

Notas Técnicas do Laboratório Nacional de Astrofísica

SPARC4 - PROTÓTIPOS DAS CÉLULAS PARA AS CÂMERAS ÓPTICAS

Flávio Felipe Ribeiro

LNA/NT/2022-21

AGO/2022

SPARC4 - PROTÓTIPOS DAS CÉLULAS PARA AS CÂMERAS ÓPTICAS

Flávio Felipe Ribeiro¹

¹*Laboratório Nacional de Astrofísica, fribeiro@lna.br*

Resumo: Desenvolvimento dos protótipos das células para câmeras do SPARC4 e testes iniciais de colagem.

Abstract: Development cell prototype for SPARC4 cameras and bonding initial tests.

Palavras-chave/keywords: câmeras; montagem de células; alinhamento óptico; SPARC4; colagem; adesivo; epóxi / *camera; cell mounts; optical alignment; SPARC4; bonding; adhesive; epoxy*

Submetido em: Jul/2022.

Revisado por:

Revisor 1 – Clemens Darwing Gneiding

Revisor 2 – Décio Ferreira

Revisor 3 – Vanessa Bawden de P. Macanhan de Arruda

Sumário

1. Introdução e histórico	4
2. Projeto óptico das câmeras.....	6
3. Desenvolvimento mecânico do protótipo.....	8
3.1. Montagem <i>poker-chip</i>	9
3.2. Proposta inicial de célula.....	12
3.3. Dispositivo de alinhamento coaxial.....	16
3.4. Resultados preliminares.....	19
3.5. Lentes de teste para ensaio de colagem	20
3.6. Protótipo da câmera	22
3.6.1. Procedimento do alinhamento	23
3.6.2. Procedimento de montagem	24
4. Colagem.....	26
4.1. Escolha do adesivo	27
4.2. Área mínima	28
4.3. Cálculo da espessura do adesivo.....	31
5. Testes	34
5.1. Ensaio térmico.....	34
5.2. Impacto/choque mecânico	36
6. Conclusão	36
7. Referências.....	37

1. Introdução e histórico

O alinhamento entre lentes em um barril é um processo delicado e necessita de um ferramental específico e de precisão. O eixo óptico de uma lente é a linha que une a posição dos raios de curvatura (ou centro de curvatura) das superfícies e para alinhar e posicionar as lentes no local exato, precisaria de todos os graus de liberdade, porém, isso se tornaria muito difícil de se fabricar e com um custo elevado de projeto, usinagem e montagem.

O projeto Sparc4 (do inglês, *Simultaneous Polarimeter And Rapid Camera in 4 bands*) é um polarímetro com câmera *imageadora* rápida em 4 bandas (Rodrigues et al. 2012). Ele foi desenvolvido por pesquisadores de várias instituições e com liderança do INPE para o telescópio de 1,6 m do OPD/LNA/MCTI. Nos últimos anos envolveu o corpo técnico/científico do LNA. O projeto óptico deste equipamento corresponde a 6 grupos, cada um deles compostos por várias lentes montadas em um sistema opto-mecânico, formando os barris. Os 6 barris referem-se ao sistema de auto-guiagem, ao colimador e a 4 câmeras ópticas, sendo que as 3 câmeras das bandas mais vermelhas são exatamente iguais entre si. Estes conjuntos foram projetados por Damien Jones (Jones 2011; 2017) , a partir de uma primeira versão de Rene Laporte. Os barris foram usinados por uma empresa privada.

Foi acordado uma visita ao INPE para as montagens dos barris em uma mesa centralizadora que estava sendo desenvolvida por um pesquisador do INPE, o Dr. Bráulio Albuquerque. A mesa estava em fase de finalização do *software* de automação, entretanto, já era possível fazer as medidas necessárias para este trabalho.

Ao iniciar as medidas para o colimador, foi percebido alguns desvios entre o eixo óptico e mecânico nas lentes. Estes desvios eram próximos aos extremos da tolerância óptica determinada no projeto, todavia, estavam dentro dos requisitos. Iniciou-se então a montagem dos barris com as lentes alinhando o barril com o eixo da mesa centralizadora. Ao colocar a segunda lente do conjunto, constatou-se um desvio muito grande para esta lente em relação a primeira. Os resultados não foram satisfatórios, pois estavam fora das tolerâncias do projeto óptico e não havia nenhum ajuste possível.

Foram desenvolvidos e usinados alguns protótipos com vários ajustes, porém, não foi obtido um bom resultado, pois não atendiam as especificações para alinhamento devido aos erros de fabricação e montagem dos elementos ópticos. Um ponto importante a considerar aqui

foi o fato do curto prazo para utilização desta mesa centralizadora para um melhor alinhamento das lentes.

Neste período, o LNA adquiriu uma mesa centralizadora LAS-P, da empresa *OptoAlignment, Inc.*, cuja precisão é $< 1,0 \mu\text{m}$ (Opto Alignment 2018b). Ela é composta de uma mesa sobre rolamento a ar, alinhada com um microscópio astigmático com fonte de luz laser, que está sobre um trilho com *encoder* linear de precisão micrométrica. Possui mandril para fixação de lentes ou células na mesa rotativa, bomba de vácuo para fixação temporária e fraca de lentes ou células, apalpador para alinhamento de células e ou lentes com relação ao eixo de rotação da mesa rotativa e alguns outros acessórios (Figura 1).

Recentemente o LNA adquiriu um complemento para esta mesa centralizadora. É um interferômetro medidor de distância, DMI (do inglês, *Distance Measuring Interferometer*) (Opto Alignment 2018a). Este complemento é capaz de medir a espessura central das lentes e o espaçamento de ar entre lentes, simplesmente acoplando um colimador com fibra óptica no lugar da objetiva da mesa centralizadora. Com este complemento é possível medir o espaçamento de ar e espessura da lente com precisão de $1,0 \mu\text{m}$.

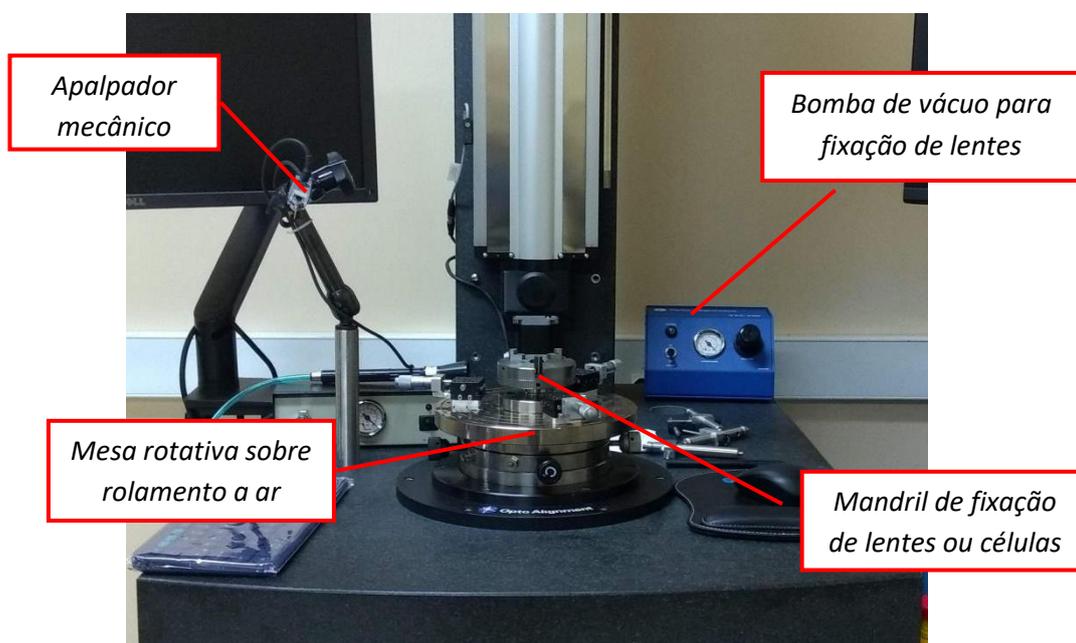


Figura 1 – Máquina de centralização de lentes do LNA. (Arquivo do autor)

Para uma melhor compreensão do texto considere as seguintes definições: **câmera** é o conjunto de lentes que focaliza uma imagem. **Barril** é o conjunto de lentes e seus suportes

inseridos em um cilindro externo. O suporte de cada lente é chamado de **célula**. **Adesivo** é uma substância que une (ou cola) duas substâncias diferentes e resiste à sua separação.

Nessa nota técnica é apresentado o desenvolvimento de um protótipo de célula, que será utilizado no barril das câmeras do projeto SPARC4. Na seção 2 serão discutidas as questões ópticas e de fabricação óptica envolvidas neste projeto.

O tipo de montagem do barril é baseado na montagem *poker chip* (Yoder 2006), sendo considerado o mais preciso. Com base na literatura utilizada, foi projetado uma célula que pudesse se adequar às necessidades do projeto. Verificou-se também as possíveis formas de assento das lentes, ou seja, a interface entre lente e célula e optou-se por um assento toroidal, será tratado este assunto na seção 3.

Para a fixação de lentes nas células e entre células, foram encontradas várias formas na literatura utilizada, e uma delas era a utilização de adesivos. Foram feitos testes com vários adesivos que demonstraram que a melhor opção entre os testados era um adesivo tipo epóxi como será mostrado nas seções 4 e 5. Este adesivo foi utilizado para travar as lentes dentro das células e travar célula com célula no processo de empilhamento que será apresentado.

2. Projeto óptico das câmeras

O projeto óptico foi desenvolvido por Damien Jones (Jones 2011; 2017) baseado em uma primeira versão desenvolvida por René Laporte. As câmeras são baseadas em uma lente telefoto de 3 componentes cujo desempenho em conjunto é eficiente, com a razão focal $f/5$, com um campo moderado e uma pupila posicionada a 50,0 mm à frente da primeira lente, sendo a pupila formada pelo colimador. As lentes são compostas por um duplete com um vidro S-FPL51Y, identificado como CM1.1 e com um vidro BAL15Y identificado como CM1.2, seguido por um espaçamento de ar, depois por um singleto de vidro S-FPL51Y, identificado como CM2, seguido por outro espaçamento de ar e outro duplete com vidro S-FPL51Y, identificado como CM3.1, com vidro de sílica, identificado como CM3.2. A nomenclatura das lentes está como no projeto. Estes vidros são de alta homogeneidade e ótima transmissão no UV (Ohara Corporation 2008), com uma excelente correção cromática em longas faixas espectrais (Jones 2017). A Tabela 1 apresenta um resumo das características físicas e mecânicas destes vidros (Ohara Corporation 2014; 2017a; 2017b).

Tabela 1 - Algumas características físicas dos vidros

VIDRO	S-FPL51Y	BAL15Y	SK-1320 (SÍLICA)
CTE α [$10^{-7}/^{\circ}\text{C}$] -30°C +70°C	136	76	5,5
TEMPERATURA VÍTREA T _g [°C]	448	507	-
COEFICIENTE DE POISSON σ	0,302	0,236	0,170
MÓDULO DE YOUNG E [$10^9\text{N}/\text{m}^2$]	716	783	714
MÓDULO DE RIGIDEZ G [$10^8\text{N}/\text{m}^2$]	275	317	309
DENSIDADE [g/cm^3]	3,66	2,90	2,201

Foram desenvolvidos 2 projetos ópticos para as câmeras, sendo um projeto para a faixa de 380 a 550 nm e um projeto para a faixa de 550-1100 nm. O projeto para a primeira faixa foi identificado como *Blue Camera*. O segundo projeto foi subdividido em 3 subfaixas (IR, GREEN & RED). Cada subfaixa possui o mesmo projeto óptico diferenciando somente no *coating*.

A Tabela 2 apresenta os valores geométricos da câmera azul (*BLUE*) e das câmeras vermelhas (*IR, GREEN & RED*). A mesma tabela também apresenta, em destaque, os valores de separação entre vértices (espaçamento de ar) entre as lentes. Um esboço das duas câmeras é apresentado na Figura 2 com os espaçamentos entre lentes destacado, as interfaces internas dos dubletos e identificação dos grupos de lentes para cada banda espectral.

Tabela 2 - Dimensões das lentes das câmeras BLUE e RED.

