

Bruno Cesar Machado  
João Pedro do Patrocínio Ceccarelli

# **Compensação dos efeitos térmicos que impactam o desempenho óptico de telescópios**

Brasil

27 de novembro de 2020

Bruno Cesar Machado  
João Pedro do Patrocínio Ceccarelli

## **Compensação dos efeitos térmicos que impactam o desempenho óptico de telescópios**

Trabalho de formatura submetido à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito para a obtenção de diploma de graduação em Engenharia Mecatrônica.

Universidade de São Paulo – USP

Escola Politécnica

Graduação

Orientador: Maurício Silva Ferreira

Brasil

27 de novembro de 2020

Bruno Cesar Machado

João Pedro do Patrocínio Ceccarelli

Compensação dos efeitos térmicos que impactam o desempenho óptico de telescópios/ Bruno Cesar Machado

João Pedro do Patrocínio Ceccarelli. – Brasil, 27 de novembro de 2020-  
95p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Maurício Silva Ferreira

Trabalho de conclusão de curso – Universidade de São Paulo – USP

Escola Politécnica

Graduação, 27 de novembro de 2020.

1. Telescópio. 2. Termodinâmica. 2. Óptica. I. Maurício Silva Ferreira. II. Universidade de São Paulo. III. Escola Politécnica. IV. Compensação dos efeitos térmicos que impactam no desempenho óptico de um telescópio utilizando teoria de simulação de elementos finitos, seleção de materiais e controle.

Bruno Cesar Machado  
João Pedro do Patrocínio Ceccarelli

## **Compensação dos efeitos térmicos que impactam o desempenho óptico de telescópios**

Trabalho de formatura submetido à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito para a obtenção de diploma de graduação em Engenharia Mecatrônica.

---

**Maurício Silva Ferreira**  
Orientador

---

**Professor**  
Convidado 1

---

**Professor**  
Convidado 2

Brasil  
27 de novembro de 2020

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente meus pais Luciana e Edson por todo o suporte dado durante toda minha graduação, nada que conquisei seria possível sem a ajuda deles.

Agradeço de coração todos meus colegas de classe, principalmente aos amigos tão próximos de mim, que sempre me fizeram tão bem e que levarei para o resto da vida.

Por fim, agradeço à minha dupla de trabalho e amigo, João, e ao professor Maurício, ambos companhias incríveis e ótimos profissionais!

Bruno Cesar Machado

Gostaria de agradecer a meus pais, Heliane e João Carlos, e à minha irmã, Isabela, por todo o apoio dado durante minha graduação e sempre me motivarem a crer que, não importa a dificuldade de um problema ou sua duração, no fim sempre haverá uma solução.

Sou muito grato aos meus colegas de classe e professores, companhias que me sempre me lembrarei e que sempre me ajudaram a desenvolver tanto profissionalmente quanto pessoalmente.

Também agradeço à minha dupla de trabalho e amigo Bruno, e ao nosso orientador Maurício Silva Ferreira, pela ideia criativa e original do tema de trabalho de conclusão de curso e por ter tido a oportunidade de ter aprendido tanto com pessoas tão dedicadas e incríveis no projeto mais importante do curso de graduação.

João Pedro do Patrocínio Ceccarelli

---

# Resumo

Nesse trabalho estudou-se formas de compensar os efeitos térmicos que impactam no desempenho óptico de telescópios. Primeiramente o trabalho analisa quais são os três principais causadores dessa divergências ópticas, sendo eles a formação de orvalho, a dilatação e conseqüente deformação da estrutura e do espelho e as correntes de convecção no interior do tubo. Estudos sobre esses fenômenos são postos em perspectiva e simulações são feitas para os telescópios de estrutura de treliça e para os telescópios de estrutura tubular. Em ambos os modelos é confirmado que tais efeitos acontecem e não são desprezíveis. Dado essa realidade, são projetadas soluções para que se possa controlar esses efeitos térmicos.

**Palavras-chave:** Telescópio. Termodinâmica. Desempenho óptico. Transferência de Calor. Formação de Orvalho. Dilatação. Correntes de Convecção. Controle Térmico.

# Abstract

In this thesis, it is studied ways to compensate for the thermal effects that impact the optical performance of telescopes. First, the thesis analyzes which are the three main causes of this optical divergence, being the formation of dew, the expansion and consequent deformation of the structure and the mirror and the convection currents inside the tube. Studies on these phenomena are put into perspective and simulations are carried out for lattice telescopes and tubular telescopes. In both models it is confirmed that such effects happen and are not negligible. Given this reality, solutions are designed to control these thermal effects.

**Keywords:** Telescope. Thermodynamics. Optical performance. Heat Transfer. Dew Formation. Dilatation. Convection Currents. Thermal Control.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema de controle térmico proposto para um telescópio de grande porte (TAN et al., 2017) . . . . .	15
Figura 2 – Resultados da simulação térmica (TAN et al., 2017) . . . . .	15
Figura 3 – Resultados da simulação térmica com diversas velocidades e com sistemas de ventilação de diferente potências (TAN et al., 2017) . . . . .	16
Figura 4 – Sistema de resfriamento do CLST (GU et al., 2019) . . . . .	17
Figura 5 – Estrutura honeycomb sandwich (GU et al., 2019) . . . . .	17
Figura 6 – Sistema de resfriamento na estrutura honeycomb sandwich (GU et al., 2019) . . . . .	17
Figura 7 – Temperaturas medidas nos materiais para 12 de janeiro de 2013 (CHADWICK et al., 2013) . . . . .	19
Figura 8 – Patente de escudo retrátil para lentes desenvolvida por Thompson (THOMPSON, 1988) . . . . .	20
Figura 9 – Correntes de convecção dentro do tubo telescópio (SERONIK, 2014) . . . . .	21
Figura 10 – Convecção ocorrendo próxima ao espelho (SERONIK, 2014) . . . . .	21
Figura 11 – Análise da diferença de temperatura pela espessura do espelho (SERONIK, 2010) . . . . .	22
Figura 12 – Instalação do ventilador no fundo do espelho primário (SERONIK, 2010) . . . . .	22
Figura 13 – Ventilador no fundo do espelho primário . . . . .	23
Figura 14 – Ventilador suspenso . . . . .	23
Figura 15 – Desenho esquemático das dimensões do espelho (STELLAFANE - AMATEUR TELESCOPE MAKING, 20–) . . . . .	29
Figura 16 – Espelho, em escala, com corte central para mostrar a curvatura da superfície esférica . . . . .	29
Figura 17 – Resultado da simulação na superfície do espelho com $t = 100s$ . . . . .	30
Figura 18 – Resultado da simulação no verso do espelho com $t = 100s$ . . . . .	30
Figura 19 – Exemplo de telescópio com estrutura de treliça (TEJRAJ AND CO., 20–) . . . . .	31
Figura 20 – CAD do suporte primário do espelho . . . . .	31
Figura 21 – Malha usada no modelo . . . . .	32
Figura 22 – Dados da aplicação de convecção e radiação no modelo . . . . .	33
Figura 23 – Dados da aplicação da restrição de movimento no modelo . . . . .	33
Figura 24 – Gráfico das Temperatura mínimas, medias e máximas no modelo . . . . .	34
Figura 25 – Tabela da Temperatura ao longo da simulação . . . . .	34
Figura 26 – Simulação com $t = 568,42s$ . . . . .	35
Figura 27 – Irradiação do Luar (CRAMER et al., 2013). A irradiação espectral é dada em $\mu W m^{-2} nm^{-1}$ . . . . .	36

Figura 28 – Resultado da simulação de deformação total . . . . .	36
Figura 29 – Resultado da simulação de deformação no espelho . . . . .	37
Figura 30 – Tabela com a variação dos resultados de acordo com a variação dos coeficientes . . . . .	37
Figura 31 – Diagrama de telescópio refletor. Retirado de (THOMPSON, 20–). Acesso em 8 de maio de 2020. . . . .	38
Figura 32 – Modelo tridimensional elaborado no <i>SpaceClaim</i> . . . . .	38
Figura 33 – Modelo tridimensional seccionado . . . . .	39
Figura 34 – Encaixe da ocular seccionada . . . . .	40
Figura 35 – Malha da simulação . . . . .	40
Figura 36 – Malha da simulação, vista do tubo exterior . . . . .	41
Figura 37 – Malha inicialmente proposta, com o modelo inteiro . . . . .	42
Figura 38 – <i>Coefficiente de convecção x velocidade do vento</i> (SHITZER, 2006) . . .	43
Figura 39 – Velocidades do vento, em $\frac{m}{s}$ , segundo o <i>website</i> Windy.com (acesso em 6 de outubro de 2020) . . . . .	43
Figura 40 – Condições de contorno de transferência de calor . . . . .	44
Figura 41 – Simulação com tempo total igual a 3600 segundos, corpo inteiro . . . .	44
Figura 42 – Simulação com tempo total igual a 3600 segundos, tubo de alumínio . .	45
Figura 43 – Simulação com tempo total igual a 3600 segundos, face da frente do vidro do espelho . . . . .	45
Figura 44 – Simulação com tempo total igual a 3600 segundos, face de trás do vidro do espelho . . . . .	46
Figura 45 – Tabela de temperatura ao longo do tempo . . . . .	46
Figura 46 – Tabela de temperatura ao longo do tempo . . . . .	47
Figura 47 – Condições de contorno para análise estrutural estática . . . . .	47
Figura 48 – Deformações totais . . . . .	48
Figura 49 – Deformações na direção radial . . . . .	48
Figura 50 – Deformações longitudinais . . . . .	49
Figura 51 – Deformações totais na face frontal (de reflexão) do primário . . . . .	49
Figura 52 – Deformações totais na face traseira do primário . . . . .	50
Figura 53 – <i>Zoom</i> atual no espelho do nosso projeto. A cor verde representa a estrutura de alumínio, a cor lilás representa a estrutura de PVC e a rosa, o espelho . . . . .	53
Figura 54 – Modelos para determinação de associação de condutividades térmicas .	54
Figura 55 – Modelo com adição de espuma de poliuretano rígida (em amarelo) para reduzir transferência de calor. . . . .	56
Figura 56 – Simulação de 3600 segundos com adição de poliuretano na tampa . . .	57
Figura 57 – Simulação térmica do espelho com tampa de poliuretano, frente . . . .	58
Figura 58 – Simulação térmica do espelho com tampa de poliuretano, trás . . . . .	58

Figura 59 – Gráfico de temperatura x tempo para o espelho . . . . .	59
Figura 60 – Deformação resultante no espelho com tampa de poliuretano, frente . . . . .	59
Figura 61 – Deformação resultante no espelho com tampa de poliuretano, trás . . . . .	60
Figura 62 – Simulação térmica do espelho com o modelo antigo, frente . . . . .	60
Figura 63 – Simulação térmica do espelho com o modelo antigo, trás . . . . .	61
Figura 64 – Gráfico de temperatura x tempo para o espelho, modelo anterior . . . . .	61
Figura 65 – Deformação resultante no espelho do modelo anterior, frente . . . . .	62
Figura 66 – Deformação resultante no espelho do modelo anterior, trás . . . . .	62
Figura 67 – Esquema dos materiais do tubo, (GE; DING, 2018) . . . . .	64
Figura 68 – Gráfico da dilatação versus temperatura ((GE; DING, 2018)) . . . . .	65
Figura 69 – Modelo da coroa de CFRP feita no <i>Space Claim</i> . . . . .	67
Figura 70 – Malha do telescópio feita no <i>Ansys</i> . . . . .	68
Figura 71 – Esquema térmico do telescópio . . . . .	68
Figura 72 – Simulação da coroa de CFRP feita no <i>Ansys</i> . . . . .	70
Figura 73 – Detalhe da simulação da coroa de CFRP feita no <i>Ansys</i> . . . . .	70
Figura 74 – Simulação do tubo de CFRP feita no <i>Ansys</i> , deformação total . . . . .	71
Figura 75 – Simulação do tubo de CFRP feita no <i>Ansys</i> , eixo X . . . . .	71
Figura 76 – Simulação do tubo de CFRP feita no <i>Ansys</i> , segunda vista do eixo x . . . . .	71
Figura 77 – Exemplo de <i>Dew Band</i> encontrada no mercado (Astrobackyard, 2020) . . . . .	72
Figura 78 – Curvas de <i>temperatura de formação de orvalho x umidade relativa</i> . . . . .	73
Figura 79 – Sensor DHT22. Retirado de: < <a href="https://lastminuteengineers.com/wp-content/uploads/arduino/Inside-DHT11-DHT22-AM2302-Temperature-Humidity-Sensor.jpg">https://lastminuteengineers.com/wp-content/uploads/arduino/Inside-DHT11-DHT22-AM2302-Temperature-Humidity-Sensor.jpg</a> >. Acesso em 23 de novembro de 2020. . . . .	75
Figura 80 – Malha de controle que representa a solução. . . . .	76
Figura 81 – Esquemático do projeto eletrônico da <i>dew band</i> . . . . .	78
Figura 82 – Esquemático para fitas isolantes. . . . .	79
Figura 83 – Distribuição de temperaturas na estrutura após 900 segundos de simulação. . . . .	81
Figura 84 – Distribuição de temperatura na face frontal do espelho ao final da simulação. . . . .	81
Figura 85 – Distribuição de temperatura na face traseira do espelho ao final da simulação. . . . .	82
Figura 86 – Deformação na estrutura após 900 segundos de simulação. . . . .	82
Figura 87 – Deformação na face frontal do espelho ao final da simulação. . . . .	83
Figura 88 – Deformação na face traseira do espelho ao final da simulação. . . . .	83
Figura 89 – <i>Dew shield</i> artesanal. Retirado de: < <a href="https://tinyurl.com/y6hpcrp8">https://tinyurl.com/y6hpcrp8</a> >. Acesso em 25 de novembro de 2020. . . . .	84
Figura 90 – Forma de instalação de um sistema de resfriamento no espelho . . . . .	86
Figura 91 – <i>Cooler</i> para o sistema de resfriamento no espelho . . . . .	86

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedade do material <i>Pyrex</i> . . . . .	27
Tabela 2 – Propriedade dos materiais PVC e Alumínio usados na simulação . . . . .	28
Tabela 3 – Propriedade do material CFRP . . . . .	64
Tabela 4 – Especificações do DHT22 (Aosong Electronics Co., 20–) . . . . .	74
Tabela 5 – Especificações do Arduino Uno (Arduino, 2005) . . . . .	75
Tabela 6 – Especificações do ZXMS6004N8Q, MOSFET NPN com <i>enhancement mode</i> do projeto (Diodes Incorporated, 2016) . . . . .	77

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAIS TEÓRICOS</b>	<b>14</b>
2.1	Estado de Arte	14
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS E REQUISITOS</b>	<b>25</b>
3.1	Objetivos gerais	25
3.2	Relevância	25
3.3	Requisitos	26
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÕES DOS EFEITOS TÉRMICOS</b>	<b>27</b>
4.1	Materiais	27
4.2	Formato do espelho	28
4.3	Simulação do espelho	29
4.4	Simulação do espelho com estrutura de treliça	30
4.4.1	Modelo	30
4.4.2	Simulações	32
4.4.3	Variando os valores do coeficiente	37
4.5	Simulação do espelho com estrutura tubular	38
4.5.1	Modelo	38
4.5.2	Simulações	40
4.6	Resultados Parciais	50
<b>5</b>	<b>COMPENSAÇÃO DOS EFEITOS TÉRMICOS</b>	<b>51</b>
<b>5.1</b>	<b>Transferência de calor para as faces espelho a diferentes taxas</b>	<b>51</b>
5.1.1	Reconstrução da tampa	55
5.1.2	Custos	56
5.1.3	Simulações	57
<b>5.2</b>	<b>Deformação</b>	<b>63</b>
5.2.1	Estudo de soluções usando CFRP	63
5.2.2	Solução usando tubos de alumínio e CFRP	66
5.2.3	Solução usando CFRP e tubos de diferentes tamanhos	66
5.2.4	Modelo	67
5.2.5	Simulações	68
5.2.6	Simulação coroa de CFRP	69
5.2.7	Modelo e tubo de CFRP	70

<b>5.3</b>	<b>Orvalho</b> . . . . .	<b>71</b>
5.3.1	Projeto da <i>Dew band</i> . . . . .	76
5.3.2	Situações de uso . . . . .	79
5.3.3	Instruções de uso . . . . .	80
5.3.4	Vantagens e desvantagens . . . . .	80
5.3.5	Simulações . . . . .	80
5.3.6	Escudo protetor para a lente . . . . .	84
<b>5.4</b>	<b>Correntes de convecção</b> . . . . .	<b>85</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>87</b>
<b>A</b>	<b>MÉTODO DE CÁLCULO UTILIZADO PELO ANSYS</b> . . . . .	<b>89</b>
<b>B</b>	<b>CÓDIGOS</b> . . . . .	<b>91</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>92</b>

# 1 Introdução

Um dos grandes problemas da observação astronômica por meio de telescópios ópticos está ligado a qualidade da imagem e de como garantir-se as melhores condições de observação para equipamentos baseados na superfície terrestre. Em telescópios refletores, a transferência de calor entre o espelho primário e o ar dentro do tubo do telescópio implica no empobrecimento da imagem captada pois a distribuição não homogênea da temperatura através do tubo provoca deformações térmicas no espelho. Adicionalmente, o fato do espelho estar mais quente que o ar dentro do tubo faz correntes de convecção serem formadas o que também afeta a qualidade da imagem através da refração dos raios incidentes.

Além das correntes de convecção, uma diferença de temperatura entre os componentes estruturais e a temperatura ambiente pode causar diversos problemas que diminuem a qualidade da observação, tais como a alteração da distância focal, desalinhamentos óticos e condensação de vapor d'água, contribuindo para a distorção da imagem. Ademais, este último também pode provocar a deposição e aderência de partículas sobre as superfícies óticas e contribuir para o crescimento de fungos.

Pretende-se encontrar a melhor forma de minimizar a variação térmica, de forma que a imagem possa ser o mais bem captada, podendo-se utilizar teorias de termodinâmica, transferência de calor e simulação computacional, tendo como objetivo o controle do gradiente de temperatura no espelho e na estrutura.

## 2 Referenciais teóricos

Aqui apresentamos textos científicos, protótipos e sites confiáveis os quais pesquisamos, que possuem forte correlação com o tema escolhido e, utilizando-os como base do conhecimento, auxiliarão a concluir o propósito desse trabalho.

### 2.1 Estado de Arte

Apesar do tema desse projeto focar em telescópios amadores, artigos sobre telescópios de grande porte nos trouxeram contribuições importantes. Esses artigos mostram análises térmicas tais quais quer-se fazer, e também quais são as técnicas de controle térmico usadas por esses telescópios para minimizar os efeitos térmicos na imagem formada. Portanto, no estado de arte, primeiramente irá ser comentado sobre o panorama bibliográfico relativo a grandes telescópios para então focar-se nas soluções e análises já existentes para telescópios amadores.

([TAN et al., 2017](#)) propõem um sistema de controle térmico que realizam de sopro e sucção, intensificando a transferência de calor no espelho primário. Essa proposta é mostrada na figura 1. O mesmo artigo mostra a análise em elementos finitos da condução de calor no espelho e da convecção com ar em sua superfície utilizando o pacote comercial do software *Ansys* (do mesmo modo que queremos fazer no nosso espelho de 165mm), os autores constroem dois modelos: um considerando o espelho inteiro e outro que, aproveitando-se da simetria, analisa apenas metade do espelho. Na figura 2 são mostrados os resultados obtidos pelos pesquisadores no programa *Ansys*. As figuras 2(a) e a 2(c) mostram a distribuição da temperatura para os dois modelos e as figura 2(b) e 2(d) mostra os resultados da simulação da energia cinética turbulenta perto da superfície do espelho primário.

A análise dos resultados desse artigo é interessante pois os pesquisadores propuseram usar um sistema que arrefece o espelho, e como exporemos mais adiante, soluções similares são propostas para telescópios amadores. Porém, é interessante saber o quão essa solução é eficiente, ou melhor, o quão potente teria que ser esse sistema de ventilação de ar para obter o resultado que queremos. Entretanto, os espelhos acabam funcionando como um armazenador de energia térmica, e devido às suas propriedades térmicas, a baixa condutividade térmica do vidro impõe a quantidade máxima que o material consegue perder calor, colocar um ventilador mais rápido e potente acaba sendo desnecessário, ou mesmo, contraproducente, já que poderia produzir elevados gradientes térmicos no interior do espelho, com efeito deletério sobre a imagem.

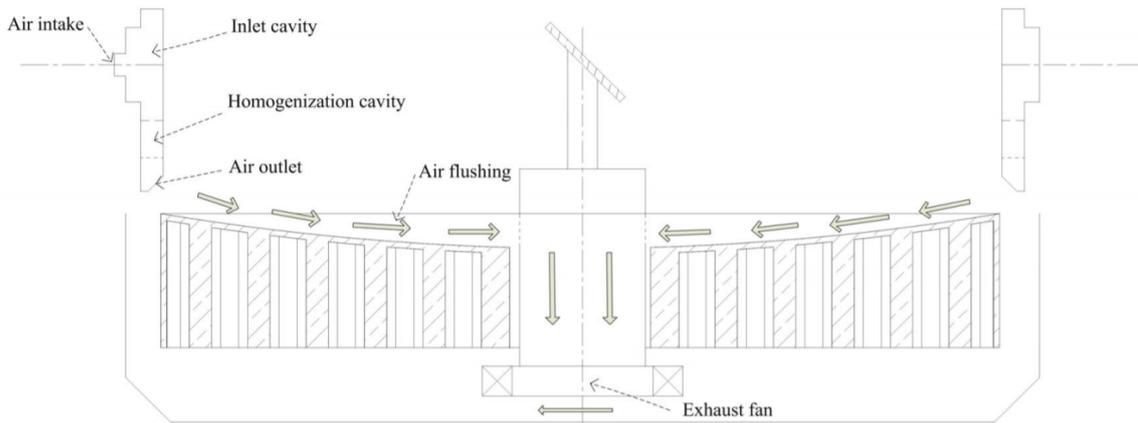


Figura 1 – Sistema de controle térmico proposto para um telescópio de grande porte (TAN et al., 2017)

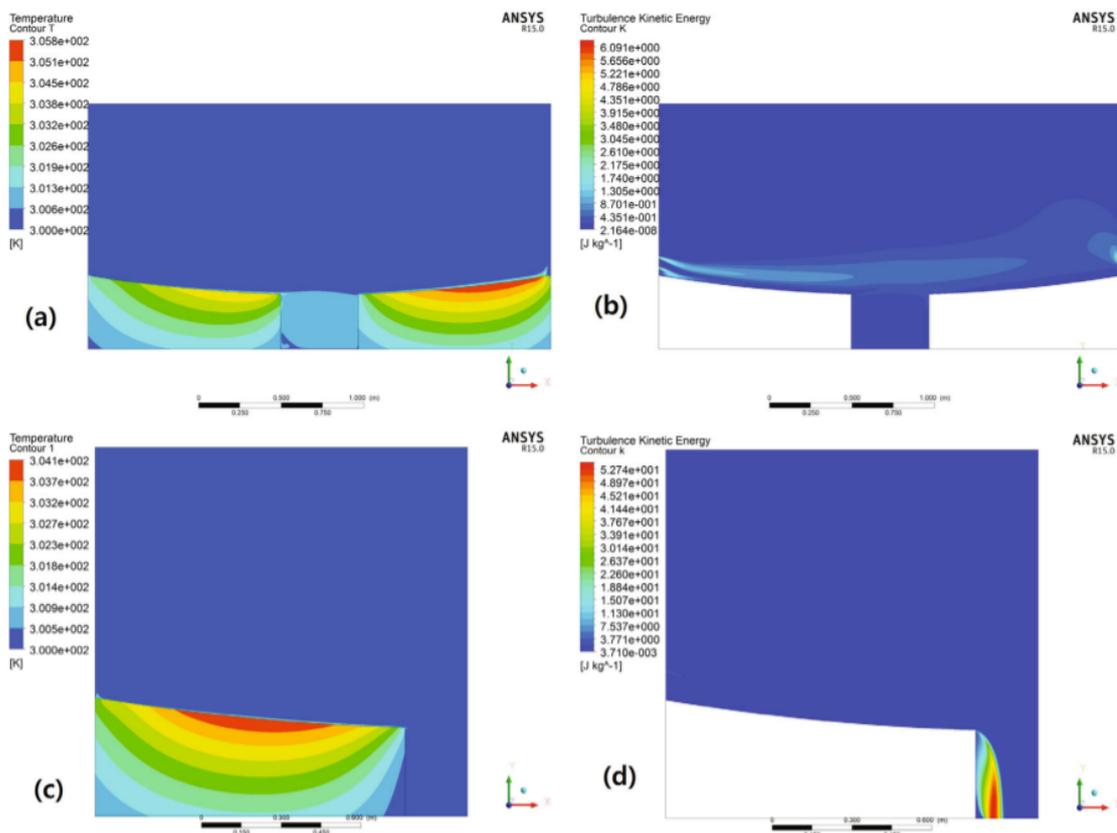


Figura 2 – Resultados da simulação térmica (TAN et al., 2017)

Os autores do artigo em questão analisaram como a velocidade e a potência do sistema de ventilação alteram a temperatura média no espelho primário, os resultados podem ser observados na figura 3. Ao aumentar a velocidade a temperatura cai drasticamente, porém, após  $4 \frac{m}{s}$ , vemos que a velocidade diminui com uma taxa bem menor, e a temperatura fica em torno de 303 K.

Porém os resultados para o nosso espelho serão razoavelmente diferentes dos desse

artigo, tanto pela diferença de diâmetro quanto pela diferença de design, já que os autores desse artigo analisam um espelho para um telescópio tipo *Cassegrain*, que possui um furo no centro do espelho primário, enquanto nós iremos analisar um sem esse furo central, do tipo Newtoniano.

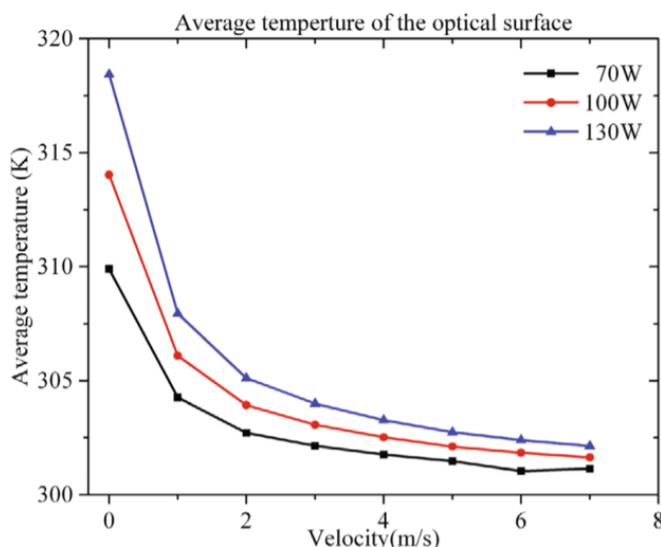


Figura 3 – Resultados da simulação térmica com diversas velocidades e com sistemas de ventilação de diferente potências (TAN et al., 2017)

Uma área da astronomia profissional que necessita de controle térmico é a voltada a observações solares, uma vez que o espelho fica diretamente apontado para o sol e, portanto, sofre bastante com adversidades térmicas. Em (GU et al., 2019) é analisado o sistema de controle térmico (*Thermal Control System - TCS*) utilizado no *Chinese Large ground-based Solar Telescope (CLST)*. Segundo (RAO et al., 2015), o CLST é um telescópio Gregoriano (muito semelhante ao modelo Cassegrain) retrátil com estrutura aberta e montagem azimutal, com um espelho primário possuindo 1,8m de diâmetro feito de sílica fundida numa estrutura *honeycomb sandwich*. O CLST também tem sistema de controle para arrefecimento da estrutura.

