existentes na literatura (Kharchenko et al., 2004). Observa-se que as velocidades radiais obtidas estão em boa concordância com as disponíveis na literatura. Em apenas dois casos não foi possível obter uma estimativa de erro, pois havia apenas uma estrela de referência disponível. Foi o que ocorreu com NP Pup, na observação de janeiro de 2002, e C* 1003, na de novembro de 2001.

5.2 Análise dos resultados

Os resultados apresentados na tabela anterior também podem ser analisados na figura 5.1. Nesta figura observa-se quais objetos apresentam variações nas velocidades radiais calculadas. A figura mostra cada estrela associada a um valor de ΔV_{rad} que corresponde a cada velocidade radial obtida em cada observação subtraída da média dos valores encontrados a partir de todas as observações do objeto. Os erros calculados estão também mostrados. Os quadrados azuis correspondem às observações de janeiro de 1999, o triângulo verde, à de novembro de 2001, os círculos vermelhos, às de janeiro de 2002, os losangos rosa, às de abril de 2009 e os losangos violeta, às de julho de 2009.

Analisando caso a caso, não há muito que possa ser dito a respeito das sete primeiras estrelas apresentadas, pois possuem velocidades radiais calculadas em apenas uma data, e por esta razão, estão representadas sobre a linha. Outras observações seriam necessárias

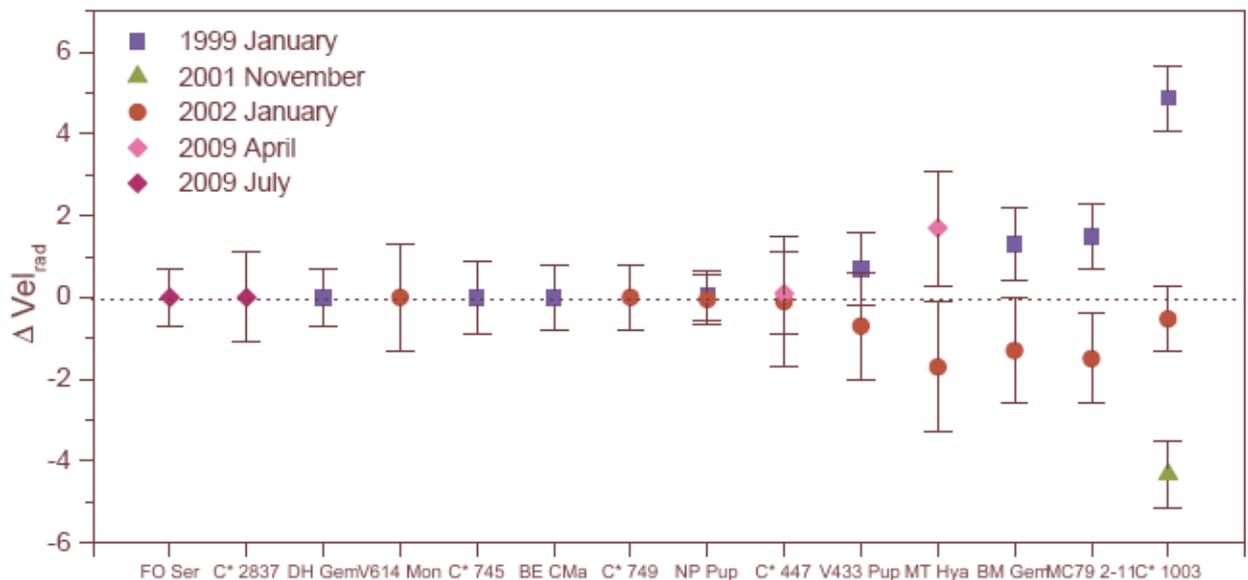


Figura 5.1: Análise das variações das velocidades radiais obtidas. Para cada objeto são representadas todas as velocidades radiais calculadas, subtraídas de seu valor médio. As estrelas V433 Pup, MT Hya, BM Gem, MC79 2-11 e C* 1003 apresentam variações significativas em suas velocidades.

para que se pudesse investigar a variabilidade de suas velocidades. Dentre os objetos que tiveram mais de uma velocidade radial calculada, nota-se que as estrelas NP Pup (C-R3 C₂₃ τ 0 SiC1) e C*447 (C-J:5 τ 2 Jpec) não apresentaram nenhuma variação aparente. Este resultado já era esperado para NP Pup, uma vez que nenhum outro indício de binaridade jamais foi detectado para esse objeto. No entanto, pouco foi discutido na literatura para a estrela C*447. Desse modo, seria interessante verificar este resultado por meio de outros métodos em que eventuais movimentos da atmosfera não pudessem interferir como, por exemplo, a partir de linhas de emissão de CO, para que se possa testar possibilidade de um sistema binário.

Percebe-se que a estrela V433 Pup (C-J) é um caso limite, em que parece haver certa variação na velocidade radial, ainda que pequena em comparação com os erros envolvidos, para que se possa tirar conclusões sobre a multiplicidade do sistema. Portanto, outras medidas de velocidades radiais também devem ser feitas para esse objeto, buscando uma precisão maior (por exemplo, empregando um número maior de estrelas de referência).

Evidentemente, a ausência de uma variação na velocidade radial não é condição suficiente para se descartar a hipótese de binaridade do sistema. Como a velocidade radial é uma projeção da velocidade real do objeto sobre a direção radial, mesmo havendo movimento de revolução da estrela ao redor de um centro de massa de sistema binário, dependendo da orientação desse sistema, essa componente pode ser nula ou pequena demais para se considerada (se o sistema tiver configuração “*face-on*”). Além disso, é sempre possível que os dados empregados para se procurar variações na velocidade da estrela tenham sido tomados em fases muito próximas de sua órbita de forma a dificultar ou impossibilitar sua detecção.

Os quatro objetos finais na figura 5.1, MT Hya (C-J:4 C₂₅ j4 τ 2: Jpec), BM Gem (C-J4 C₂₅ j5 τ 2 Jpec), MC79 2-11 (C-J6 C₂₆ j6 τ 2: JPec) e C* 1003 (C-J4 C₂₅ j4 τ 3 Jpec), apresentam, claramente, variações significativas nas velocidades radiais medidas nas diferentes ocasiões. Esses quatro casos podem ser vistos em mais detalhes na figura

5.2.

C* 1003 foi a estrela que apresentou maior variação na velocidade radial entre todos os objetos estudados. Determinou-se uma velocidade de $41,5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ em janeiro de 1999 enquanto que em novembro de 2001 obteve-se $32,3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, fato que implica em uma variação de $\approx 9,2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ em um período de 35 meses. Ohnaka et al. (2006) mostraram que a estrela C* 1003 de fato apresenta um disco circumbinário, o que só pode ser concebido através de interações em um sistema binário. Portanto, a variação de $9,2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ apresentada é compatível com o resultado dos autores e confirma a existência de um sistema múltiplo. Note-se que, até o momento, nenhuma medida e acompanhamento da variação da velocidade radial, que ratificasse a binaridade do sistema, havia sido publicada.

Um resultado não tão esperado foi o encontrado para a estrela MC79 2-11 (ver figura 5.2), pois, apesar de essa estrela ter sido identificada como carbonada rica em silicato