Superfície da Lente BLUE	Raio de curvatura [mm]	Espessura [mm]	Superfície da Lente RED	Raio de curvatura [mm]	Espessura [mm]
CM1B1	53,92	15,00	CM1R1	53,92	15,00
CM1B2	-38,04	10,00	CM1R2	-35,49	10,00
CM1B3	32,45	2,193 ± 0,02	CM1R3	32,45	2,369 ± 0,02
CM2B1	34,42	18,00	CM2R1	34,42	18,00
CM2B2	-109,04	4,994 ± 0,10	CM2R2	-109,04	4,245 ± 0,10
CM3B1	28,32	9,00	CM3R1	28,32	9,00
CM3B2	25,44	11,00	CM3R2	28,66	11,00
CM3B3	16,64	-	CM3R3	16,64	-

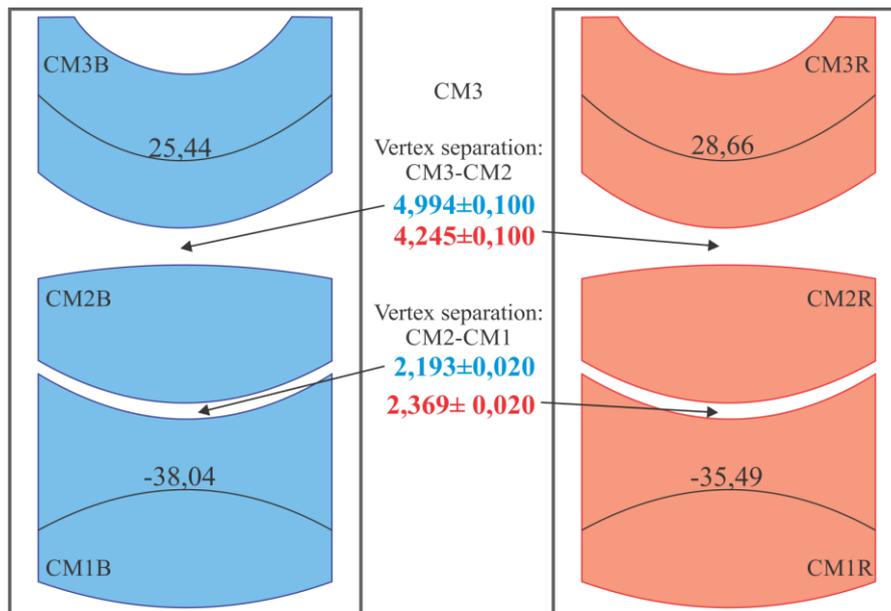


Figura 2 – Espaçamento entre vértices das lentes das câmeras e escopo do barril (Arquivo do autor).

3. Desenvolvimento mecânico do protótipo

O eixo óptico de uma lente é definido como a linha que conecta os centros de curvaturas das superfícies, como pode ser visto na Figura 3. Para uma lente perfeita, a centralização das superfícies é feita para ambas as superfícies, asseguramos que o eixo óptico coincida com o eixo mecânico de simetria da lente, mas não ficando vinculado ao mesmo. Desta forma, com esta definição, o eixo óptico fica independente do processo de fabricação.

No processo de fabricação de lentes, se fazem as superfícies esféricas primeiro, a lente é alinhada opticamente e, então, é feito o desbastamento lateral da lente até o diâmetro desejado. Esta fabricação não é perfeita, entretanto, ela pode ser executada dentro de algumas tolerâncias (erro de máquina). Algumas lentes podem apresentar um desalinhamento (deslocamento e/ou inclinação) do eixo óptico com relação ao eixo mecânico, formando uma lente em cunha como podemos ver na Figura 3. Para compensar este desalinhamento, usamos um assento para a primeira superfície, diminuindo os graus de liberdade, como será visto na subseção 3.1.

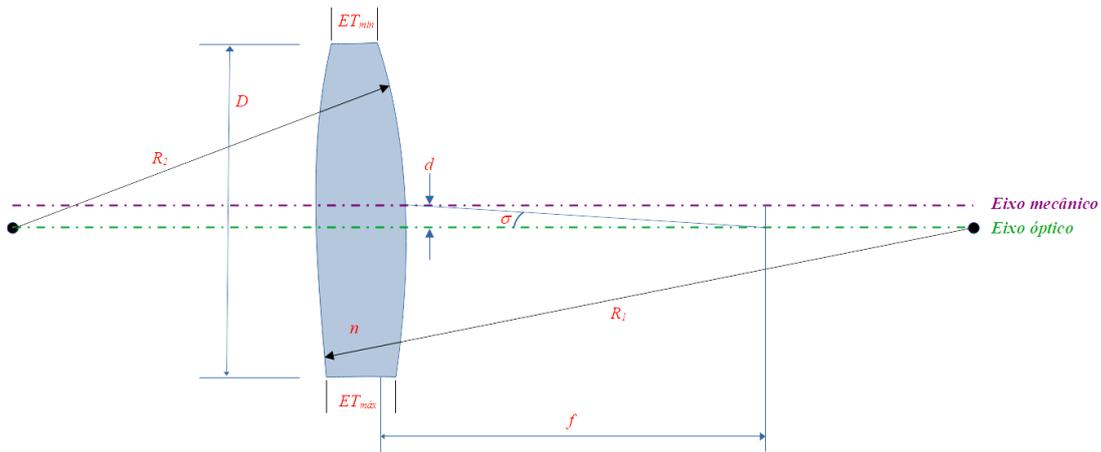


Figura 3 – Definição de eixo óptico (desvios exagerados para melhor visualização) [Arquivo do autor]

No levantamento bibliográfico sobre alinhamento e montagem de lentes, encontramos quatro tipos básicos de montagem: *drop-in assembly*; *lathe assembly*; *modular assembly & poker-chip assembly* (ou *subcell*), sendo o método *poker-chip* o utilizado para os casos que exigem maior precisão (Bayar 1981; Fischer 1991; R. E. Hopkins 1976; 1980; Yoder 2006). Também foram encontrados 4 tipos de assento de lentes: canto “vivo”, tangencial, esférico e toroidal, sendo o primeiro de mais fácil usinagem e o último mais difícil. O assento canto vivo é o mais comum, porém a quina pode possuir um pequeno raio, de cerca de 0,05 mm (Yoder 1995), quase se aproximando do assento toroidal, cuja curvatura é maior. O assento tangencial é uma superfície cônica, não é usada em superfícies côncavas e é de fácil usinagem. Na linha de contato com a lente, tende-se a criar uma tensão menor que no canto vivo. Para maiores detalhes sobre cada assento, consultar (Yoder 2006).

3.1. Montagem *poker-chip*

Neste método, as lentes são montadas em células individuais e fixadas nas mesmas de forma que o eixo óptico fique paralelo ao eixo mecânico. Em seguida, as células são empilhadas (como se faz com as fichas do *poker*) e posicionadas de forma a sobrepor os eixos ópticos com precisão. Então, as células são unidas por algum adesivo estrutural, tipo epóxi.

Pode ser visto na Figura 4a que, se centrar a lente em cunha pelo eixo mecânico de sua borda externa, o eixo óptico da lente estará inclinado em relação ao eixo mecânico. Isso pode ocorrer quando a célula da lente não possui um espaçamento entre a lente e o diâmetro interno do barril. É visto também que pode rotacionar a lente sobre a superfície 1, cujo ponto de giro é

o centro de curvatura C_1 , até que o eixo óptico fique paralelo ao eixo mecânico, como podemos ver na Figura 4b.

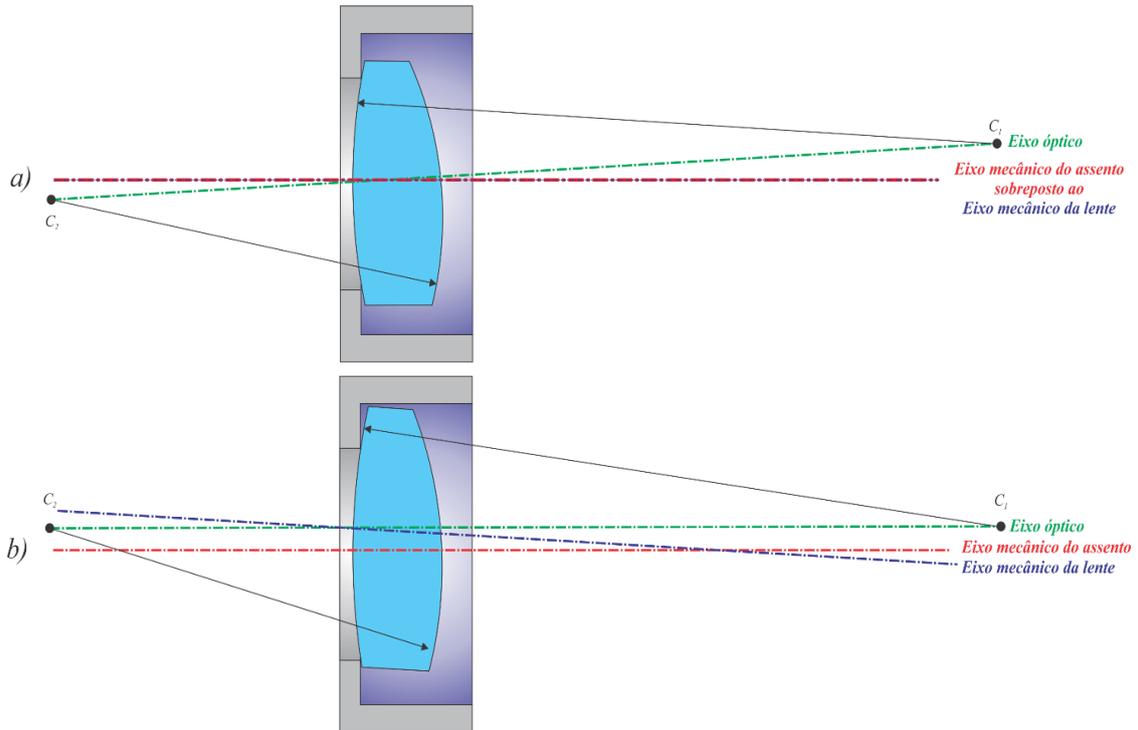


Figura 4 – Lente em cunha alinhadas na célula a) pelo eixo mecânico b) pelo eixo óptico (fora de escala) [Arquivo do autor].

Se considerar duas lentes com “defeitos” de fabricação (R. E. Hopkins 1976), montadas e alinhadas da forma acima, tem-se os eixos ópticos paralelos um ao outro, como pode ser visto na Figura 5a. Para alinhar os eixos ópticos coaxialmente, só é preciso deslizar uma célula sobre a outra, como mostra a Figura 5b.

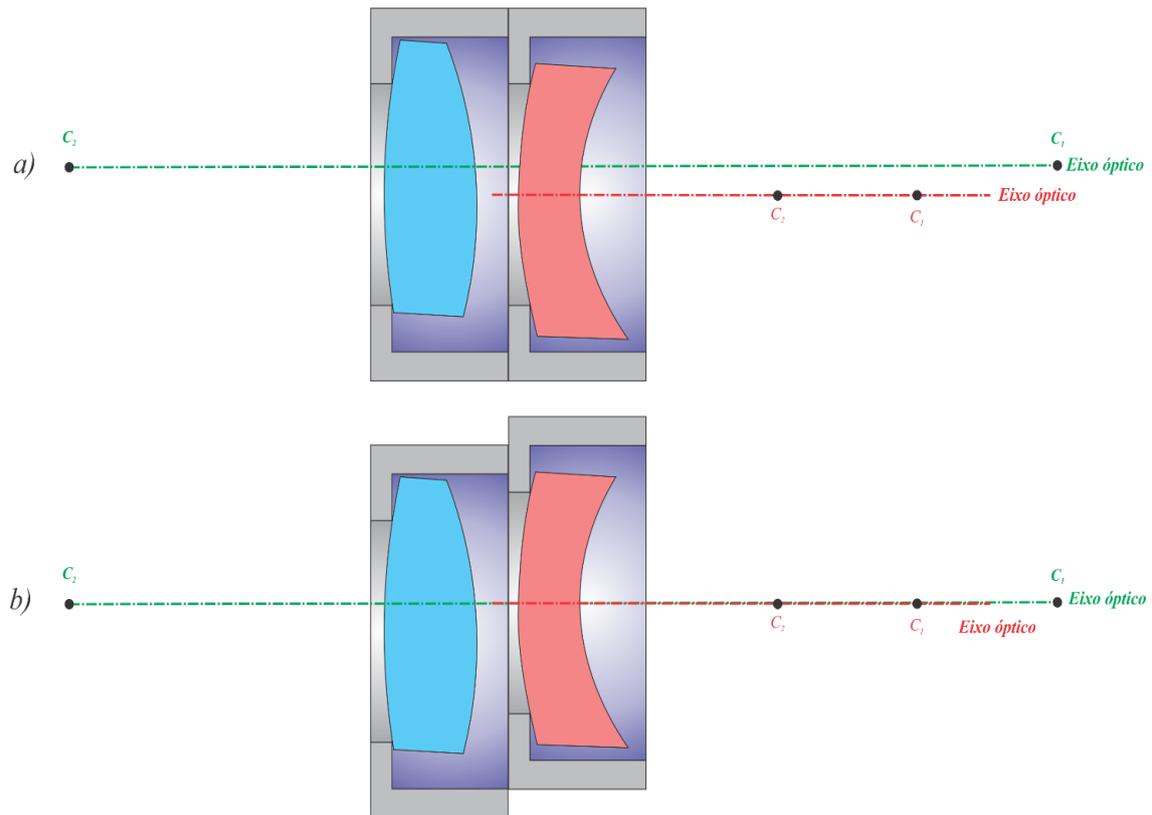


Figura 5 – Lentes em cunha perfeitamente alinhadas (fora de escala). [Arquivo do autor]

Um problema para este sistema de montagem é o distanciamento entre lentes. Para resolver este problema é possível colocar espaçadores calibrados entre as células, distribuídos uniformemente para não inclinar as células entre si, para o caso em que o espaçamento estiver menor. Para o caso em que o espaçamento for maior que o nominal, é preciso fazer um retrabalho na célula ou uma nova com valor corrigido.