O TCS do CLST consiste em três unidades idênticas e independentes, cada uma trabalha para um setor de 120 graus do espelho primário. O sistema possui 297 bicos de entrada (IN), mais de 100 bicos de fluxo de retorno (RFN) e 3 ventiladores integrados totalmente. O "ventilador integrado" consiste no próprio ventilador, um trocador de calor (HE) e um aquecedor. Os principais componentes e a montagem de uma unidade de TCS são ilustrados na figura 4".

Os bicos de entrada são inseridos nas cavidades da camada do honeycomb sandwich (é uma estrutura que faz parte do espelho primário, ver figuras 5 e 6) através dos orifícios da *back sheet* (figura 5). Os ventiladores são usados para injetar ar através dos bicos de entrada nas cavidades para resfriar a parte inferior da folha superior (*face sheet*). O ar é guiado de volta através dos bicos de fluxo de retorno e resfriados nos trocadores de calor

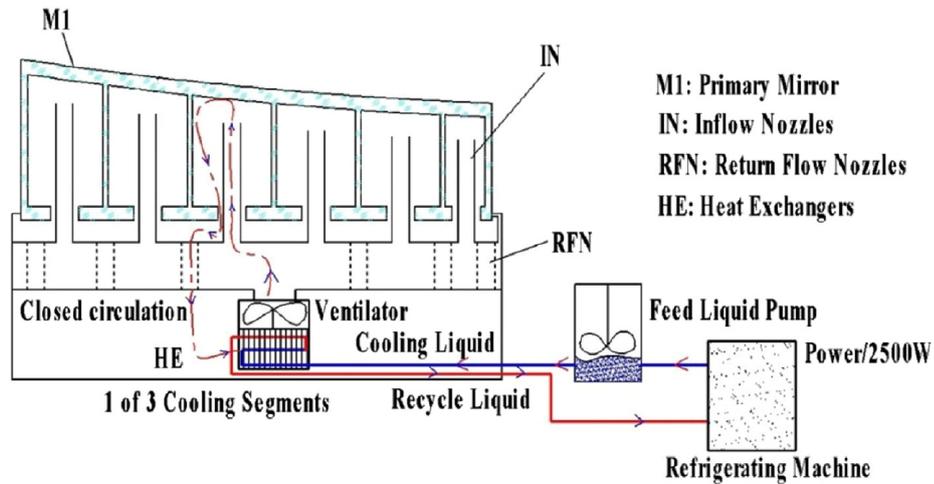


Figura 4 – Sistema de resfriamento do CLST (GU et al., 2019)

integrados nos ventiladores. Esta é uma circulação de ar fechada no espelho primário. Os trocadores de calor são um sistema de refrigeração líquida usando solução de água de etilenoglicol como fluido refrigerante. O líquido aquecido dos trocadores de calor é resfriado por um refrigerador.

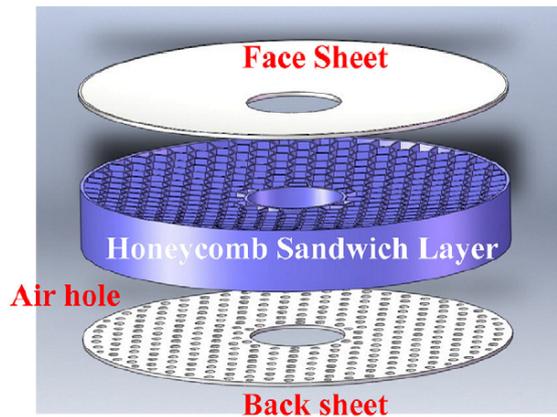


Figura 5 – Estrutura honeycomb sandwich (GU et al., 2019)

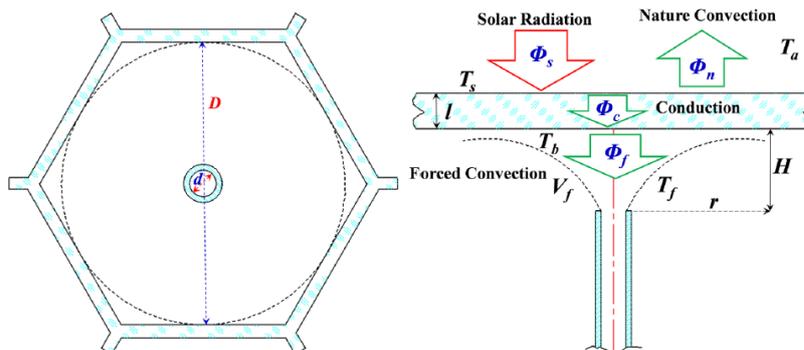


Figura 6 – Sistema de resfriamento na estrutura honeycomb sandwich (GU et al., 2019)

Consideramos esse artigo pois há discussão sobre um sistema de controle térmico já existente, e que funciona adequadamente para o telescópio para o qual foi projetado. Naturalmente, esse sistema possui uma proporção em tamanho, custo e complexidade muito maior do que pretendemos projetar para a nossa realidade, porém é válido o esforço de entender como este funciona, uma vez que soluções adotadas no TCS podem influenciar o projeto do nosso.

Assim sendo, esses artigos relacionados a grandes telescópios profissionais nos ajudaram a obter uma visão melhor de diversas soluções, como a utilizada no *CLST*, já existente no mercado, ou como a solução proposta mostrada na figura 1. (TAN et al., 2017) também apresentaram as análises feitas no espelho e alguns resultados proveniente das simulações computacionais.

Um outro problema recorrente, principalmente em dias de verão, quando a atmosfera não apresenta dificuldades para a observação de astros <sup>12</sup> é a formação de orvalho dentro da estrutura do telescópio, enevoando as lentes e impossibilitando a observação caso não haja limpeza delas. Em (CHADWICK et al., 2013) é descrito matematicamente o fenômeno pela fórmula de Magnus-Tetens:

$$T_d = \frac{bF}{a - F} \quad (2.1)$$

Sendo  $T_d$  a temperatura para a formação de orvalho (do inglês, *Dew Temperature*,  $b = 237,7^\circ\text{C}$ ,  $a = 17,27$  e  $F$ :

$$F = \frac{aT_{amb}}{b + T_{amb}} + \ln \frac{RH}{100} \quad (2.2)$$

Sendo  $T_{amb}$  a temperatura ambiente em  $^\circ\text{C}$  e  $RH$  a umidade relativa no ambiente. Para quatro materiais diferentes, de estruturas de telescópios com superfícies de lente de mesmo tamanho, (CHADWICK et al., 2013) realizaram medições sobre suas temperaturas ao decorrer de um dia de inverno:

Como pode-se ver, o material T6086 - vidro dielétrico Solid Kavalier SIMAX SiO (curva amarela) foi o que apresentou maior decaimento de temperatura ao longo do dia em comparação com outros (T191, A36 e T1010, vidro Solid Kavalier SIMAX Al/SiO, vidro Solid Soda Al/SiO e vidro Solid Kavalier SIMAX Al/SiO com revestimento hidrofóbico). Segundo os cientistas, isso se deve a emissividade  $\epsilon$  10 vezes menor do T6086 em relação aos outros materiais, portanto perdendo muito mais energia para o ambiente pela equação apresentada no mesmo artigo (THOMPSON, 1988) :  $R = \epsilon^4$ , sendo  $R$  a perda por radiação em  $\frac{W}{m^2}$ ,  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^8 \frac{W}{m^2K^4}$ ) e  $T$  a temperatura da superfície em  $K$ .

Outra forma de combater a danificação do telescópio causada pela formação de orvalho seria a utilização de um escudo protetor para a lente. Esse escudo é simplesmente uma extensão da lente que bloqueia o deslizamento de água para a lente e inclusive melhora

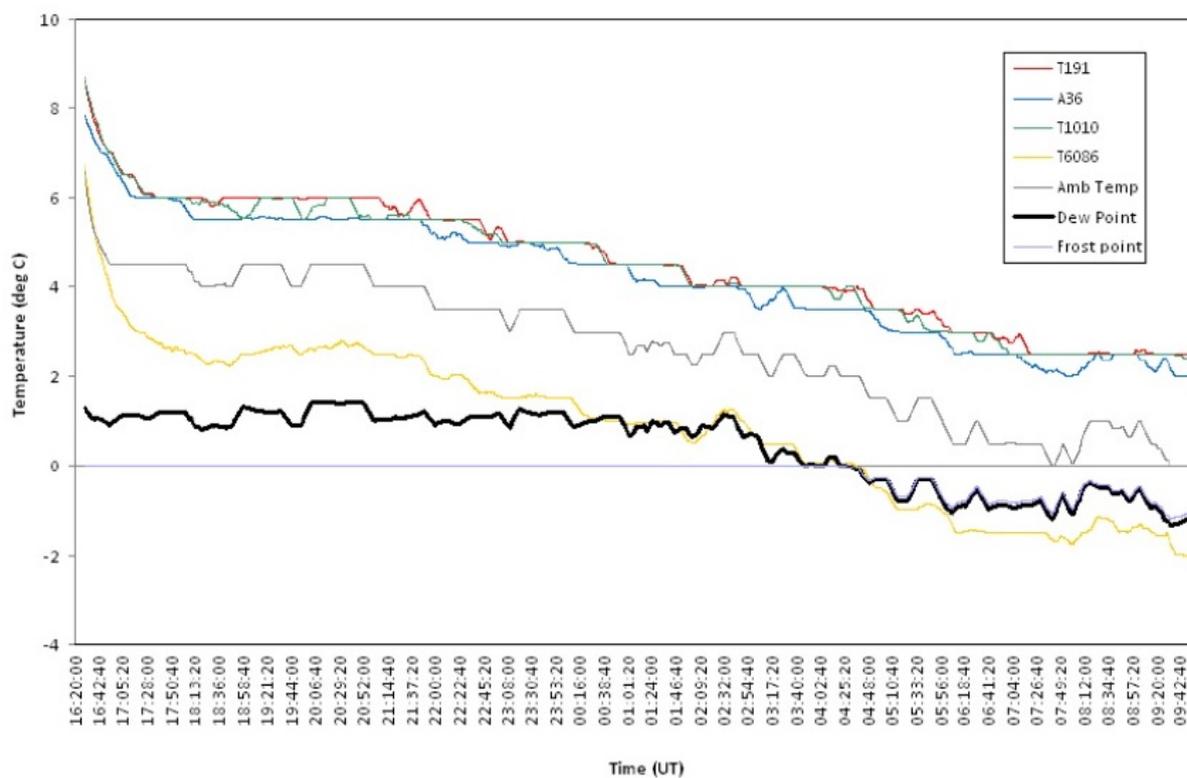


Figura 7 – Temperaturas medidas nos materiais para 12 de janeiro de 2013 (CHADWICK et al., 2013)

a visualização de astros por tornar a região ao redor da lente mais escurecida. Na figura 8 é possível encontrar um exemplo de escudo retrátil (THOMPSON, 1988).

U.S. Patent Mar. 8, 1988 Sheet 1 of 2 4,729,649

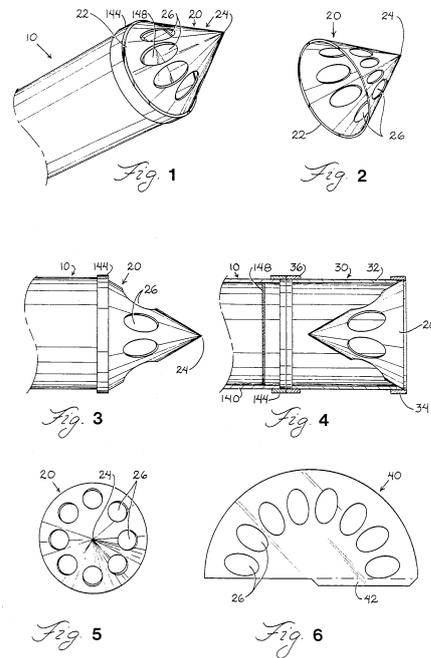


Figura 8 – Patente de escudo retrátil para lentes desenvolvida por Thompson (THOMPSON, 1988)

A partir deste ponto iremos discutir sobre as influências, análises e soluções vindas de artigos e sites sobre telescópios amadores. As informações tiradas dessas fontes de informação permitiram-nos entender o problema que as correntes de convecção causam dentro do tubo do telescópio, e assim nos inspiraram a procurar a melhor solução para os problemas térmicos presentes nessa área. Essas fontes de informação também nos foi muito importante para contextualizar-nos sobre o que já existe em termos de controle térmico para telescópios amadores.

(SERONIK, 2014) exemplifica a dimensão desse problema, explicando o porquê é necessário o controle térmico caso se queira uma imagem melhor e posteriormente analisa uma técnica de controle térmico em telescópios amadores. Em telescópios refletores, a transferência de calor entre o espelho primário e o ar dentro do tubo do telescópio implica num empobrecimento da imagem captada, pois a temperatura não homogeneamente distribuída através do tubo causa refração, devido as correntes de convecção surgentes, nos raios de luz que estão sendo refletidos. Além das correntes de convecção, uma diferença de temperatura entre os componentes estruturais e a temperatura ambiente pode causar diversos problemas que diminuam a qualidade da observação, tais como a alteração da distância focal, deformação nos espelhos por dilatação térmica e condensação de vapor

d'água, contribuindo para a distorção da imagem. Na figura 9 é mostrado o esquemático de como esse problema ocorre e a figura 10 mostra uma fotografia da pluma térmica se formando em cima do espelho.

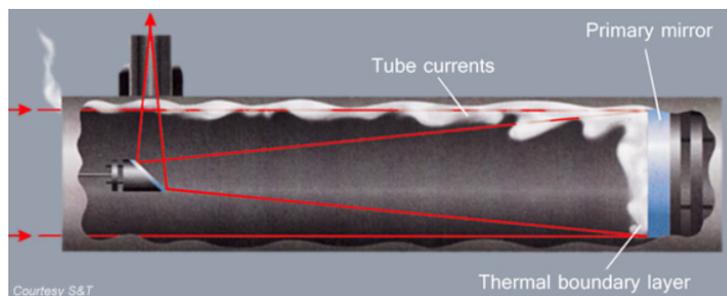


Figura 9 – Correntes de convecção dentro do tubo telescópico (SERONIK, 2014)

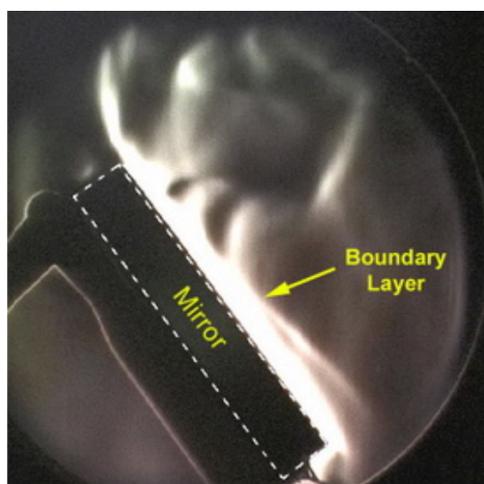


Figura 10 – Convecção ocorrendo próxima ao espelho (SERONIK, 2014)

O mesmo site traz mais algumas informações úteis para a análise que queremos fazer, afirmando que as distorções causadas começam a ser relevantes quando a diferença entre a temperatura do espelho e do ambiente é maior do que  $3^{\circ}\text{C}$ . O autor desse artigo também nos mostra graficamente a ordem dessa diferença de acordo com a espessura do espelho. Conforme a imagem 11, podemos analisar que, para espelhos com abertura de a partir de 6 polegadas (152,4 mm), a espessura apresenta pouca influência sobre seu tempo de resfriamento conforme essa medida aumenta.

Em (SERONIK, 2014) e (SERONIK, 2010) foi proposta a instalação de um ventilador nas costas do espelho primário, como pode ser visto na figura 12. Também foi comentado nestes artigos que um ventilador instalado de forma a soprar ar na superfície do espelho seria uma excelente solução

Outra questão analisada é a do quão rápido tem que ser o ventilador para se alcançar o melhor resultado. Como comprova (TAN et al., 2017), um ventilador que sopra muito mais sobre a superfície do espelho não necessariamente fará com que o mesmo resfrie

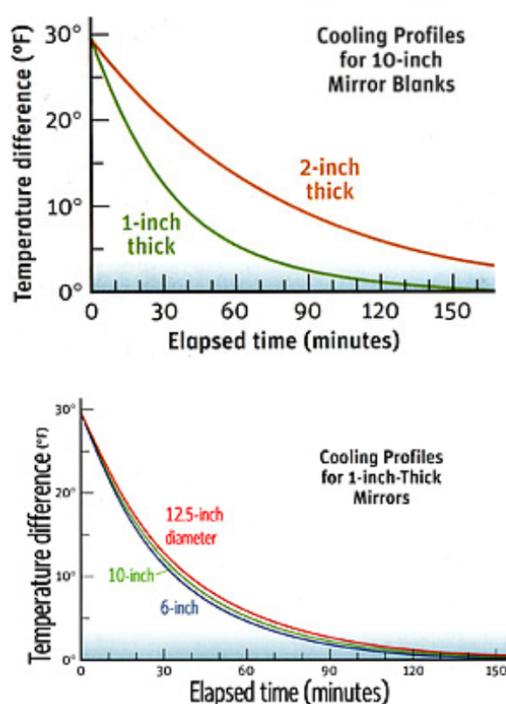


Figura 11 – Análise da diferença de temperatura pela espessura do espelho (SERONIK, 2010)

mais rápido, uma vez que a condutividade térmica do material implica num limite da taxa em que o calor pode ser transmitido para fora do espelho (mostrado na figura 3).



Figura 12 – Instalação do ventilador no fundo do espelho primário (SERONIK, 2010)

A vazão de  $20 \frac{ft^3}{min}$  ( $0,566 \frac{m^3}{min}$ ) seria o limite. Um ventilador de velocidade maior não causaria mudança na taxa de resfriamento do espelho. Ademais, um ventilador muito potente poderia implicar num aumento de vibração da estrutura, tornando-se incômodo observar pelo telescópio (SERONIK, 2010).

Em (GREER, 2005) também há instalação ventiladores no telescópio como uma

forma de controle de temperatura. Por mais que essa solução não se aplique inteiramente aos nossos objetivos, uma vez que pretendemos solucionar também a alteração da distância focal, deformação nos espelhos por dilatação térmica e condensação de vapor d'água além das correntes de convecção, esses artigos influenciaram nossa forma de pensar uma solução para as correntes de convecção geradas dentro do tubo do telescópio e também nos mostrou o conhecimento atual já existente de soluções desse problema.

O autor do artigo propõe dois tipos de instalação: um com o ventilador voltado para a parte de trás do espelho (como mostrado na Figura 12) e outro com o ventilador suspenso, soprando diretamente para a superfície do espelho, como mostrado na Figura 14.



Figura 13 – Ventilador no fundo do espelho primário

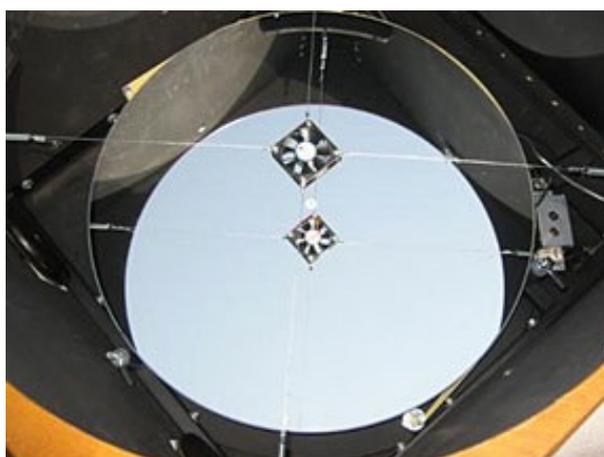


Figura 14 – Ventilador suspenso

(ASTROFOX ASTRONOMICAL INSTRUMENTS, 20–?) nos mostra mais um tipo de dificuldade relacionada à variação de temperatura em telescópios. As lentes que compõem o dispositivo sofrem dilatação em proporções diferentes dependendo de sua posição. A empresa, fabricante de telescópios de alta precisão na região do Reino Unido, que publicou este artigo, afirma que ao levar o telescópio de dentro de casa para seu jardim há dilatação da lente externa de modo mais rápido do que a dilatação da lente interna devido à maior taxa absoluta de transferência de calor na parte de fora, provocando diminuição da qualidade da imagem observada. Portanto, como solução sugerida, deve-se utilizar vidros com os mais baixos coeficientes térmicos possíveis. Sugestões dadas pelo autor incluem *Schott Zerodur*, sílica fundida e, na situação em que quer-se minimizar os custos, vidro borossilicato (*pyrex*), cujos calores específicos à temperatura ambiente (25°C) são  $0,196 \frac{\text{cal}}{\text{gK}}$  (SCHOTT, 20–),  $0,185 \frac{\text{cal}}{\text{gK}}$  (HERAEUS CONAMICA, 20–) e  $0,198 \frac{\text{cal}}{\text{gK}}$  (VALLEY DESIGN CORP., 20–), respectivamente. Ademais, seus coeficientes de dilatação térmica linear são  $7 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\text{K}}$  (SCHOTT, 20–),  $5,1 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{K}}$  (HERAEUS CONAMICA, 20–), e  $3,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$  (VALLEY DESIGN CORP., 20–), também respectivamente. O vidro convencional, à temperatura ambiente, tem calor específico de aproximadamente  $0,201 \frac{\text{cal}}{\text{gK}}$  (SAINT GOBAIN, 20–) e coeficiente de dilatação térmica de  $9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$  (SAINT GOBAIN, 20–). Nitidamente, o vidro do tipo Schott Zerodur terá a menor dilatação dentre as três opções consideradas, porém, para o nosso caso, em que queremos construir um telescópio amador, o vidro borossilicato possui um custo muito menor e dilata, aproximadamente, três vezes menos que o vidro convencional, sendo este o que consideraremos para nossos espelhos. Também percebe-se que os calores específicos podem ser desconsiderados para a escolha, visto que todos esses materiais possuem valores muito próximos entre si.

## 3 Objetivos e requisitos

Nesta seção é discutido o que quer-se realizar com nosso projeto de graduação com seus devidos requisitos decorrentes da pesquisa em fontes fidedignas no estado da arte. Também são apresentados a motivação de escolha do tema como projeto de graduação e os propósitos de caráteres acadêmico e sócio-econômico os quais o projeto tem capacidade de influenciar.

### 3.1 Objetivos gerais

Estudar, analisar e propor uma solução barata e prática para o problema de gradientes térmicos no telescópio amador padrão, os quais provocam degradação da qualidade da imagem, juntamente, propor uma solução para diminuir as deformações que o telescópio é submetido num ambiente de queda de temperatura.

Extensões: Propor e implementar um sistema de avaliação de risco de condensação no tubo e nos espelhos, para evitar a formação de mofo e conseqüentemente deterioração da imagem. Propor e implementar um sistema de monitoramento da qualidade imagem baseado na avaliação de existências de correntes de convecção oriundas de diferença de temperatura no interior do telescópio.

### 3.2 Relevância

O objetivo em questão possui relevância econômica, uma vez que através desse estudo poderia-se criar um produto comercializável, com a clientela alvo sendo os astrônomos amadores, e o desenvolvimento de tecnologia para telescópios amadores poderia influenciar o fortalecimento dessa indústria no Brasil, barateando a produção de telescópios e difundindo a astronomia no país.

O estudo também pode ser um preparatório para estudos posteriores com objetivo de atingir grandes telescópios profissionais, cuja construções e utilizações geram renda e desenvolvimento científico.

Tem-se também uma motivação técnica em se dominar sistemas de precisão, sendo projeto e manejo de máquinas precisas um assunto correlacionado com mecatrônica, porém, sem um sistema de controle térmico, é impossível atingir a precisão requerida para o exemplo em questão, telescópio, e para muitas outras máquinas que dependem de mecatrônica fina para funcionar corretamente.

### 3.3 Requisitos

O projeto requer que as soluções propostas nesse trabalho melhorem de alguma o problema do orvalho, da deformação da estrutura e das correntes de convecção.

Ao controlarmos o gradiente de temperatura, as partes do telescópio podem ficar abaixo do ponto de orvalho, temperatura que caracteriza a temperatura aonde se começa a condensar água na estrutura e nos espelhos. E portanto, a medida da viabilidade econômica, a estrutura deverá ser de materiais com baixa condutividade térmica, para evitar mais facilmente o orvalho. Esse materiais também devem ser leves, resistentes e duradouros o suficiente para que o telescópio seja móvel e que ao locomovê-lo não se alterem o alinhamento das peças.

## 4 Simulações dos efeitos térmicos

Nessa sessão iremos discorrer sobre o resultado obtido nas simulações, junto com as condições de contorno adotadas e demais decisões que influenciaram a análise termodinâmica e termomecânica que foram feitas. Uma estratégia adotada pelo grupo foi o de fazer varias simulações diferentes, considerando primeiro só o espelho e depois incluindo a estrutura também. Foram simulados dois tipos de estrutura: a tubular (tubo longo) e a treliçada. Os resultados podem ser vistos nas sessões abaixo.

Devido o fim da restrição de abertura do espelho, que antes estava atrelada ao espelho disponível que seria usado no protótipo, resolvemos fazer as simulações com tamanhos maiores de espelho, pois para um diâmetro maior, as deformações ficarão mais evidentes, uma vez que a distancia focal também aumenta, e o resultado é uma amplificação das distorções, tornando assim o projeto mais interessante do ponto de vista técnico.

### 4.1 Materiais

Segundo (BANYAL; RAVINDRA; CHATTERJEE, 2013), os materiais normalmente utilizados na confecção de espelhos de telescópio e que foram testados no presente artigo, são *Pyrex*, *Zerodur* e sílica. Num primeiro momento, nossas simulações usaram o material *Pyrex* como referência, e deixaremos a análise de materiais para depois da coleta dos primeiros resultados desse material, de acordo com os resultados, existe a possibilidade de mantermos o mesmo material do espelho (*Pyrex*) e mudarmos apenas o material da estrutura tubular, de forma a evitar condensação, e usarmos meios externos para compensar possíveis deformações no material *Pyrex*.

Na tabela 1, é mostrado as propriedades do material *Pyrex*, necessário para a inserção de um material no modelo criado na simulação de elementos finitos.