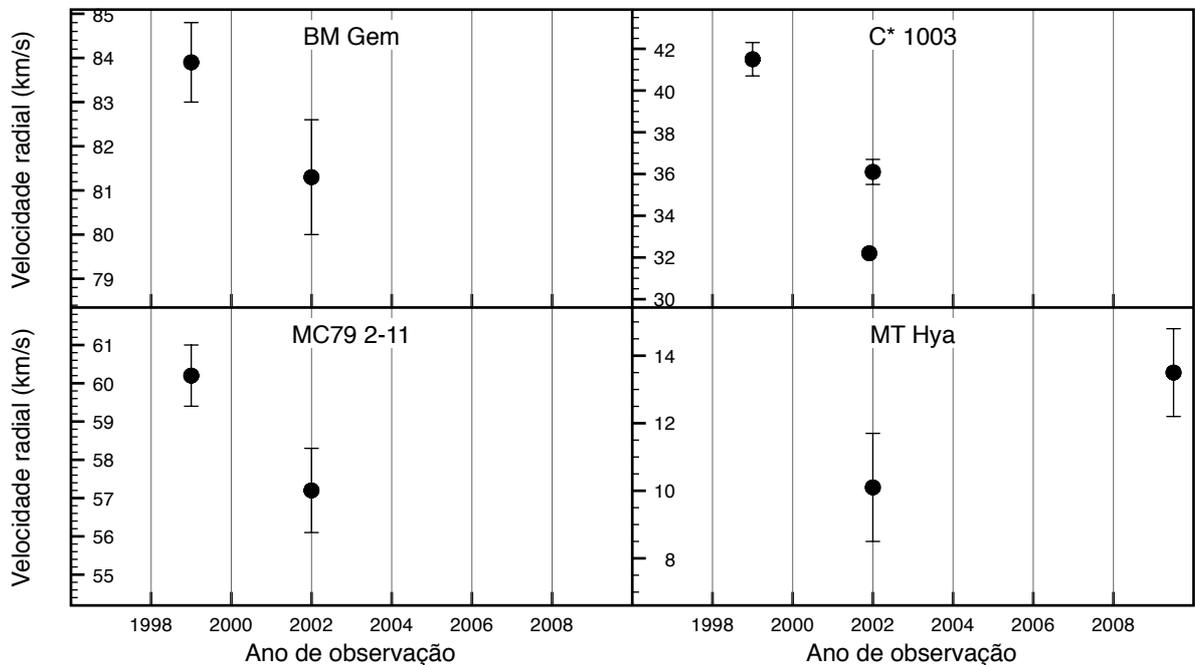


Figura 5.2: Velocidade radial medida para os quatro casos em que houve uma variação significativa, indicando que esses objetos são, provavelmente, sistemas binários. A medida de novembro de 2001 para a estrela C* 1003, como explicado previamente, não possui estimativa de erro associada.

Velocidades Radiais

Tabela 5.2: Variação da velocidade radial para a estrela BM Gem medida nos últimos 65 anos por este trabalho e outros autores utilizando técnicas diversas.

Ano	V_{rad} (km · s ⁻¹)	σ (km · s ⁻¹)	Autor
1944	88,0	± 4	Sanford (1944)
1953	98,0		Wilson (1953)
1990	75,0	± 0,4	Lambert et al. (1990a)
1994	87,1		Barbier-Brossat et al. (1994)
janeiro 1999	83,9	± 0,9	Este trabalho
janeiro 2002	81,3	± 1,3	Este trabalho
2006	95,5		Bobylev et al. (2006)
2007	93,0	5,5	Kharchenko et al. (2004)

(Evans, 1990), nenhuma evidência de sua binaridade ou da existência de um disco havia sido apresentada até hoje. A velocidade obtida em janeiro de 1999 foi de 60,2 km · s⁻¹ enquanto em 2002 foi 57,2 km · s⁻¹, correspondendo a uma variação de 3 km · s⁻¹ ao longo de três anos. Esta é uma variação significativa, indicando que essa estrela passa a ser mais uma carbonada rica em silicato que aparenta consistir em um sistema binário, possivelmente capaz de produzir o disco oxigenado – natureza química inferida pela emissão em 9,8 μm .

Outro resultado interessante foi MT Hya, também classificada como C-J rica em silicato e que apresentou significativa variação na velocidade radial entre os anos de 2002 e 2009. Essa estrela, que no passado foi descrita como C-R, mas foi revelada como uma C-J (Dissertação de Mestrado - De Mello (2007)), apresentou uma variação de $\Delta v_{rad} = 3,4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ao longo de 7 anos. Esta detecção é uma evidência forte de um sistema binário que pode abrigar um disco rico em oxigênio. No entanto, são necessários ainda estudos no IR que indiquem a existência (ou não) de uma estrutura de disco.

A estrela BM Gem é uma das carbonadas ricas em silicato mais bem estudadas. Barnbaum et al. (1991) encontrou uma variação de $\approx 3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, sugerindo sua natureza binária, que também foi verificada neste trabalho conforme pode ser visto na figura 5.2. Encontrou-se uma velocidade de 83,9 km · s⁻¹ em janeiro de 1999 e 81,3 km · s⁻¹ em 2002, implicando

uma variação da velocidade radial de $2,6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ em um intervalo de três anos. Este resultado é coerente com o de trabalhos anteriores. Considerando-se os valores já publicados por outros autores, como mostra a tabela 5.2, percebe-se que ao longo dos últimos 65 anos, pelo menos três medidas da velocidade radial da estrela BM Gem foram feitas com o sistema binário em fases próximas: $87,1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ publicada por Barbier-Brossat et al. (1994), $88,0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ publicada por Sanford (1944) e a velocidade medida neste trabalho de $83,9 \pm 0,9 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ (janeiro de 1999).

Em resumo, observa-se que as estrelas MT Hya, V433 Pup, BM Gem, MC79 2-11 e C* 1003, são boas candidatas para futuros estudos mais detalhados — inclusive, e especialmente, para observações com técnicas capazes de resolver espacialmente os possíveis discos circumbinários desses sistemas como a interferometria.

6 Conclusões

Possíveis Cenários e Evolução

Na seção a seguir, os objetos C-J estudados nesse trabalho são discutidos individualmente, no contexto dos resultados gerais obtidos para essa classe de estrelas. E em seguida, são apresentadas as considerações finais a respeito deste trabalho.

6.1 Considerações por Objeto

DH Gem: C-R2 C₂₃ τ 2 SiC4

NP Pup: C-R3 C₂₃ τ 0 SiC1

Apesar das estrelas C-R não serem objetos de estudo deste trabalho, considera-se a hipótese de que, dada a grande semelhança entre as duas classes, esses objetos sejam, de fato, progenitores das estrelas C-J, tanto normais como ricas em silicato. Visto que uma das condições apontadas para a formação de uma estrela carbonada rica em silicato tem sido a existência de uma companheira de baixa luminosidade, iniciou-se um estudo do comportamento da velocidade radial, também para as estrelas C-R. O índice C₂₃ calculado para DH Gem e NP Pup correspondem às mais baixa estimativa de abundância da razão C/O da amostra.

No entanto, por enquanto, apenas uma medida de velocidade radial foi obtida para a estrela DH Gem. NP Pup, por sua vez, teve medidas de velocidades radiais calculadas para duas épocas diferentes, e nenhuma variação aparente foi medida. Note-se que nenhum outro indício de binaridade jamais foi detectado para ela. É recomendável que, no futuro, o estudo da variabilidade da velocidade radial, iniciado neste trabalho, seja continuado para a estrela DH Gem e ampliado para outras C-R. Identificar sistemas binários em estrelas

Conclusões

do tipo C-R é um passo importante para determinar a validade da sequencia evolutiva proposta por De Mello (2007): $C-R \longrightarrow C-J_{rica\ em\ silicato} \longrightarrow C-J_{normal} \longrightarrow C-N$.

C 2123: C-J3 C₂8 j6 τ2 SiC2*

Esta estrela carecia tanto de uma classificação detalhada em relação à sua fotosfera, quanto ao seu envoltório, visto que foi um dos casos de mau apontamento do satélite IRAS, e nenhuma espectroscopia no infravermelho existia para ela até então. Neste trabalho, obtiveram-se observações T-ReCS a partir das quais se constatou que ela possui um envoltório típico de estrelas carbonadas normais (De Mello et al., 2009). Obtiveram-se, ainda, observações no visível através do espectrógrafo Coudé que foram empregadas para a classificação NSCC da estrela, sendo esta a primeira classificação correta disponível para a estrela. Os índices calculados apontam para elevadas estimativas de abundância de carbono e de sobre-abundância do carbono isotópico. Este resultado confirma a natureza C-J sugerida por Evans (1990).

V 614 Mon: C-J:2 τ1 SiC2

Não foi possível obter uma classificação fotosférica, devido à indisponibilidade de espectros óticos de baixa ou intermediária resolução. Ainda assim, por ter sido previamente classificada como uma carbonada tipo J (Chan, 1993), recebeu um índice de população C-J, seguido da notação de incerteza (:). Trata-se de uma boa candidata a ser observada com o espectrógrafo Coudé com vistas a completar sua classificação NSCC. Foi iniciado o estudo da variabilidade de sua velocidade radial. No entanto, uma segunda medida se faz necessária para qualquer discussão.

BE CMa: C-J2 C₂5 j5 MS1 τ0 SiC4

FO Ser: C-J3 C₂6 j7 MS3 τ2 SiC1

Essas estrelas tiveram sua classificação NSCC apresentadas em De Mello et al. (2009). Através dessa classificação, observa-se que BE CMa possui o menor valor para opacidade,

$\tau_{ext} = 0,10$, típico de estrelas com envoltórios opticamente finos. Coerentemente, foi a que obteve o maior valor para a razão SiC/CA , típico de carbonadas iniciais, estando assim, possivelmente no início de sua trajetória evolutiva como C-J normal. FO Ser, por sua vez, obteve os índices elevados que caracterizam sua fotosfera e a natureza C-J foi confirmada por meio do cálculo do índice-j, enquanto a do envoltório rico em carbono pelo índice-SiC.