O distanciamento entre lentes neste sistema depende do diâmetro do assento, do tipo de assento e do raio de curvatura da lente. O cálculo é baseado na flecha de um arco, como podemos ver na Figura 6a. e pela Eq. 1.

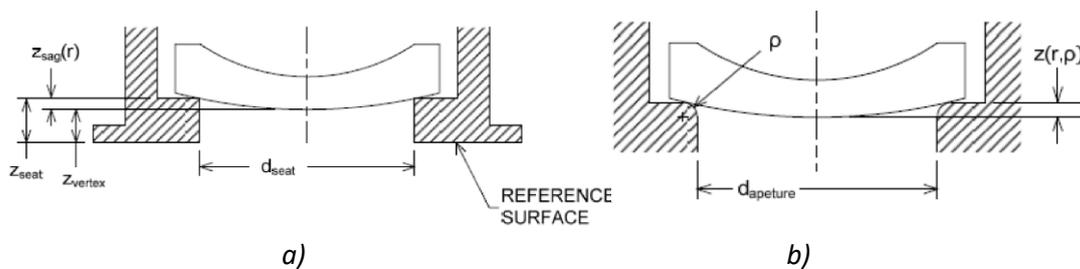


Figura 6 – Arranjo para calcular distância entre uma superfície de referência e o vértice da lente a) assento vivo b) assento toroidal [Adaptado de (C. L. Hopkins e Burge 2011)]

$$z_{vertex} = z_{seat} - R_{lente} + \sqrt{R_{lente}^2 - \left(\frac{d_{seat}}{2}\right)^2} \quad 1$$

Na Figura 6b, pode-se ver o assento toroidal de forma que a Eq. 1 se transforma em

$$z_{sagTor} = R_{lens} + \rho - \sqrt{(R_{lente} + \rho)^2 - \left(\frac{d_{aperture}}{2} + \rho\right)^2} \quad 2$$

Os valores obtidos pelas equações 1 e 2 são utilizados para referenciar as dimensões das células em relação ao raio de curvatura e diâmetro das lentes, bem como o espaçamento entre lentes explicado anteriormente.

3.2. Proposta inicial de célula

A partir da escolha do método de montagem acima, foi projetada uma célula modelo que pudesse atender aos requisitos das câmeras da SPARC4. A célula possui um assento toroidal para as lentes com um pequeno reservatório (câmara) para um adesivo. Este modelo é baseado em (R. E. Hopkins 1976; 1980).

Para os testes iniciais do método de assento de lentes, foram utilizadas algumas lentes oftalmológicas adquiridas no comércio local, com diâmetro $38 \pm 1 \text{ mm}$. As curvaturas das superfícies não foram medidas, porém uma das superfícies era côncava, como ilustrado na Figura 7.

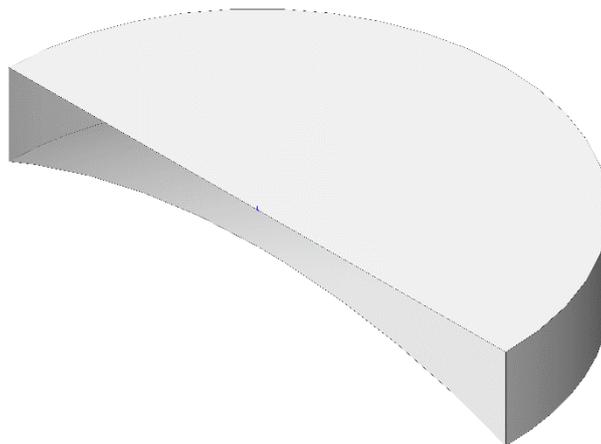


Figura 7 – Lente oftalmológica para teste inicial (fora de escala)[Arquivo do autor].

Considerando o perfil da lente na Figura 7, foi projetada uma célula com assento toroidal, como pode ser visto, em corte, na Figura 8. Nela pode-se ver o assento e alguns furos, explicado mais adiante. Na Figura 9 há uma foto de uma das células usinadas e com a lente oftalmológica.

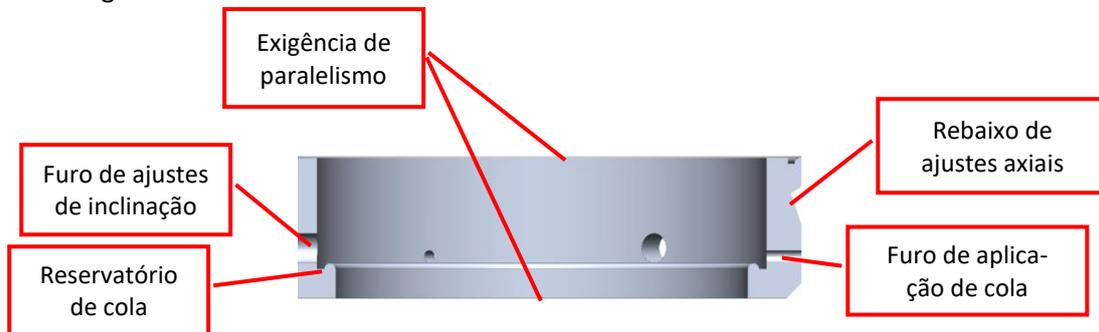


Figura 8 – Vista em corte da célula com assento toroidal. [Arquivo do autor]



Figura 9 – Foto da célula projetada com a lente. [Arquivo do autor]

Na Figura 10a pode ser visto uma simulação do deslocamento da lente na célula e a inclinação dos eixos. À direita da Figura 10b, um dos parafusos no limite de ajuste para aquela inclinação. A lente se mantém sobre a superfície toroidal pela força gravitacional.

O posicionamento da lente é feito por posicionadores com rosca M3, com ponta de nylon e com mola (Figura 11). (Milby e Burge 2011) apresentam o mesmo método utilizado aqui em um experimento onde utilizaram vários tipos de posicionadores.

Após o ajuste de inclinação, é preciso fixar a lente na posição. Para fixação, foi escolhido o uso de adesivos, de forma que os posicionadores sejam temporários e ficarão na célula apenas até a completa cura do adesivo. Na célula foram feitos três furos espaçados de 120° , próximos a superfície toroidal para aplicação de adesivo. A aplicação é feita através de seringas e pontas de aplicação (uma espécie de agulha hipodérmica) com diâmetro externo de 0,9 mm. Mais detalhes sobre o adesivo, aplicação e cura serão mostrados na seção 4.

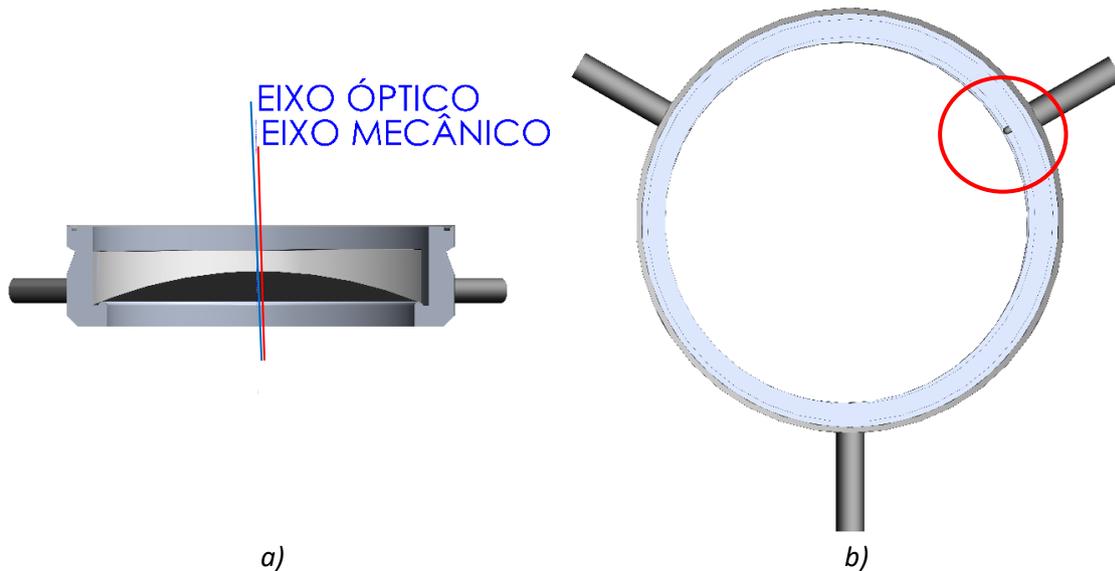


Figura 10 – Deslocamento de parafuso de ajuste e inclinação do eixo óptico em relação ao mecânico.



Figura 11 – Posicionador com ponta nylon com mola

O sistema de assento acima corrige somente o erro de inclinação do eixo óptico, deixando assim todos os eixos paralelos, mas não permite o ajuste de coaxialidade, o que também é necessário, como mostrado na subseção 3.1 e Figura 5.

Para o ajuste de coaxialidade dos eixos, utilizou-se as superfícies planas das células, colocando tolerância de paralelismo e sobrepondo as mesmas. Nas células, há um recorte lateral em ângulo, sua função é fazer o ajuste de translação (coaxialidade). O nosso modelo de barril de teste é mostrado na Figura 12 e Figura 13.

Na Figura 13 são detalhadas um pouco mais as células sobrepostas indicando os locais de adesivo. Na lateral da célula foi feito um rebaixo em ângulo para posicionar as células de forma a não permitir movimento axial. Mais detalhes na próxima subseção.

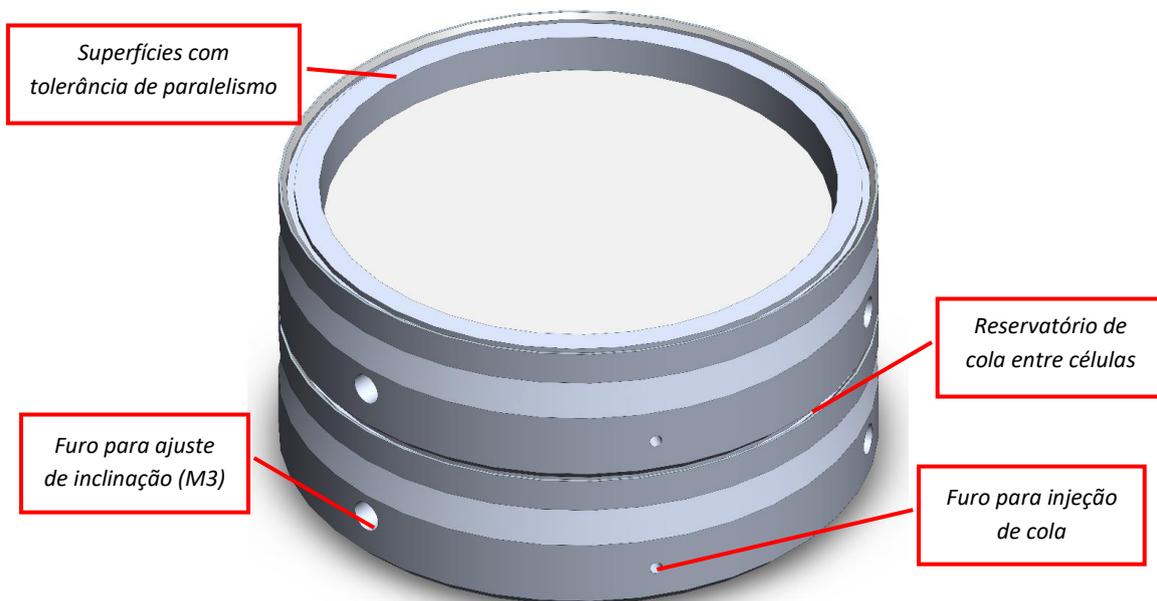


Figura 12 – Vista isométrica do empilhamento das células do teste inicial.