Propriedade	Pyrex	Unidades
Massa específica ( $\rho$ )	2,23	$10^3 kgm^{-3}$
Condutividade térmica (k)	1,14	$W K^{-1}m^{-1}$
CTE - Coeficiente de expansão térmica ( $\alpha$ )	3,25	$10^{-6} K^{-1}$
Cp - Calor específico	750	$J kg^{-1}K^{-1}$
Emissividade ( $\epsilon$ )	0,95	-
Módulo de Young (E)	64	$10^9 Pa$
Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )	0.2	-

Tabela 1 – Propriedade do material *Pyrex*

A estrutura do telescópio é formada por dois materiais, no interior ele é feito de

polímero (PVC rígido), e no exterior, liga de alumínio. Entre esses materiais existe um pequeno gap de menos de 1mm de ar. As propriedades desses materiais são mostradas na tabela 2. Ambos os modelos de telescópio serão modelados com esses materiais, sendo que o modelo tubular irá usar esses materiais no tubo, e a estrutura de treliça irá usa-la no suporte do espelho primário.

Propriedade	PVC	Aluminio	Unidades
Massa específica ( $\rho$ )	1,39	2,77	$10^3 kgm^{-3}$
Condutividade térmica (k)	0,175	148,62	$WC^{-1}m^{-1}$
CTE - Coeficiente de expansão térmica ( $\alpha$ )	127	0,23	$10^{-6}C^{-1}$
Cp - Calor específico	1050	875	$Jkg^{-1}C^{-1}$
Emissividade ( $\epsilon$ )	0,93	0,09	-
Módulo de Young (E)	2,86	71	$10^9 Pa$
Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,4	0,33	-

Tabela 2 – Propriedade dos materiais PVC e Alumínio usados na simulação

## 4.2 Formato do espelho

Devido ao fim da restrição de tamanho do espelho, que antes estava atrelado ao espelho que seria usado no protótipo, resolvemos testar diferentes tamanhos. Para a primeira simulação do espelho, foi modelado um espelho de 6"(152.4mm) de abertura, que seria o maior diâmetro para qual um perfil esférico seria aceitável. Esse espelho foi baseado no encontrado no site ([AGENA ASTROPRODUCTS, 20-](#)).

Modelamos a superfície do espelho usando a forma esférica pela simplificação na hora de gerar o CAD (*Computer Aided Design*), uma vez que não temos os parâmetros para gerar uma superfície parabólica.

Os dados usadas para o CAD desse primeiro espelho seriam a espessura de 20 mm, abertura de 6"(152,4mm) e distancia focal de 750 mm. O raio da esfera portanto é de  $R = 1500$  mm, uma vez que é o dobro da distancia focal.

O coeficiente *sagitta* (*sag*), profundidade do ponto de mínimo (veja figura 15), foi calculada através da expressão abaixo, resultando em  $sag = 1,93548mm$ :

$$Sagitta = \frac{D^2}{8 \cdot R} = \frac{152,4^2}{8 \cdot 1500} = 1,93548mm$$

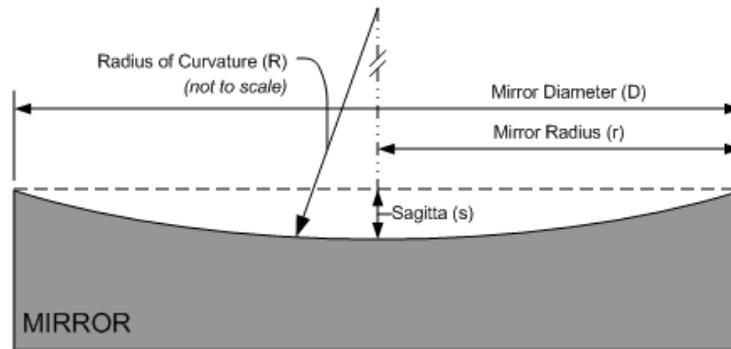


Figura 15 – Desenho esquemático das dimensões do espelho (STELLAFANE - AMATEUR TELESCOPE MAKING, 20–)

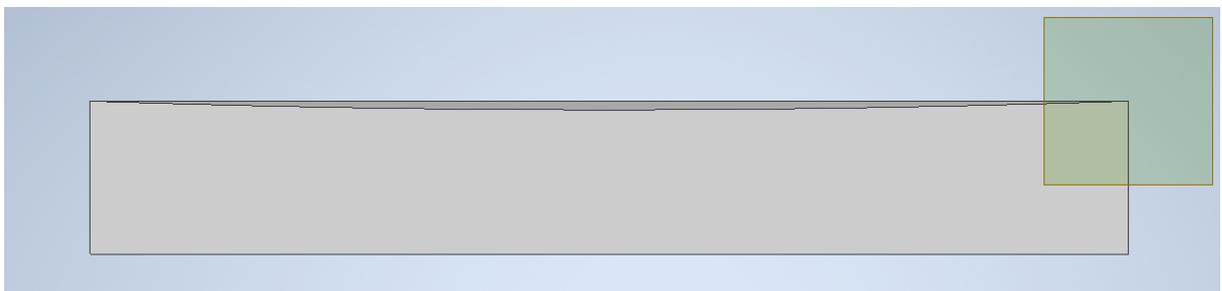


Figura 16 – Espelho, em escala, com corte central para mostrar a curvatura da superfície esférica

### 4.3 Simulação do espelho

Para essa simulação de condução 3D em regime transitório, foi usado o CAD do espelho de 152,4 mm mostrado na sessão 4.2, também utilizamos o programa de simulação *SimScale*. A simulação utilizou o material Pyrex, Temperatura global  $T = 25^{\circ}\text{C}$ , Temperatura de referência  $T_o = 10^{\circ}\text{C}$  e um coeficiente de transferência de calor  $h = 10 \frac{\text{W}}{\text{K}\cdot\text{m}^2}$ .

A convecção foi considerada apenas nas laterais e superfície superior do espelho, fazendo a suposição que o fundo estaria termicamente isolado. O valor do coeficiente de transferência de calor foi retirado de (BANYAL; RAVINDRA; CHATTERJEE, 2013). As temperaturas representam o movimento do telescópio de um ambiente controlado a  $25^{\circ}\text{C}$ , como o interior de uma casa, para o frio da noite, representado pelo  $T_o = 10^{\circ}\text{C}$ .

O resultado da simulação é mostrado nas imagens abaixo, após a simulação compreender 100s, se tem uma variação de cerca de  $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$  através do espelho, concentrando a maior temperatura ao longo da borda, um efeito já esperado, uma vez que a borda costuma ser problemática, por causa de sua área maior. Além disso, em (BANYAL; RAVINDRA; CHATTERJEE, 2013), o que os autores recomendam é uma variação menor do que 0,5

°C, uma variação da ordem que encontramos nessa simulação já causaria impactos na qualidade da captura de luz pelo espelho.

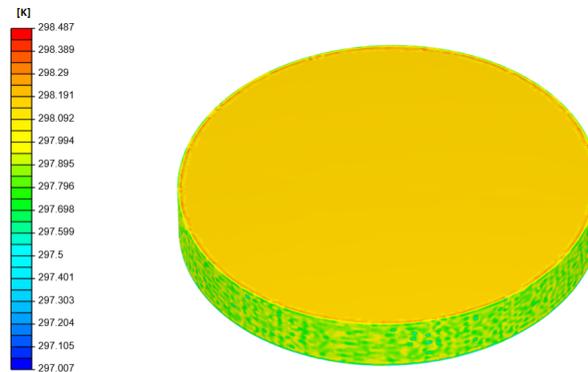


Figura 17 – Resultado da simulação na superfície do espelho com  $t = 100s$

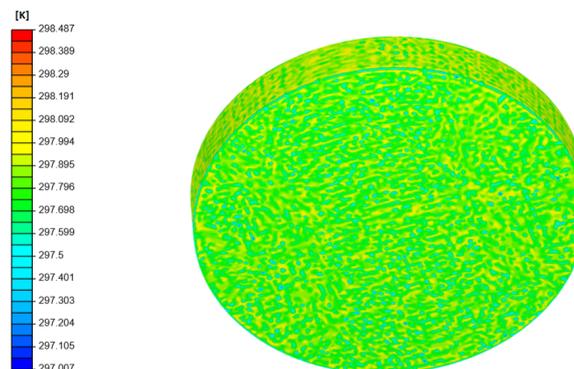


Figura 18 – Resultado da simulação no verso do espelho com  $t = 100s$

A simulação completa compreende 10800 segundos, para poder-se analisar quanto tempo demora para todo o espelho alcançar os 10 °C. No caso, o tempo necessário é de 7200 segundos, a partir desse tempo, a peça já atingiu o regime permanente.

## 4.4 Simulação do espelho com estrutura de treliça

### 4.4.1 Modelo

A figura 19 mostra o modelo de um telescópio com estrutura de treliça, porém, mesmo nesse modelo, o espelho fica alocado dentro de um pequeno tubo, chamado de suporte do espelho primário. Para a simulação, iremos desconsiderar os efeitos térmicos que as treliças causariam, para que a modelagem seja de apenas o espelho e do suporte do espelho primário. A figura 20 mostra o CAD desse modelo de telescópio.

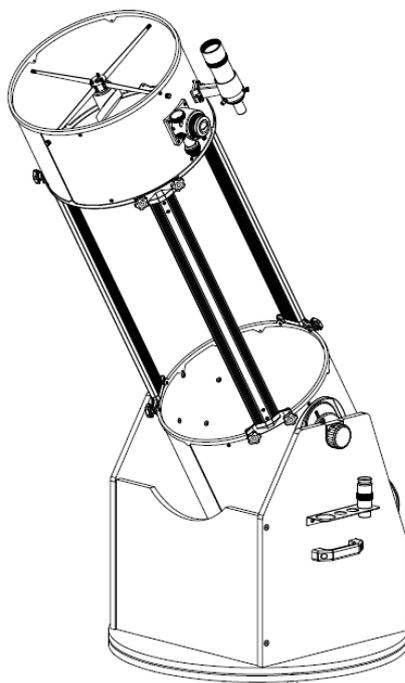


Figura 19 – Exemplo de telescópio com estrutura de treliça (TEJRAJ AND CO., 20–)

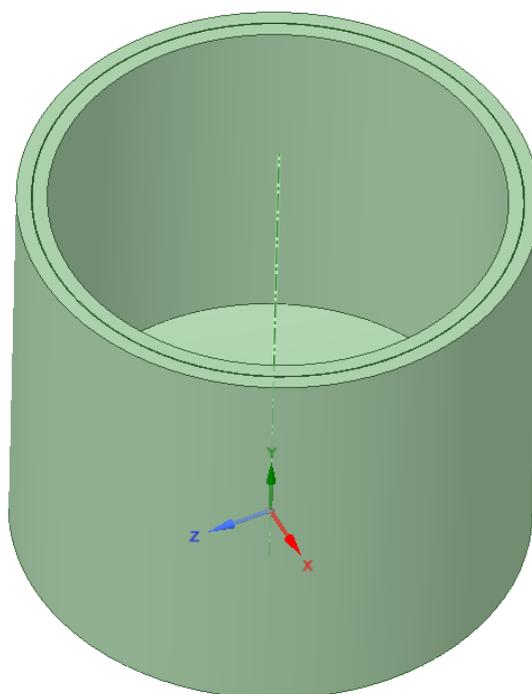


Figura 20 – CAD do suporte primário do espelho

#### 4.4.2 Simulações

Foram realizadas diversas simulações, com diferentes malhas e com diferentes simplificações no modelo. Para se otimizar a malha e diminuir o custo computacional, adequando-se as restrições que a versão estudantil do software, simulando-se apenas metade do modelo.

A malha usada para a simulação do telescópio de treliça é mostrada na figura 21, ela possui 14576 nós e 9524 elementos.

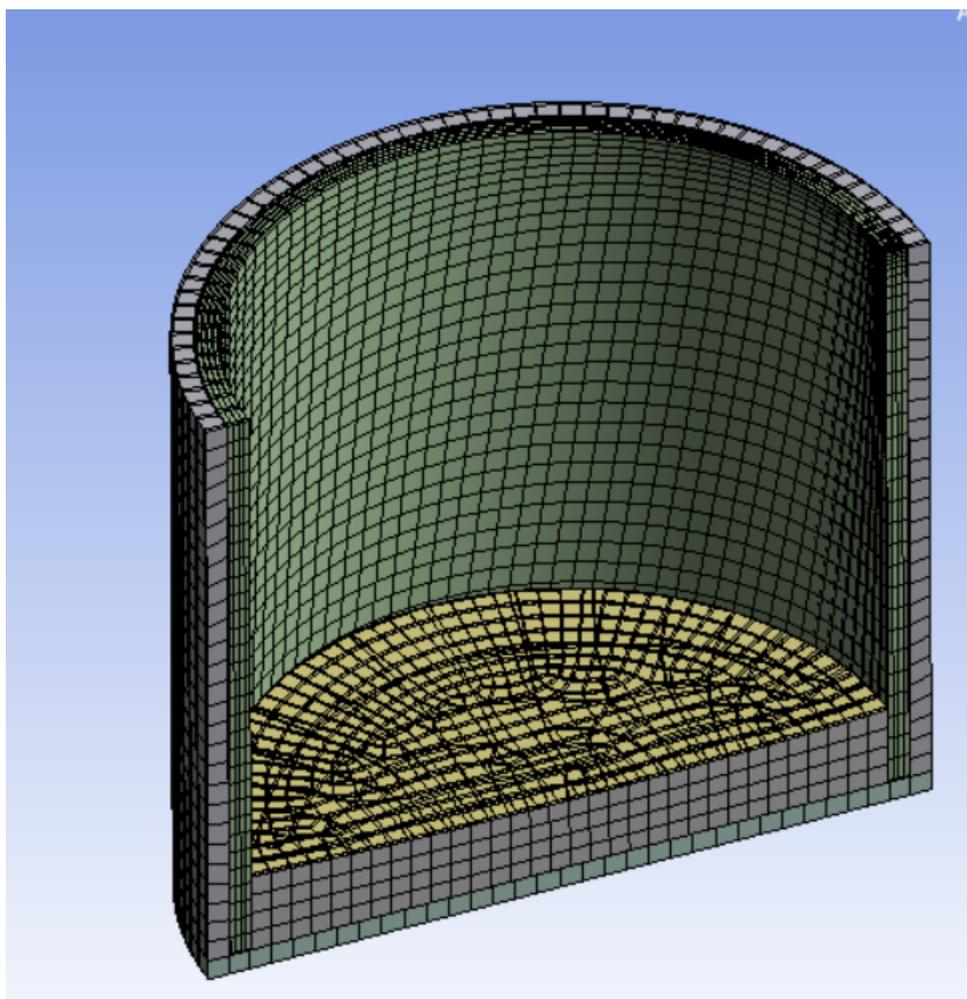


Figura 21 – Malha usada no modelo

Na figura 22 é mostrado a aplicação da convecção e radiação nas superfícies, junto aos valores utilizados, é importante lembrar que a temperatura inicial utilizada é de 25 °C, o lado traseiro do espelho foi considerado adiabático. A figura 23 mostra que a superfície de baixo foi fixada e permitida 0 graus de liberdade. Também foi considerado que a troca de calor por radiação no espelho seria insignificante, pois o fator de forma seria muito pequeno, reduzindo a importância dessa interação termodinâmica na simulação.

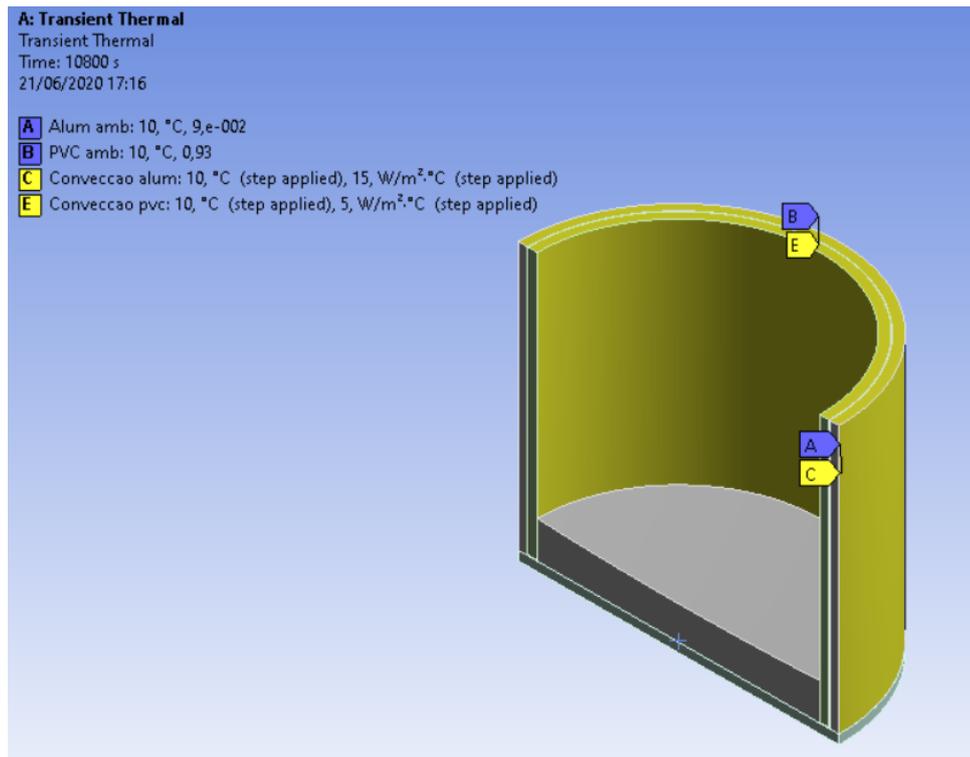


Figura 22 – Dados da aplicação de convecção e radiação no modelo

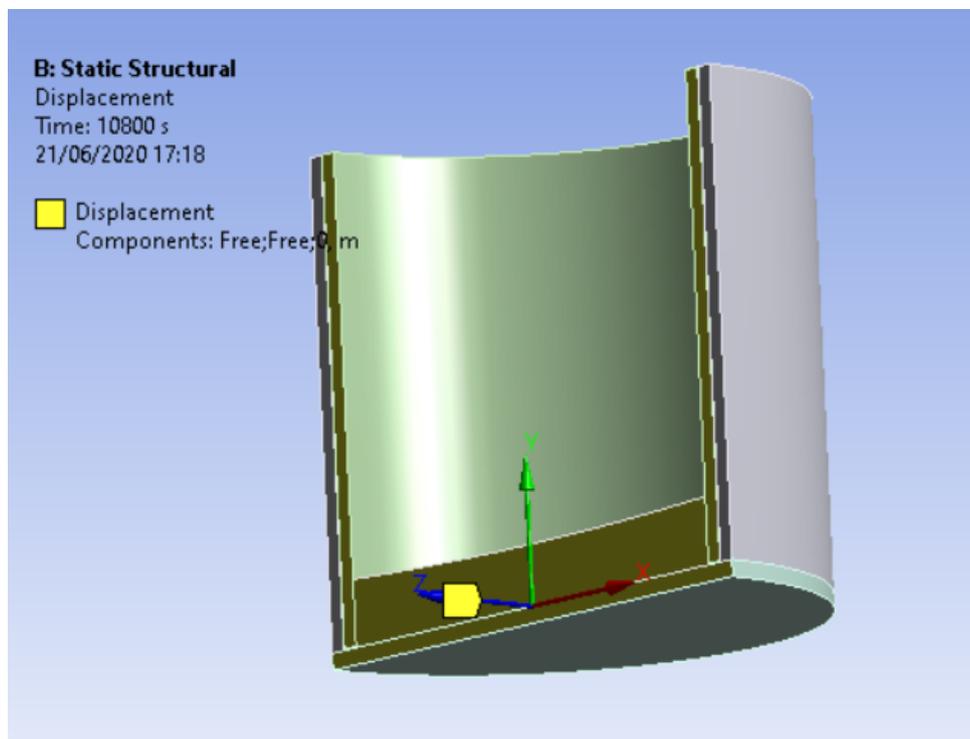


Figura 23 – Dados da aplicação da restrição de movimento no modelo

O resultado da simulação térmica transiente é mostrada nas figuras 24, 25 e 26. A simulação compreende 3 horas de tempo (10800s) e mostra que a estrutura inteira tende a uma temperatura de 10 °C, sendo que a estrutura no momento inicial possui uma

temperatura de 25 °C. Ao longo da simulação, podemos perceber que as beiradas do espelho dissipam calor mais rapidamente que o centro, analisando a figura 26, é possível ver que o centro do espelho estava a 21 °C (representado pela cor laranja escuro) aproximadamente enquanto o tubo já estava chegando aos 16 °C (representado pela cor verde), no instante  $t=586,42s$ . Na figura 24, as linhas vermelha, azul e verde mostram respectivamente, a temperatura mínima, média e máxima no modelo, ao longo do tempo. Através da figura 24 podemos concluir que a simulação alcança o regime permanente após 7200s, quando tanto as temperaturas máximas, mínimas e a média se estabilizam por volta de 10 °C.

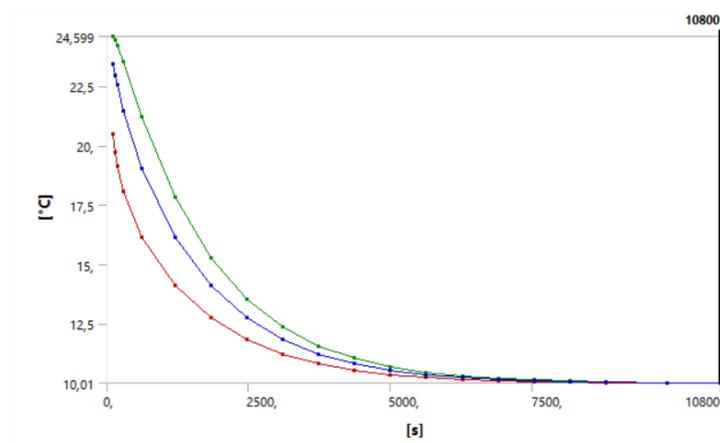
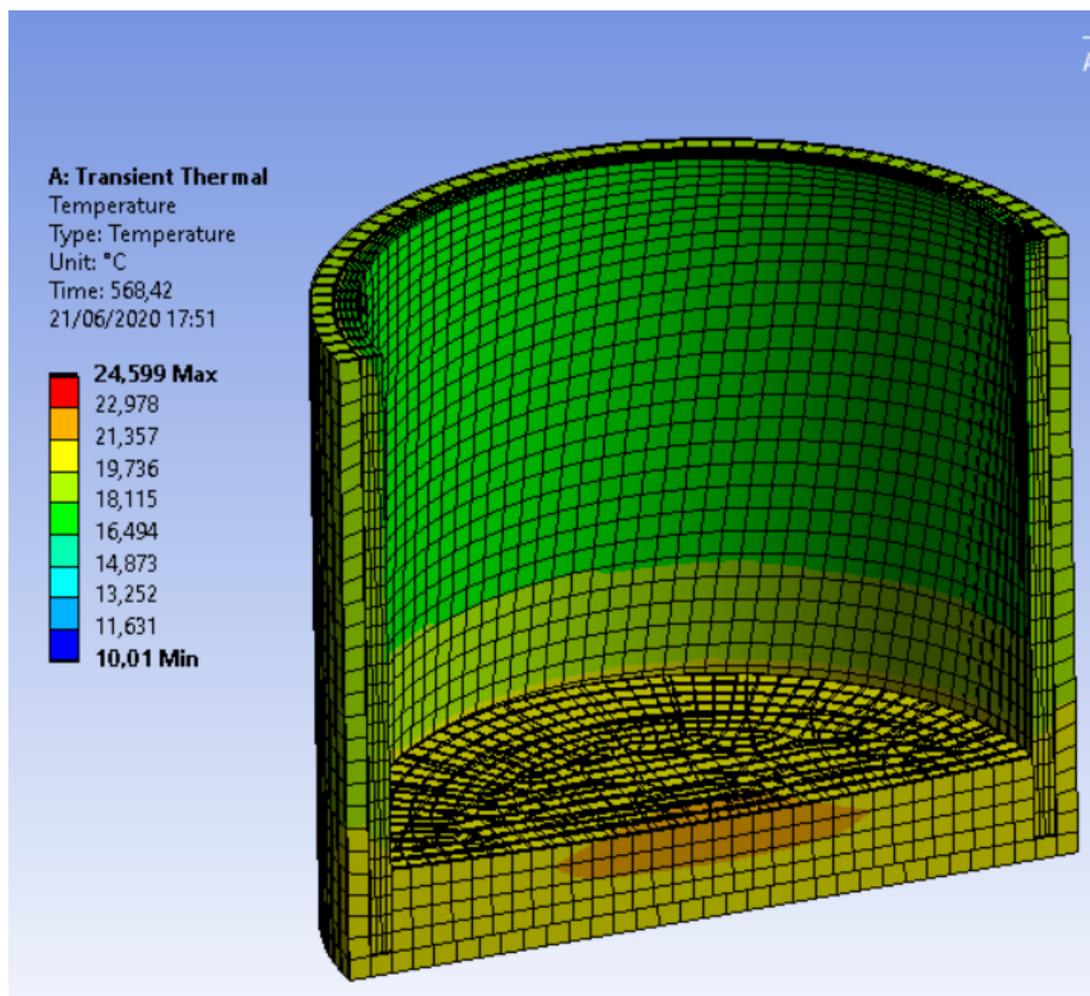


Figura 24 – Gráfico das Temperatura mínimas, medias e máximas no modelo

	Time [s]	✓ Minimum [°C]	✓ Maximum [°C]	✓ Average [°C]
1	108,	20,5	24,599	23,44
2	144,	19,708	24,43	22,978
3	180,	19,144	24,234	22,553
4	288,	18,062	23,53	21,466
5	612,	16,168	21,224	19,045
6	1200,3	14,135	17,839	16,146
7	1824,2	12,754	15,294	14,11
8	2454,5	11,836	13,544	12,743
9	3086,7	11,224	12,366	11,83
10	3719,8	10,817	11,578	11,22
11	4353,4	10,544	11,052	10,813
12	4987,3	10,363	10,702	10,542
13	5621,5	10,242	10,468	10,361
14	6255,8	10,161	10,312	10,241
15	6890,3	10,108	10,208	10,161
16	7524,8	10,072	10,138	10,107
17	8159,3	10,048	10,092	10,071
18	8793,9	10,032	10,061	10,048
19	9873,9	10,017	10,033	10,026
20	10800	10,01	10,019	10,015

Figura 25 – Tabela da Temperatura ao longo da simulação

Figura 26 – Simulação com  $t= 568,42s$ 

Além das simulações de temperatura, também foram feitas simulações de deformação de estrutura estática. As figuras 28 e 29 mostram o resultado das simulações de deformação total e da deformação no espelho, respectivamente.