O estudo da variabilidade da velocidade radial dessas estrelas foi iniciado, mas é necessária uma nova observação para cada uma das estrelas para que se faça uma análise comparativa.

HD 100764: C-J3 C₂4 j5 τ 2 SiC4

RV TrA: C-J6 C₂8 j7 MS3 τ 2 SiC2

V1942 Sgr: C-J3 C₂8 j6 MS1 τ 0 SiC2

Estas estrelas foram sugeridas como C-J por Chen et al. (2007) e careciam de confirmação a respeito da natureza de seus envoltórios circunstelares. Através de observações no visível obtidas com o espectrógrafo Coudé, foi possível confirmar a sobre-abundância de carbono isotópico desses objetos. RV TrA e V1942 Sgr receberam o maior índice de abundância de carbono da amostra, C₂8. Para todas as três estrelas encontraram-se envoltórios típicos de estrelas carbonadas, isto é, com emissão característica em $11.3\mu\text{m}$. A opacidade extremamente baixa de V1942 Sgr sugere um estágio inicial da fase AGB, com envoltório opticamente fino. HD 100764, por sua vez, obteve alto valor do índice -SiC, o que faz supor que seja uma estrela AGB inicial, visto que os grãos ricos em SiC podem ser os primeiros a se condensar nos envoltórios das estrelas carbonadas, fazendo com que a razão SiC/C.A. seja elevada. Tanto HD 100764 como RV TrA são boas candidatas a estrelas C-J normais que já encontram-se nessa fase a algum tempo, visto que seus envoltórios não são opticamente finos (até $\tau = 0,20$). Dessa forma, um estudo sobre a variabilidade de suas velocidades radiais se faz necessário para que se possa localizá-las ou na parte superior (C-J ricas em silicato que evoluíram para C-J normais) ou na parte inferior (C-J normais) da sequência evolutiva proposta por De Mello (2007), visto que se diferenciam

Conclusões

pena natureza binária.

RS Tel: C-J C₂5 j6 MS1

C 2365: C-J C₂5 j6 MS1*

NW Lib: C-J C₂6 j7 MS3

Infelizmente, não foi possível obter para nenhum desses objetos uma classificação NSCC completa, visto que não estão disponíveis espectros infravermelhos para eles. Dessa forma, estes são bons candidatos a serem observados com o espectrógrafo T-ReCS, tendo em vista o sucesso do uso desse espectrógrafo para a classificação do envoltório de estrelas carbonadas. A natureza C-J de C* 2365 e NW Lib havia sido sugerida por Zamora et al. (2009); Chen et al. (2007), respectivamente, e ambas foram confirmadas através do cálculo do índice-j. RS Tel, por outro lado, havia sido erroneamente considerada como estrela C-R por Knapp et al. (2001), embora nenhuma medida ou estimativa de sua abundância de carbono isotópico já sido feita anteriormente. A estimativa da razão $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ calculada por meio do indicador médio bem como a análise do espectro visível na região azul do espectro quanto a intensidade das linhas de BaI e SrI, não deixam dúvidas quanto à sua natureza C-J. Trata-se portanto de uma nova C-J normal que deve ser incorporada à lista de C-J classificadas na literatura.

IRAS 09411-5933: C-J₄ C₂4 j6 τ 3 Jpec

IRAS 14286-4706: C-J₅ C₂6 j6 τ 2 Jpec

C 749: C-J₅ C₂5 j6 MS2 τ 2 Jpec*

Chen & Zhang (2006) sugeriram uma natureza tipo C-J rica em silicato para as estrelas e essa foi confirmada neste trabalho. O valor obtido para o índice que mede a sobre-abundância de carbono isotópico foi j6, o que não deixa dúvidas sobre a classe C-J delas. C* 745 já havia sido assim classificada por De Mello (2005). De acordo com os modelos de envoltório circunstelar calculados, o envoltório de IRAS 09411-5933 é óticamente mais espesso do que o de IRAS 14286-4706. Isso indicaria, em primeira análise, que IRAS

09411-5933 está em uma etapa evolutiva posterior a IRAS 14286-4706.

Pela primeira vez um valor de velocidade radial foi calculado para C* 749. No entanto, é necessária outra medida para que se possa discutir sobre a possibilidade de binaridade do sistema.

VX Aql: C-J2 C₂4 j7 τ2 Jpec

IRAS 16001-4851: C-J:6 τ3 Jpec

Apesar de VX Aql ter sido observada com o espectrógrafo Coudé (OPD), em 2009, IRAS 16001-4851 não foi. Portanto, esta última obteve uma classificação NSCC incompleta. VX Aql obteve um dos menores índices -C₂, C₂3, e uma das maiores sobreabundâncias em carbono isotópico, j7.

Ambas são carbonadas C-J ricas em silicato. No entanto, enquanto a estrutura característica de VX Aql encontra-se em emissão, a de IRAS 16001-4851 apresenta uma auto-absorção. Por haver espectros tanto LRS-IRAS (1986) quanto T-ReCS (2009), foi possível calcular dois modelos para cada uma das estrelas. Os modelos de transferência radiativa que melhor se ajustaram aos dados espectrais revelaram os mesmos parâmetros físicos, de modo que nenhuma variação foi detectada na opacidade do envoltório das estrelas, num intervalo de tempo de 23 anos. O caso extremo da estrela IRAS 16001-4851 indica que esta é uma estrela C-J rica em silicato mais evoluída que as demais estrelas peculiares dessa amostra.

C 745: C-J:*

C 447: C-J:5 τ2 Jpec*

V433 Pup: C-J:

Não foi possível, para estas estrelas, obter uma classificação para a fotosfera desses objetos por faltar um espectro ótico de baixa resolução. No entanto, C*447 e V433 Pup já haviam sido detectadas como estrelas ricas em carbono isotópico (Chan, 1993) e receberam o índice de população C-J e o índice de incerteza (:) até que sua classificação no ótico

seja completada. C* 745, por sua vez, teve sua sobre-abundância de carbono isotópico definida por meio de cálculos de síntese espectral (De Mello, 2007). As estrelas C*745 e V433 Pup carecem ainda de uma classificação de seus envoltórios, enquanto a mesma foi possível para C* 447.

Foi obtida para C* 745, pela primeira vez, uma medida da velocidade radial. É necessária, ao menos, uma segunda medida para que se possa discutir sua variação. C* 447 recebeu duas medidas de velocidade radial, em 2002 e 2009. No entanto, nenhuma variação aparente foi detectada. A ausência de uma variação na velocidade radial não é condição suficiente para se descartar a hipótese de binaridade do sistema, visto que pode ser um reflexo de uma distribuição "face-on". Assim, novas buscas de binaridade devem ser empregadas para a estrela C*447. V433 Pup, por outro lado, obteve uma variação na velocidade radial de 1,3 km/s ao longo de 3 anos. Apesar de não ser uma variação tão significativa quanto a encontrada para C* 1003, trata-se de um caso limite, e outras medidas devem ser feitas para esse objeto.

Como não existem discussões na literatura sobre a natureza química do envoltório de V433 Pup, estudos espectroscópicos dessa estrela no infravermelho, próximo à banda N, são necessários para que se examine sua natureza. Pode-se então revelar se a estrela é mais uma carbonada rica em silicato com indícios de binaridade ou se é uma carbonada normal (possivelmente binária), podendo ser o elo de ligação para sustentar a sequência evolutiva sugerida por De Mello (2007): C-R \longrightarrow C-J_{rica em silicato} \longrightarrow C-J_{normal} \longrightarrow C-N.

BM Gem: C-J₄ C₂5 j₅ τ 2 Jpec

C 1003: C-J₄ C₂5 j₄ τ 3 Jpec*

MT Hya: C-J₄ C₂5 j₄ τ 2 Jpec

A classificação desses objetos foi obtida anteriormente a este trabalho e publicada em De Mello et al. (2009). BM Gem é uma das estrelas C-J ricas em silicato mais bem estudadas na literatura. Neste trabalho, encontrou-se uma variação significativa na velocidade radial dessa estrela, $\approx 2,6\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, reafirmando a possibilidade de se tratar de

um sistema binário, conforme sugerido por Barnbaum et al. (1991). A identificação de linhas indicativas da presença de uma companheira de baixa luminosidade envolta por um disco (Izumiura, 2003) corroboram também à existência de um sistema binário. E, ainda, se considerarmos os resultados de apresentados por Ohnaka et al. (2008) referente à observações interferométricas conclui-se que há evidência suficiente para o cenário de um disco ao redor da companheira da estrela BM Gem.