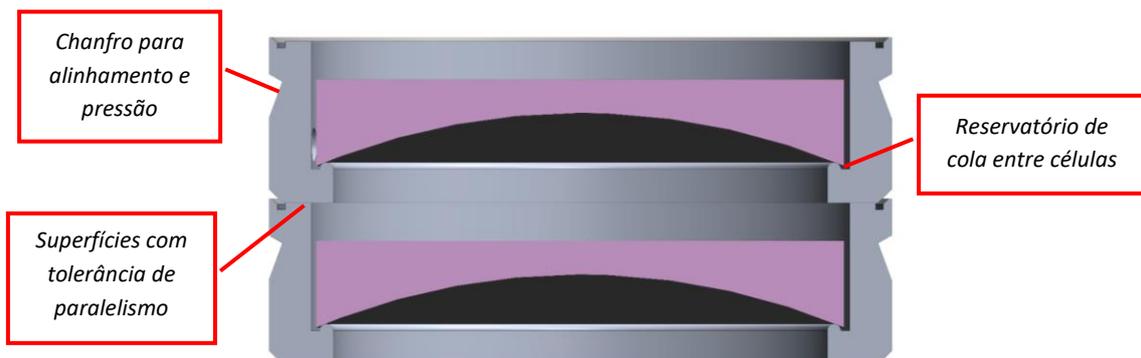


Figura 13 – Perfil dos reservatórios de adesivos.

Na Figura 14 pode ser vista uma foto das células sobrepostas e coladas.



Figura 14 – Foto da sobreposição das células coladas entre si.

3.3. Dispositivo de alinhamento coaxial

Para fazer o alinhamento coaxial, foi projetado um dispositivo de ajuste simples, porém preciso. Este dispositivo, com componentes do laboratório de metrologia, é completado por 3 peças usinadas, como mostra a Figura 15.

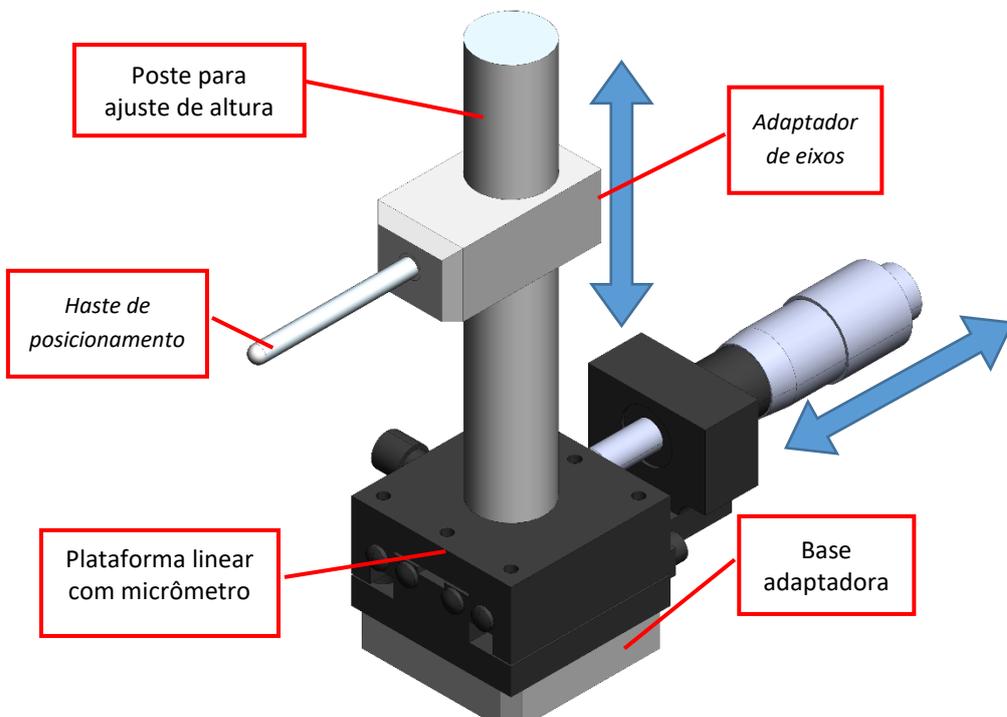


Figura 15 – Dispositivo de ajuste de posição das lentes(Arquivo do autor).

Um dos componentes é uma plataforma linear, com micrômetro e com percurso total de 12,7 mm, onde cada volta desloca 0,5 mm. Um poste e um grampo de 90° (adaptador de eixos) são colocados sobre a plataforma linear de forma que possa ser feito um ajuste de altura para várias células sobrepostas, como pode ser visto na Figura 16. A haste de posicionamento é aplicada sobre o rebaixo em ângulo na célula superior (ver Figura 16), de forma que a força aplicada seja distribuída na direção do eixo e entre as células para melhor posicionamento entre as mesmas.

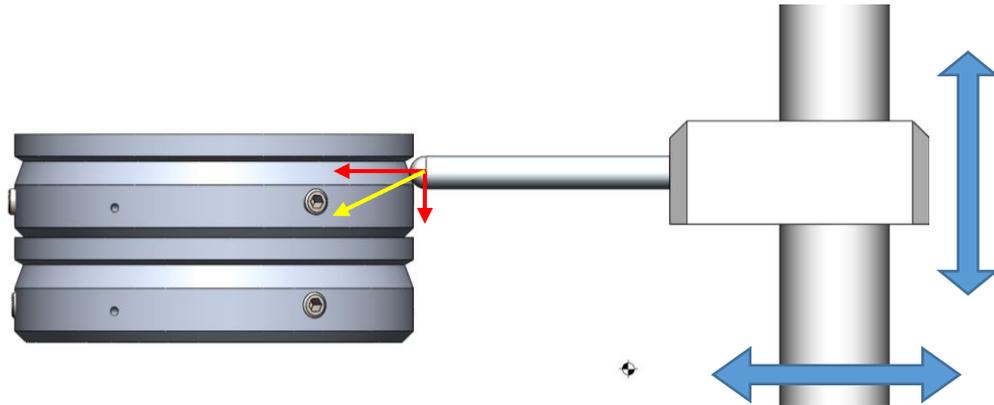


Figura 16 – Distribuição de forças no dispositivo de ajuste de posição das lentes(Arquivo do autor).

No adaptador de eixos há uma haste de aço inox com ponta esférica (Figura 17)

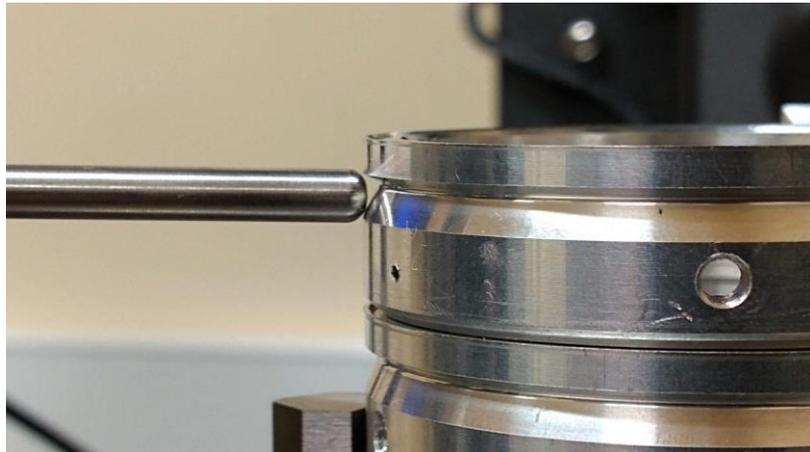


Figura 17 – Distribuição de forças no dispositivo de ajuste de posição das lentes(Arquivo do autor).

A plataforma linear é fixada por um adaptador na plataforma de rotação da máquina de centralização (Figura 18). Utilizam-se 3 dispositivos como este, onde a haste é posicionada sobre a abertura/rasgo/chanfro lateral da célula superior.

A Figura 18 e Figura 19 mostram a montagem de três destes dispositivos, alinhados a 120° cada sobre a mesa rotativa do equipamento de alinhamento do LNA.

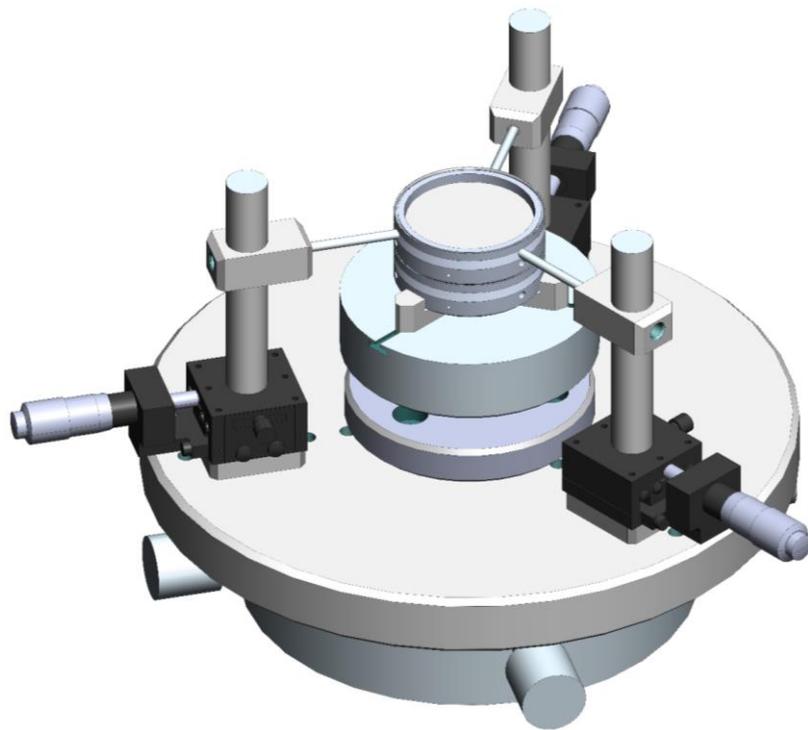


Figura 18 – Conjunto de lentes montados para colagem das células (Arquivo do autor).

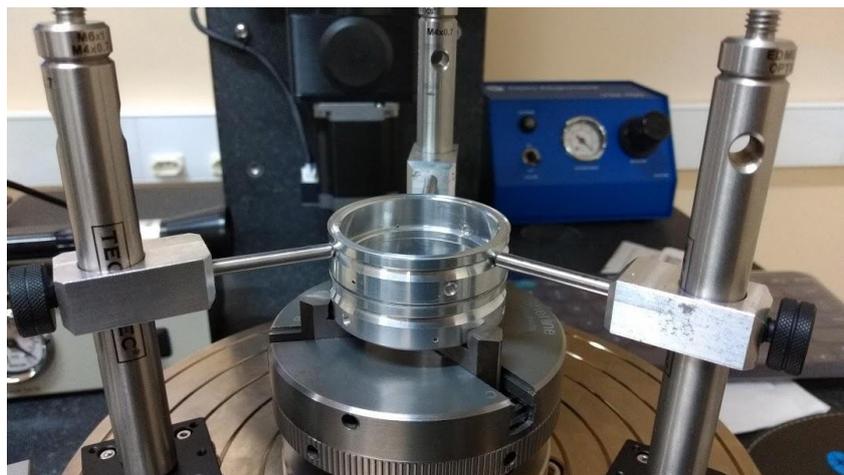


Figura 19 – Foto do conjunto de lentes montados para colagem das células (Arquivo do autor).

Foram feitas várias iterações entre os 3 dispositivos até que os eixos ópticos estivessem sobrepostos idealmente, ou seja, se aproximassem ao máximo, o que não ocorreu devido a imprecisão das lentes oftalmológicas utilizadas.

3.4. Resultados preliminares

As células usinadas atenderam as exigências iniciais de tolerância. As medidas geométricas estavam dentro das tolerâncias exigidas conforme relatório de qualidade enviado. Um outro fator a considerar é a dimensão de 0,7 mm do rebaixo do reservatório do adesivo e o raio de perfil da superfície toroidal de 0,5 mm. Foi preciso fabricar uma ferramenta específica em nossa oficina para este processo de usinagem. Observa-se também que as dimensões dos furos para aplicação de adesivo estão em dimensões adequadas considerando a viscosidade do adesivos utilizados. A quantidade de furos também foi adequada e a distribuição do adesivo foi bem uniforme dentro do canal.