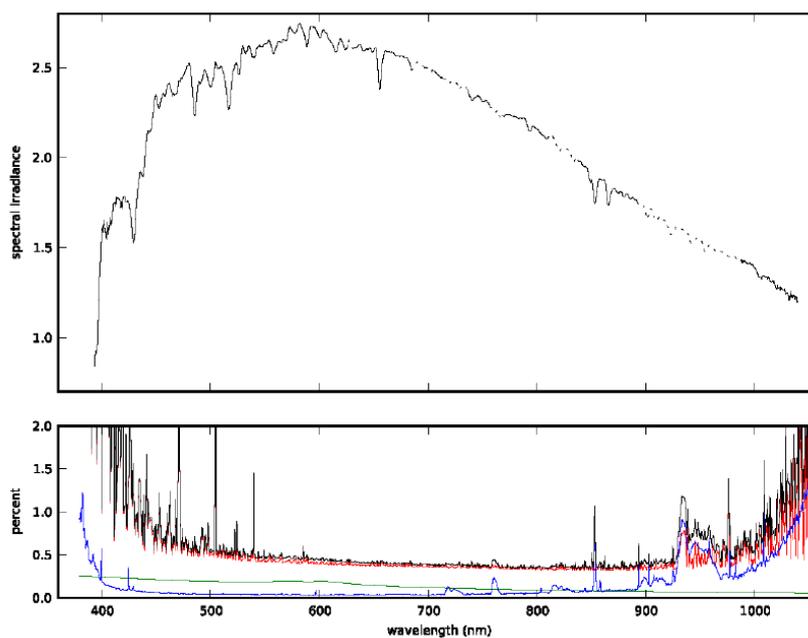


Figura 27 – Irradiação do Luar (CRAMER et al., 2013). A irradiação espectral é dada em  $\mu W m^{-2} nm^{-1}$ .

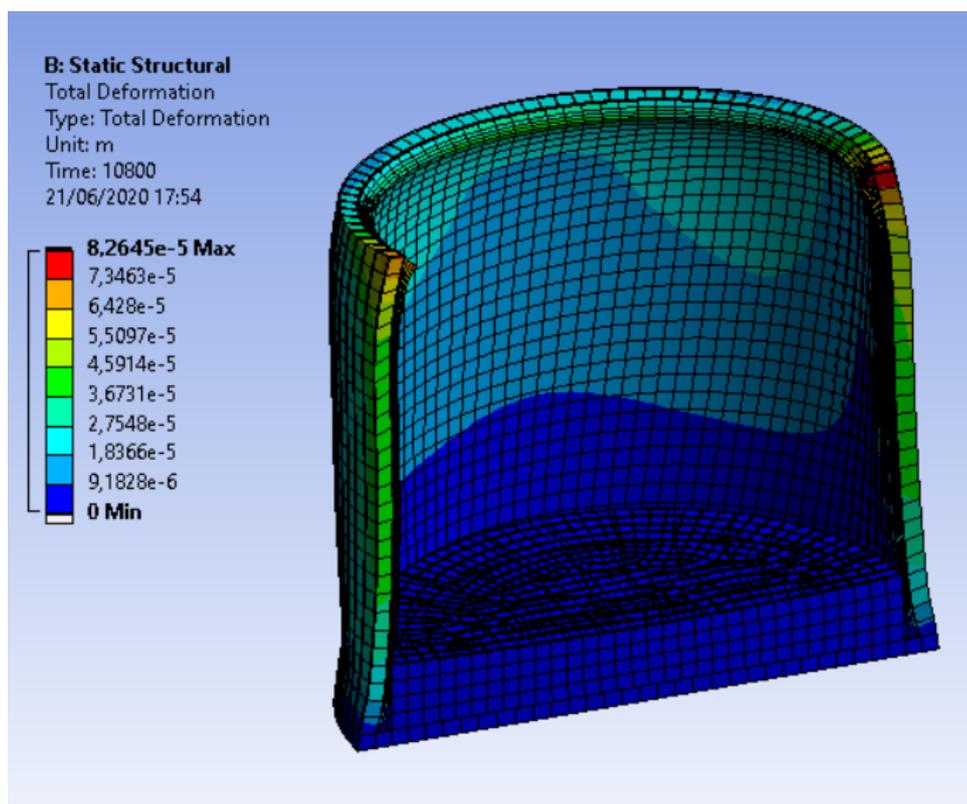


Figura 28 – Resultado da simulação de deformação total

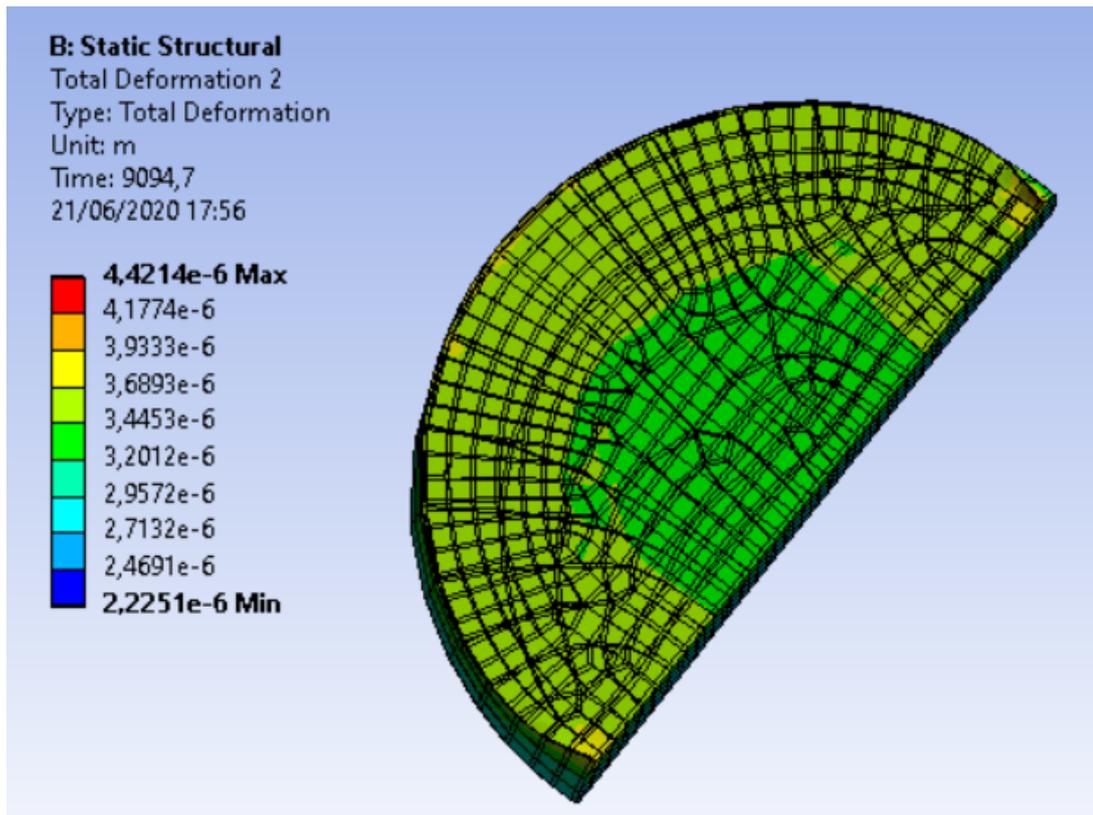


Figura 29 – Resultado da simulação de deformação no espelho

### 4.4.3 Variando os valores do coeficiente

Utilizando a ferramenta *Parameter set* do Ansys, variamos o valor dos coeficientes escolhidos com o intuito de medir a influência que os mesmos teriam no resultado. Na figura 30 vemos que a variação desses coeficientes não implicam em grandes mudanças nos resultados, de forma que é garantido que mesmo se nossa escolha dos coeficientes teve um erro se comparado com os valores reais, a influencia no resultado seria numa alteração do tempo para atingir o regime permanente.

De forma que, sendo o objetivo dessa sessão provar a existência e medir o tamanho dessas variações térmicas e dimensionais, vemos que os valores obtidos na simulação são razoáveis e provam a necessidade de se projetar um sistema de compensação para esses erros que impactam o desempenho óptico dos telescópios.

P2 - Convection exterior Film Coefficient	P3 - Convection interior Film Coefficient	P4 - Convection Espelho Film Coefficient	P7 - Temperature Average	P11 - Deformação no espelho Average
W m <sup>-2</sup> C <sup>-1</sup>	W m <sup>-2</sup> C <sup>-1</sup>	W m <sup>-2</sup> C <sup>-1</sup>	C	m
15	5	5	13.403	2.7089E-06
16	5	5	13.338	2.7102E-06
17	5	5	13.283	2.7113E-06
14	5	5	13.478	2.7074E-06
13	5	5	13.554	2.7062E-06
15	6	6	13.086	2.7173E-06
15	7	7	12.807	2.7243E-06
15	8	8	12.555	2.7293E-06
15	4	4	13.763	2.6957E-06

Figura 30 – Tabela com a variação dos resultados de acordo com a variação dos coeficientes

## 4.5 Simulação do espelho com estrutura tubular

### 4.5.1 Modelo

Este modelo é baseado num telescópio refletor Newtoniano, cujo funcionamento é descrito visualmente na imagem abaixo:

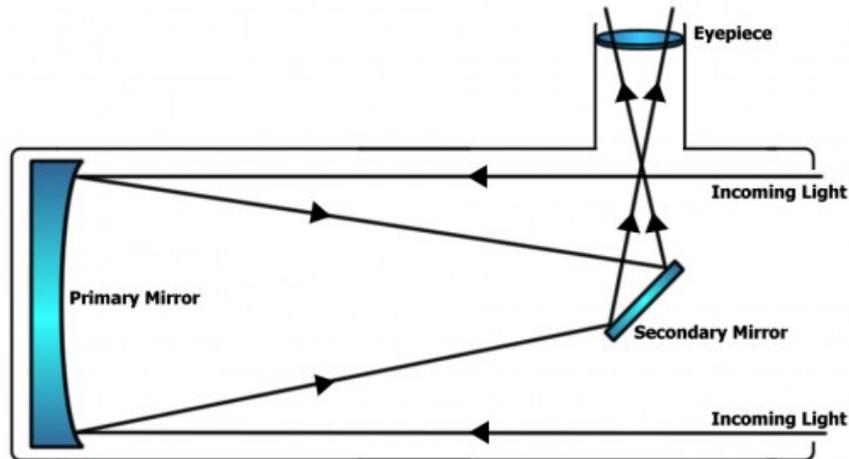


Figura 31 – Diagrama de telescópio refletor. Retirado de (THOMPSON, 20–). Acesso em 8 de maio de 2020.

O princípio de seu funcionamento é que luz entre pela cavidade dos tubos e seja refletida num grande espelho primário, refletindo a luz num espelho secundário responsável por redirecionar e formar a imagem captada pelo espelho primário no local em que se insere a ocular (*eyepiece* na imagem) 31 (NASA Science, 2019).

Dessa forma, o modelo feito no módulo SpaceClaim do *software Ansys* é análogo:



Figura 32 – Modelo tridimensional elaborado no *SpaceClaim*

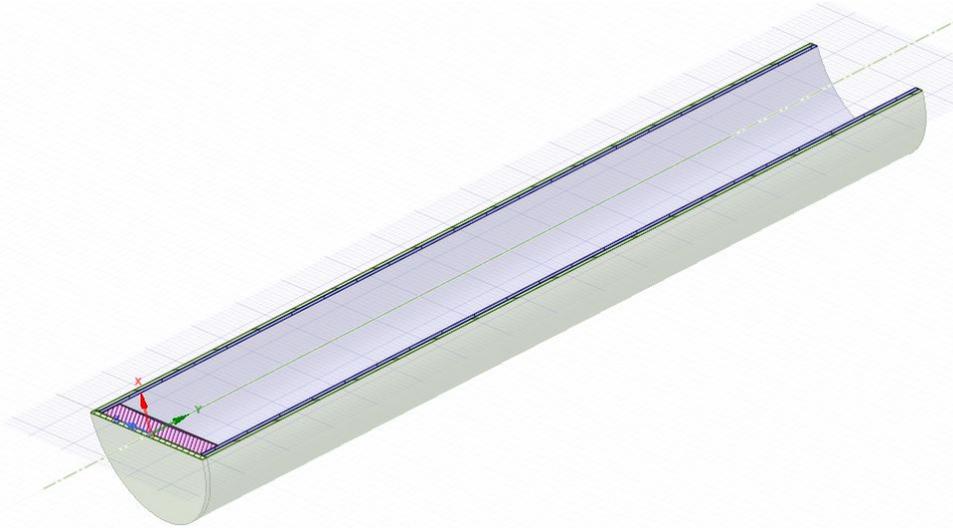


Figura 33 – Modelo tridimensional seccionado

A estrutura deste telescópio é semelhante ao treliçado porém há algumas diferenças. Semelhantemente, projetamos o tubo desse telescópio com tubos externo e interno de mesma espessura e materiais iguais ao modelo anterior. O espelho possui também 20mm de espessura. No entanto, o comprimento dos tubos é muito maior, já que a distância focal deve ser a soma das distâncias entre o espelho primário e o espelho secundário, e entre o espelho secundário e a lente ocular (*eyepiece*) (KALIF, 20–)(BEISH, 2000). Como a distância focal requerida é de 750mm, o tubo exterior possui raio de 86,5mm e o tubo ocular possui tamanho convencional de 1,25 polegadas (31,75mm) (STARIZONA, 20–), temos que a distância entre os espelhos secundário e primário deve ser de  $750 - (86,5 + 31,75) = 631,75\text{mm}$ . O restante do tubo (cujo comprimento total é de 805mm), foi designado para evitar incidência de luz diretamente na lente ocular ou no espelho secundário, o que inviabilizaria a formação da imagem (BEISH, 2017).

Ademais, temos do outro lado uma tampa de proteção a danos ao espelho, também formada por alumínio e medindo 5mm de espessura, como a estrutura externa. Apenas o alumínio foi escolhido porque, primeiramente, manufaturar uma peça circular de PVC seria custoso, dificultando a construção do protótipo. Há também, no lado interno do tubo, uma fina camada folha de alumínio com 0,01mm de espessura na face do vidro de *Pyrex* que constitui o espelho (para melhor simulá-lo).

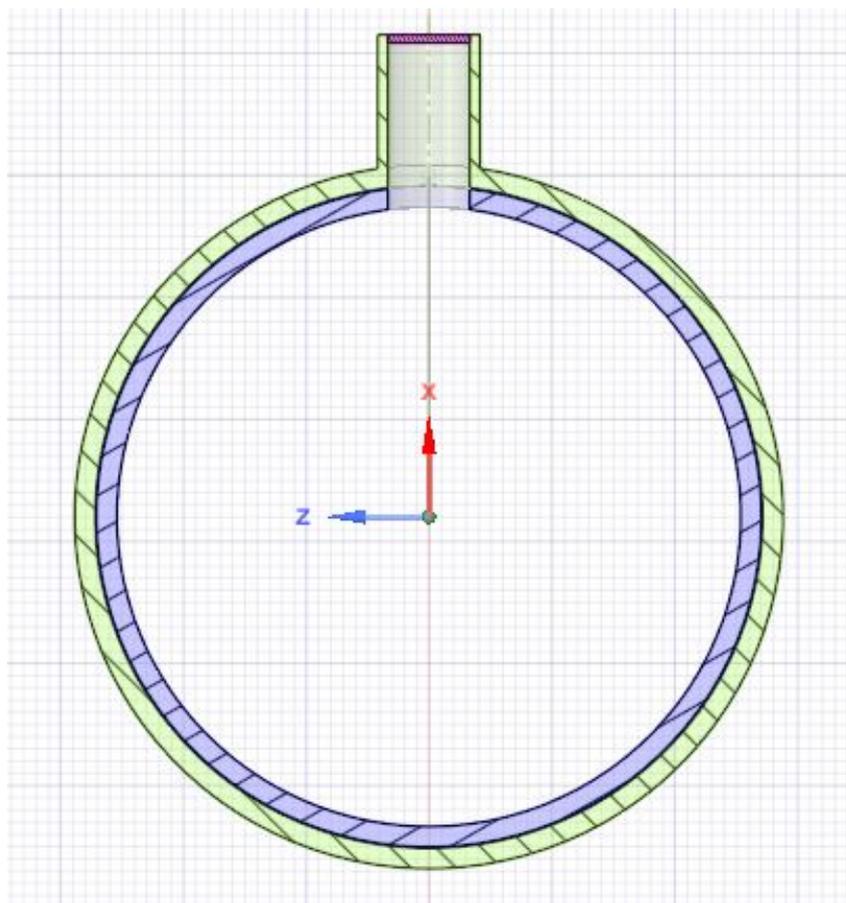


Figura 34 – Encaixe da ocular seccionada

Enfim, a lente ocular possui raio externo de 12,5mm e interno de 10mm e o vidro é *Pyrex*, com 2mm de espessura.

#### 4.5.2 Simulações

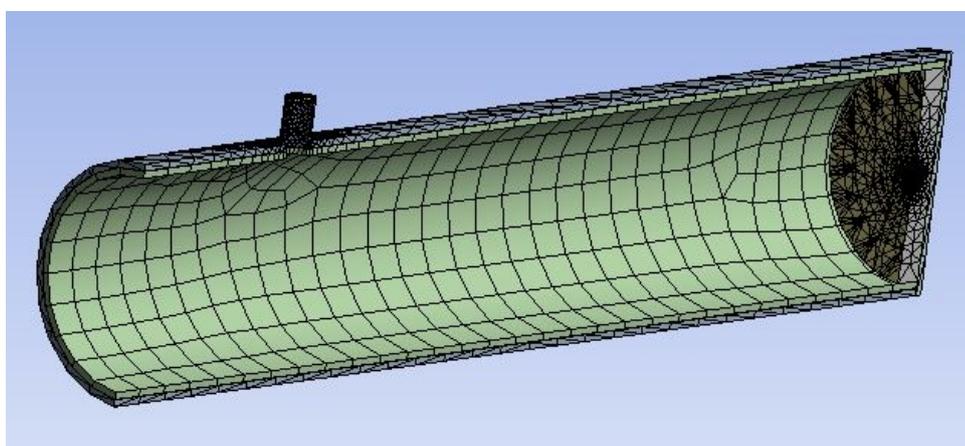


Figura 35 – Malha da simulação

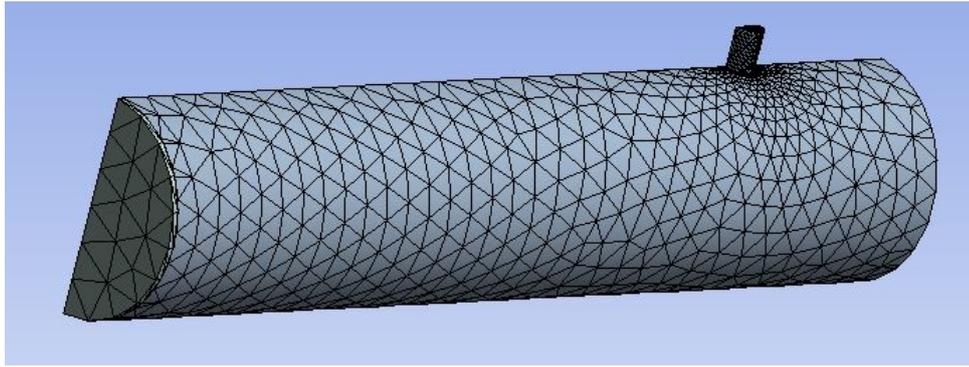


Figura 36 – Malha da simulação, vista do tubo exterior

Com as limitações da versão estudantil do módulo *Mechanical* do *Ansys*, o conjunto para malha calculada tem 3893 nós e 10271 elementos usando metade do tubo porque a solução é simétrica. Foram aplicadas condições de refinamento de malha *Edge Sizing*, com número de divisões igual a 10 na divisão entre o tubo ocular (a fim de dividir esse local em menos elementos, visto que concentra muitos nós e não é o foco da análise), e *Face Meshing*, padrão, no espelho e na tampa atrás do espelho (a fim de que a malha torne-se mais simétrica e mais dividida nestes locais, visto que o centro do espelho é um ponto de concentração de nós devido a sua geometria irregular em relação ao resto do telescópio (o centro do espelho possui um pequeno ponto para adição de condição de contorno para simular as deformações resultantes)). Visualmente também nota-se, pela imagem 35, que a malha do espelho aparenta estar super dividida, porém isto ocorre devido a divisão em elementos tanto do vidro do espelho quanto da fina camada de liga de alumínio que representa o espelho. Tal camada é tão fina ( $10^{-2}mm$ ) que isso gera superposição visual na imagem, mas não afeta os resultados.

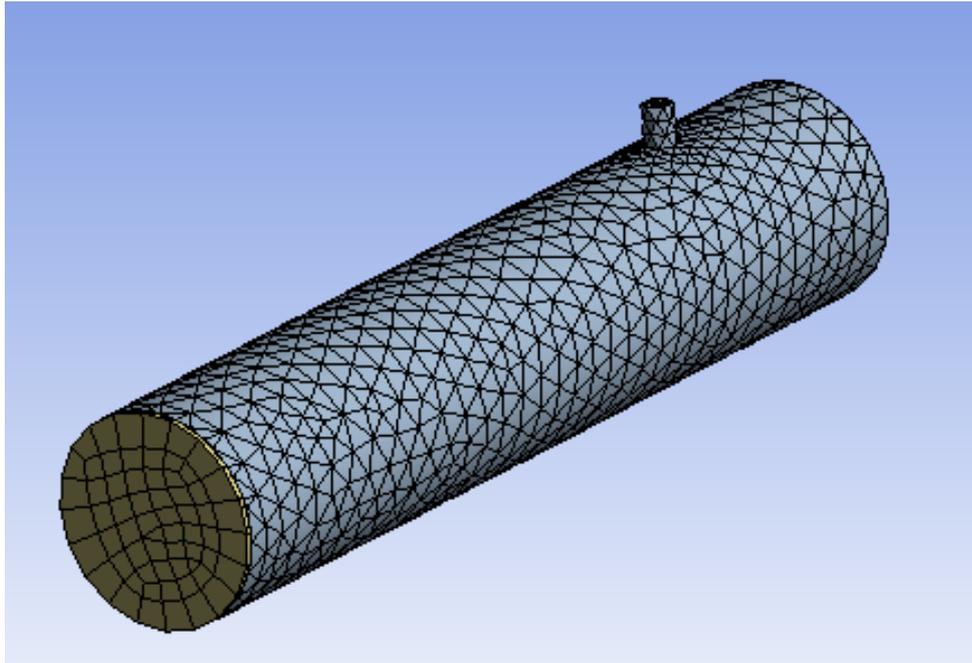


Figura 37 – Malha inicialmente proposta, com o modelo inteiro

Inicialmente planejava-se realizar testes com o tubo inteiro porém ao fim percebemos que apenas com metade do modelo poderia-se refinar melhor a malha e também adquirir resultados do Ansys mais rapidamente. As condições de contorno aplicadas na malha foram temperatura inicial igual a  $25^{\circ}\text{C}$ , convecção em todas as superfícies com contato com ambiente (ou seja, nenhuma aplicada no plano de corte), com a temperatura do ambiente igual a  $10^{\circ}\text{C}$  e coeficiente de convecção  $h = 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$  e também radiação (tanto entre superfícies, se aplicável, quanto com o meio) nas superfícies correspondentes (calculadas com as emissividades já mencionadas). O coeficiente de convecção foi escolhido de acordo com o modelo de Osczevski (imagem 38) considerando que baixa variação de temperatura ( $\pm 30^{\circ}\text{C}$ ) interfira pouco em seu valor (SHITZER, 2006), com velocidade média do vento de aproximadamente 1 m/s (velocidade típica para uma manhã de outubro em São Paulo (imagem 39)):

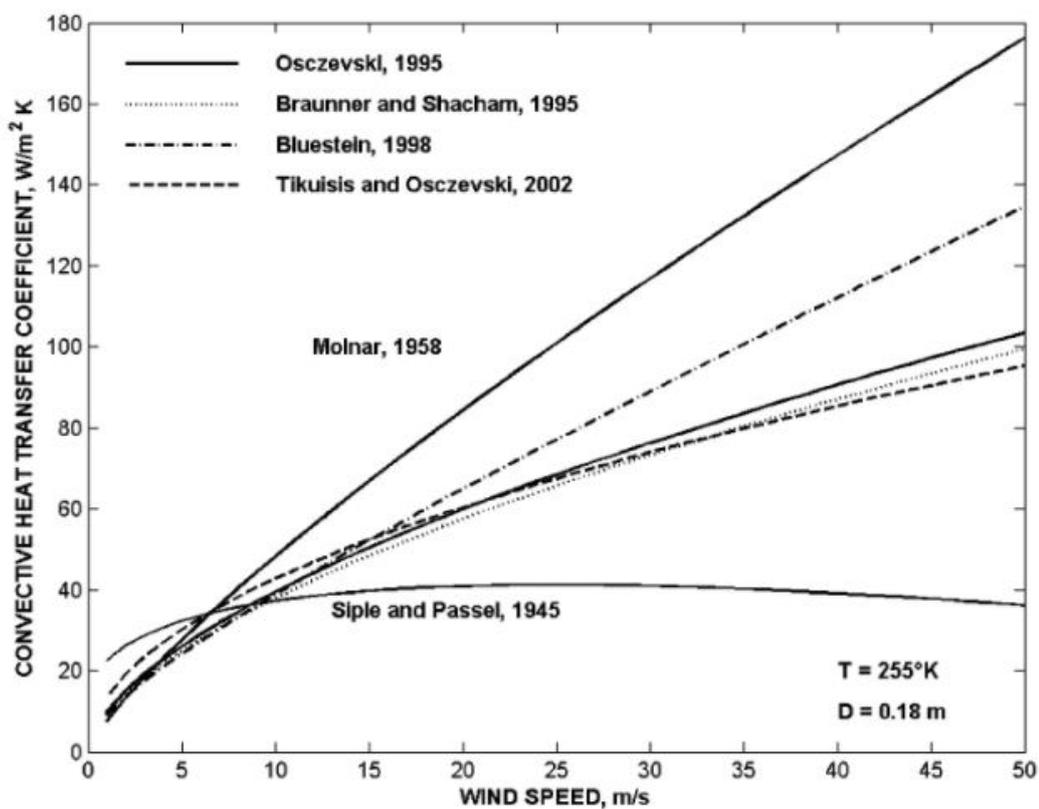


Figura 38 – Coeficiente de convecção x velocidade do vento (SHITZER, 2006)

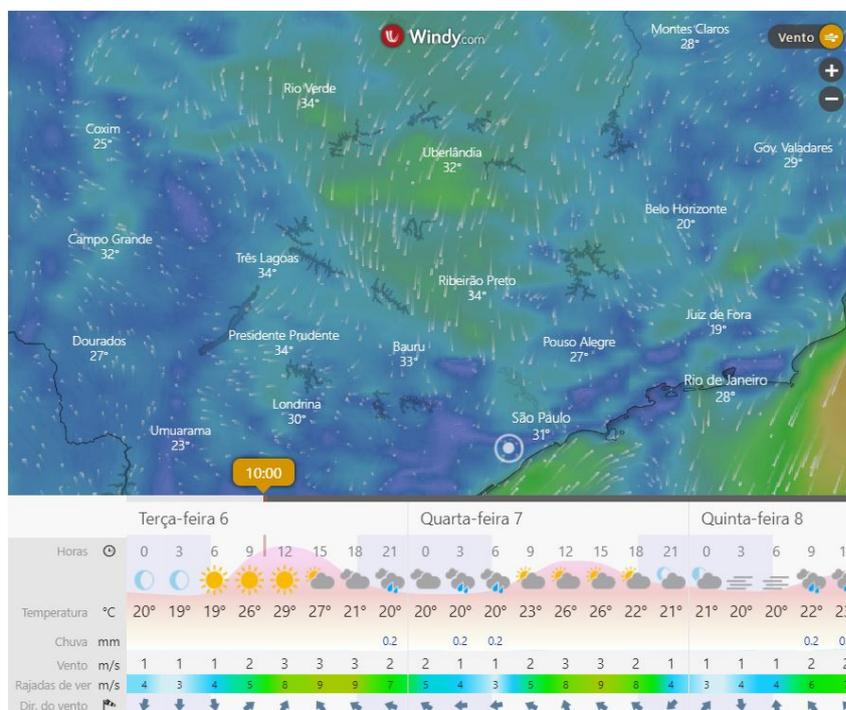


Figura 39 – Velocidades do vento, em  $\frac{m}{s}$ , segundo o website Windy.com (acesso em 6 de outubro de 2020)

Ademais, o incremento dos passos foi realizado de modo automático pelo software

pois assim o tempo para simular e a disponibilização dos resultados eram adquiridas muito mais rapidamente (tempo mínimo para cada passo é 0,1% do tempo total de simulação e tempo máximo é 10%).