Em uma linha semelhante está C* 1003, para quem Ohnaka et al. (2006) também havia detectado um disco oxigenado circumbinário ao suposto sistema binário da estrela, por meio de observações interferométricas. No entanto, não havia, ainda, nenhum outro indício de binaridade, obtido por outros meios, até que De Mello (2007) calculou, para esse objeto, a maior variação na velocidade radial entre os objetos da amostra, de $\approx 9,2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ em um período de 35 meses. Dessa forma, evidencia-se tratar-se de sistema binário, o que sustenta o cenário de disco circumbinário proposto para o sistema. Evidência derradeira, para completar esse quadro, seria a detecção direta da primária de baixa luminosidade.

MT Hya, que apresenta um valor para o índice-j limite entre C-J e C-R, obteve em 2009 uma segunda medida para a velocidade radial, de modo a ser possível o estudo comparativo. Neste, encontrou-se uma variação de $\approx 3,4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, no período de 7 anos, evidência forte de um sistema binário que pode abrigar um disco rico em oxigênio. No entanto, são necessários, ainda, estudos no IR que indiquem a existência (ou não) de uma estrutura de disco.

IRAS 16103-4929: C-J:3 MS3 τ 2 Jpec

C-J carbonada rica em silicato que apresentou uma variação relevante na opacidade calculada, por meio de modelos de envoltório circunestelar com os espectros LRS-IRAS (1986) e T-ReCS (2009), conforme pode ser visto em detalhe na figura 6.1. O aumento detectado na opacidade sugere um incremento da densidade de grãos no envoltório circunestelar. Para que se complete a classificação NSCC são necessárias observações na região do ótico de baixa ou intermediária resolução. Assim, esta é mais uma boa candidata para se estudar a

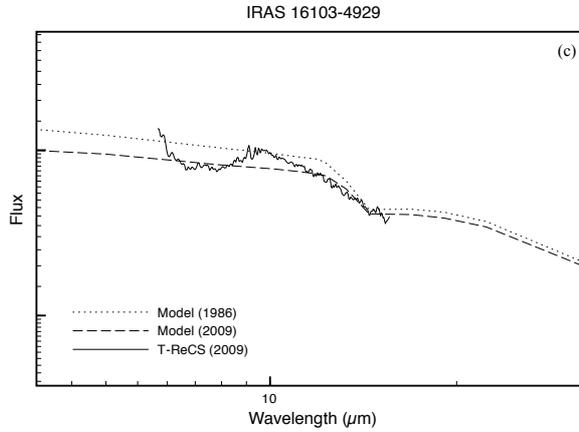


Figura 6.1: Modelos de transferência radiativa calculados com base na fotometria disponível na literatura e na estrutura de emissão em $9,8\mu m$. A linha sólida representa o espectro T-ReCS, a pontilhada o modelo calculado com base no espectro LRS-IRAS (1986) e a tracejada no modelo calculado com base no próprio espectro T-ReCS(2009).

variabilidade da velocidade radial ou a presença de discos, uma vez que suas demais características são semelhantes às das estrelas C-J ricas em silicato que apresentaram variações nestas velocidades calculadas.

IRAS 09425-6040: C-J:5 $\tau 2$ Jpec

MC79 2-11: C-J5 C₂6 j6 $\tau 3$ Jpec

C 2837: C-J4 C₂7 j6 $\tau 2$ Jpec*

IRAS 11311-6355: C-J:5 $\tau 2$ Jpec

As classificações NSCC das estrelas MC79 2-11 e C* 2837 foram obtidas previamente e publicadas em De Mello et al. (2009). As demais, IRAS 09425-6040 e IRAS 11311-6355, estão com a classificação incompleta, porém obtida pela primeira vez neste trabalho. Essas estrelas são todas carbonadas ricas em silicato, sendo que IRAS 09425-6040 é rica em silicato cristalino, que se manifesta em comprimentos de onda maiores que $15\mu m$. As demais estrelas apresentam uma intensa estrutura em $9.8\mu m$ em emissão. Foram calculados dois modelos, um com base em espectros LRS-IRAS e outro em T-ReCS, e para as três estrelas observou-se uma variação da opacidade estimada. MC79 2-11, IRAS 11311-6355 e C* 2837 obtiveram variação de $\Delta\tau_{ext2007-1986} = 0,5 \pm 15$, $\Delta\tau_{ext2009-1986} = 0,45 \pm 15$ e

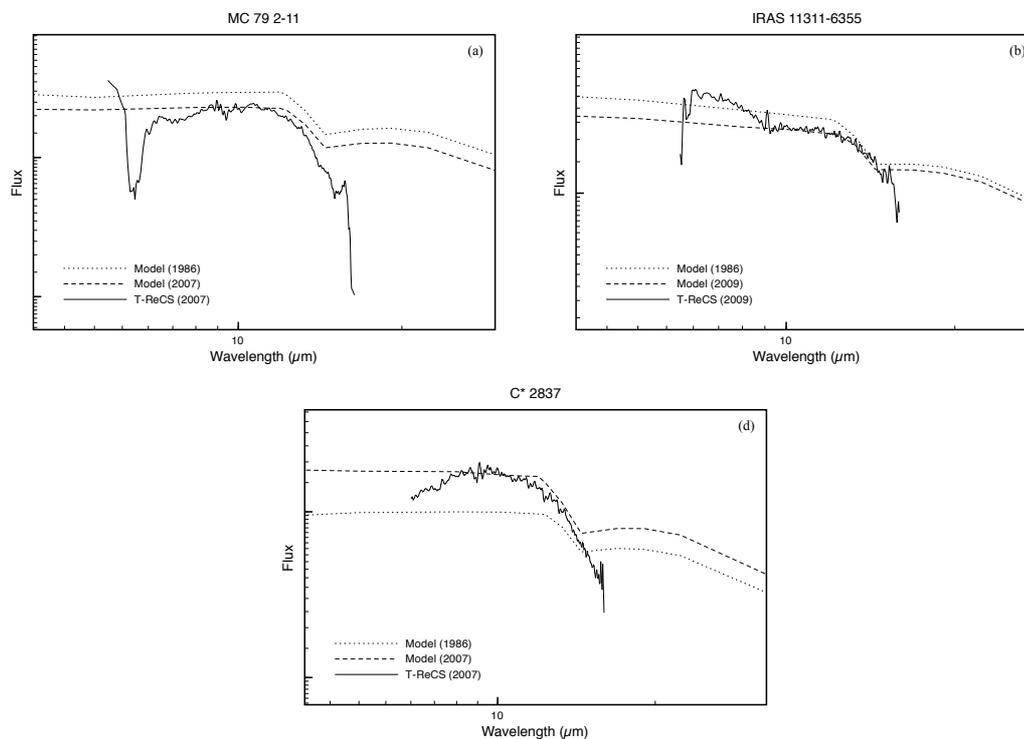


Figura 6.2: Modelos de transferência radiativa calculados com base na fotometria disponível na literatura e na estrutura de emissão em $9,8\mu\text{m}$. A linha sólida representa o espectro T-ReCS, a pontilhada o modelo calculado com base no espectro LRS-IRAS (1986) e a tracejada no modelo calculado com base no próprio espectro T-ReCS(2009).

$\Delta\tau_{ext2007-1986} = -0,80 \pm 0,15$, respectivamente (ver figura 6.2). Estes resultados indicam que os dois primeiros envoltórios tenham se espessado e que o último tenha ficado mais opticamente fino, ao longo do intervalo de até 23 anos.

Molster et al. (2001) mostraram que IRAS 09425-6040 possui estruturas devidas à molécula de C_2H_2 e a grãos de SiC nos comprimentos de onda próximos ao centro da banda N. O mesmo pode ser observado nas observações T-ReCS, em 2007. No entanto, sabe-se que ela é mais um exemplo de uma estrela carbonada rica em silicato, especificamente do tipo C-J. A natureza oxigenada de seu envoltório apenas é revelada em comprimentos de onda além de $15\mu\text{m}$, onde o espectro é dominado por intensas emissões de estruturas de silicato cristalino ricas em Mg. Dessa forma, IRAS 09425-6040 é a primeira estrela com uma assinatura de dupla química no envoltório confirmada.