O sistema de alinhamento angular funciona bem após várias iterações, considerando que as lentes oftálmicas não são de precisão e sua massa pequena. Os ajustes de inclinação observados na mesa centralizadora foram bons, mesmo não atingindo os valores de requisito superdimensionado para esta situação.

O dispositivo de posicionamento entre células funciona, porém com mais iterações para se chegar a valores satisfatórios, bem como o consumo de tempo em relação ao alinhamento da lente dentro da célula. A variação de posição da superfície superior só ocorreu quando um esforço a mais foi feito em um dos dispositivos. Quando a posição retornava para um ponto de tensão menor, a superfície retornava para a posição, dentro de alguns *microns*. Outras considerações relevantes são:

- Os furos para aplicação de adesivo precisam ser usinados com cuidado e esta observação deve ser escrita no desenho mecânico.
- A quantidade de furos foi adequada para o adesivo utilizado. Para um adesivo mais viscoso é preciso uma quantidade maior de furos.
- Os furos dos parafusos M3 ficam com muita folga, sendo preciso ajustar a rosca para diminuir a folga.

Com os resultados obtidos, foi realizado um experimento melhorado e verificamos outras formas de alinhamento entre células, sendo um dispositivo de posicionamento no topo

da célula e mudanças na sequência de montagem-colagem. Apesar das altas exigências de tolerâncias, a oficina mecânica do LNA usinou todas as células com a qualidade desejada.

Como será visto com mais detalhes na seção 4, o adesivo não escoou para a área útil da lente e não houve movimentação perceptível na lente após a cura do adesivo. Não houve descolamento nem outros problemas visíveis.

3.5. Lentes de teste para ensaio de colagem

Para seguir com os ensaios para esta proposta, foram enviadas para fabricação em BK7, três lentes diferentes, com dimensões aproximadas das lentes do projeto da Sparc4. Uma das superfícies é plana e a outra convexa com raio aproximado (valor arredondado) do raio de curvatura das lentes. Na Tabela 3, a coluna “Raio da superfície” indica o raio de curvatura indicado do projeto correspondendo a primeira superfície no caminho óptico de cada lente. A coluna “Raio da lente” corresponde ao valor inteiro mais próximo da coluna anterior. A terceira coluna é a espessura total das lentes, considerando que há dubletos no projeto como as lentes CM1 e CM3. A quarta coluna é o diâmetro de cada lente, sendo o mesmo especificado no projeto de 38,0mm.

O erro de cunha (*wedge*) ficou $< 5'$. Os fatores que influenciaram na escolha de uma lente plano-convexa foram: a facilidade de fabricação, o baixo custo, a massa aproximada da lente do projeto.

Tabela 3 - Especificações das lentes de testes.

<i>Lente</i>	<i>Raio da superfície [mm]</i>	<i>Raio da lente ($\pm 0,1$) [mm]</i>	<i>Espessura ($\pm 0,5$) [mm]</i>	<i>Diâmetro ($\pm 0,5$) [mm]</i>
CM1B1	53,92	54,0	25,0	38,0
CM2B1	34,42	34,0	18,0	38,0
CM3B1	28,32	28,0	20,0	38,0

A Figura 20, Figura 21 e Figura 22 apresenta as medidas das lentes.

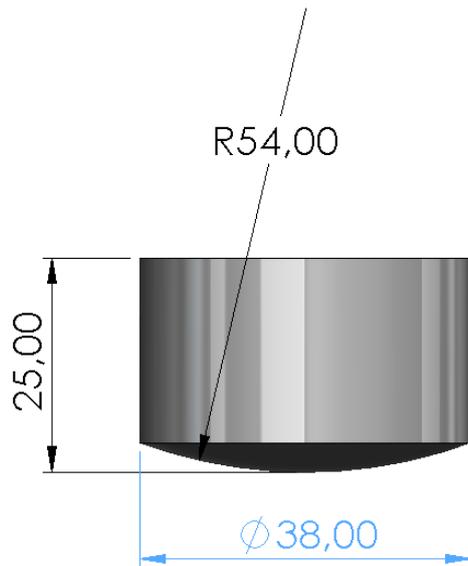


Figura 20 – Lente de teste CM1(Arquivo do autor).

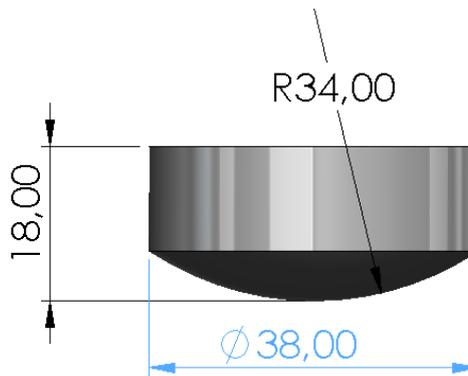


Figura 21 – Lente de teste CM2(Arquivo do autor).

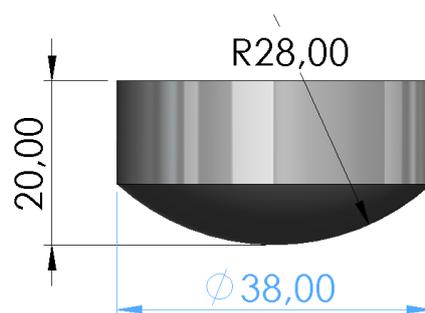


Figura 22 – Lente de teste CM3(Arquivo do autor).

Com estas lentes de testes foi possível verificar o procedimento de confecção e montagem das células e barris preservando as lentes originais do projeto e desta forma verificar:

- Deslocamento da lente sobre a superfície toroidal através dos posicionadores, considerando somente sua massa como pré carga;
- Verificação da aderência dos adesivos no vidro antes e após teste térmico;
- Verificação da aderência dos adesivos em alumínio anodizado;
- Variação do posicionamento da lente após cura do adesivo, retirada dos parafusos de alinhamento e teste térmico;
- Verificação de um procedimento para a montagem do barril final;
- Verificação do alinhamento entre as células, precisão e alterações no posicionamento após cura do adesivo;
- Verificação do descolamento após variações de temperatura.

3.6. Protótipo da câmera

Com as lentes de testes e os primeiros ensaios de alinhamento e colagem, foi projetado um protótipo para as câmeras da Sparc4 (Figura 23).

Utilizando as equações (1) e (2), foram feitos os cálculos para o posicionamento das lentes nas células, no caso, de forma a manter o vértice de cada lente no plano inferior da célula, como pode ser visto na Figura 23. O plano superior foi calculado de forma a manter a distância do vértice da lente superior e da superfície plana da lente inferior com as distâncias do projeto óptico da câmera da Sparc4.

Pela Figura 23 é visto um volume de adesivo (em verde), este volume é de aproximadamente 0,25 ml, totalizando 1,25 ml de adesivo considerando todas as regiões com adesivo.

Este protótipo é para posicionamento das lentes e não do barril completo das lentes, como definido na introdução. O conceito deste projeto é que depois de montado e colado, o conjunto da Figura 23, seja colocado dentro de um barril.

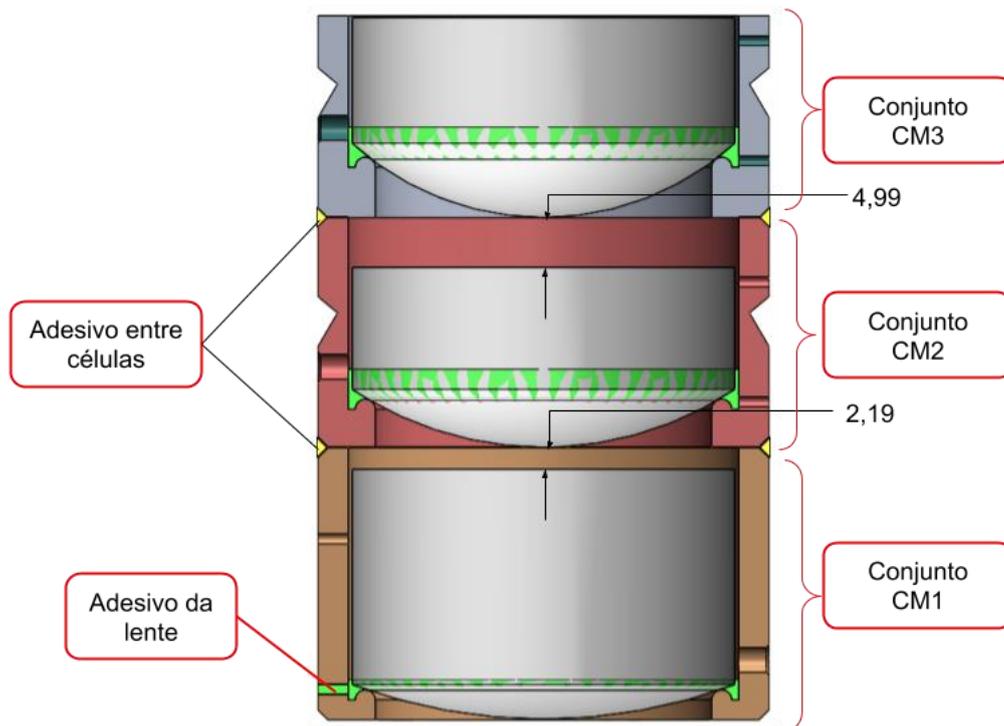


Figura 23 – Vista em corte do empilhamento das células do protótipo(Arquivo do autor).

3.6.1. Procedimento do alinhamento

Para a montagem das lentes foi feito o alinhamento da célula CM1 na mesa rotativa da máquina centralizadora. Através de um apalpador, eliminou-se a descentragem (Figura 24a) e inclinações (Figura 24b) da célula utilizando o *software* da máquina de alinhamento. Iniciou-se com a descentragem e caso o valor alcançado não seja satisfatório, trocou-se para o alinhamento de inclinação e retorna-se para o alinhamento de descentragem. Este procedimento foi feito até minimizar os erros.

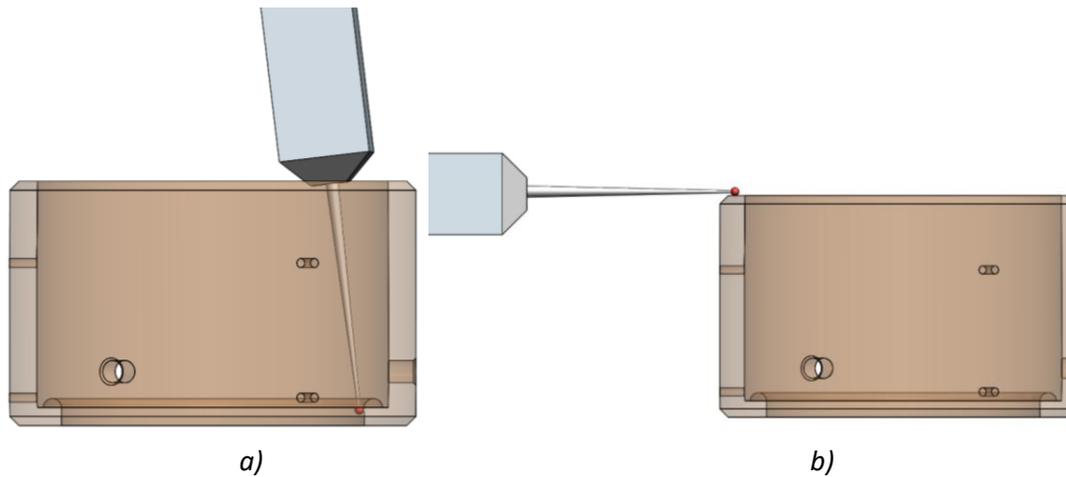


Figura 24 – Ilustração do alinhamento do conjunto CM1 a) batimento interno, b) batimento superior (Arquivo do autor).

3.6.2. Procedimento de montagem

Após o alinhamento da célula, inseriu-se a lente de teste CM1 com auxílio de uma ventosa a vácuo (Figura 25). Colocou-se então os posicionadores (Figura 11) e com auxílio do *software* de alinhamento da máquina centralizadora, encontrou-se os centros de curvatura e posicionou-se a lente até minimizar o desvio da imagem.

A Figura 26 mostra a montagem na mesa centralizadora do empilhamento do conjunto CM1 com o conjunto CM2. Fez-se um alinhamento manual no início e depois foram montados os dispositivos de posicionamento. Primeiro foi alinhada a célula axialmente como feito no conjunto CM1. Nesta situação, não foi possível fazer o alinhamento angular, pois considerou-se o primeiro conjunto como “perfeito”. Os defeitos de usinagem da célula CM2 são compensados na inclinação da lente e com deslocamento radial da célula.