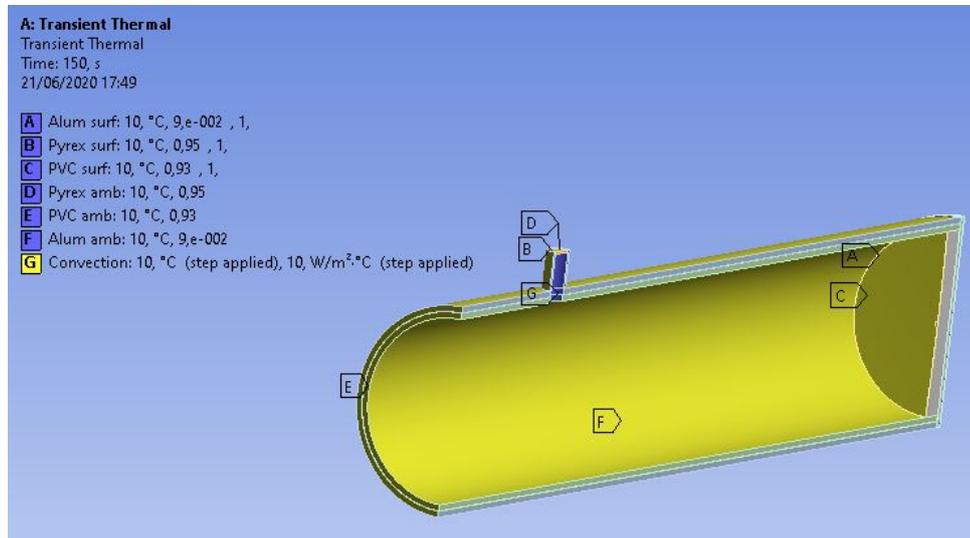


Figura 40 – Condições de contorno de transferência de calor

Assim, simulando o modelo para  $\Delta t = 3600s$ :

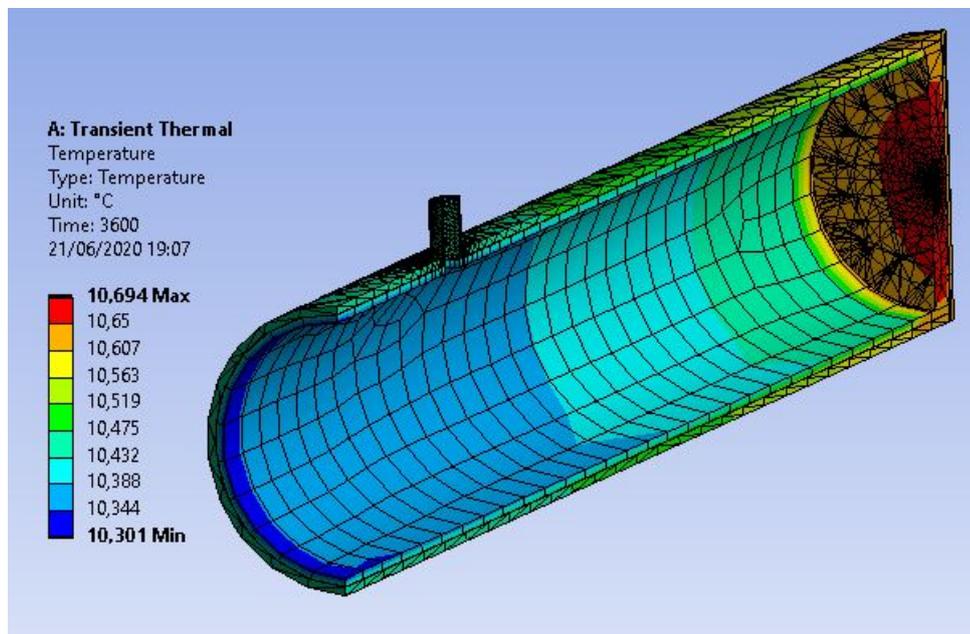


Figura 41 – Simulação com tempo total igual a 3600 segundos, corpo inteiro

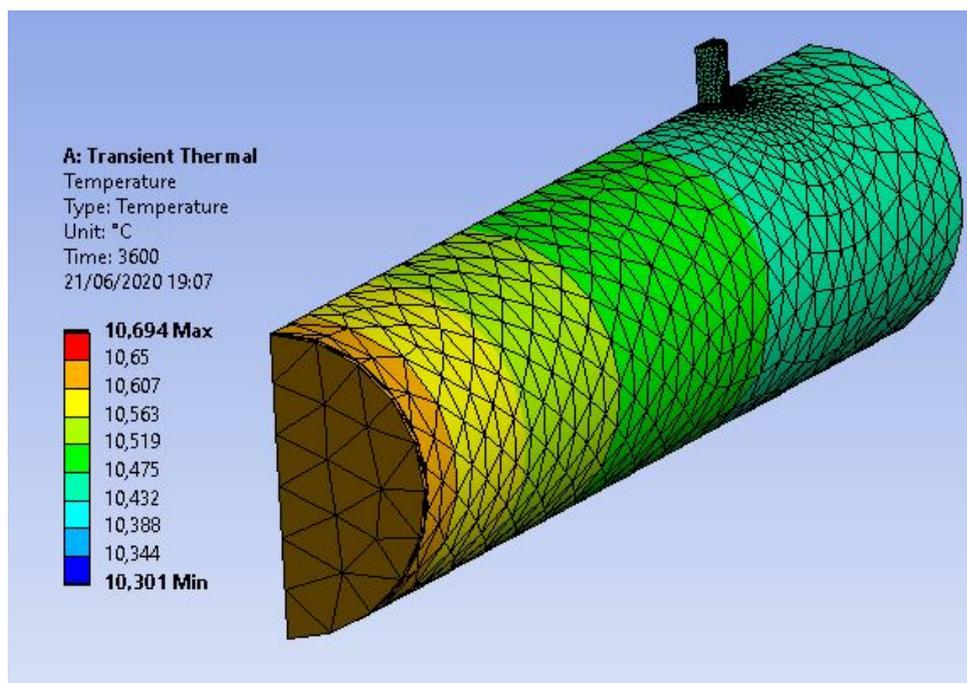


Figura 42 – Simulação com tempo total igual a 3600 segundos, tubo de alumínio

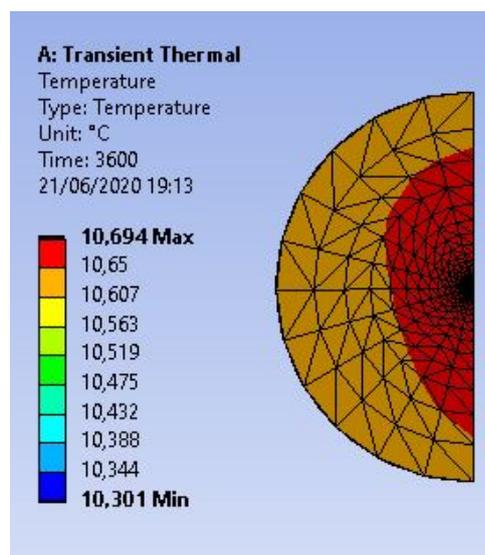


Figura 43 – Simulação com tempo total igual a 3600 segundos, face da frente do vidro do espelho

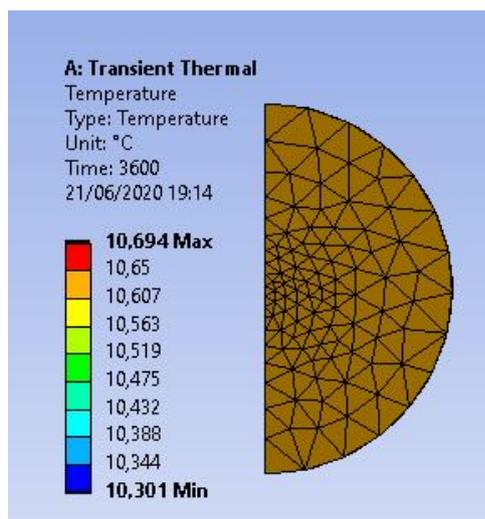


Figura 44 – Simulação com tempo total igual a 3600 segundos, face de trás do vidro do espelho

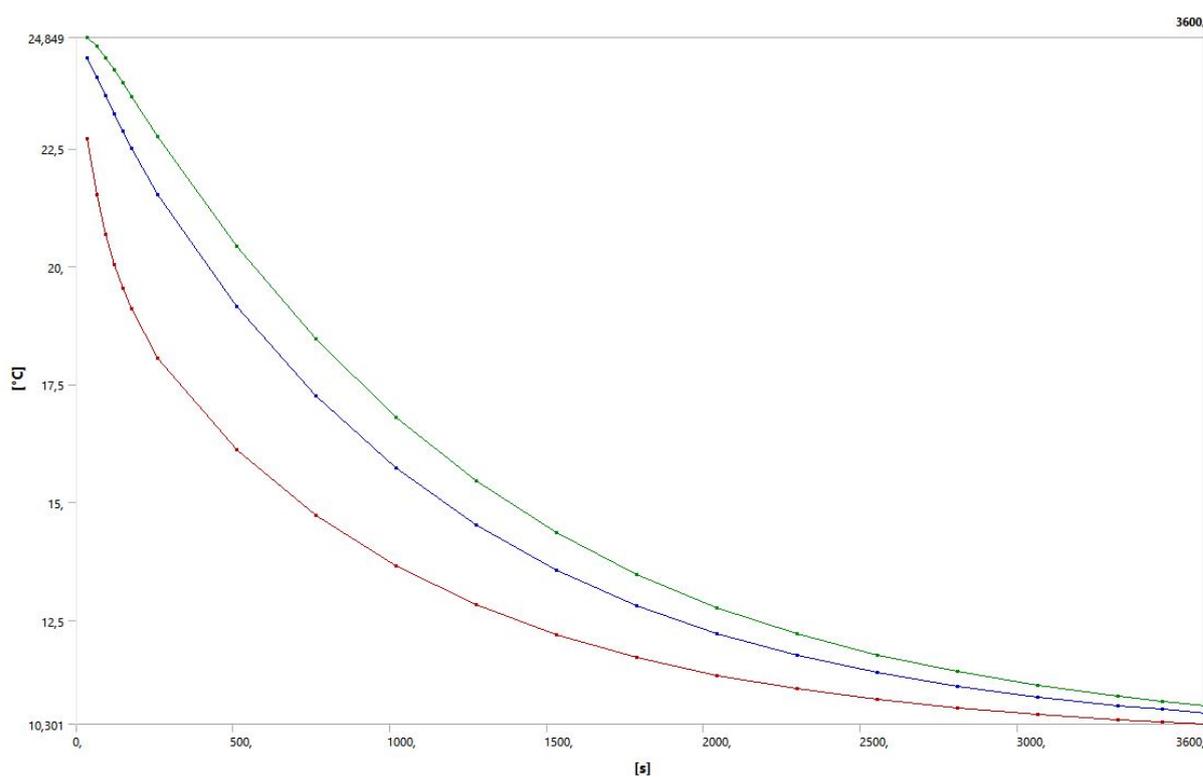


Figura 45 – Tabela de temperatura ao longo do tempo

	Time [s]	✓ Minimum [°C]	✓ Maximum [°C]	✓ Average [°C]
1	36,	22,7	24,849	24,42
2	63,98	21,513	24,659	24,002
3	91,961	20,673	24,425	23,607
4	119,94	20,04	24,165	23,227
5	147,92	19,537	23,89	22,86
6	175,9	19,101	23,606	22,504
7	259,84	18,053	22,746	21,518
8	511,66	16,114	20,433	19,146
9	763,49	14,721	18,463	17,25
10	1019,2	13,653	16,807	15,724
11	1274,8	12,834	15,454	14,516
12	1530,5	12,203	14,36	13,564
13	1786,2	11,714	13,479	12,815
14	2041,9	11,337	12,774	12,223
15	2297,6	11,045	12,213	11,758
16	2553,2	10,817	11,764	11,391
17	2808,9	10,641	11,408	11,102
18	3064,6	10,503	11,124	10,875
19	3320,3	10,396	10,898	10,696
20	3460,1	10,345	10,789	10,61
21	3600,	10,301	10,694	10,535

Figura 46 – Tabela de temperatura ao longo do tempo

Aplicamos condições de contorno de restrição de movimento em direção à face normal à de corte e também outra condições de restrição de movimento num ponto no centro do espelho para simular as deformações resultantes:

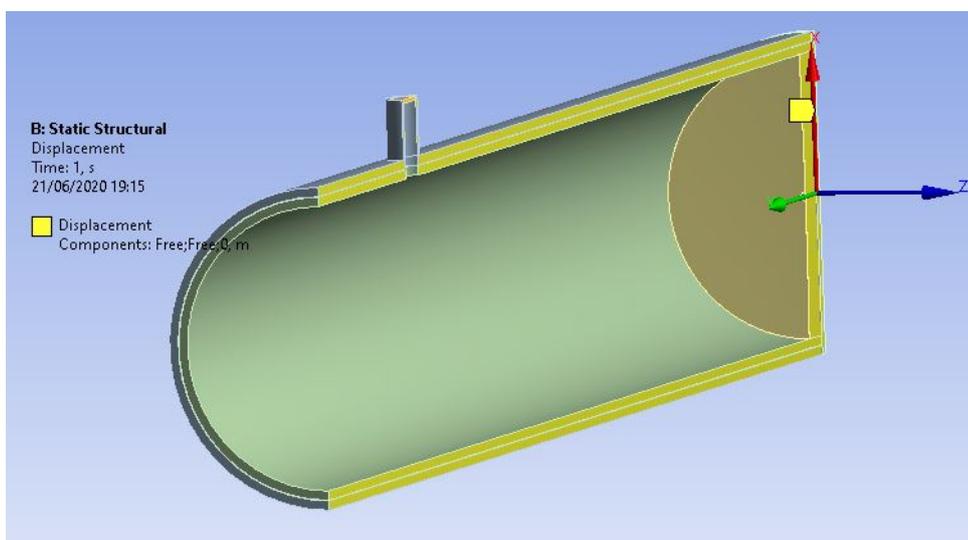


Figura 47 – Condições de contorno para análise estrutural estática

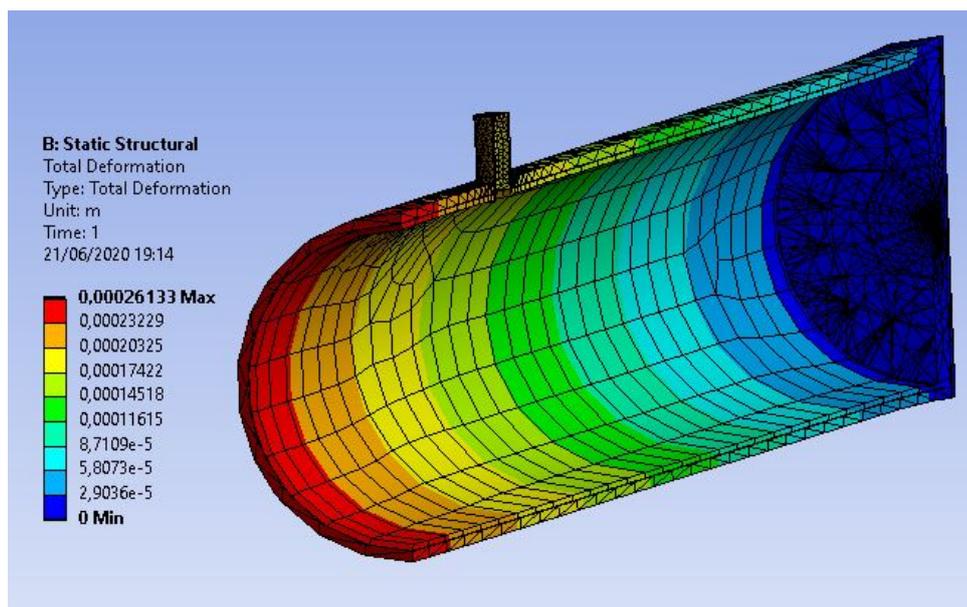


Figura 48 – Deformações totais

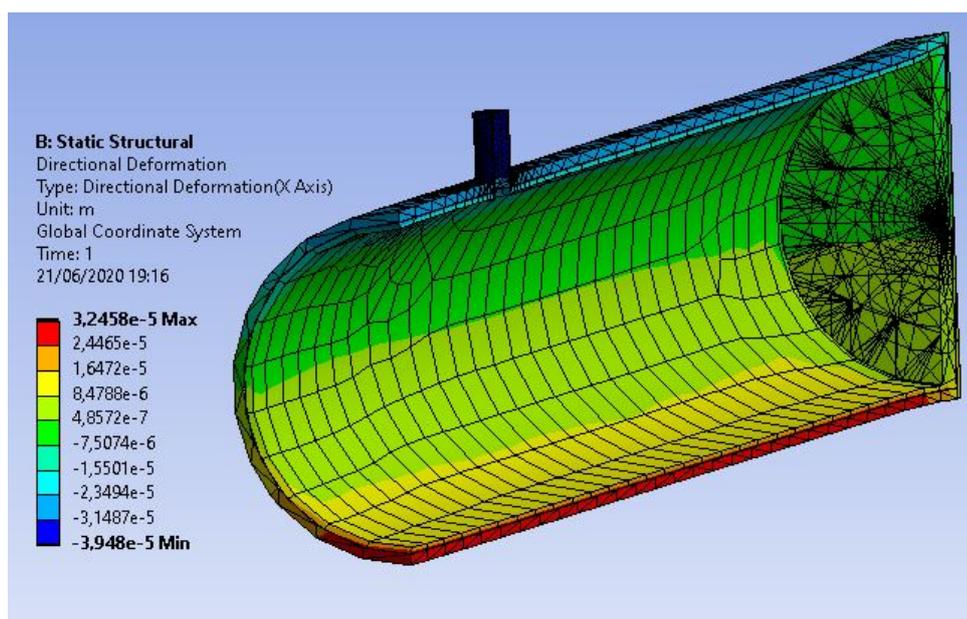


Figura 49 – Deformações na direção radial

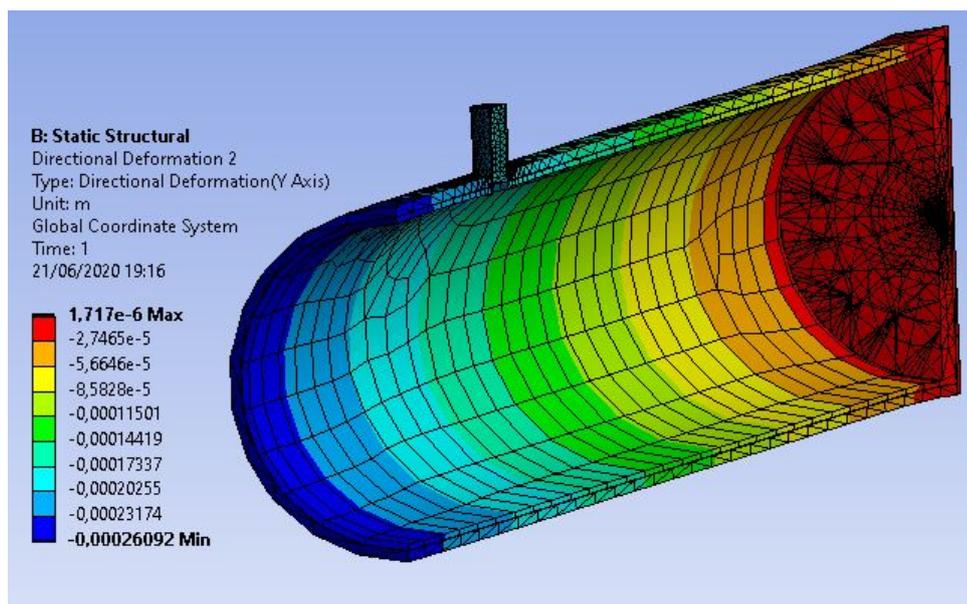


Figura 50 – Deformações longitudinais

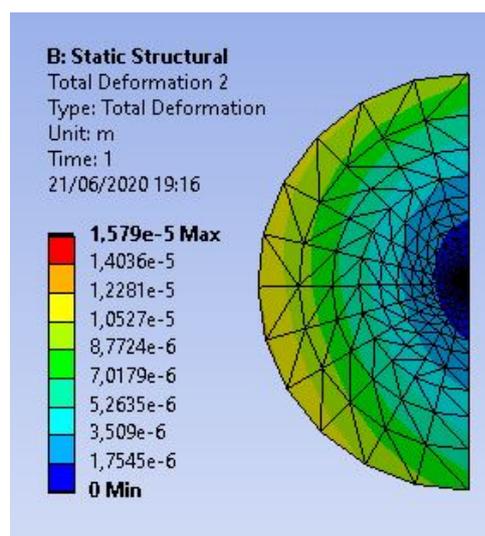


Figura 51 – Deformações totais na face frontal (de reflexão) do primário

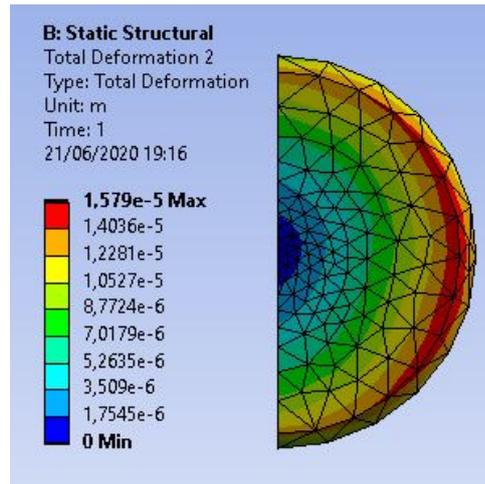


Figura 52 – Deformações totais na face traseira do primário

## 4.6 Resultados Parciais

Como era de se esperar, as maiores temperaturas localizam-se no núcleo do vidro *Pyrex* e as menores nas bordas da estrutura (tais quais as figuras 43 e 42) devido às condições de transferência de calor impostas e também à condutibilidade térmica de cada material. Também vemos grandes diferenças de temperaturas no espelho, resultando em dilatação na ordem de  $10^{-5}m$ . As simulações mostram o desempenho térmico antes de qualquer aplicação de correção dos efeitos térmicos, e dessa forma vemos algumas oportunidades em otimizar nosso telescópio a partir de modificações decorrentes da análise de suas simulações térmicas.

## 5 Compensação dos efeitos térmicos

Nesse capítulo será discutido as ações necessárias para controlar as distorções que causam o empobrecimento da imagem captada pelo telescópio amador padrão. Como já provado no capítulo 4, ambos modelos de telescópio amadores precisam de formas de compensação térmica para controlar a distribuição de temperatura e conseqüentemente as deformações correlacionadas a dilatação.

Para os problemas mencionados nas seções anteriores serão discutidas soluções (algumas delas já existentes na indústria) e como essas soluções poderão ser adaptadas ao nosso projeto. Simulações e estudos teóricos serão feitas para guiar as soluções desejadas. Para que as soluções sejam estudadas de forma hábil, optaremos por focar no telescópio refletor Newtoniano, que é o modelo mais frequentemente vendido a astrônomos amadores.

### 5.1 Transferência de calor para as faces espelho a diferentes taxas

Tal como observado no capítulo 4, temos que nas duas faces do espelho há transferência de calor a taxas diferentes, o que causa deformações a níveis diferentes e pode, dependendo da temperatura, alterar a distância focal, prejudicando a formação da imagem consideravelmente. Dessa forma, iremos identificar as taxas de calor máximas (em módulo) transferida em cada superfície, tentando equalizar eventuais diferenças.

A taxa de transferência de calor por convecção  $Q_{conv}$  (medida em W) para uma superfície é dada por (BERGMAN; LAVINE; INCROPERA, 2011a):

$$Q_{conv} = hA(T_{amb} - T_{sup}) \quad (5.1)$$

Sendo  $h$  o coeficiente de convecção (no caso em  $\frac{W}{m^2K}$ ),  $A$  a área do corpo ( $m^2$ ),  $T_{amb}$  a temperatura do ambiente e  $T_{sup}$  a temperatura da superfície a qual a convecção ocorre (ambas em  $K$ ).

No caso, temos de acordo com as simulações já realizadas anteriormente e com base nas imagens 38 e 39,  $h = 10 \frac{W}{m^2K}$ ,  $T_{amb} = 298K$  e  $T_{sup} = 283K$  (diferença de temperatura inicial e máxima considerada na modelagem (imagem 40), pois sabemos que a temperatura na superfície vai decaindo ao longo da exposição ao ambiente). Como a área do corpo utilizaremos a área do espelho primário do telescópio tubular (32):

$$A_{esp} = \pi R_{int}^2 \quad (5.2)$$

Sabendo que o raio interno  $R_{int} = 0,076200m$ , temos então  $A = 0,018241m^2$ . Portanto:

$$Q_{conv,min,esp} = 10 \cdot 0,018241 \cdot (283 - 298) = -2,7362W \quad (5.3)$$

Sendo  $Q_{conv,min,esp}$  a nomenclatura dada para a mínima taxa de perda de calor por condução no espelho.

Também há a taxa de condução de calor  $Q_{cond}$  (em W) da estrutura do telescópio em contato com o espelho (BERGMAN; LAVINE; INCROPERA, 2011a):

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (5.4)$$

O sinal negativo é devido ao sentido da condução ser da superfície de maior temperatura até a de menor temperatura (BERGMAN; LAVINE; INCROPERA, 2011a).

Com  $k$  sendo a condutividade térmica do material ( $\frac{W}{mK}$ ),  $A$  a área a qual ocorre passagem de calor ( $m^2$ ) e  $\frac{dT}{dx}$  o gradiente de temperatura no meio ( $\frac{K}{m}$ ).

Aliás, se considerássemos o meio de condução como uniforme e distribuição de temperatura nele como linear, poderíamos reescrever a equação de condução:

$$Q_{cond} = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{x} \quad (5.5)$$

Com  $x$  sendo o comprimento considerado para a transferência do calor e  $T_1$  e  $T_2$  como as temperaturas das superfícies ( $T_2 > T_1$ ). Essa equação pode ser usada para transferência de calor entre o espelho e sua tampa atrás. No entanto, para a condução de calor entre o espelho e suas laterais, devido a geometria radial do problema, o gradiente de temperatura não é linear e então não se deve adotar esse modelo. (BERGMAN; LAVINE; INCROPERA, 2011b) nos mostra uma equação própria para condução em meios cilíndricos ocos:

$$Q_{cond,cil} = \frac{2\pi Lk(T_1 - T_2)}{\ln(\frac{R_2}{R_1})} \quad (5.6)$$

Sendo  $R_1$  e  $R_2$  os raios interno e externo do cilindro,  $T_1$  e  $T_2$  suas temperaturas respectivas e  $L$  é o comprimento do cilindro.