As estrelas MC79 2-11, C* 2837 e IRAS 11311-6355 exibem, ao final de seu espectro na

banda N' do espectro T-ReCS, uma absorção próxima a $15\mu\text{m}$, que vem sendo associada a compostos de C_2H_2 , que costumam mascarar a emissão de SiC na região. Após análise conjunta com espectro T-ReCS banda Q e comparativo com espectro LRS-IRAS, para as duas primeiras estrelas, chegou-se à conclusão que trata-se de uma estrutura real e não um artefato instrumental. Dessa forma, MC79 2-11 e C* 2837 são dois novos exemplos de C-J ricas em silicato com indícios de química dupla em seu envoltório, o que sustenta a hipótese de um cenário de um sistema binário composto por uma estrela AGB carbonada, uma anã de baixa luminosidade e um disco circumbinário / circunstelar à companheira rico em oxigênio. Um estudo mais profundo a respeito da existência ou não dessa absorção na região pode ser a chave para confirmar o mesmo para IRAS 11311-6355.

Referente às velocidades radiais, até o momento foi obtida apenas uma medida de velocidade radial para C* 2837. No entanto, De Mello (2007) já havia apresentado uma variação na velocidade radial da estrela MC79 2-11 de $3\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ao longo de três anos. Esta é uma variação significativa, e representa mais uma evidência de que se trata de um sistema binário, que possivelmente exiba um disco de acreção. A fim de buscar uma evidência mais definitiva de binaridade, faz-se necessário evidências diretas do disco desse sistema, como por exemplo por meio de observações interferométricas, e da própria companheira de baixa luminosidade, através por exemplo de estudos na região violeta do espectro, tal como já feito para a estrela BM Gem,.

Um passo intermediário para as estrelas C* 2837 e IRAS 11311-6355 é realizar um estudo da variação da velocidade radial, uma vez que essas são boas candidatas a serem estudadas com as mesmas técnicas hoje empregadas para detecção direta e indireta de sistemas binários e discos circunstelares para estrelas C-J ricas em silicato.

6.2 Considerações finais

Ao longo deste trabalho, procurou-se entender melhor as estrelas carbonadas tipo C-J,

e em especial as estrelas C-J ricas em silicato. De fato, esses objetos estão envoltos em tantas dúvidas que muito trabalho ainda precisa ser realizado até que se possa concluir de forma definitiva sobre as causas para as peculiaridades que são observadas em seus espectros.

A própria classificação disponível na literatura para as carbonadas tipo J é bastante controversa. Costuma-se tratar as C-J como estrelas típicas AGBs ricas em carbono. No entanto, ao que tudo indica, as C-J parecem evoluir de estrelas C-R, que por sua vez, não tiveram seu enriquecimento em carbono como as AGBs carbonadas normais. Desse modo, deve-se levar em consideração, ao analisar a classificação das C-J, que seu enriquecimento em carbono possa ser anterior à fase AGB. Assim, nada impede que a estrela C-J V1942 Sgr, com índice C_28 , por exemplo, seja menos evoluída que a C-N U Hya, uma estrela C_{24} , dado que, ao que tudo indica, processos de enriquecimento diferentes ocorrem para esses dois objetos.

A classificação proposta pelo NSCC é adequada para descrever as C-J, pois, por adotar um conjunto abrangente de índices, fornece, ainda que de forma simplificada, uma visão sobre o cenário geral do objeto de estudo. No capítulo 3 apresentou-se a classificação NSCC para todos os objetos da amostra deste trabalho. Para muitas estrelas aqui estudadas ainda não havia sido atribuída nenhuma classificação detalhada – apenas o índice de população havia sido definido.

De Mello (2007) sugeriu que as estrelas C-J são um estágio evolutivo curto entre as de estrelas C-R, suas progenitoras, e algumas estrelas C-N. No entanto esta ainda é uma hipótese que necessita de mais evidências para sustentá-la. Porém, se considerarmos válido esse argumento, o envoltório circunstelar rico em oxigênio das estrelas C-J ricas em silicato, deveria se formar e posteriormente diluir, nesta fase intermediária. No capítulo 4, analisou-se a evolução temporal desses envoltórios através de modelos que visam a resolver o problema de transferência radiativa nesses ambientes circunstelares, através de espectros infravermelhos obtidos com um intervalo de duas décadas.

Os espectros LRS-IRAS (1986) e T-ReCS (2007; 2009) possuem resoluções comparáveis e mostraram-se ferramentas eficientes no estudo da natureza dos envoltórios das estrelas carbonadas bem como na análise temporal dos mesmos. Mesmo que os modelos empregados utilizem simetrias esféricas que não reproduzem de fato as estruturas das estrelas carbonadas ricas em silicato, as simulações oferecem uma boa primeira aproximação, e um bom método para identificar novas estrelas candidatas a sustentar um sistema binário complexo como as que veem sendo discutidas na literatura: BM Gem, EU And, C* 1003, V778 Cyg e FJF 270. Dentre as 7 estrelas carbonadas ricas em silicato estudadas neste trabalho identificou-se 4 com uma variação temporal na sua opacidade de extinção: MC79 2-11, IRAS 11311-6355, IRAS 16103-4929 e C 2837. Enquanto as três primeiras parecem estar experimentando um espessamento de seus envoltórios circunstelares, C* 2837 está passando pelo processo inverso de diluição do envoltório rico em oxigênio.

Também foi possível estudar uma estrutura de absorção no final do filtro N, com um comprimento de onda central em aproximadamente $15\mu\text{m}$ para MC79 2-11, C-2837 e IRAS 11311-6355. Essa estrutura em $15\mu\text{m}$ tem sido associada à molécula C_2H_2 , que pode estar escondendo uma emissão de SiC de seus envoltórios circunstelares. Dessa forma, este estudo apresenta três possíveis estrelas com assinaturas de dupla-química em seus envoltórios circunstelares. Ainda considerando o argumento de De Mello (2007), referente às C-J ricas em silicato serem uma etapa intermediária da evolução, e considerando a variação detectada para o envoltório circunstelar das mesmas pode-se entender que MC79 2-11 e IRAS 11311-6355 estão na fase de formação do envoltório rico em oxigênio enquanto C* 2837 está na fase de diluição deste mesmo envoltório.

No capítulo 5 foram apresentadas evidências de binaridade para mais 4 objetos, além da confirmação da binaridade de BM Gem, por meio de medidas de variações de suas velocidades radiais, pelo método de correlação cruzada de seus espectros com outros de referência. Uma dessas novas detecções foi a da estrela C* 1003, que, como mostrado por Ohnaka et al. (2006), apresenta um disco circumbinário – em seu trabalho se supôs

sua binaridade, embora não houvesse medidas diretas que a confirmassem. Outros dois objetos em que uma variação na velocidade radial pôde ser medida foram MC79 2-11 e MT Hya. Em um outro caso, o de V433 Pup, encontramos uma variação de $1,3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ na velocidade radial, que apesar de não ser tão significativa quanto os resultados anteriores, é um primeiro indício de binaridade, que justifica a obtenção de novas medidas. Junto com este último objeto, outro que deve ser estudado quanto à variabilidade de sua velocidade radial é IRAS 16103-4929, que apresenta características de evolução de seu envoltório semelhantes às de MC79 2-11. V433 Pup carece também de estudos de seu envoltório circunstelar visto que pode ser a evidencia observacional faltante na sequência evolutiva das C-J ricas em silicato, proposta por De Mello (2007).

Atualmente, contam-se 39 estrelas carbonadas ricas em silicato e ao menos outras 12 candidatas. No entanto, apenas cinco têm sido alvo de estudos robustos de buscas por discos circunstelares ou circumbinários ou pela presença da companheira desses possíveis sistemas binários. Com esta tese, apresentou-se 7 novas candidatas a sistemas binários, capazes portanto, em princípio, de sustentar tais discos de acreção. Dentre estas, duas jamais haviam sido identificadas como estrelas C-J ricas em silicato: C* 749 e MT Hya. Estudos dessa natureza devem portanto ser estendidos para: MC79 2-11, MT Hya, C* 1003, C* 2837, IRAS 11311-6355, C* 749 e IRAS 16103-4929.

O estudo apresentado nessa tese teve por objetivo também reforçar a sugestão de sequência evolutiva especial para as estrelas C-J proposta por De Mello (2007). Ao longo da seção anterior buscou-se localizar, de forma qualitativa, alguns objetos nesta sequência evolutiva. Na figura 6.3 estão alguns exemplos discutidos, que servem para ilustrar a sequência, e estabelecer vínculos entre esta e os dados observacionais. A investigação de mais objetos, especialmente nas situações marcadas com um ponto de interrogação na figura é essencial para reforçar e/ou refinar o esquema proposto.