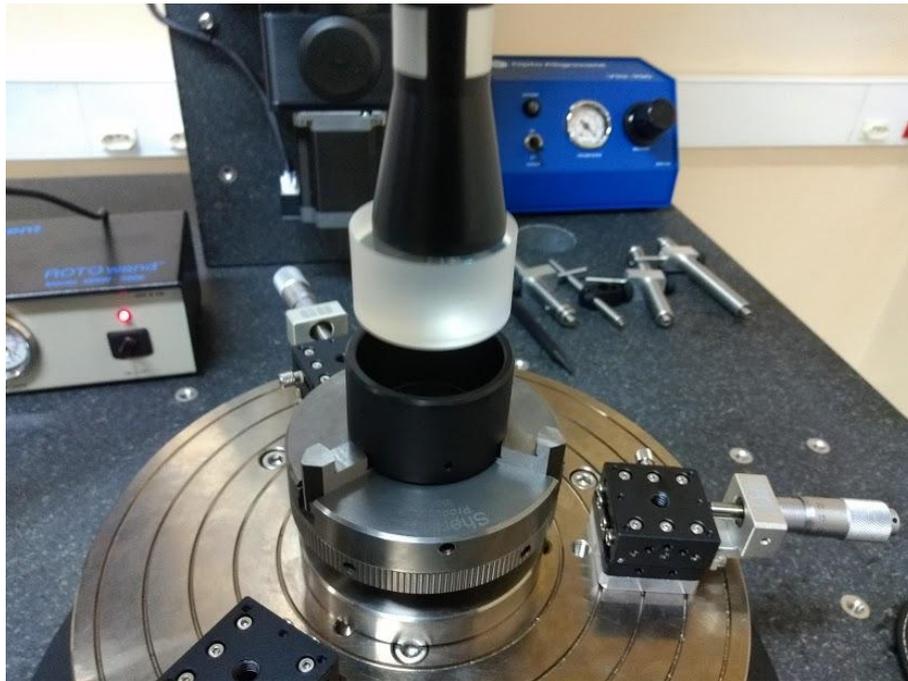


Figura 25 – Montagem conjunto CM1 utilizando a ventosa a vácuo (Arquivo do autor).

Neste momento pode-se aplicar adesivo em três pontos entre as células e fazer a cura do mesmo. O objetivo é manter o posicionamento entre estas células, para então, proceder com o posicionamento da terceira lente.

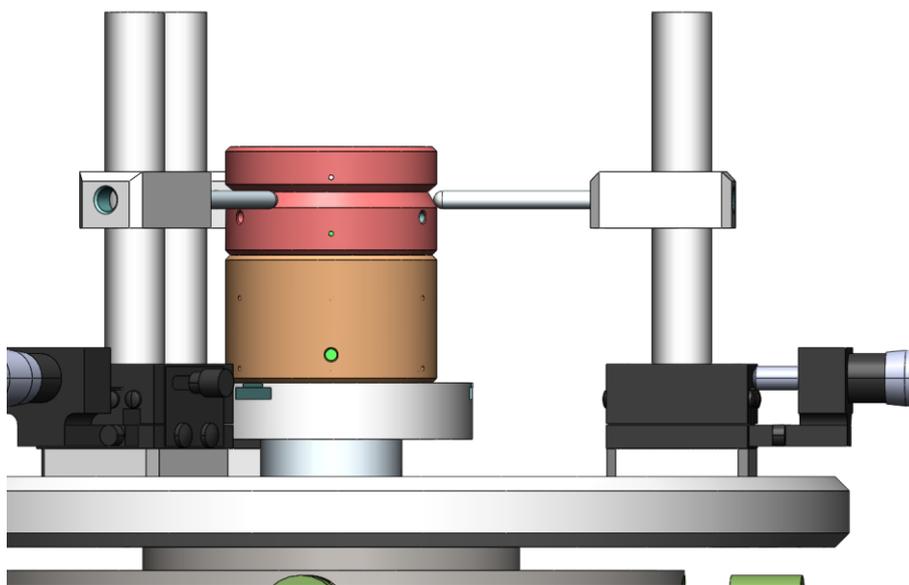


Figura 26 – Modelo 3D da montagem do conjunto CM1 com conjunto CM2 (Arquivo do autor).

Já na Figura 27, é visto o empilhamento do conjunto CM3 sobre o conjunto CM1 com o conjunto CM2. A célula deverá ser alinhada pelo diâmetro interno do assento, para isso, os dispositivos de alinhamento devem ser ajustados para a altura do conjunto CM3. Em seguida é introduzida a lente CM3 nesta célula e os três posicionadores. Com auxílio do programa da mesa centralizadora é feito o alinhamento dos centros de curvatura desta lente.

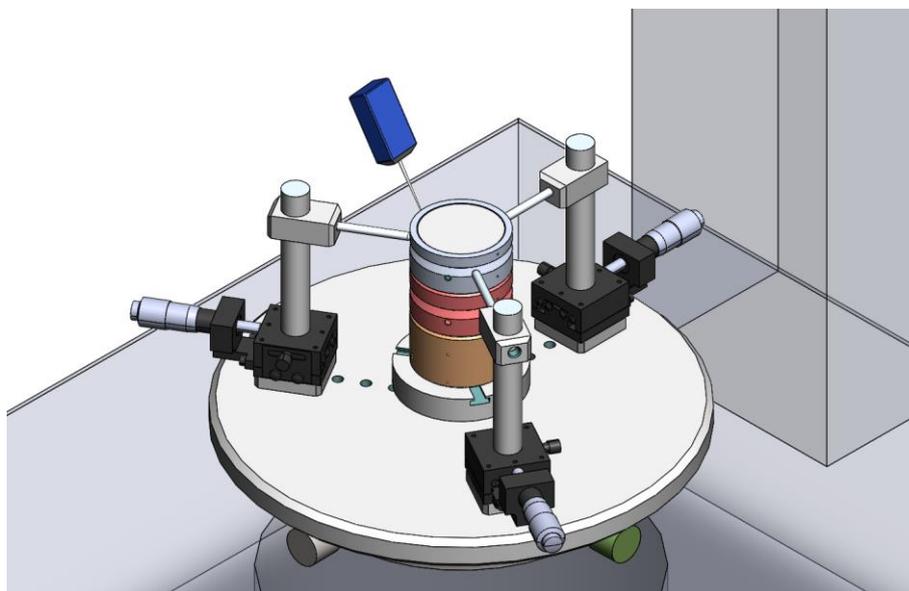


Figura 27 – Modelo 3D da montagem conjunto CM1 com conjunto CM2 com conjunto CM3 (Arquivo do autor).

Após todos os procedimentos de posicionamento, inicia-se a aplicação do adesivo para as lentes e entre células.

4. Colagem

Na literatura utilizada, foram encontrados várias formas de fixação mecânica de lentes: anel roscado, *o-rings*, clipe com efeito mola, conjuntos de parafusos, entre outros (Jim H. Burge 2011; Lamontagne e Desnoyers 2019; Vukobratovich 1991; Yoder 2006).

Uma outra forma encontrada é a utilização de adesivos, que são fáceis de trabalhar e muito eficientes, desde que o adesivo escolhido tenha um força adequada e propriedades compatíveis com a aplicação, por exemplo: a temperatura de operação/trabalho do sistema onde ele será aplicado (Daly e Hawk 2017). Neste protótipo optou-se por realizar a fixação das lentes nas células e das células entre si com um adesivo.

O primeiro passo é a seleção do adesivo apropriado para a aplicação e este não é um trabalho trivial e normalmente é esquecido. Depois se prioriza as propriedades do adesivo. Muitas vezes a escolha do adesivo é baseada no conhecimento de experiências de casos de sucesso e frequentemente se torna a mais alta prioridade, principalmente se no projeto houver semelhanças, de forma a diminuir os riscos (Daly e Hawk 2017). Testes de eficiência tem mostrado que uma boa seleção dos adesivos fornece um alto nível de estabilidade no alinhamento durante a cura, depois de um ciclo térmico e numa extensa faixa de temperaturas (Lamontagne et al. 2013).

O adesivo mais comum é o epóxi, que é um polímero orgânico termo endurecível, ou seja, ele endurece mais rapidamente quando aquecido. Várias características podem ser alteradas dependendo da composição química, mas em geral suas características são: alta força, conformidade moderada e limitada faixa de temperatura onde as propriedades são estáveis. A maioria é feita em duas partes, uma resina e um catalisador cuja proporção é determinada pelo fabricante.

Os elastômeros (RTV – *room temperature vulcanization*) não são caracterizados como adesivos estruturais, porém usar um elastômero para fixar uma lente em um suporte é uma técnica de montagem simples que requer baixas tolerâncias de fabricação da borda da lente e do barril ou célula. Os componentes com cura UV são especialmente rápidos para a montagem. O elastômero é tipicamente injetado com uma seringa pelos furos de injeção na montagem. As lentes devem ser centralizadas antes da injeção (Lamontagne et al. 2013). A escolha do adesivo deve considerar também a desgaseificação e danos a superfície (Daly e Hawk 2017). A montagem elastomérica é de difícil desmontagem se for preciso refazer alguma parte mecânica onde foi aplicada. Se a camada de elastômero for grossa o suficiente, a lente irá atermalizar na direção radial já o epóxi deformará para compensar as mudanças de dilatação térmica do material.

4.1. Escolha do adesivo

Na Tabela 5 há algumas características básicas dos três adesivos disponíveis para esta proposta. Os três adesivos foram testados. Os dados foram coletados no *site* dos fabricantes.

O adesivo P-92 é de uso geral, servindo também como selante ou material de enchimento. Sua viscosidade é alta e isso ajuda a não espalhar com facilidade. A cura ocorre através da exposição do adesivo a luz ultravioleta de 10 a 15 *min*, isso indica que a montagem do barril pode ser mais rápida. A contração é nula durante a cura, sendo uma característica

interessante por não gerar tensão na lente (Summer Optics 2020). Este adesivo nos foi indicado pelo Dr. Braulio Albuquerque/INPE.

O adesivo Epo-tek 301-2 é um adesivo de 2 componentes, muito utilizado em projetos com fibras ópticas, agrupamento de fibras, terminação em ferrule, lâminas de vidro em ranhuras. Possui boa adesão em vidros, quartzo e metais. Possui baixa desgaseificação sendo aprovada pela NASA (EPOTEK 2019).

O adesivo Sylgard 184 é um elastômero de 2 componentes com várias aplicações na indústria eletrônica (encapsulamento de LED's, sensores, conectores, etc) (The Dow Chemical 2017). Utilizado também para cimentar duas lentes (dubleto), sendo o adesivo indicado por (Jones 2017) para os dubletos do projeto.

Tabela 4 - Características básicas dos adesivos disponíveis para esta proposta.

<i>Adesivo</i>	<i>Cura</i>	<i>Tipo</i>	<i>Tempo de cura [~20°C]</i>	<i>CTE[x10⁻⁶]</i>	<i>Força de cisalhamento ou de tração [kg/cm²]</i>
<i>Summer Optics P92</i>	<i>Luz UV</i>	<i>1 componente</i>	<i>1h</i>	<i>63,00</i>	<i>246,07</i>
<i>Epotek 301-2</i>	<i>Temp. ambiente</i>	<i>2 componentes</i>	<i>48h</i>	<i>61,00</i>	<i>140,61</i>
<i>Sylgard 184 (RTV)</i>	<i>Temp. ambiente</i>	<i>2 componentes</i>	<i>48h</i>	<i>340,00</i>	<i>68,32</i>

4.2. Área mínima

Para que um adesivo cumpra a função de manter um objeto fixado ao outro, é preciso que tenha uma área mínima de aplicação do mesmo. O cálculo para a medida de área mínima de adesivo é dado pela equação a seguir (Daly e Hawk 2017; Yoder 2006) :

$$A_{\min} = \frac{m_L a_g f_s}{J} \quad 3$$

Onde:

m_L é a massa da lente, em [kg]

a_g é o fator de gravidade

f_s é o fator de segurança

J é a força de cisalhamento ou de tração [kg/cm²] – shear or tensile strength

Segundo (Yoder 2006), o cálculo pode utilizar tanto a força de cisalhamento quanto a de tração. Para o cálculo destes valores, foram utilizados os fatores indicados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores utilizados para o cálculo da área mínima para as lentes

<i>Nome da variável</i>	<i>Variável</i>	<i>Valor utilizado</i>
<i>Fator de aceleração (pior caso)</i>	a_g	100
<i>Fator de segurança (2 a 10)</i>	f_s	10
<i>Número de pontos de aplicação</i>	N	3
<i>Diâmetro da lente</i>	D_L	38

Como indicado na subseção 3.5, as massas das lentes de testes eram próximas as massas das lentes do projeto. Para a densidade dos vidros das lentes, utilizou-se os dados do *datasheet* de cada uma. Estes valores são apresentados na Tabela 6. Para os cálculos a seguir, utilizou-se os valores teóricos do volume, obtidos pelo modelo 3D *Solidworks* das lentes.