Sabemos que  $R_2 = R_{ext} = 86,5mm$ ,  $R_1 = R_{int} = 76,2mm$ ,  $T_1 = 283K$ ,  $T_2 = 298K$  e  $L = 20mm$ . A condutividade térmica depende do material intermediário entre o espelho e o ambiente:

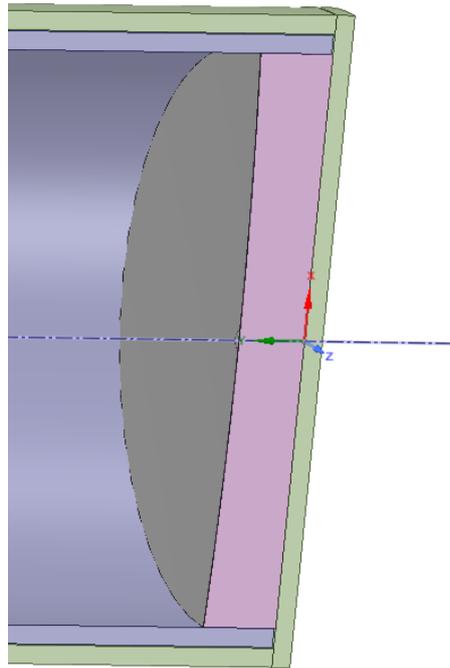


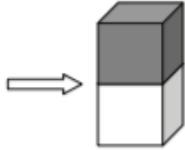
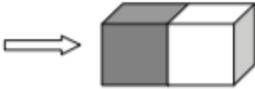
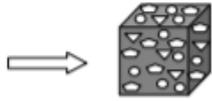
Figura 53 – *Zoom* atual no espelho do nosso projeto. A cor verde representa a estrutura de alumínio, a cor lilás representa a estrutura de PVC e a rosa, o espelho

Entre a traseira do espelho e o meio externo há apenas a tampa de alumínio, cuja condutividade térmica é mostrada na tabela 2:  $k_{Al} = 148,62 \frac{W}{mK}$ . Portanto, o calor conduzido é dado pela substituição dos valores que temos na equação 5.5:

$$Q_{cond,tampa} = -148,62 \cdot (76,2 \cdot 10^{-3})^2 \frac{(298 - 283)}{5 \cdot 10^{-3}} = -8133,1W \quad (5.7)$$

A parte traseira do espelho (sem considerar o espelho como um todo, mas sim apenas sua superfície que mantém contato com a tampa) perde calor muito mais rapidamente que a dianteira devido a alta condutividade do alumínio e a fina espessura da tampa. É notável que a tampa deve ser reconstruída de forma a evitar uma perda de calor tão alta.

No caso de transferência de calor para a geometria radial, para calcular a condutividade térmica equivalente  $k_{eq}$  pela associação em série de dois materiais com condutividades diferentes podemos assumir que as condutividades térmicas comportam-se, fisicamente, de forma similar a capacitores elétricos (MIYAWAKI; PONGSAWATMANIT, 1994):

Model	Schematic Diagram	Equation
Parallel		$k_{pa} = \sum_{i=1}^n X_i^v k_i$
Series		$\frac{1}{k_{se}} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i^v}{k_i}$
Maxwell-Eucken		$k_{ma} = k_c \left\{ \frac{k_d + 2k_c - 2X_d^v(k_c - k_d)}{k_d + 2k_d + X_d^v(k_c - k_d)} \right\}$

source: (MIYAWAKI; PONGSAWATMANIT, 1994).

Figura 54 – Modelos para determinação de associação de condutividades térmicas

Segundo a figura 54, a associação em série  $k_{se}$  desses materiais é dada pela segunda fórmula, com  $k_i$  sendo a condutividade térmica do material e  $X_i^v$  sendo sua fração volumétrica na associação. Sabendo que o tubo de PVC possui diâmetro interno de 76,2 mm e diâmetro externo de 81,2 mm, e que o tubo de alumínio possui diâmetro interno de 81,2 mm e externo de 86,5 mm, ambos com altura do espelho de 20 mm, temos que suas frações volumétricas são:

$$X_{Al}^v = \frac{20 \cdot \pi(86,5^2 - 81,2^2)}{20 \cdot \pi(86,5^2 - 76,2^2)} = 0,53038 \quad (5.8)$$

$$X_{PVC}^v = 1 - X_{Al}^v = 0,46962 \quad (5.9)$$

Assim, a condutividade térmica equivalente será:

$$\frac{1}{k_{se}} = \frac{0,53038}{148,62} + \frac{0,46962}{0,175} \Rightarrow k_{se} = \frac{148,62 \cdot 0,175}{0,5(148,62 \cdot 0,175)} = 0,37199 \frac{W}{mK} \quad (5.10)$$

E a taxa de transferência de calor máxima em módulo torna-se:

$$Q_{cond,min,cil} = \frac{2\pi 20 \cdot 10^{-3} \cdot 0,37199(283 - 298)}{\ln\left(\frac{86,5}{76,2}\right)} = 5,5306W \quad (5.11)$$

Como pode-se ver, é bem menor que a taxa de calor inicialmente perdida na tampa devido a baixa condutividade térmica do PVC. Por esta perda de calor ser simétrica em

relação ao eixo central do telescópio e não ser muito diferente da perda na região dianteira, concluímos que não há necessidade de modificar a estrutura do telescópio para alterar a transferência de calor nesta região.

### 5.1.1 Reconstrução da tampa

Com base na fórmula de associação de condutividades em série (54), podemos contornar o problema da grande perda de calor na traseira do espelho aumentando o comprimento da tampa, fazendo um orifício nela e inserindo material isolante térmico no orifício, de forma a reduzir a perda de calor e mantendo a rigidez e a estética do telescópio.

Pela fórmula de associação em série disponível em 54 e assumindo a hipótese de aproximar a distribuição de temperatura linearmente, teríamos que a perda de calor por convecção torna-se:

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_{eq}} &= \frac{1}{k_{se}} = \frac{X_{Al}^v}{k_{Al}} + \frac{X_{PVC}^v}{k_{PVC}} \Rightarrow \frac{1}{k_{se}} = \frac{0,5}{148,62} + \frac{0,5}{0,175} \\ &\Rightarrow k_{se} = \frac{148,62 \cdot 0,175}{0,5(148,62 + 0,175)} = 0,34959 \frac{W}{mK} \end{aligned} \quad (5.12)$$

$$Q_{cond,min,tampa} = -0,34959 \cdot \pi(76,2 \cdot 10^{-3})^2 \left( \frac{298 - 283}{10 \cdot 10^{-3}} \right) = -9,5656W \quad (5.13)$$

Ao dobrar o comprimento da tampa e inserir uma camada intermediária, foi possível reduzir a perda máxima de calor da superfície em contato com a tampa em, aproximadamente, 99,88%. Dessa forma, é nítido que devemos alterar a composição da tampa protetora de forma a manter as temperaturas no espelho ao serem expostas ao meio.

Indo além, quadruplicando o comprimento da tampa (de 5mm para 20mm) e inserindo a camada intermediária de PVC com comprimento de 15mm (75% da fração volumétrica da tampa):

$$\frac{1}{k_{se}} = \frac{0,25}{148,62} + \frac{0,75}{0,175} \Rightarrow k_{se} = 0,23324 \frac{W}{mK} \quad (5.14)$$

$$Q_{cond,min,tampa} = -0,23324 \cdot \pi(76,2 \cdot 10^{-3})^2 \left( \frac{298 - 283}{20 \cdot 10^{-3}} \right) = -3,1910W \quad (5.15)$$

Conseguimos reduzir a maior perda de calor possível ainda mais, em 2/3 do que foi calculado, e ainda mantemos rigidez e estética no telescópio. E a taxa de transferência de calor na parte traseira tornou-se muito próxima da dianteira (-2,7362 W).

### 5.1.2 Custos

Após verificarmos as opções de mercado, descobrimos que um tarugo de PVC com diâmetro um pouco maior do que precisaríamos seria muito custoso e difícil de ser encontrada, além de que apenas utilizaríamos uma parcela muito pequena deste tarugo. Desta forma, pesquisamos novas alternativas e descobrimos que a espuma de poliuretano é uma ótima solução para contornar tais problemas devido ao seu baixo custo e a possibilidade de moldá-la de acordo com a necessidade.

A espuma de poliuretano rígida possui condutividade térmica ainda mais baixa que o PVC ( $k_{pol} = 0,05 \frac{W}{mK}$ ) (PRASAD et al., 2009) e, apesar de sua rigidez não ser tão alta em relação a do PVC ( $E_{pol} = 421 - 461 MPa$  (STIRNA et al., 2011), contra  $E_{PVC} = 2860 MPa$  (tabela 2)), podemos prolongar a camada cilíndrica de PVC de forma a revestir o telescópio tal qual a imagem abaixo:

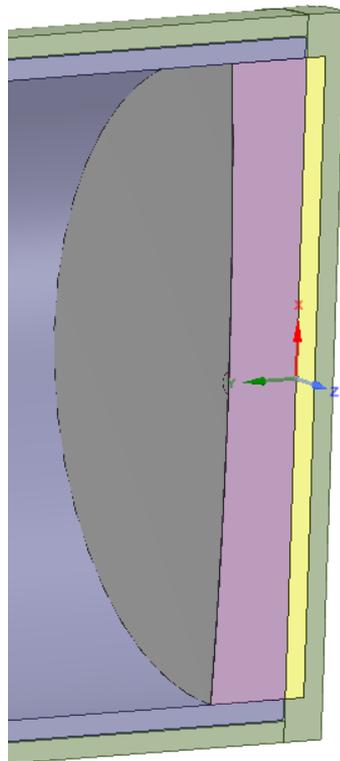


Figura 55 – Modelo com adição de espuma de poliuretano rígida (em amarelo) para reduzir transferência de calor.

Assim, a considerando uma tampa de 20 mm (15 mm de poliuretano), teríamos que a perda de calor torna-se:

$$\frac{1}{k_{se}} = \frac{0,25}{148,62} + \frac{0,75}{0,05} \Rightarrow k_{se} = 0,066659 \frac{W}{mK} \quad (5.16)$$

$$Q_{cond,min,tampa} = -0,066659 \cdot \pi(76,2 \cdot 10^{-3})^2 \left( \frac{298 - 283}{20 \cdot 10^{-3}} \right) = -0,91197W \quad (5.17)$$

Percebe-se que a transferência de calor mínima e inicial na parte em contato com a tampa reduziu-se demais. Dessa forma, iremos reduzir seu comprimento de forma a aumentar a transferência de calor, para 5 mm de espuma de poliuretano (comprimento total da tampa de 10 mm, sendo os 5 mm restantes de alumínio):

$$\frac{1}{k_{se}} = \frac{0,25}{148,62} + \frac{0,75}{0,05} \Rightarrow k_{se} = 0,099966 \frac{W}{mK} \quad (5.18)$$

$$Q_{cond,min,tampa} = -0,099966 \cdot \pi(76,2 \cdot 10^{-3})^2 \left( \frac{298 - 283}{10 \cdot 10^{-3}} \right) = -2,7353W \quad (5.19)$$

Assim, com a adição da espuma de poliuretano, as taxas mínimas (mínimas devido ao sinal negativo, porém máximas em módulo considerando as temperaturas utilizadas para simulações no capítulo 4) de transferência de calor nas superfícies frontal (-2,7362 W) e na traseira (-2,7353 W) tornam-se quase iguais.

### 5.1.3 Simulações

Considerando as mesmas condições de simulação anteriores:

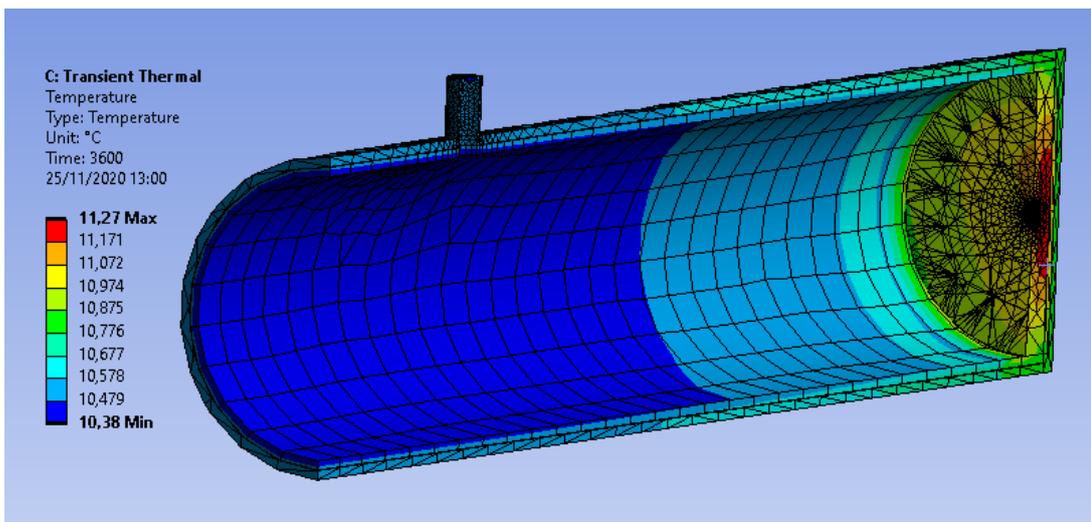


Figura 56 – Simulação de 3600 segundos com adição de poliuretano na tampa

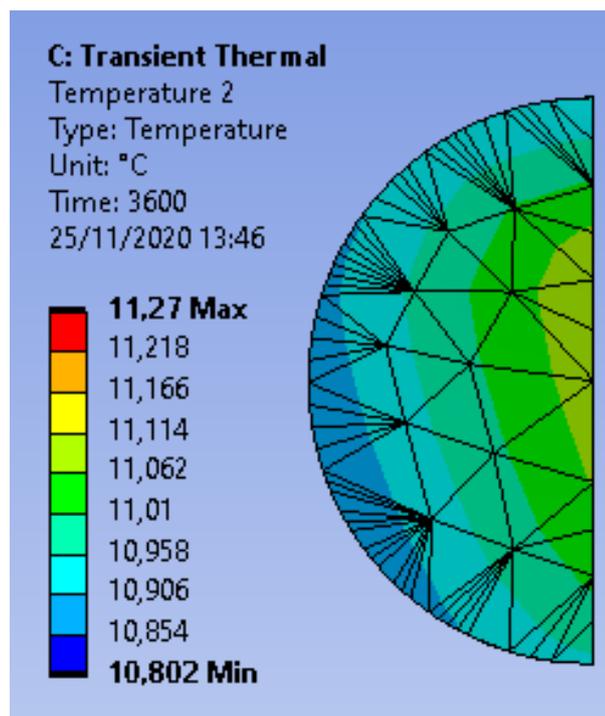


Figura 57 – Simulação térmica do espelho com tampa de poliuretano, frente

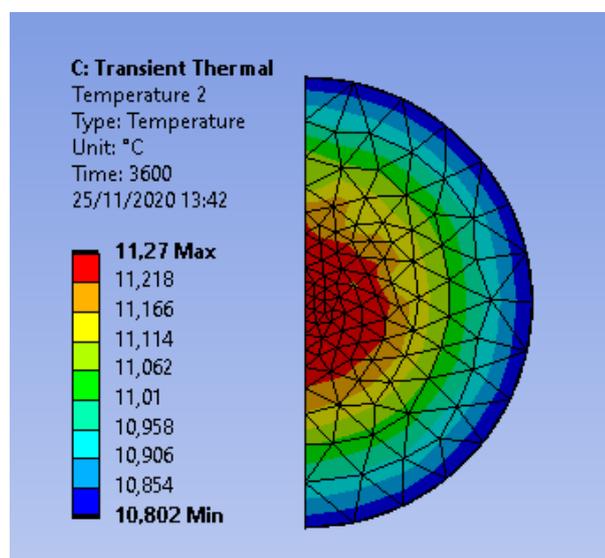


Figura 58 – Simulação térmica do espelho com tampa de poliuretano, trás

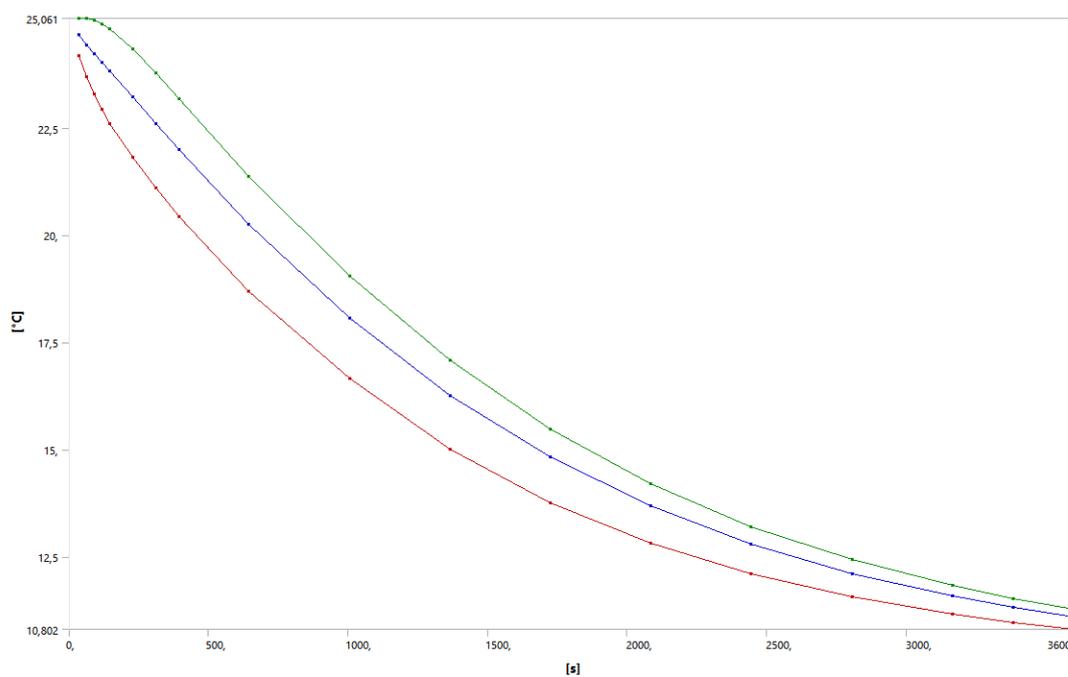


Figura 59 – Gráfico de temperatura x tempo para o espelho

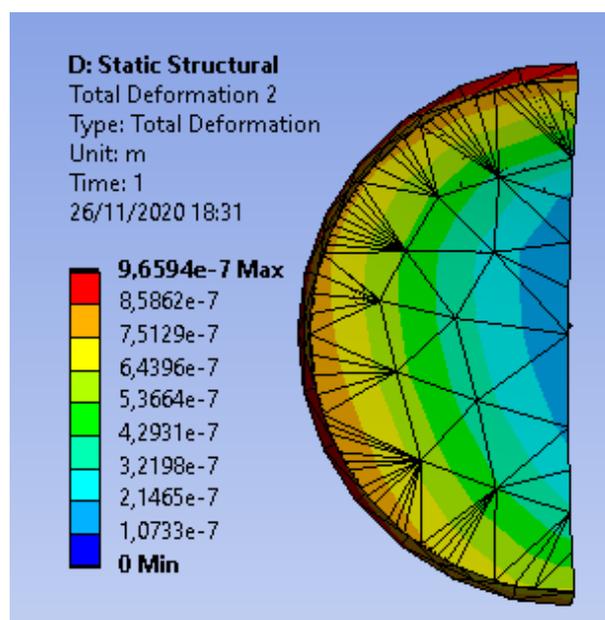


Figura 60 – Deformação resultante no espelho com tampa de poliuretano, frente

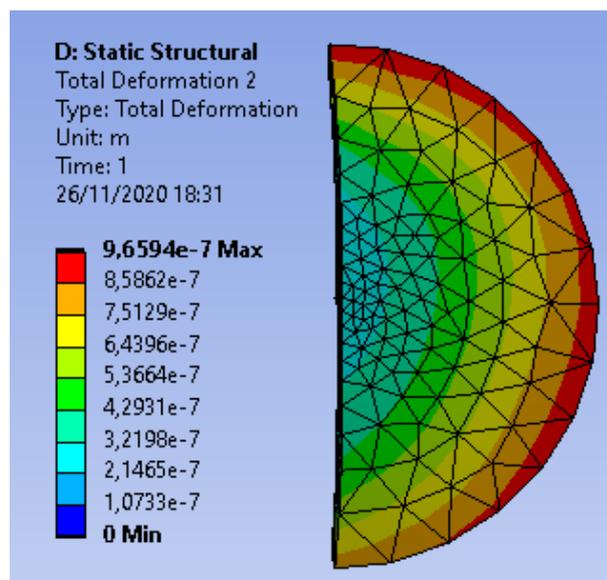


Figura 61 – Deformação resultante no espelho com tampa de poliuretano, trás

Agora, comparando ao modelo sem camada de poliuretano (preferimos mostrar novas imagens para dar enfoque ao espelho):

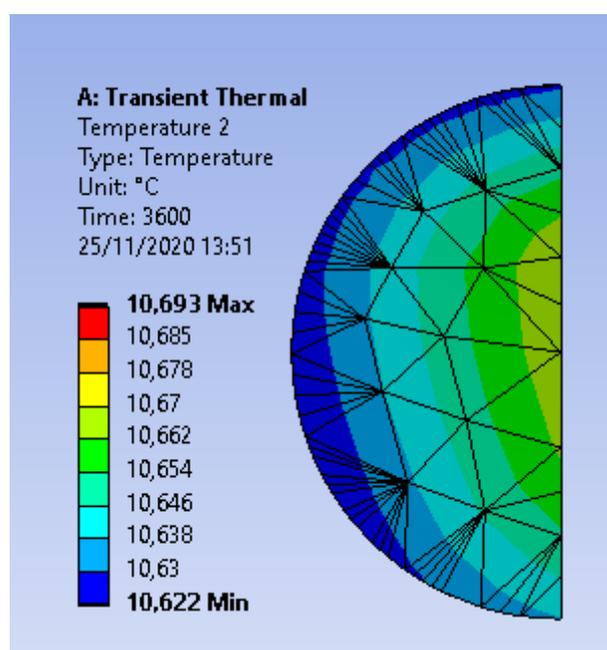


Figura 62 – Simulação térmica do espelho com o modelo antigo, frente

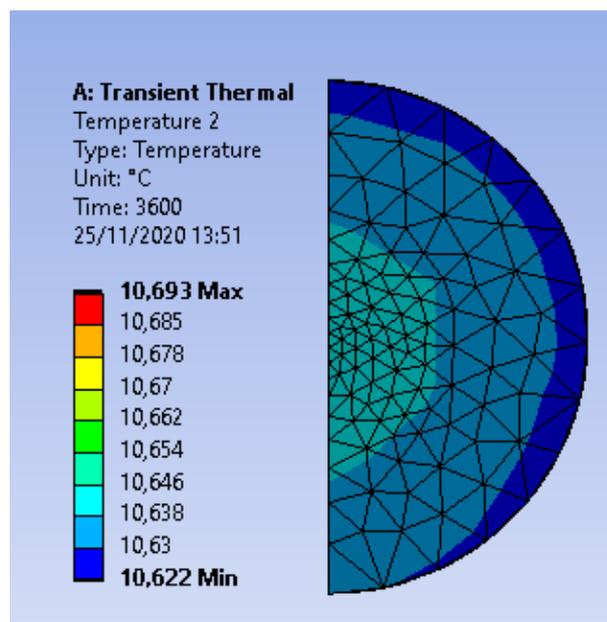


Figura 63 – Simulação térmica do espelho com o modelo antigo, trás

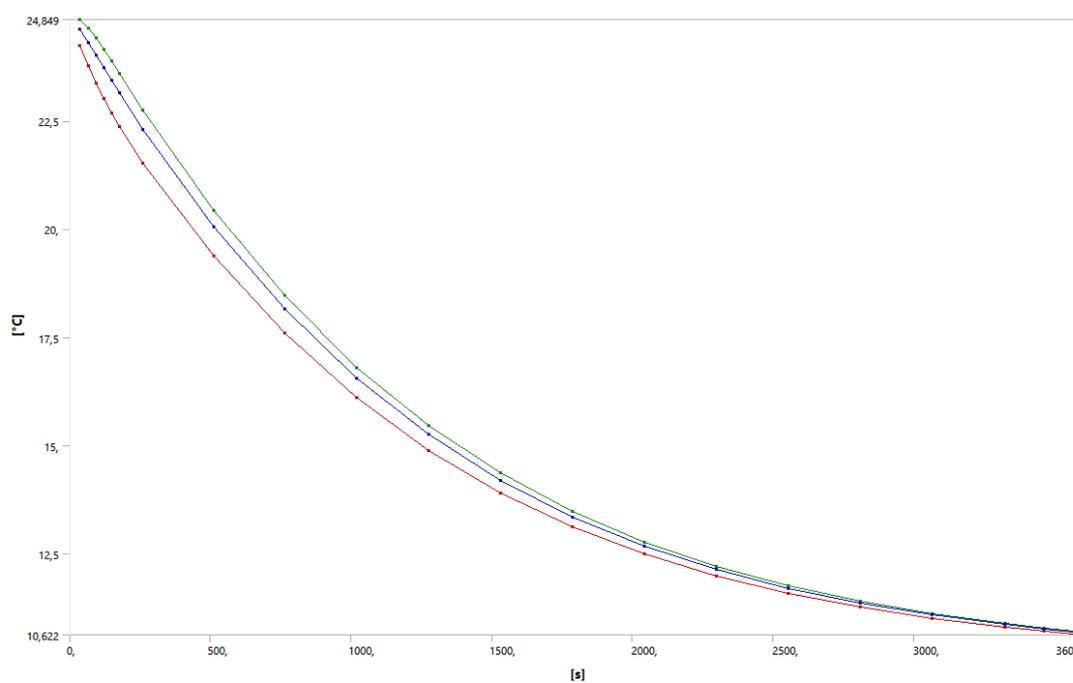


Figura 64 – Gráfico de temperatura x tempo para o espelho, modelo anterior

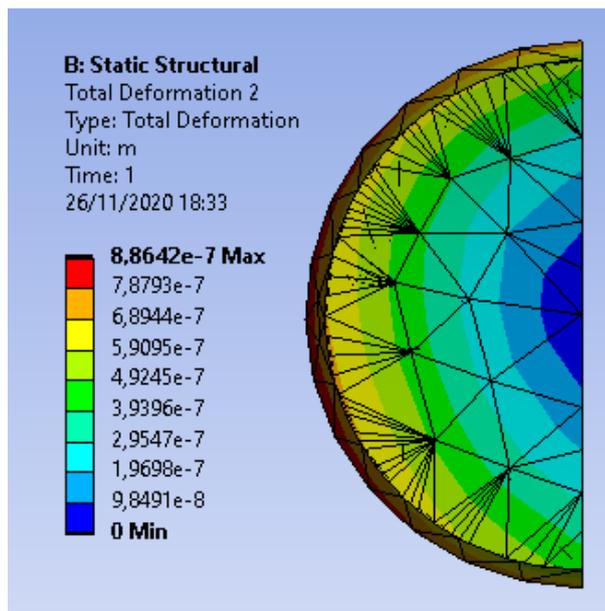


Figura 65 – Deformação resultante no espelho do modelo anterior, frente

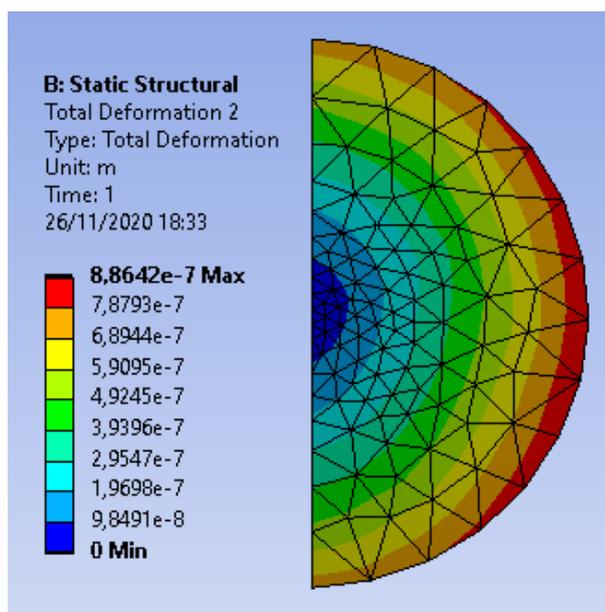


Figura 66 – Deformação resultante no espelho do modelo anterior, trás

A modificação realizada na tampa não trouxe os efeitos esperados a longo prazo. Como podemos ver, os gradientes de temperaturas finais após o tempo de simulação de 3600 segundos foram maiores no caso da tampa com poliuretano do que em relação ao modelo anterior (imagens 57 e 58 vs 62 e 63). Conseqüentemente, suas deformações totais, ainda que não muito diferentes, foram maiores no caso da tampa de poliuretano (imagens 60 e 61 vs 65 e 66). Analisando o gráfico de decaimento da temperatura no espelho para a tampa modificada (imagem 59), vemos que o poliuretano, de fato, preserva a temperatura na face de contato melhor do que o alumínio. A temperatura começa a decair bem mais

lentamente nessa superfície do que na outra, o que gera o maior gradiente de temperatura ao longo do tempo.