Finalmente, com este trabalho procurou-se diminuir as questões que circundam as estrelas C-J, e em especial as C-J ricas em silicato. Cenários evolutivos, envolvendo tanto

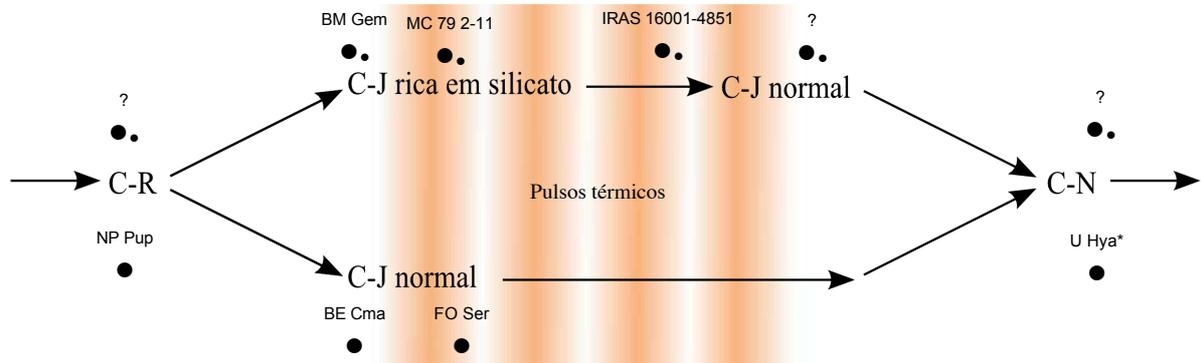


Figura 6.3: Esquema ilustrativo da sequência evolutiva proposta por De Mello (2007), situando preliminarmente, como exemplos, alguns dos objetos estudados neste trabalho. A parte superior do esquema compreenderia sistemas binários capazes de armazenar o material ejetado pela estrela em sua fase oxigenada. Um ponto de interrogação indica que faltam, até o momento, objetos do tipo correspondente claramente identificados. A estrela U Hya, marcada com um asterisco, excepcionalmente, não foi classificada neste trabalho, mas em De Mello et al. (2009).

interações com o meio quanto processos interiores, foram abordados e sugeridos. É imprescindível que modelos de envoltório com outras geometrias além da esférica sejam testados para se definir as estruturas reais dos sistemas binários das C-J ricas em silicatos. Deve-se, também, ampliar o estudo atual utilizando ferramentas de interferometria, por exemplo, com as novas candidatas sugeridas neste trabalho. Esses estudos serão importantes para confirmar os resultados aqui apresentados, e para se entender melhor detalhes da natureza dessas estrelas peculiares.

Bibliografia

- Abia, C. & Isern, J., 1997. ‘ $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratios and Li abundances in C stars: evidence for deep mixing?’’. *MNRAS*, 289, L11–L15.
- Abia, C., Isern, J., & Canal, R., 1993. ‘On the li Production by Galactic C-Stars’. *A&A*, 275, 96.
- Barbier-Brossat, M., Petit, M., & Figon, P., 1994. ‘Third bibliographic catalogue of stellar radial velocities (Text in French).’. *A&AS*, 108, 603–609.
- Barnbaum, C., Zuckerman, B., & Kastner, J. H., 1991. ‘The mass range of carbon stars’. *AJ*, 102, 289–294.
- Bechstedt, F., Käckell, P., Zywietz, A., Karch, K., Adolph, B., Tenelsen, K., & Furthmüller, J., 1997. ‘Polytypism and Properties of Silicon Carbide’. *Physica Status Solidi B Basic Research*, 202, 35–62.
- Benson, P. J. & Little-Marenin, I. R., 1987. ‘A water maser associated with EU Andromedae - A carbon star near an oxygen-rich circumstellar shell’. *ApJ*, 316, L37–L40.
- Bobylev, V. V., Goncharov, G. A., & Bajkova, A. T., 2006. ‘The OSACA database and a kinematic analysis of stars in the solar neighborhood’. *Astronomy Reports*, 50, 733–747.
- Boffin, H. M. J., Abia, C., Isern, J., & Rebolo, R., 1993. ‘A Catalog of li Abundances and Equivalent Widths in a Sample of Galactic C-Stars’. *A&AS*, 102, 361.
- Bouigue, R., 1954. ‘Contribution à l’étude des étoiles rouges carbonées II’. *Annales d’Astrophysique*, 17, 104.
- Brewer, J. P., Richer, H. B., & Crabtree, D. R., 1996. ‘Late-Type Stars in M31. II. C-, S-, and M-Star Spectra’. *AJ*, 112, 491.

Bibliografia

- Chan, S. J., 1993. ‘Spectroscopic study of carbon stars with silicate features. 1: Observations’. *AJ*, 106, 2126–2139.
- Chan, S. J. & Kwok, S., 1991. ‘New candidates for carbon stars with silicate features’. *ApJ*, 383, 837–841.
- Chen, P. S. & Kwok, S., 1993. ‘Circumstellar Properties of S Stars. I. Dust Features’. *ApJ*, 416, 769.
- Chen, P.-S. & Shan, H.-G., 2011. ‘Identification of new silicate carbon stars’. *Ap&SS*, 335, 457–467.
- Chen, P.-S. & Zhang, P., 2006. ‘Newly Identified Silicate Carbon Stars from IRAS Low-Resolution Spectra’. *Chinese J. Astron. Astrophys.*, 6, 697–704.
- Chen, P.-S., Yang, X.-H., & Zhang, P., 2007. ‘Infrared Study of J-Type Carbon Stars Based on Infrared Astronomical Satellite, Two Micron All Sky Survey, and Infrared Space Observatory Data’. *AJ*, 134, 214–222.
- Claussen, M. J., Kleinmann, S. G., Joyce, R. R., & Jura, M., 1987. ‘A flux-limited sample of Galactic carbon stars’. *ApJS*, 65, 385–404.
- Cutri, R. M., Skrutskie, M. F., van Dyk, S., Beichman, C. A., Carpenter, J. M., & Chester, T., 2003. ‘2MASS All-Sky Catalog of Point Sources (Cutri+ 2003)’. *VizieR Online Data Catalog*.
- da Silva, L., de La Reza, R., & Barbuy, B., 1995. ‘Carbon Isotope Ratios in Very Lithium-Rich K Giants’. *ApJ*, 448, L41.
- David, P. & Pégourié, B., 1995. ‘The complex dielectric function for circumstellar silicate grains based on the IRAS data.’. *A&A*, 293, 833–839.
- De Mello, A. B., 2005. ‘Catalogando estrelas carbonadas: uma proposta de classificação compacta e eficiente’. *Projeto Final de Graduação em Astronomia*.

-
- De Mello, A. B., 2007. ‘Estrelas C-J: Investigando suas Atmosferas, seus Envoltórios e sua Evolução’. *Dissertação de Mestrado em Astronomia*.
- De Mello, A. B., Lorenz-Martins, S., de Araújo, F. X., Bastos Pereira, C., & Codina Landaberry, S. J., 2009. ‘NSCC - A New Scheme of Classification of C-Rich Stars Devised from Optical and Infrared Observations’. *ApJ*, 705, 1298–1319.
- Dearborn, D. S. P., Lattanzio, J. C., & Eggleton, P. P., 2006. ‘Three-dimensional Numerical Experimentation on the Core Helium Flash of Low-Mass Red Giants’. *ApJ*, 639, 405–415.
- Deguchi, S., Nakada, Y., & Sahai, R., 1990. ‘SiO and CO emission from carbon stars with silicate features and southern IRAS sources’. *A&A*, 230, 339–354.
- Deroo, P., van Winckel, H., Verhoelst, T., Min, M., Reyniers, M., & Waters, L. B. F. M., 2007. ‘The circumbinary disc around the J-type C-star IRAS 18006-3213’. *A&A*, 467, 1093–1101.
- Dominy, J. F., 1984. ‘The chemical composition and evolutionary state of the early stars’. *ApJS*, 55, 27–43.
- Ducati, J. R., 2002. ‘Catalogue of Stellar Photometry in Johnson’s 11-color system.’. *VizieR Online Data Catalog*.
- Egan, M. P., Price, S. D., Kraemer, K. E., Mizuno, D. R., Carey, S. J., Wright, C. O., Engelke, C. W., Cohen, M., & Gugliotti, M. G., 2003. ‘MSX6C Infrared Point Source Catalog. The Midcourse Space Experiment Point Source Catalog Version 2.3 (October 2003)’. *VizieR Online Data Catalog*.
- Engels, D., 1994. ‘More H₂O maser in J-type carbon stars’. *A&A*, 285, 497–502.
-