Tabela 6 – Densidade e massa teórica das lentes.

<i>LENTE</i>	<i>MATERIAL</i>	<i>DENSIDADE [g/cm³]</i>	<i>MASSA [g]</i>
CM1.1R	S-FPL51Y	3,66	44,16
CM1.2R	BAL15Y	2,90	51,34
CM2R	S-FPL51Y	3,66	59,75
CM3.1R	S-FPL51Y	3,66	37,15
CM3.2R	SÍLICA	2,20	32,27
CM1.1B	S-FPL51Y	3,66	44,85
CM1.2B	BAL15Y	2,90	50,79
CM2B	S-FPL51Y	3,66	59,75
CM3.1B	S-FPL51Y	3,66	39,45
CM3.2B	SÍLICA	2,20	30,89

Utilizando a Eq. 3 os valores da Tabela 5 e da Tabela 6 pode-se calcular a área mínima de adesivo para uma distribuição uniforme. Considerando o perfil cilíndrico da lente e a área calculada (veja Figura 28a) chega-se a altura (ou largura) do fio de adesivo (Tabela 7). Utilizando-se de três pontos de aplicação e uma aproximação circular dos pontos, pode-se obter um raio aproximado dos pontos de aplicação (Tabela 8). Para uma melhor visualização, veja Figura 28b.

Tabela 7 - Área mínima em forma anel periférico.

LENTE	MASSA [g]	P92	Epo-Tek 301-2	Sylgard 184	P92	Epo-Tek 301-2	Sylgard 184
		Área mínima [mm ²]			Altura mínima [mm]		
CM1R	95,50	19,405	140,61	68,32	0,162	0,2845	0,5854
CM2R	59,75	12,141	21,246	43,727	0,1017	0,1780	0,3663
CM3R	69,42	14,105	24,685	50,804	0,1182	0,2068	0,4256
CM1B	95,66	19,437	34,015	70,008	0,1628	0,2849	0,5864
CM2B	59,75	12,141	21,246	43,727	0,1017	0,1780	0,3663
CM3B	70,74	14,374	25,154	51,770	0,1204	0,2107	0,4337

Tabela 8 - Raio mínimo para três pontos de aplicação de adesivo.

LENTE	MASSA [g]	P92	Epo-Tek 301-2	Sylgard 184
CM1R	95,50	1,435	1,898	2,723
CM2R	59,75	1,135	1,501	2,154
CM3R	69,42	1,223	1,618	2,322
CM1B	95,66	1,436	1,900	2,725
CM2B	59,75	1,135	1,501	2,154
CM3B	70,74	1,235	1,634	2,344

Pode ser visto pelos valores das últimas colunas da Tabela 8 que a linha de adesivo para manter a lente fixa na célula é muito pequena, isso considerando que utilizamos a situação do pior caso (fator de segurança = 2 na Tabela 5). Pelos cálculos, conclui-se que não há necessidade de aplicar o adesivo em toda a lateral das lentes, mas sim uma pequena fita.

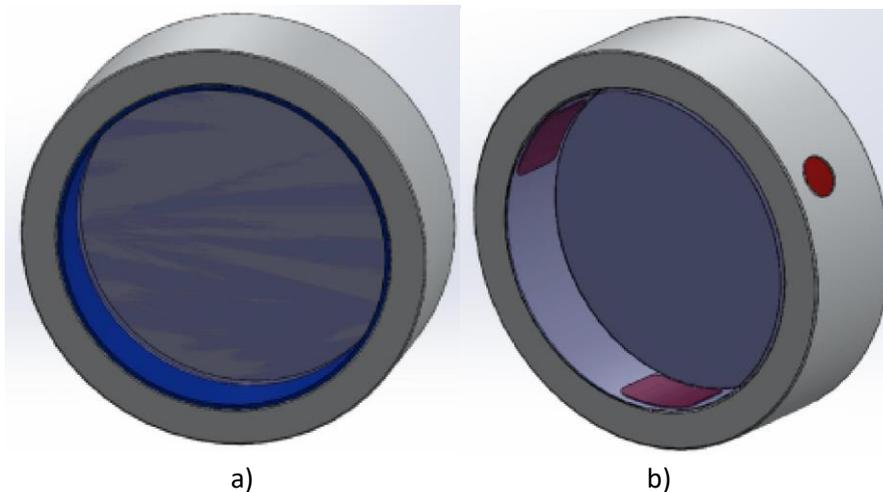


Figura 28 – Aplicação lateral de adesivos a) aplicação em anel lateral. b) aplicação em três pontos laterais, [adaptado de (Daly e Hawk 2017)].

A Figura 29 mostra o adesivo Epo-Tek 301-2 aplicada pelo furo e seu espalhamento na lateral da lente.

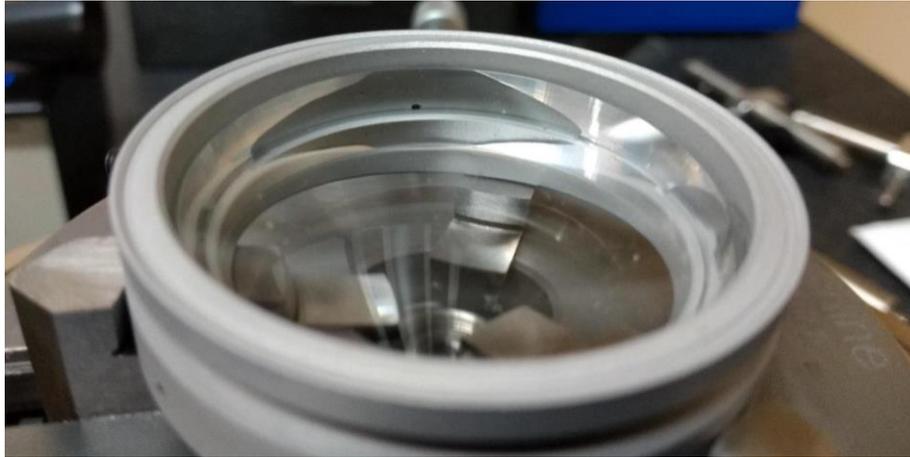


Figura 29 – Adesivo Epo-Tek 301-2 aplicada pelo furo e seu espalhamento na lateral da lente (Arquivo do autor).

4.3. Cálculo da espessura do adesivo

Para calcular a espessura do adesivo deve-se considerar uma montagem atermalizada. O primeiro a apresentar uma equação foi (Bayar 1981). A **equação de Bayar**, que é uma equação simples, considera somente a expansão térmica radial (Schwertz e Burge 2012), dada a seguir

$$\text{Bayar} \quad h_B = D_L \frac{\alpha_M - \alpha_L}{2(\alpha_A - \alpha_L)} \quad 4$$

Onde

D_L diâmetro externo do elemento óptico,

α_M é o coeficiente de expansão térmica do metal,

α_L é o coeficiente de expansão térmica do vidro,

α_A é o coeficiente de expansão térmica do adesivo.

Uma representação geométrica destes valores pode ser vista na Figura 30.

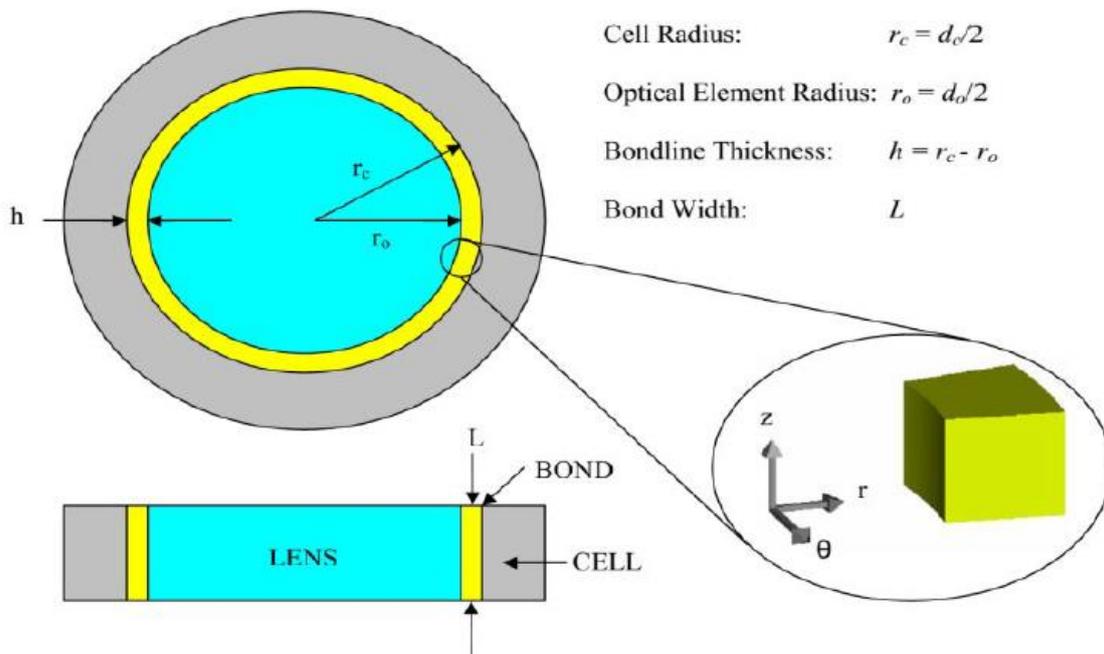


Figura 30 – Montagem comum de lente atermalizada. [Adaptado de (Daly e Hawk 2017)]

Segundo (Monti 2007) a Eq. 4 não é muito precisa para uma aplicação de adesivo contínuo em torno da circunferência óptica. Ela pode servir como uma aproximação para o limite superior da espessura do adesivo em um sistema com múltiplos segmentos de adesivos em torno do diâmetro da lente. Já HERBERT, 2006. faz uma modificação nesta equação considerando tensões normais e o coeficiente de Poisson, de forma que a fica

Bayar modificada

$$h_B^* = \frac{D_L(\alpha_M - \alpha_L)}{2 \left(\frac{1+\nu}{1-\nu} \right) \alpha_A - \alpha_L} = \frac{r_L(\alpha_M - \alpha_L)}{\left(\frac{1+\nu}{1-\nu} \right) \alpha_A - \alpha_L} \quad 5$$

Onde

ν é o coeficiente de Poisson do adesivo.

r_L é o raio da lente.

Já a **Equação de Muench (ou van Bezooijen)** fornece uma maior precisão por considerar a expansão axial e tangencial do adesivo (Jim H. Burge 2011; Herbert 2006; Monti 2007; Schwertz e Burge 2012). O limite inferior para um adesivo atérmico e continua em torno da lente é

$$\text{van Bezooijen} \quad h_B^* = \frac{D_L}{2} \frac{(\alpha_M - \alpha_L)}{\alpha_A - \alpha_M + \frac{2\nu}{1-\nu} \left(\alpha_A - \frac{\alpha_L + \alpha_M}{2} \right)} \quad 6$$

Em (Monti 2007)) encontramos uma modificação na Eq. 6, dando um limite superior para a *Equação de Muench*.

$$\text{van Bezooijen} \quad h_B^* = \frac{D_L}{2} \frac{(\alpha_M - \alpha_L)}{\alpha_A - \alpha_M + \frac{\nu}{1-\nu} \left(\alpha_A - \frac{\alpha_L + \alpha_M}{2} \right)} \quad 7$$

modificada

A diferença entre as equações é o fator 2 no terceiro termo do denominador.