Assim, conclui-se que os cálculos realizados nas subseções anteriores não estavam incorretos: realmente o poliuretano resulta em menor perda de calor da superfície em contato. Entretanto, o problema de utilizar essa solução é que para períodos maiores de tempo gera maiores gradientes de temperatura e por consequência, maiores deformações. Enfim, concluímos que tentativas de soluções semelhantes para redução de perda de calor por condução para telescópios são melhor indicadas para situações em que o ideal é tentar diminuir a variação de temperatura de parte específica de um corpo, porém cujos aumentos dos gradientes de temperatura de outras partes ao seu redor não sejam, de fato, decisivas.

## 5.2 Deformação

Como visto no capítulo 4, a deformação na estrutura é mais significativa que a deformação no espelho, e por mais que seja considerado pelo grupo que a variação no espelho seja mais crítica, esse pensamento vem do fato da dificuldade maior de controlar os deslocamentos no espelho. Entretanto, o deslocamento na estrutura não deixa de ser um empecilho para a qualidade da imagem. O suporte do espelho secundário é rigidamente fixado á estrutura do telescópio, e a deformação dessa estrutura é diretamente relacionada a problemas no foco e portanto ao desempenho óptico do telescópio.

A solução inicialmente pensada pela dupla para o problema descrito era a instalação de extensômetros através do tubo e das treliças, de tal forma que tais deformações seriam detectadas e corrigidas através de um sistema de atuadores. Porém o trabalho mudou de rumo, não mais apresentando um modelo físico como um protótipo, e sim apenas soluções teóricas e simulações, nas quais o grupo achou mais interessante estudar uma solução baseada no artigo (GE; DING, 2018).

Para evitar as distorções no espelho, é preciso controlar a temperatura do mesmo, sendo que a dilatação uniforme do mesmo causa deformações significativas. A solução desse problema está relacionada a solução do problema da seção 5.4.

### 5.2.1 Estudo de soluções usando CFRP

Dessa forma, nessa sessão será continuada a proposição da solução do problema em questão, a deformação do tubo. Após analisar o artigo (GE; DING, 2018) o grupo optou por estudar a possibilidade de ponderar essas distorções através da utilização de um material com coeficiente de expansão negativo. O material em questão é o CFRPs, polímero reforçado com fibra de carbono (do inglês *carbon fiber reinforced polymer*). O mesmo já é estudado e utilizado para controlar a precisão de máquinas que estão sujeitas a erros provindo de cargas térmicas.

O material possui as propriedades mecânicas e térmicas mostradas na tabela 3. Nota-se que enquanto o CTE do CFRP é  $-0.41 \cdot 10^{-6} K^{-1}$  enquanto a do alumínio anodizado é de  $23.6 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ .

Propriedade	CFRP	Unidades
Massa específica ( $\rho$ )	1,61	$10^3 kgm^{-3}$
Condutividade térmica (k)	9.4	$WK^{-1}m^{-1}$
CTE - Coeficiente de expansão térmica ( $\alpha$ )	-0.41	$10^{-6} K^{-1}$
Cp - Calor específico	754	$Jkg^{-1}C^{-1}$
Módulo de Young (E)	9.4	$10^9 Pa$
Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,28	-

Tabela 3 – Propriedade do material CFRP

A utilização de tal material permitiria que, quando soldado junto ao alumínio do tubo do telescópio, o mesmo compensasse as variações causadas por efeitos térmicos. Uma vez que o material tendo um coeficiente de expansão negativo, ele diminuiria de tamanho enquanto o alumínio teria tendência de aumentar, assim, forçando a estrutura a se manter na mesma dimensão. A figura 67 mostra um esquema simplificado a se fazer na superfície do tubo do telescópio, acoplar ao alumínio o CFRP, de forma que ambos desloquem o mesmo  $\delta l$  para a temperatura ambiente.

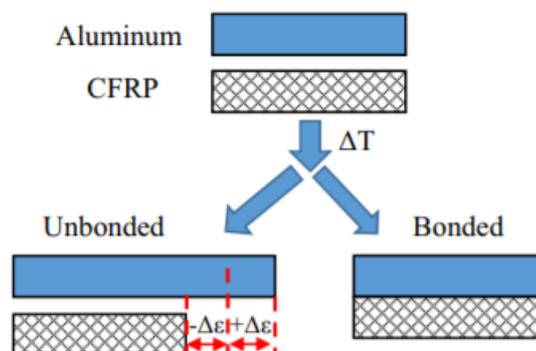


Figura 67 – Esquema dos materiais do tubo, (GE; DING, 2018)

Na figura 68, é mostrado um gráfico mostrando a curva de expansão do alumínio contra a de expansão do CFRP. O desafio é fazer ambos materiais terem dilatações de módulos iguais com sinais diferentes, tendo necessidade de se utilizar um sistema de resistores que deixariam o CFRP ligeiramente mais aquecido que o alumínio, de forma que ambas dilatações se cancelassem, ou de forma similar, usar um sistema de resfriamento no caso em que o alumínio esteja contraindo.

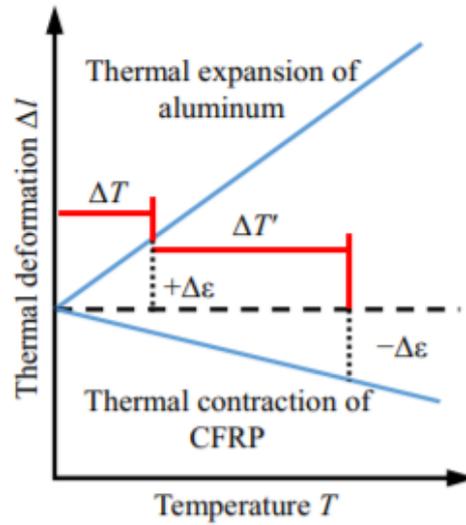


Figura 68 – Gráfico da dilatação versus temperatura ((GE; DING, 2018))

Usando a equação da expansão linear térmica, aonde  $b$  é o comprimento do tubo,  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica e  $\Delta T$  é a mudança de temperatura em relação ao ambiente.

$$\Delta b = \alpha \cdot b \cdot \Delta T \tag{5.20}$$

$$\Delta b = \alpha \cdot b \cdot \Delta T \tag{5.21}$$

Da equação 5.20 e da suposição de variação de comprimentos iguais mostrada em 5.21, temos a equação 5.22

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = -\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) * \frac{b_2}{b_1} \tag{5.22}$$

Considerando tamanhos iguais, temos:

$$\frac{\Delta T_{CFRP}}{\Delta T_{Alumínio}} = -\left(\frac{\alpha_{Alumínio}}{\alpha_{CFRP}}\right) \tag{5.23}$$

$$\frac{\Delta T_{CFRP}}{\Delta T_{Alumínio}} = -\left(\frac{23.6}{0.41}\right) \tag{5.24}$$

Conseguindo as relações:

$$\Delta T_{CFRP} = 57.56 \Delta T_{Alumínio} \tag{5.25}$$

$$\Delta T_{Alumínio} = 0.017 \Delta T_{CFRP} \tag{5.26}$$

### 5.2.2 Solução usando tubos de alumínio e CFRP

Devido a grande diferença de coeficientes de expansão térmicos, pensou-se em construir o tubo de CFRP e aplicar o alumínio como um revestimento externo, de forma a aproveitar o maior coeficiente de expansão do alumínio para aplicar o controle de temperatura nele. Dessa forma, o revestimento de alumínio teria apenas de ser esquentado ou esfriado para um  $\Delta T$  menor, do que o necessário para a mesma variação no CFRP.

Desta forma, a queda de temperatura experienciada pelo telescópio faria o CFRP dilatar enquanto que esse movimento seria compensada pela retração do alumínio, esse sendo resfriado por um ventilador. E para o caso do aumento de temperatura no tubo, haveria uma contração da fibra de carbono e a mesma seria compensada pelo alumínio expandindo por causa do calor gerado pelos resistores.

Como descrito anteriormente, para se ter um mesmo deslocamento linear, tubos do material alumínio e do material CFRP teriam de estar em temperaturas diferentes, seguindo as equações 5.25 e 5.26.

Porém essa solução não é simples de se implementar, para o caso de um tubo interno de alumínio e um externo de CFRP, teríamos que medir a variação de temperatura do tubo interno, multiplicar por 57.56 e aplicar essa diferença de temperatura no tubo externo. Para uma variação de, por exemplo, 3 ° C, teria de se aplicar uma variação de 172.68 ° C. Algo que é completamente inviável pela impossibilidade de se gerar tanto calor em pouco tempo para que haja um real controle preciso da posição da estrutura.

O mesmo vale para um telescópio construído com um tubo externo de alumínio e um interno de CFRP, teríamos que medir a variação de temperatura do tubo interno, multiplicar por 0.017, e seria muito difícil garantir a variação de exatos  $0.017\Delta T_{CFRP}$  no tubo externo.

A maioria dos telescópios amadores seguem a estruturas de dois tubos, um dentro de outro, por isso esse trabalho simula tal situação,

A princípio o trabalho está trabalhando a partir da premissa original de um tubo feito de dois materiais, porém dado as propriedades térmicas e mecânicas do CFRP, é possível se pensar em fazer um telescópio usando apenas esse material, já que seu coeficiente de expansão térmica é muito menor que a de materiais mais convencionais. Essa solução será comentada mais adiante.

### 5.2.3 Solução usando CFRP e tubos de diferentes tamanhos

Outra opção mais simples, e ainda se baseando na equação 5.22, que não exigiria um complexo sistema de aquecimento e resfriamento, seria a de atingir uma combinação ótima de comprimento, de forma que para a mesma variação de temperatura, ambas

apresentem a mesma variação de comprimento.

Dessa forma, o tubo do telescópio seria feito de alumínio e o CFRP seria uma coroa fixada na base, próxima ao espelho. Os tamanhos serão calculados abaixo.

Usando a equação da expansão linear térmica, aonde  $b$  é o comprimento do tubo,  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica e  $\Delta T$  é a mudança de temperatura em relação ao ambiente.

Usando a equação 5.22 e impondo um mesmo  $\Delta T$ , uma vez que ambos materiais estarão no mesmo ambiente e sofrendo a mesma carga térmica, teremos:

$$b_{CFRP} = b_{Alumínio} * \frac{-\alpha_{CFRP}}{\alpha_{Alumínio}} \quad (5.27)$$

$$b_{CFRP} = 0.8 * \frac{0.41}{23.6} \quad (5.28)$$

Portanto temos que, para esse *setup*, o tamanho do tubo de CFRP teria de ser de 13.89 milímetros.

Na próxima seção é mostrado o modelo para a análise dessa solução do telescópio com o tubo de CFRP, também é feito um maior detalhamento das condições de contorno para se ter um modelo no Ansys mais compatível com a realidade, de forma que as simulações dos elementos compensadores dos efeitos térmicos seja mais precisa.

## 5.2.4 Modelo

Baseando-se na solução proposta na subseção anterior, a de soldar um tubo de 13.89 mm em volta do tubo de alumínio, de forma que ambos irão ter variações dimensionais opostas de mesmo valor, cancelando-se. A figura 73 mostra o modelo feito no *Space Claim*.

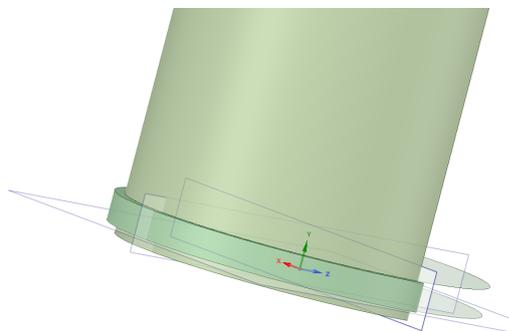


Figura 69 – Modelo da coroa de CFRP feita no *Space Claim*

Em preparo para uma mudança na simulação que será abordada na próxima seção, a malha também foi mudada pro modelo. O modelo agora é dividido em duas partes para

que possa receber separadamente os estímulos térmicos do céu e do solo ao mesmo tempo. A malha construída para as simulações a seguir possui 3892 nós e 10480 elementos, e foi feita procurando-se maximizar a qualidade versus o custo computacional, o qual é limitado na versão estudantil do *Ansys* que usamos. A malha pode ser vista na figura 70.

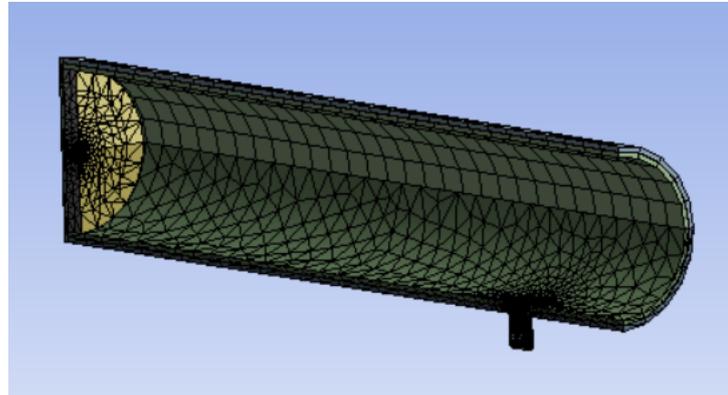


Figura 70 – Malha do telescópio feita no *Ansys*

### 5.2.5 Simulações

Iremos simular novamente o telescópio, porém dessa vez com o modelo inteiro, e com a parte inferior sendo afetada pela radiação refletida pelo solo e a parte superior sendo afetada pela radiação refletida pelo céu, como é mostrado na figura 71,  $dT$  é a diferença de temperatura entre as partes do tubo.

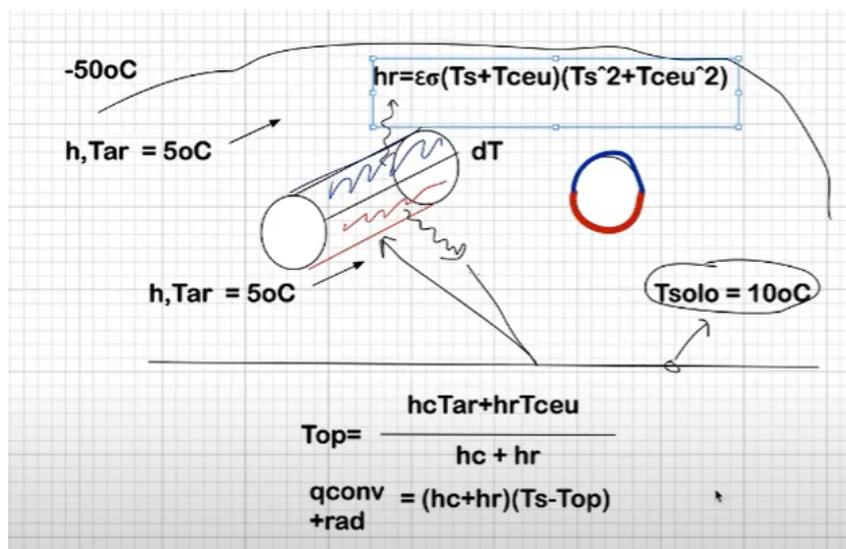


Figura 71 – Esquema térmico do telescópio

Para isso primeiro iremos usar as equações mostradas abaixo para calcular os coeficientes térmicos separadamente para a parte superior e a parte inferior do telescópio

e assim será calculado a temperatura de operação do sistema.

$$h_{\text{radiação}} = \epsilon\sigma(T_{\text{superfície}} + T_{\text{céu}})(T_{\text{superfície}}^2 + T_{\text{céu}}^2) \quad (5.29)$$

$$T_{\text{Operação}} = \frac{h_{\text{convecção}}T_{\text{ar}} + h_{\text{radiação}}T_{\text{céu}}}{h_{\text{convecção}} + h_{\text{radiação}}} \quad (5.30)$$

$$q_{\text{convecção}} + \text{radiação} = (h_{\text{convecção}} + h_{\text{radiação}})(T_{\text{superfície}} - T_{\text{operação}}) \quad (5.31)$$

O coeficiente para a convecção na parte do telescópio voltada para o céu será dado pela equação 5.29, substituindo os valores, com  $\sigma = 5.67 \frac{W}{m^2K^4}$ , emissividade do alumínio anodizado,  $\epsilon = 0.55$ ,  $T_{\text{superfície-al}} = 283.50K$  e  $T_{\text{céu}} = 223.15$  temos  $h_r = 2.06 \frac{W}{m^2C}$

O coeficiente para a convecção na parte do telescópio voltada para o solo será dado pela equação 5.29, substituindo os valores, com  $\sigma = 5.67 \frac{W}{m^2K^4}$ , emissividade do alumínio anodizado,  $\epsilon = 0.55$ ,  $T_{\text{superfície-al}} = 283.50K$  e  $T_{\text{solo}} = 283.15$  temos  $h_r = 2.84 \frac{W}{m^2C}$

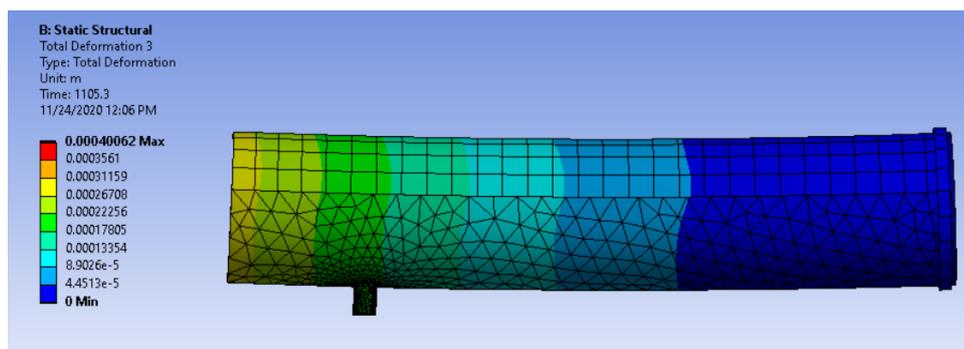
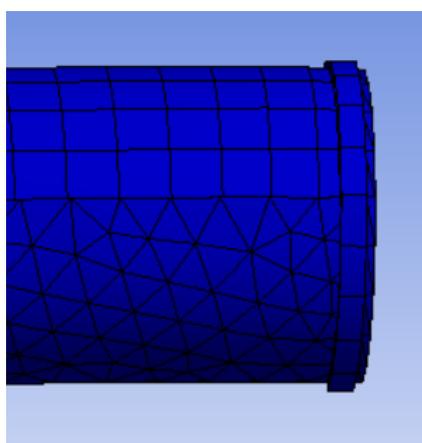
Calculando a  $T_{\text{operação}}$  para a parte do telescópio voltada para o céu, usando os valores calculados anteriormente, temos  $T_{\text{operação}} = \frac{15*278.15+2.06*223.15}{15+2.06} = 271,50K$ , ou seja,  $T_{\text{operação}} = -1.65C$

Calculando a  $T_{\text{operação}}$  para a parte do telescópio voltada para o solo, usando os valores calculados anteriormente, temos  $T_{\text{operação}} = \frac{15*278.15+2.84*283.15}{15+2.84} = 278.95K$ , ou seja,  $T_{\text{operação}} = 5.8C$

## 5.2.6 Simulação coroa de CFRP

Utilizando o *Ansys* e o modelo descrito, a simulação dessa solução foi obtida, a simulação atinge regime estacionário após 1100 segundos de simulação.

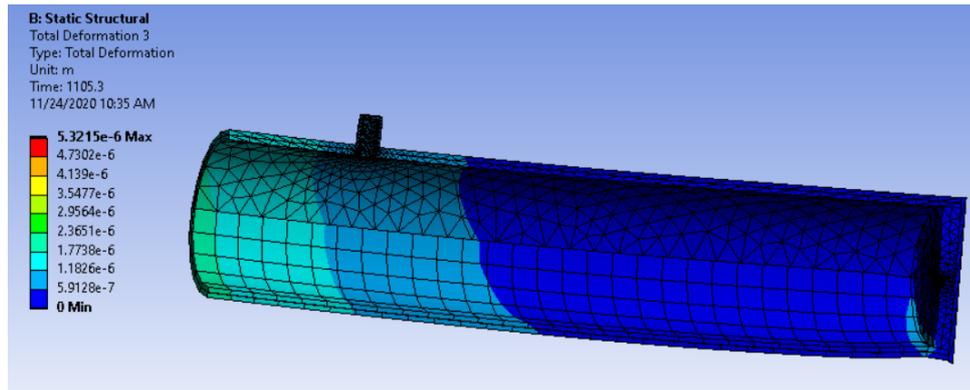
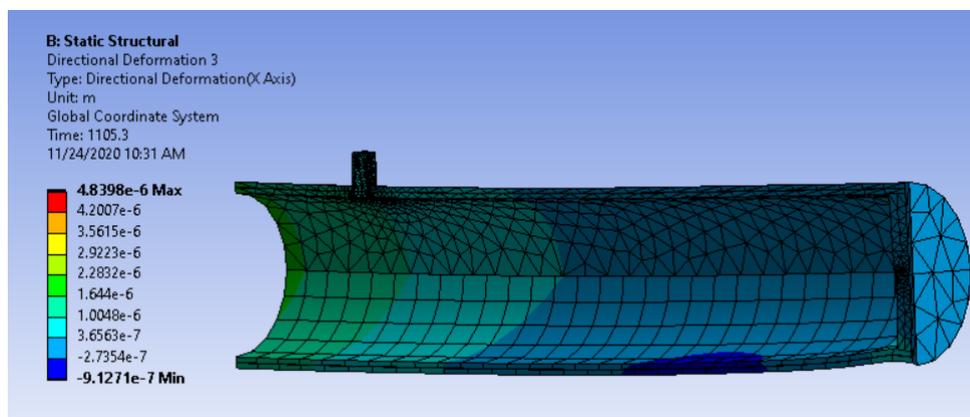
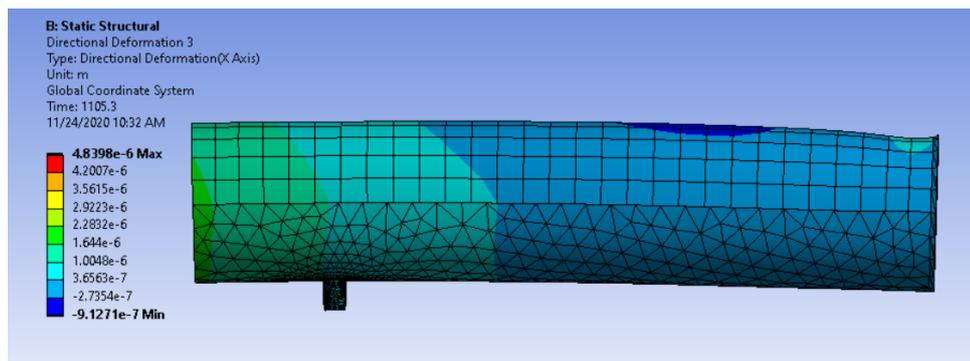
Na figura 72 é possível observar que a deslocação perto da coroa é menor que na ponta, porém os valores de deformação obtidos foram bastante similares aos que a estrutura era submetida sem a utilização do CFRP, portanto o grupo testará outras soluções.

Figura 72 – Simulação da coroa de CFRP feita no *Ansys*Figura 73 – Detalhe da simulação da coroa de CFRP feita no *Ansys*

### 5.2.7 Modelo e tubo de CFRP

Estudando as opções, podemos pensar num modelo feito apenas de CFRP, pois esse material possui um coeficiente de expansão térmica muito menor que a de materiais mais convencionais. Como o escopo desse trabalho era a de achar soluções através de vários métodos incluindo a de seleção de materiais, é razoável simular essa situação e discutir sobre os resultados. A simulação feita atingiu regime estacionário e equilíbrio térmico aos 1100s.

Podemos ver nas imagens 74, 75 e 76 que a utilização desse material para a confecção dos tubos implicaria numa consistente diminuição da deformação, com as deformações ficando na ordem de  $10^{-6}$  m ao máximo em toda a estrutura. Simulações auxiliares de deformações nas principais direções reforçam a tese de que a escolha desse material melhora muito a performance do telescópio em relação ao problema de deformação da estrutura.

Figura 74 – Simulação do tubo de CFRP feita no *Ansys*, deformação totalFigura 75 – Simulação do tubo de CFRP feita no *Ansys*, eixo XFigura 76 – Simulação do tubo de CFRP feita no *Ansys*, segunda vista do eixo x

### 5.3 Orvalho

A condensação ocorre quando a temperatura de um vapor é reduzida a valores inferiores ao de sua temperatura de saturação (BERGMAN; LAVINE; INCROPERA, 2011c). A formação de orvalho é o evento específico de condensação, que ocorre quando o vapor que se condensa é vapor d'água.

Tal formação de orvalho é prejudicial por bloquear a reflexão da luz, inclusive podendo danificar o telescópio com pela reação química oxidação com o metal que é parte da sua estrutura e também tornando o ambiente propício para a proliferação de fungos. Portanto, é considerado um dos fatores críticos no funcionamento do telescópio.