Bibliografia

- Engels, D. & Leinert, C., 1994. ‘Near infrared speckle interferometry and water maser observations of carbon stars with an oxygen-rich circumstellar environment’. *A&A*, 282, 858–866.
- Evans, T. L., 1986. ‘The low-luminosity J-type carbon stars’. *MNRAS*, 220, 723–735.
- Evans, T. L., 1990. ‘Carbon stars with silicate dust shells. I - Carbon stars with enhanced C-13 (J stars)’. *MNRAS*, 243, 336–348.
- Frenklach, M. & Feigelson, E. D., 1989. ‘Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in circumstellar envelopes’. *ApJ*, 341, 372–384.
- Gail, H.-P. & Sedlmayr, E., 1986. ‘The primary condensation process for dust around late M-type stars’. *A&A*, 166, 225–236.
- Gail, H. P. & Sedlmayr, E., 1987. ‘Dust formation in stellar winds. III - Self-consistent models for dust-driven winds around C-stars’. *A&A*, 171, 197–204.
- Gezari, D. Y., Pitts, P. S., & Schmitz, M., 1999. ‘Catalog of Infrared Observations, Edition 5 (Gezari+ 1999)’. *VizieR Online Data Catalog*.
- Gordon, C. P., 1971. ‘Carbon Stars with Strong C¹³ and Lithium Spectral Features’. *PASP*, 83, 667.
- Guglielmo, F., Epchtein, N., Le Bertre, T., Fouque, P., Hron, J., Kerschbaum, F., & Lepine, J. R. D., 1993. ‘Identification of 106 new infrared carbon stars in the IRAS Point Source Catalog - Near-infrared photometry and their space distribution in the galaxy’. *A&AS*, 99, 31–69.
- Habing, H. J. & Olofsson, H., eds., 2003. *Asymptotic giant branch stars*.
- Harris, M. J. & Lambert, D. L., 1987. ‘A search for (C-14)(O-16) in the atmospheres of evolved stars’. *ApJ*, 318, 868–872.

-
- Herwig, F., 2005. ‘Evolution of Asymptotic Giant Branch Stars’. *ARA&A*, 43, 435–479.
- Iben, I., Jr. & Renzini, A., 1983. ‘Asymptotic giant branch evolution and beyond’. *ARA&A*, 21, 271–342.
- Izumiura, H., 2003. ‘Violet spectra of carbon stars associated with silicate features’. In Nakada, Y., Honma, M., & Seki, M., eds., *Mass-Losing Pulsating Stars and their Circumstellar Matter*, volume 283/*Astrophysics and Space Science Library*, 189–196.
- Izumiura, H., Noguchi, K., Aoki, W., Honda, S., Ando, H., Takada-Hidai, M., Kambe, E., Kawanomoto, S., Sadakane, K., Sato, B., Tajitsu, A., Tanaka, W., Okita, K., Watanabe, E., & Yoshida, M., 2008. ‘Evidence for a Companion to BM Gem, a Silicate Carbon Star’. *ApJ*, 682, 499–508.
- Jura, M. & Kahane, C., 1999. ‘Orbiting Molecular Reservoirs around Evolved Red Giant Stars’. *ApJ*, 521, 302–309.
- Kahane, C., Barnbaum, C., Uchida, K., Balm, S. P., & Jura, M., 1998. ‘A Circumbinary Reservoir around BM Geminorum?’. *ApJ*, 500, 466.
- Kaufer, A., Stahl, O., Tubbesing, S., Norregaard, P., Avila, G., Francois, P., Pasquini, L., & Pizzella, A., 1999. ‘Commissioning FEROS, the new high-resolution spectrograph at La Silla.’. *The Messenger*, 95, 8–12.
- Keenan, P. C., 1993. ‘Revised MK spectral classification of the red carbon stars’. *PASP*, 105, 905–910.
- Kharchenko, N. V., Piskunov, A. E., & Scholz, R.-D., 2004. ‘Radial Velocities with Astrometric Data’. *VizieR Online Data Catalog*, 3239, 0.
- Knapp, G., Pourbaix, D., & Jorissen, A., 2001. ‘Reprocessing the Hipparcos data for evolved giant stars II. Absolute magnitudes for the R-type carbon stars’. *A&A*, 371, 222–232.
-

Bibliografia

- Lambert, D. L., Gustafsson, B., Eriksson, K., & Hinkle, K. H., 1986. ‘The chemical composition of carbon stars. I - Carbon, nitrogen, and oxygen in 30 cool carbon stars in the Galactic disk’. *ApJS*, 62, 373–425.
- Lambert, D. L., Smith, V. V., & Hinkle, K. H., 1990a. ‘Infrared spectroscopy of four carbon stars with 9.8 micron emission from silicate grains’. *AJ*, 99, 1612–1620.
- Lambert, D. L., Smith, V. V., & Hinkle, K. H., 1990b. ‘Infrared spectroscopy of four carbon stars with 9.8 micron emission from silicate grains’. *AJ*, 99, 1612–1620.
- Little-Marenin, I. R., 1986. ‘Carbon stars with silicate dust in their circumstellar shells’. *ApJ*, 307, L15–L19.
- Little-Marenin, I. R., Benson, P. J., & Dickinson, D. F., 1988. ‘Masers associated with two carbon stars - V778 Cygni and EU Andromedae’. *ApJ*, 330, 828–834.
- Little-Marenin, I. R., Staley, S. B., Benson, P. J., & Cadmus, R. R., Jr., 1994. ‘Three Short Period Miras - Z Aql, RZ SCO and R Cet: Water Maser Emission and its Implications’. In *Bulletin of the American Astronomical Society*, volume 26/*Bulletin of the American Astronomical Society*, 1452.
- Lloyd Evans, T., 2010. ‘Carbon stars.’. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 31, 177–211.
- Lloyd Evans, T., 1991. ‘Carbon stars with silicate dust shells. II - More stars with enhanced C-13 (J stars)’. *MNRAS*, 249, 409–416.
- Lorenz-Martins, S. & Lefèvre, J., 1994. ‘SiC grains and evolution of carbon stars’. *A&A*, 291, 831–841.
- Lorenz-Martins, S., de Araújo, F. X., Codina Landaberry, S. J., de Almeida, W. G., & de Nader, R. V., 2001. ‘Modeling of C stars with core/mantle grains: Amorphous carbon + SiC’. *A&A*, 367, 189–198.

-
- Molster, F. J., Yamamura, I., Waters, L. B. F., Nyman, L.-Å., Käufl, H.-U., de Jong, T., & Loup, C., 2001. ‘IRAS 09425-6040: A carbon star surrounded by highly crystalline silicate dust’. *A&A*, 366, 923–929.
- Morel, M. & Magrenat, P., 1978. ‘UBVRIJKLMNH photoelectric photometric catalogue. (Magnetic tape).’. *A&AS*, 34, 477–478.
- Morgan, D. H., Hatzidimitriou, D., & Cannon, R. D., 2004. ‘Merrill-Sanford bands in Large Magellanic Cloud carbon stars’. *MNRAS*, 355, 1196–1206.
- Morris, M., 1987. ‘Mechanisms for mass loss from cool stars’. *PASP*, 99, 1115–1122.
- Noguchi, K., 1990. ‘Statistical characteristics of the ten-micron silicate emission in M-type stars’. *PASJ*, 42, 419–440.
- Ohnaka, K. & Boboltz, D. A., 2008. ‘Imaging the oxygen-rich disk toward the silicate carbon star EU Andromedae’. *A&A*, 478, 809–814.
- Ohnaka, K. & Tsuji, T., 2000. ‘Quantitative Analysis of Carbon Isotope Ratios in N-, SC-, and J-type Carbon Stars’. In Wing, R. F., ed., *The Carbon Star Phenomenon*, volume 177/*IAU Symposium*, 81.
- Ohnaka, K. & Tsuji, T., 1996. ‘Quantitative analysis of carbon isotopic ratios in carbon stars. I. 62 N-type and 15 SC-type carbon stars.’. *A&A*, 310, 933–951.
- Ohnaka, K. & Tsuji, T., 1999. ‘Quantitative analysis of carbon isotopic ratios in carbon stars. III. 26 J-type carbon stars including 5 silicate carbon stars’. *A&A*, 345, 233–243.
- Ohnaka, K., Driebe, T., Hofmann, K.-H., Leinert, C., Morel, S., Paresce, F., Preibisch, T., Richichi, A., Schertl, D., Schöller, M., Waters, L. B. F. M., Weigelt, G., & Wittkowski, M., 2006. ‘High angular resolution N-band observation of the silicate carbon star IRAS08002-3803 with the VLTI/MIDI instrument . Dusty environment spatially resolved’. *A&A*, 445, 1015–1029.
-