Podemos ver pela Eq. 4, Eq. 5, Eq. 6 e Eq. 7 que a espessura do adesivo só depende diâmetro da lente e do material que ela é feita, bem como os coeficientes de dilatação térmica dos outros materiais. Desta forma o diâmetro interno da célula fica:

$$D_M = D_L + 2h \quad 8$$

O material proposto para a fabricação das células das lentes é a liga Al-6061-T6, cujo CTE é de

$$\alpha = 2,36.10^{-6} / ^\circ C$$

Todas as lentes que foram coladas no projeto são de vidro S-FPL51Y, inclusive os dubletos. Isso nos diz que o cálculo que devemos fazer são iguais para todas as lentes e células, só alterando o coeficiente de Poisson para cada adesivo. Os resultados das equações acima estão na Tabela 9

Tabela 9 - Espessura mínima de adesivo

<i>ADESIVO</i>	<i>Eq. 4 [mm]</i>	<i>Eq. 5 [mm]</i>	<i>Eq. 6 [mm]</i>	<i>Eq. 7 [mm]</i>
<i>P92</i>	<i>7,716</i>	<i>1,841</i>	<i>1,678</i>	<i>2,757</i>
<i>Epo-Tek 301-2</i>	<i>8,128</i>	<i>1,910</i>	<i>1,736</i>	<i>2,861</i>
<i>Sylgard 184</i>	<i>0,961</i>	<i>0,306</i>	<i>0,301</i>	<i>0,458</i>

5. Testes

5.1. Ensaio térmico

O teste de ciclo térmico é uma simulação das condições de temperatura de trabalho da câmara sob o telescópio 1,6m do OPD. Ele visa averiguar a estabilidade do adesivo nestas condições e com isso a estabilidade angular das lentes.

O ciclo térmico escolhido foi baseado nos pontos médios máximo e mínimo no OPD, sendo este 1,5°C e o outro 27°C. Na programação da câmara térmica do LNA, foram feitas as sequências a representadas na Tabela 10 e na Figura 31

Tabela 10 - Ensaio térmico

<i>Ciclo</i>	<i>Temperatura Inicial</i>	<i>Temperatura Final</i>	<i>Tempo</i>
1	20 °C	20 °C	30 min
2	20 °C	- 5 °C	30 min
3	-5 °C	-5 °C	30 min
4	-5 °C	20 °C	30 min
5	20 °C	20 °C	30 min

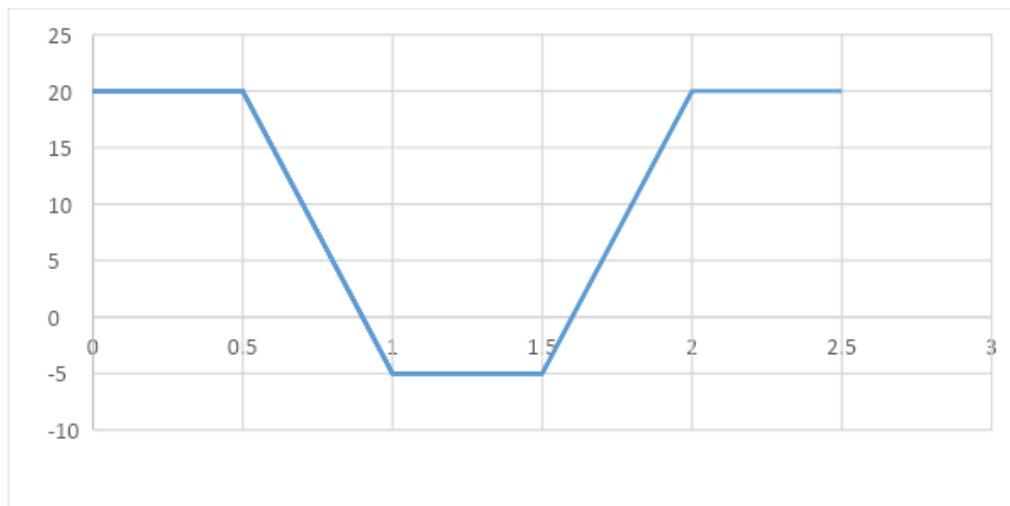


Figura 31 – Gráfico do ciclo térmico.

Foram feitos vários testes térmicos nas células de forma a avaliar o método de montagem e a eficiência do adesivo.

Após o ensaio térmico foi feita uma análise qualitativa e visual para verificar descolamentos, trincas, mudanças de forma ou alguma outra mudança visível.

Foi visto que para a colagem de lente com célula pode ser usado a Epo-tek 301-2 e a P-92. Para a colagem entre células, a Epo-tek foi melhor, mas para isso, foi preciso fazer um lixamento com palha de aço e limpeza com acetona quando a célula está anodizada (EPOTEK 2013).

Em todas os testes, o Sylgard 184 não obteve bons resultados, como mostrado na Figura 32 e Figura 33, onde pode ser visto que o adesivo somente aderiu à lente, não ficando nenhuma parte na célula. Esta avaliação foi feita exercendo uma força manual para retirar a lente da célula afim de avaliar a aderência do adesivo em ambos os materiais.

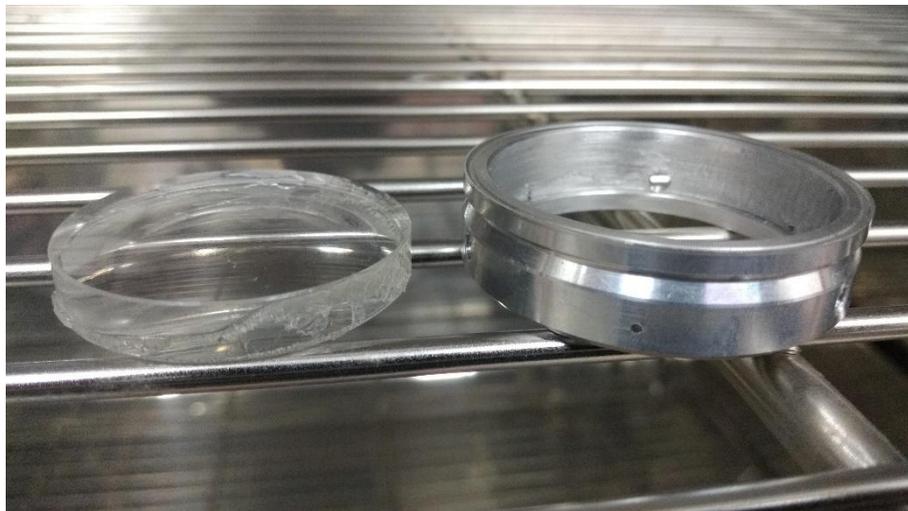


Figura 32 – Teste de ciclo térmico com sylgard 184.



Figura 33 – Teste de ciclo térmico com sylgard 184. O adesivo se manteve na lente mas não houve aderência no metal.

5.2. Impacto/choque mecânico

O instrumento SPARC4 será montado e operado no telescópio de 1,6 m do OPD. Este telescópio não possui vibrações severas que poderiam danificar significativamente o instrumento. Os testes de vibração ou de impacto mecânico não se aplicam a estas necessidades, sendo mais usual na indústria e em projetos espaciais.

As células e lentes serão coladas, sobre uma mesa rotativa que está sobre uma bancada de granito. Esta bancada é muito estável e as possíveis vibrações não irão interferir no processo de cura dos adesivos.

6. Conclusão

Considerando todos os fatores dados nas seções anteriores, foi visto a capacidade técnica da oficina mecânica na usinagem de precisão, que a técnica desenvolvida funciona e trás bons resultados.

Depois dos testes do protótipo foi apresentado uma proposta para o barril das câmeras ópticas para o instrumento SPARC4, que será detalhado em outra nota técnica.

7. Referências

- Bayar, Mete. 1981. "Lens Barrel Optomechanical Design Principles". *Optical Engineering* 20 (2): 181–86.
- Burge, Jim H. 2011. "Mounting of Optical Components". Notas de aula, Tucson, AZ.
- Daly, John G., e Matthew D. Hawk. 2017. "Adhesive Bonds for Optics: Analysis and Trade-Offs". Em *Optomechanical Engineering 2017*, editado por David M. Stubbs e Alson E. Hatheway, 1. San Diego, United States: SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2275713>.
- EPOTEK. 2013. "Tech Tip 24 - Bonding to Aluminum". Tech Tip 24. Tech Tip. Billerica, MA: Epoxy Technology Inc.
- . 2019. "Epo-Tek 301-2". Datasheet. Billerica, MA.
- Fischer, Robert E. 1991. "Case Study of Elastomeric Lens Mounts". Em , editado por Roger A. Paquin e Daniel Vukobratovich, 27. San Diego, CA. <https://doi.org/10.1117/12.48841>.
- Herbert, James J. 2006. "Techniques for Deriving Optimal Bondlines for Athermal Bonded Mounts". Em , editado por Pantazis Z. Mouroulis, Warren J. Smith, e R. Barry Johnson, 62880J. San Diego, California, USA. <https://doi.org/10.1117/12.680828>.
- Hopkins, C. L., e J. H. Burge. 2011. "Application of Geometric Dimensioning and Tolerancing for Sharp Corner and Tangent Contact Lens Seats". Em , editado por José Sasián e Richard N. Youngworth, 81310F. San Diego, California, USA. <https://doi.org/10.1117/12.894159>.
- Hopkins, Robert E. 1976. "Some thoughts on lens mounting". *Optical Engineering* 15 (5): 428–30.
- . 1980. "Lens mouting and Centering, Hopkins". Em *Applied Optics and Optical Engineering*, 1st ed, VIII:31–54. 3. New York: Academic Press.
- Jones, Damien J. 2011. "SPARC4 Optical Design Report". Dec 12 2011. Prime Optics.
- . 2017. "SPARC4 Optical Set". 20170710. Eumundi, Australia: Prime Optics.
- Lamontagne, Frédéric, e Nichola Desnoyers. 2019. "New Solutions in Precision Lens Mounting". *Optical Review* 26 (4): 396–405. <https://doi.org/10.1007/s10043-019-00514-6>.
- Lamontagne, Frédéric, Michel Doucet, Maxime Savard, e Min Wang. 2013. "Optomechanical Tolerancing and Lens Alignment Using Elastomeric Lens Mount to Efficiently Meet Optical Requirements". Em , editado por Alson E. Hatheway, 88360M. San Diego, California, United States. <https://doi.org/10.1117/12.2022775>.
- Milby, Ezra, e Jim Burge. 2011. "Centration of Optical Elements". Em , editado por James H. Burge, Oliver W. Föhnle, e Ray Williamson, 812616. San Diego, California, USA. <https://doi.org/10.1117/12.894126>.
- Monti, Christopher L. 2007. "Athermal Bonded Mounts: Incorporating Aspect Ratio into a Closed-Form Solution". Em , editado por Alson E. Hatheway, 666503. San Diego, CA. <https://doi.org/10.1117/12.730275>.
- Ohara Corporation. 2008. "i-LINE". Branchburg, NJ: Ohara Corporation.
- . 2014. "SK-1300 - FUSED SÍLICA". Branchburg, NJ: Ohara Corporation.
- . 2017a. "BAL15Y". Branchburg, NJ: Ohara Corporation.
- . 2017b. "S-FPL51Y". Branchburg, NJ: Ohara Corporation.
- Opto Alignment. 2018a. "LAS-DMI". Catálogo. Indian Trail, NO: Opto Alignment.
- . 2018b. "LAS-P-VIS Precision Optical Inspection & Alignment". 2018. <https://www.optoalignment.com/las-p-vis>.
- Rodrigues, Claudia V., Keith Taylor, Francisco J. Jablonski, Marcelo Assafin, Alex Carciofi, Deonísio Cieslinski, Joaquim E. R. Costa, et al. 2012. "Concept of SPARC4: A Simultaneous Polarimeter and Rapid Camera in 4 Bands". Em , editado por Ian S. McLean, Suzanne K. Ramsay, e Hideki Takami, 844626. Amsterdam, Netherlands. <https://doi.org/10.1117/12.924976>.
- Schwartz, Katie, e Jim Burge. 2012. *Field Guide to Optomechanical Design and Analysis*. SPIE. <https://doi.org/10.1117/3.934930>.
- Summer Optics. 2020. "Ultraviolet Curing Optical Cements and Photopolymers". 14 de setembro de 2020. <https://www.optical-cement.com/cements/cements/uv.html>.

- The Dow Chemical. 2017. "SYLGARD 184 Silicone Elastomer". Datasheet.
- Vukobratovich, Daniel. 1991. "Advances in Optomechanics". Em , editado por Rudolph P. Guzik, Hans E. Eppinger, Richard E. Gillespie, Mary K. Dubiel, e James E. Pearson, 436–46. Rosemont, IL. <https://doi.org/10.1117/12.47744>.
- Yoder, Paul R. 1995. *Mounting Lenses in Optical Instruments*. Vol. 21. Tutorial Texts in Optical Engineering TT21. Bellingham , Wash: SPIE Press.
- Yoder, Paul R. 2006. *Opto-Mechanical Systems Design*. 3rd ed. Optical Science and Engineering 105. Bellingham, Wash. : Boca Raton, FL: SPIE Press ; CRC/Taylor & Francis.