Bibliografia

- Ohnaka, K., Izumiura, H., Leinert, C., Driebe, T., Weigelt, G., & Wittkowski, M., 2008. ‘Asymmetric silicate dust distribution toward the silicate carbon star BM Geminorum’. *A&A*, 490, 173–178.
- Olson, F. M., Raimond, E., Neugebauer, G., van Duinen, R. J., Habing, H. J., Aumann, H. H., & Beintema, D. A., 1986. ‘IRAS catalogues and atlases - Atlas of low-resolution spectra’. *A&AS*, 65, 607–1065.
- Olofsson, H., Lindqvist, M., Nyman, L.-A., & Winnberg, A., 1998. ‘Circumstellar molecular radio line intensity ratios’. *A&A*, 329, 1059–1074.
- Pégourié, B., 1988. ‘Optical properties of alpha silicon carbide’. *A&A*, 194, 335–339.
- Perryman, M. A. C. & ESA, , eds., 1997. *The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission*, volume 1200/*ESA Special Publication*.
- Plez, B., Smith, V. V., & Lambert, D. L., 1993. ‘Lithium Abundances and Other Clues to Envelope Burning in Small Magellanic Cloud Asymptotic Giant Branch Stars’. *ApJ*, 418, 812.
- Rouleau, F. & Martin, P. G., 1991. ‘Shape and clustering effects on the optical properties of amorphous carbon’. *ApJ*, 377, 526–540.
- Sackmann, I.-J. & Boothroyd, A. I., 1992. ‘The creation of super-rich lithium giants’. *ApJ*, 392, L71–L74.
- Sanford, R. F., 1944. ‘Radial Velocities of 283 Stars of Spectral Classes R and N.’. *ApJ*, 99, 145.
- Sedlmayr, E., 1994. ‘From Molecules to Grains’. In U. G. Jorgensen, , ed., *IAU Colloq. 146: Molecules in the Stellar Environment*, volume 428/*Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag*, 163.

-
- Smith, V. V. & Lambert, D. L., 1989. ‘Synthesis of lithium and s-process elements in Small Magellanic Cloud asymptotic giant branch stars’. *ApJ*, 345, L75–L78.
- Smith, V. V. & Lambert, D. L., 1990. ‘The chemical composition of red giants. III - Further CNO isotopic and s-process abundances in thermally pulsing asymptotic giant branch stars’. *ApJS*, 72, 387–416.
- Speck, A. K., 1998. *The Mineralogy of Dust Around Evolved Stars*. Tese de doutorado, PhD Thesis, University College London, 1998 %,F University College London Gower Street, London WC1N 1AS.
- Speck, A. K., Cami, J., Markwick-Kemper, C., Leisenring, J., Szczerba, R., Dijkstra, C., Van Dyk, S., & Meixner, M., 2006. ‘The Unusual Spitzer Spectrum of the Carbon Star IRAS 04496-6958: A Different Condensation Sequence in the LMC?’. *ApJ*, 650, 892–900.
- Straniero, O., Chieffi, A., Limongi, M., Busso, M., Gallino, R., & Arlandini, C., 1997. ‘Evolution and Nucleosynthesis in Low-Mass Asymptotic Giant Branch Stars. I. Formation of Population I Carbon Stars’. *ApJ*, 478, 332.
- Szczerba, R., Szymczak, M., Babkovskaia, N., Poutanen, J., Richards, A. M. S., & Groenewegen, M. A. T., 2006. ‘Oxygen-rich disk in the V778 Cygni system resolved’. *A&A*, 452, 561–565.
- Utsumi, K., 1985. ‘Abundance analysis of cool carbon stars’. In Jaschek, M. & Keenan, P. C., eds., *Cool Stars with Excesses of Heavy Elements*, volume 114/*Astrophysics and Space Science Library*, 243–246.
- Wasserburg, G. J., Boothroyd, A. I., & Sackmann, I.-J., 1995. ‘Deep Circulation in Red Giant Stars: A Solution to the Carbon and Oxygen Isotope Puzzles?’. *ApJ*, 447, L37.
- Waters, L. B. F. M., Cami, J., de Jong, T., Molster, F. J., van Loon, J. T., Bouwman, J., de Koter, A., Waelkens, C., Van Winckel, H., Morris, P. W., Cami, J., Bouwman, J., de
-

Bibliografia

- Koter, A., de Jong, T., & de Graauw, T., 1998. ‘An oxygen-rich dust disk surrounding an evolved star in the Red Rectangle’. *Nature*, 391, 868.
- Willems, F. J. & de Jong, T., 1986. ‘Carbon stars with oxygen-rich circumstellar dust shells Observational evidence for the onset of the carbon star phase’. *ApJ*, 309, L39–L42.
- Wilson, R. E., 1953. ‘General catalogue of stellar radial velocities.’. *Carnegie Institute Washington D.C. Publication*.
- Yamamura, I., Dominik, C., de Jong, T., Waters, L. B. F. M., & Molster, F. J., 2000. ‘The origin of silicate carbon stars: ISO/SWS observation of V778 Cygni’. *A&A*, 363, 629–639.
- Zacharias, N., Monet, D. G., Levine, S. E., Urban, S. E., Gaume, R., & Wycoff, G. L., 2005. ‘NOMAD Catalog (Zacharias+ 2005)’. *VizieR Online Data Catalog*.
- Zamora, O., Abia, C., Plez, B., Domínguez, I., & Cristallo, S., 2009. ‘The chemical composition of carbon stars. The R-type stars’. *A&A*, 508, 909–922.

Anexo A: T-ReCs Data of Silicate Carbon Stars

Apresentamos a seguir a versão submetida em XX de novembro de 2012 ao Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS) do artigo “T-ReCs Data of Silicate Carbon Stars”, que apresenta os espectros Gemini T-ReCS e a metodologia empregada na obtenção de modelos de envoltório circumstelar empregados às estrelas observadas nas missões de 2007 e 2009.

Resumo

Um dos tipos mais incomuns revelados pelo satélite IRAS foi a classe de objetos ditos estrelas carbonadas ricas em silicatos, cuja a origem e evolução tem sido um mistério desde a sua descoberta. Esses objetos apresentam a emissão de silicato em $9,8\mu m$, apesar de suas fotosferas serem ricas em carbono. A natureza carbonadas dessas estrelas é revelada tanto na região visível como no infravermelho próximo do espectro, enquanto que a natureza oxigenada pode ser constatada na região do infravermelho intermediário e profundo. As interpretações atuais a respeito desses objetos apontam para a existência de um disco circumbinário ou ao redor da estrela companheira, que atua como o reservatório do material rico em oxigênio ejetado via perda de massa, no passado. Neste trabalho, nós investigamos a natureza de 7 estrelas carbonadas ricas em silicato através da análise da estrutura em emissão em $9,8\mu m$ utilizando observações com o espectrógrafo T-ReCS junto com espectros LRS-IRAS a fim de definir uma distribuição teórica de energia espectral obtido através de modelos de transferência radiativa. Alguns comentários a respeito da estrutura em absorção em $15\mu m$ também são explanados.

Anexo B: NSCC – New Scheme of Classification of C-Rich Stars Devised from Optical and Infrared Observations

Apresentamos a seguir o artigo “NSCC – New Scheme of Classification of C-Rich Stars Devised from Optical and Infrared Observations” (De Mello et al., 2009) publicado em novembro de 2009 pelo *Astrophysical Journal* (ApJ), que apresenta mais detalhadamente as definições e a metodologia para a obtenção dos índices de classificação no Novo Sistema de Classificação de Estrelas Carbonadas (NSCC). O trabalho apresentado no artigo foi parte também de minha dissertação de mestrado (De Mello, 2007).

Resumo

Apresentamos um novo sistema de classificação de estrelas ricas em carbono baseado na análise de 51 estrelas AGBs através dos índices de classificação mais bem aceitos na literatura (Keenan, 1993; Morgan et al., 2004). A extensão incorporada aos tradicionais sistemas de classificação, que também é a maior vantagem deste sobre os demais já existentes, é a combinação dos usuais índices que descrevem a fotosfera com novos índices no infravermelho, que permitem uma interpretação do envoltório circumstelar. Portanto, este novo sistema é composto pelos usuais índices de sub-classes espectrais C₂-, j-, MS- e de temperatura, e ainda, pelos novos índices SiC- (abundância de SiC/C.A.) e τ - (opacidade). Os valores dos índices no infravermelho foram obtidos através de simulações do transporte radiativo nos envoltórios circumstelares utilizando a metodologia de Monte Carlo. O conjunto completo dos índices, aplicado para as estrelas da nossa amostra, resultou em um sistema de classificação mais eficiente, uma vez que a análise em um amplo intervalo espectral permite que se obtenha um cenário mais completo para as estrelas carbonadas.