Uma das soluções padrões no mercado é a utilização de uma *dew band*(imagem 77) para esquentar o telescópio até uma faixa de temperatura maior que a temperatura de formação de orvalho.



Figura 77 – Exemplo de *Dew Band* encontrada no mercado ([Astrobackyard, 2020](#))

Como já comentado no capítulo 2 em mais detalhes, o cálculo para se obter a temperatura limite para formação de orvalho depende diretamente da temperatura ambiente e da umidade do ar. A solução para a integração de um dispositivo de controle de temperatura envolve medir tais variáveis e calcular a temperatura do ponto de orvalho a partir delas, e a partir desse dado, garantir uma temperatura mínima maior que a temperatura calculada.

Tal como visto em ([CHADWICK et al., 2013](#)), podemos obter as curvas de *temperatura de formação de orvalho x umidade relativa* utilizando as fórmulas de Magnus-Tetens (2.1):

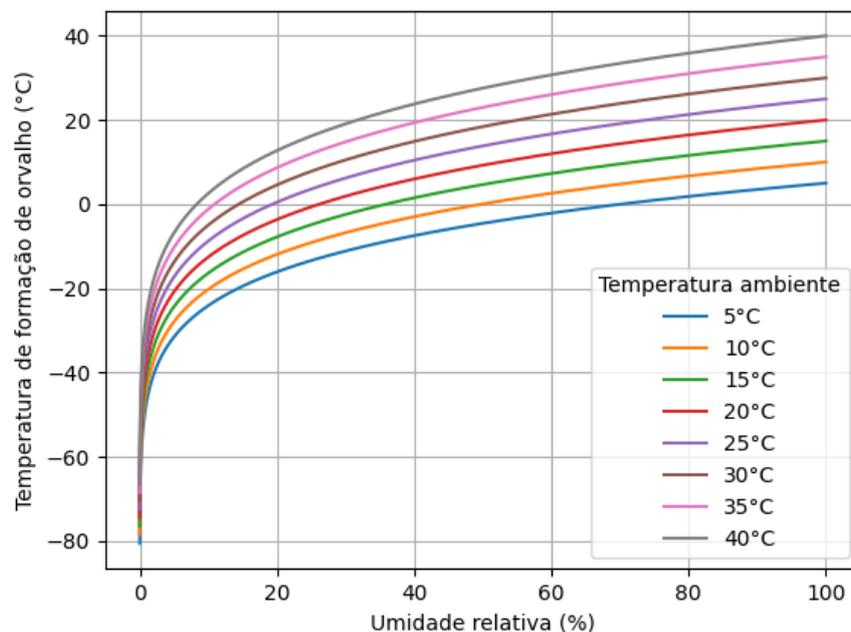


Figura 78 – Curvas de *temperatura de formação de orvalho x umidade relativa*

As curvas acima foram plotadas inserindo umidades relativas inclusas num intervalo de 0 a 100%, com passo de 0,01, na fórmula de Magnus-Tetens num programa em *Python*, com auxílio das bibliotecas *numpy* e *matplotlib*. O código do programa é de autoria nossa e está disponível no apêndice "códigos".

Como pode-se perceber, conforme a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar aumentam, maior é a temperatura de formação de orvalho. É importante notar que, conforme umidade relativa aumenta, a temperatura de formação de orvalho tende a tornar-se mais próxima da temperatura ambiente, até o ponto no qual  $RH = 100\%$  é máximo,  $T_d = T_{amb}$  (LAWRENCE, 2005). De qualquer forma, pelas curvas pode-se notar que a formação de orvalho ocorre em situações que o telescópio encontra-se numa temperatura menor que a do ambiente, situação muito comum quando as observações são realizadas no período matutino e ao ar livre.

Deve-se então encontrar uma forma de gerar calor suficiente para manter a temperatura nas lentes um pouco acima da temperatura de formação de orvalho, evitando que surja um novo grande gradiente de temperatura ao redor da lente para que os problemas de deformação e da formação de correntes de convecção não sejam agravados.

Dessa forma, mantendo o objetivo do projeto de propor e analisar soluções de baixo custo para contornar os problemas associados a gradientes térmicos em telescópios amadores, inicialmente foi discutida a criação um sistema de controle cujo funcionamento é dado a partir de um sensor de umidade relativa do ar (elemento de medição), um

controlador e uma *dew band* (atuador), porém essa opção foi descartada devido a umidade relativa geralmente não ser a mesma se os ambientes estiverem a temperaturas distintas e separados por um meio físico (por exemplo, a umidade relativa dentro de uma casa é com temperatura ambiente menor que a do meio externo é maior que a umidade relativa do ambiente fora da casa). Isso ocorre devido a umidade relativa do ar ( $RH$ ) depender da pressão de saturação do vapor d'água  $e_s$  (em Pa), que por sua vez depende da temperatura do ambiente ( $T_{amb}$ , em celsius) (ALLAN; PEREIRA; SMITH, 1998):

$$RH = 100\% \cdot \frac{e_a}{e_s} \quad (5.32)$$

$$e_s = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_{amb}}{273,3 + T_{amb}}\right) \quad (5.33)$$

Obs:  $e_a$  (em Pa) corresponde a pressão de vapor atual do ambiente.

Devido a diferença de temperaturas gerarem diferentes umidades relativas do ar, a solução integrando o sensor de umidade do ar integrada com um controlador ligado à *dew band* não pode ser utilizada. Ademais, a medição da umidade relativa a distância e ligada remotamente ao controlador não será discutida por fugir do escopo amador e de baixo custo do projeto. Com isso, pensamos noutra possibilidade de automação para o aquecimento do telescópio que meça a temperatura da região do espelho continuamente, de forma a permanecer na temperatura ambiente. A maior desvantagem desse método, no entanto, é que o usuário necessita saber a temperatura do ambiente previamente para controlar que a temperatura seja controlada.

O sensor escolhido para medir a temperatura foi o DHT22 devido a seu baixo custo e compatibilidade com microcontroladores conhecidos (Arduino e PIC):

Faixa de umidade relativa	0 - 100%
Precisão de medição de umidade	$\pm 2\%$
Resolução de medição de umidade	$\pm 0,1\%$
Precisão na temperatura	$\pm 1\%^\circ\text{C}$
Resolução na temperatura	0,1 °C
Tempo de resposta máximo	5 s
Alimentação	3,3 - 5 V
Consumo máximo de corrente	0,5 mA

Tabela 4 – Especificações do DHT22 (Aosong Electronics Co., 20–)

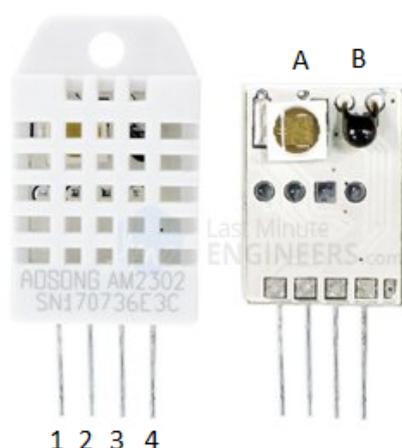


Figura 79 – Sensor DHT22. Retirado de: <<https://lastminuteengineers.com/wp-content/uploads/arduino/Inside-DHT11-DHT22-AM2302-Temperature-Humidity-Sensor.jpg>>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

Na imagem 79, os pinos 1, 2, 3 e 4, são respectivamente os pinos de alimentação, saída dos dados, NC (Not Connected) e terra. Os componentes abaixo de A e B são responsáveis pela medição de umidade do ar e temperatura do meio ao redor, respectivamente.

O dispositivo escolhido como controlador foi o Arduino Uno, visto que inclusive já existem códigos *open source* disponíveis para realizar a interface de comunicação sensor-controlador com o DHT22:

Micronrolador	ATmega328
Tensão de operação	5 V
Tensão de entrada (recomendada)	7-12 V
Tensão de entrada (limites)	6-20 V
Número de pinos I/O (digitais)	14
Número de pinos I/O (analógicos)	6
Corrente DC em cada pino I/O	40 mA
Corrente DC para o pino de 3,3V	50 mA
Memória <i>flash</i>	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
<i>Clock</i>	16 MHz

Tabela 5 – Especificações do Arduino Uno (Arduino, 2005)

A solução pode ser representada como uma malha de controle com realimentação, tal qual:

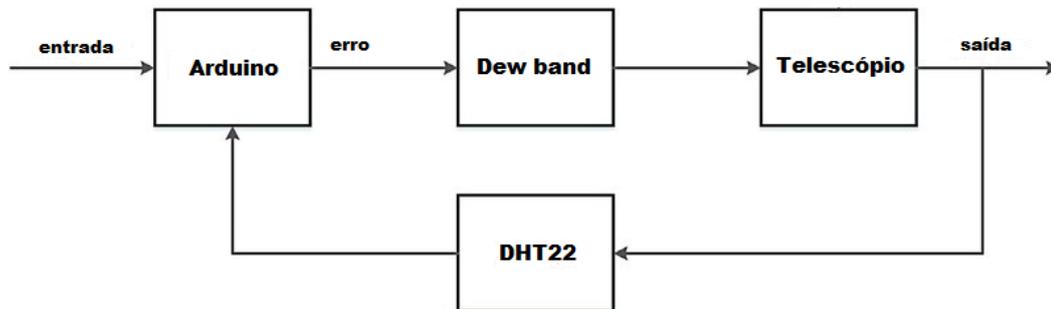


Figura 80 – Malha de controle que representa a solução.

Com a entrada representando a temperatura escolhida pelo observador, o erro sendo a diferença entre a temperatura desejada e a temperatura medida e a saída sendo a temperatura pós-atuação pela *dew band*.

Enfim, a *dew band* será desenvolvida consistindo de uma associação de resistores ligados em série conectados ao polo positivo de uma bateria de 12V, revestidos com materiais isolantes (térmico entre contato do resistor com o ar e elétrico entre contato do resistor com a estrutura do telescópio) e ao *drain* de um MOSFET NPN com *enhancement mode*. A *gate* está conectada a uma porta de saída do Arduino com um resistor intermediário que será ativada quando o sensor de umidade relativa detectar que a temperatura da lente estará abaixo da temperatura de saturação, e a *source* estará conectada ao polo negativo da bateria. A bateria de 12V foi escolhida por ser uma opção de custo relativamente baixo, fácil de encontrar no mercado e oferecer mais potência ao circuito do que a saída do Arduino pode oferecer por si só (além de possuir um limite de corrente máximo maior).

A simulação dessa solução no software Ansys consistirá em aplicar um fluxo de calor ao longo de uma faixa ao redor do tubo do telescópio.

### 5.3.1 Projeto da *Dew band*

Como a utilização da *dew band* sempre ocorrerá numa situação a qual haverá ganho de calor por parte do telescópio (pois o observador estará partindo de um ambiente com temperatura menor para outro com temperatura maior), o ideal é que a potência  $P$  (em W) gerada pela *dew band* seja a maior disponível para conseguir aquecer o espelho no menor tempo possível, evitando que o observador espere mais tempo que o necessário para começar seu estudo de campo:

$$P = \frac{U^2}{R_{eq}} \quad (5.34)$$

Com  $U = 11,3V$  (tensão da bateria utilizada menos a tensão entre *drain* e *source* do MOSFET, tida como  $0,7V$ ) e  $R_{eq}$  (em  $\Omega$ ) sendo a resistência equivalente da associação de resistores.

Dessa forma, deve-se encontrar resistores que sejam capazes de operar com a corrente máxima  $I_{max}$  (em A) que passe por eles:

$$I_{max} = \frac{U}{R_{eq}} \quad (5.35)$$

A escolha dos resistores depende do custo. Por exemplo, segundo o fornecedor Mouser, há resistores muito potentes ( $P_{res,max} = 12W$ ) e resistência baixa ( $R = 2\Omega$ ) cujo custo é de cerca de 6 dólares a unidade, porém o custo tornaria-se muito alto. Como o tempo de aquecimento não é um problema muito grande, preferimos seguir com um modelo de resistor com potência máxima menor mas custo mais reduzido. Um bom tipo de resistor a ser escolhido seria o Type 3502, da TE Connectivity, cuja potência máxima é  $P_{res,max} = 2W$  e a resistência é  $R = 12\Omega$  (TE Connectivity, 2019). Com uma associação em série de 8 resistores teríamos uma potência segura de cerca de  $1,5W$  em cada um deles. O custo também é bem menor, por  $0,52$  dólares no mesmo fornecedor.

Então, para a escolha do MOSFET também devemos escolher um modelo cuja corrente máxima de passagem no dreno e na *source* devem ser:

$$I_{D,max} = I_{S,max} = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{11,3}{96} = 0,118A \quad (5.36)$$

Um bom e econômico modelo é o ZXMS6004N8Q, da fabricante Diodes Incorporated. Os dados que comprovam que se adequa ao projeto são:

$V_{DS,max}$	60V
$V_{in,max}$	6V
$V_{thr}$	0,7V - 1,5V
$I_{D,max}$	2,5A
$I_{S,max}$	1A

Tabela 6 – Especificações do ZXMS6004N8Q, MOSFET NPN com *enhancement mode* do projeto (Diodes Incorporated, 2016)

Sendo  $V_{DS,max}$  a máxima diferença de potencial entre *drain* e *source* (no nosso caso é  $0,7V$ , tensão de queda do MOSFET),  $V_{in,max}$  o maior potencial de entrada no dreno e  $V_{thr}$  a tensão de saturação da porta (obs: no Arduino a tensão em H é  $3,3-5,0V$  e em L é nula).

Obs: a tensão interna do MOSFET ( $0,5\Omega$ ) foi desconsiderada por ser bem menor que a resistência da *dew band*.

Abaixo, vemos um esquemático do nosso projeto eletrônico para a *dew band*, criado no *software* SimulIDE:

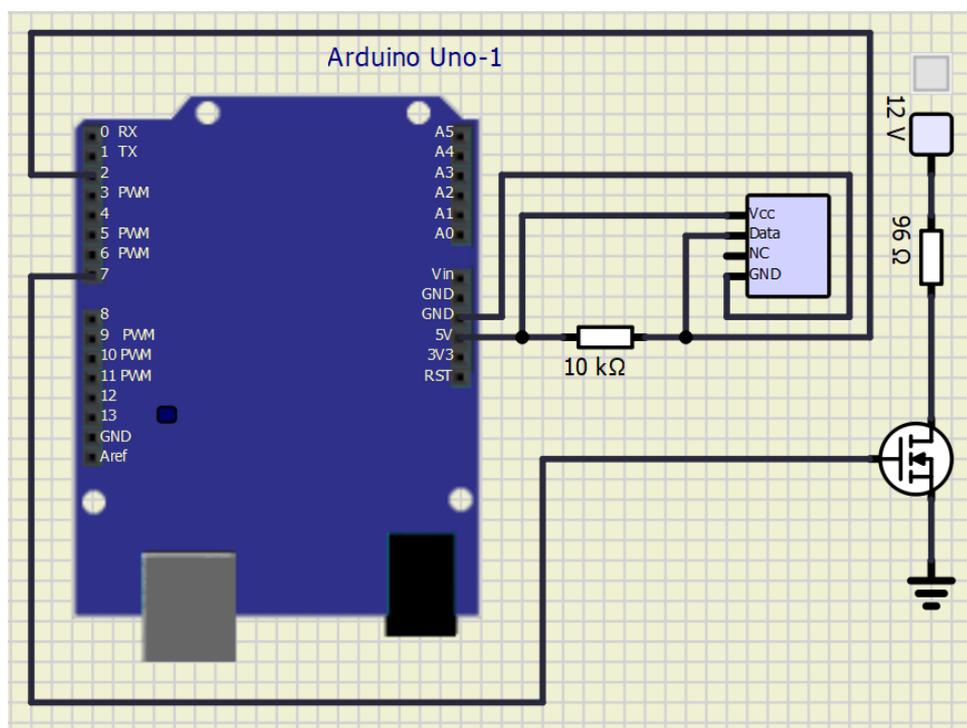


Figura 81 – Esquemático do projeto eletrônico da *dew band*.

A porta de saída dos dados deve ser conectada a um pino digital do Arduino, e também há necessidade de utilizar um resistor *pull-up* entre tal saída e a alimentação do Arduino. O sensor, apesar de visualmente não parecer na imagem 81, na prática fica muito próximo da associação resistiva de  $96\Omega$  para captar a temperatura da banda constantemente.

Entre os resistores e o tubo de alumínio também deverá ter uma camada de fita isolante elétrica para garantir a segurança do observador e entre os resistores e o ar deve haver uma camada de fita isolante térmica, evitando perda de calor para o meio. A fita isolante térmica deve ter largura maior que a fita isolante elétrica para que a *dew band* permaneça aderida ao telescópio, já que a fita menos larga irá se aderir na mais larga. A fita mais larga, com a área restante, irá ser aderida ao telescópio. O sensor de temperatura também será posicionado próximo aos resistores para medir constantemente a temperatura da *dew band*:

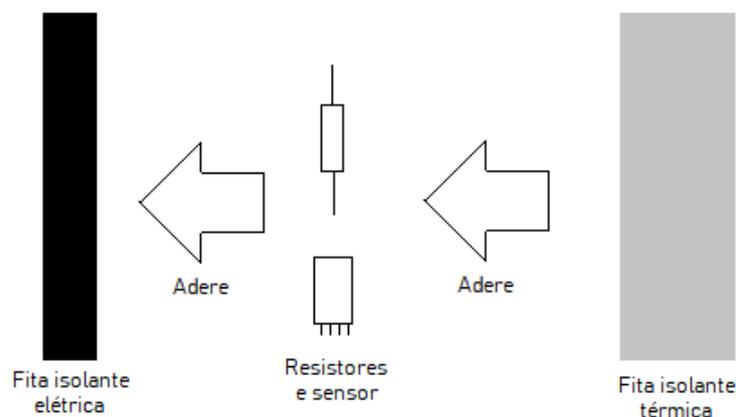


Figura 82 – Esquemático para fitas isolantes.

A fita isolante elétrica encontrada foi o modelo 33+<sup>MR</sup>, da fabricante 3M. Foi escolhida devido ao baixo custo, capacidade de isolar a tensão elétrica da bateria ( $V_{iso,max} = 750V$ ) e capacidade de resistir até  $105^{\circ}C$  (3M, 2018). Para a fita isolante térmica, após uma pesquisa de mercado, constatamos que qualquer modelo pode se encaixar em nossos requisitos, visto que nenhum distribuidor no Brasil oferece um catálogo ou *data sheet* com os dados além da descrição básica do produto.

O comprimento mínimo das tiras de fita que compõem a dew band deve ser  $2\pi \cdot 86,5 = 543,5mm$ , perímetro do tubo de alumínio.

### 5.3.2 Situações de uso

Primeiramente, assume-se que o observador não irá utilizar seu telescópio num cenário o qual a umidade relativa do ar é próxima a 100% pois senão nossa solução não funcionaria. Aliás, é improvável de que observações sejam realizadas nesse cenário pois uma umidade do ar máxima demonstra um cenário de chuva.

Assim, assumindo a condição acima e que o telescópio será deslocado de um local frio para um ambiente quente, as situações mais prováveis as quais o observador deverá utilizar a *dew band* automatizada antes de realizar seu estudo de campo são:

1. Numa manhã que começa fria mas esquenta rapidamente e o local de armazenamento do telescópio esquenta de forma lenta em comparação ao meio externo.
2. Num dia quente o qual o telescópio está armazenado num local com refrigeração por ar condicionado e há grande diferença de temperatura entre os dois meios.

### 5.3.3 Instruções de uso

Numa das situações acima, o observador deverá, antes de levar o telescópio fora do ambiente fechado:

1. Ligar seu Arduino com todos os respectivos cabos conectados corretamente
2. Executar o código no computador, mudando a temperatura ambiente de acordo com a atual
3. Esperar até que haja mensagem no leitor informando que o telescópio está pronto para uso

A partir deste ponto, o observador poderá iniciar suas observações sem precisar se preocupar com formação de orvalho no espelho.

### 5.3.4 Vantagens e desvantagens

As vantagens em comparação com uma *dew band* convencional são:

- Temperatura do espelho não ultrapassa a temperatura do ambiente
- Economiza bateria

As desvantagens são:

- Maior custo (microprocessador)
- Instalação mais difícil

### 5.3.5 Simulações

As simulações para a eficácia da *dew band* consistiram em construir uma fina banda com temperatura fixa igual a da temperatura ambiente ao redor da região do espelho, com a temperatura inicial do telescópio a  $18^{\circ}\text{C}$  e temperatura ambiente de  $24^{\circ}\text{C}$  (considerando que o observador esteja num quarto fechado cuja temperatura seja  $18^{\circ}\text{C}$ , mas que este meio troque calor com o ambiente externo que se encontra a  $30^{\circ}\text{C}$ . Portanto, a temperatura média é de  $24^{\circ}\text{C}$  para simplificar os cálculos visto que a temperatura do quarto subirá gradativamente). A grande diferença de temperatura é dada para simularmos uma situação em que o orvalho possa se formar naturalmente a condições de umidade próximas às diárias ( $RH \approx 60\%$ , com temperatura de formação do orvalho de aproximadamente  $21^{\circ}\text{C}$ ). As demais condições de simulação são iguais às utilizadas no capítulo 4, exceto pelo tempo de simulação de 900 segundos. Os resultados obtidos foram:

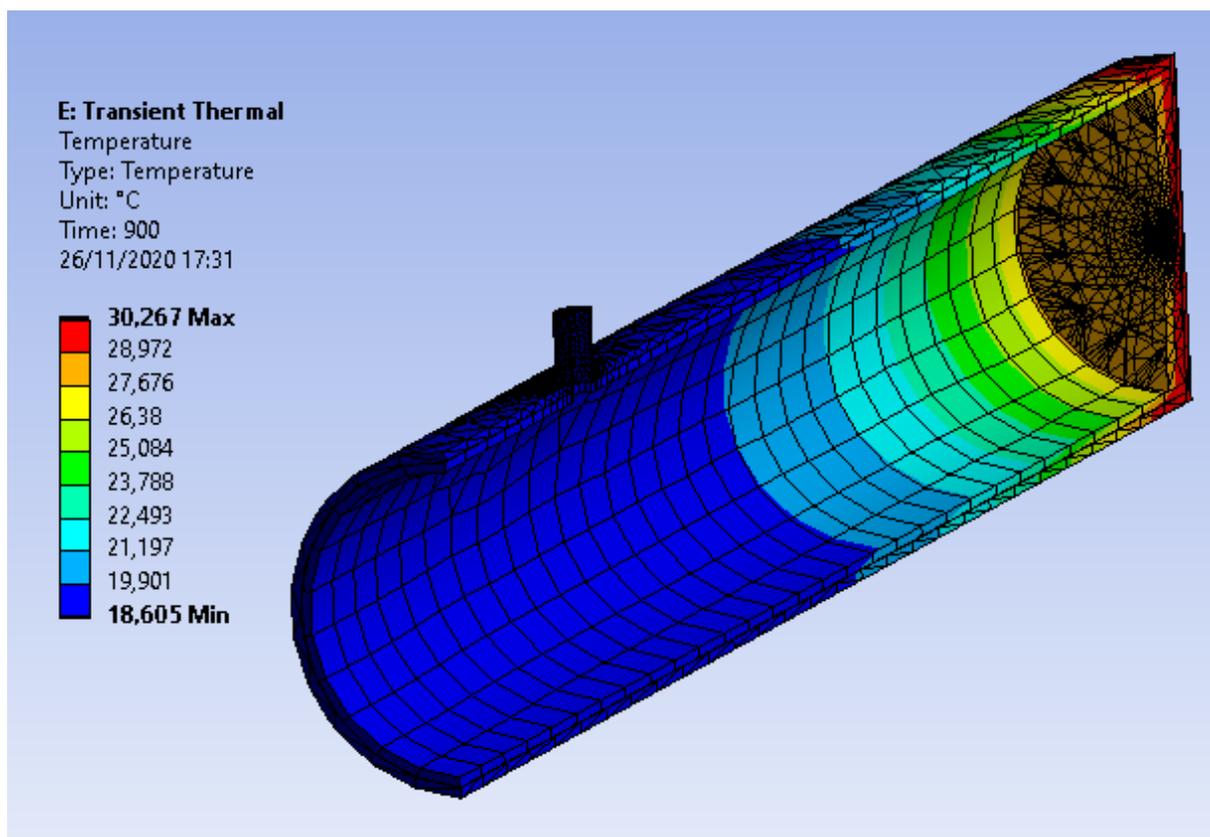


Figura 83 – Distribuição de temperaturas na estrutura após 900 segundos de simulação.

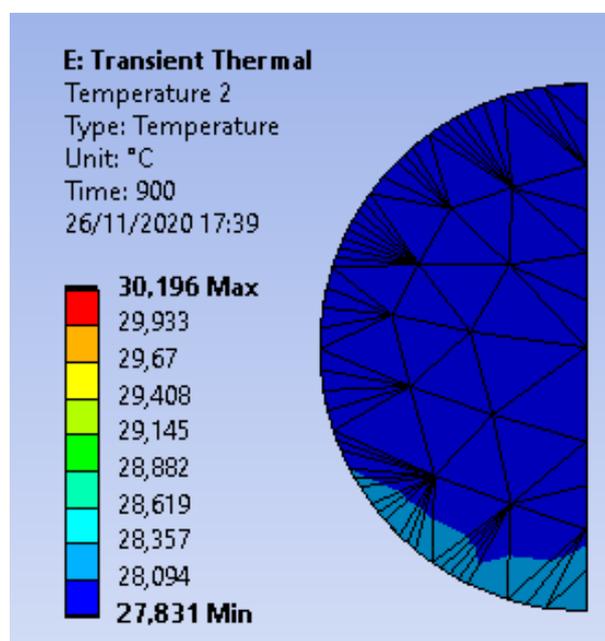


Figura 84 – Distribuição de temperatura na face frontal do espelho ao final da simulação.

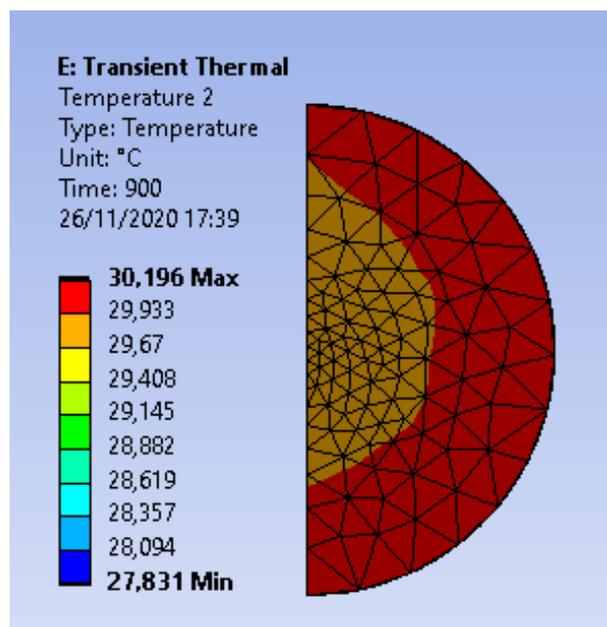


Figura 85 – Distribuição de temperatura na face traseira do espelho ao final da simulação.

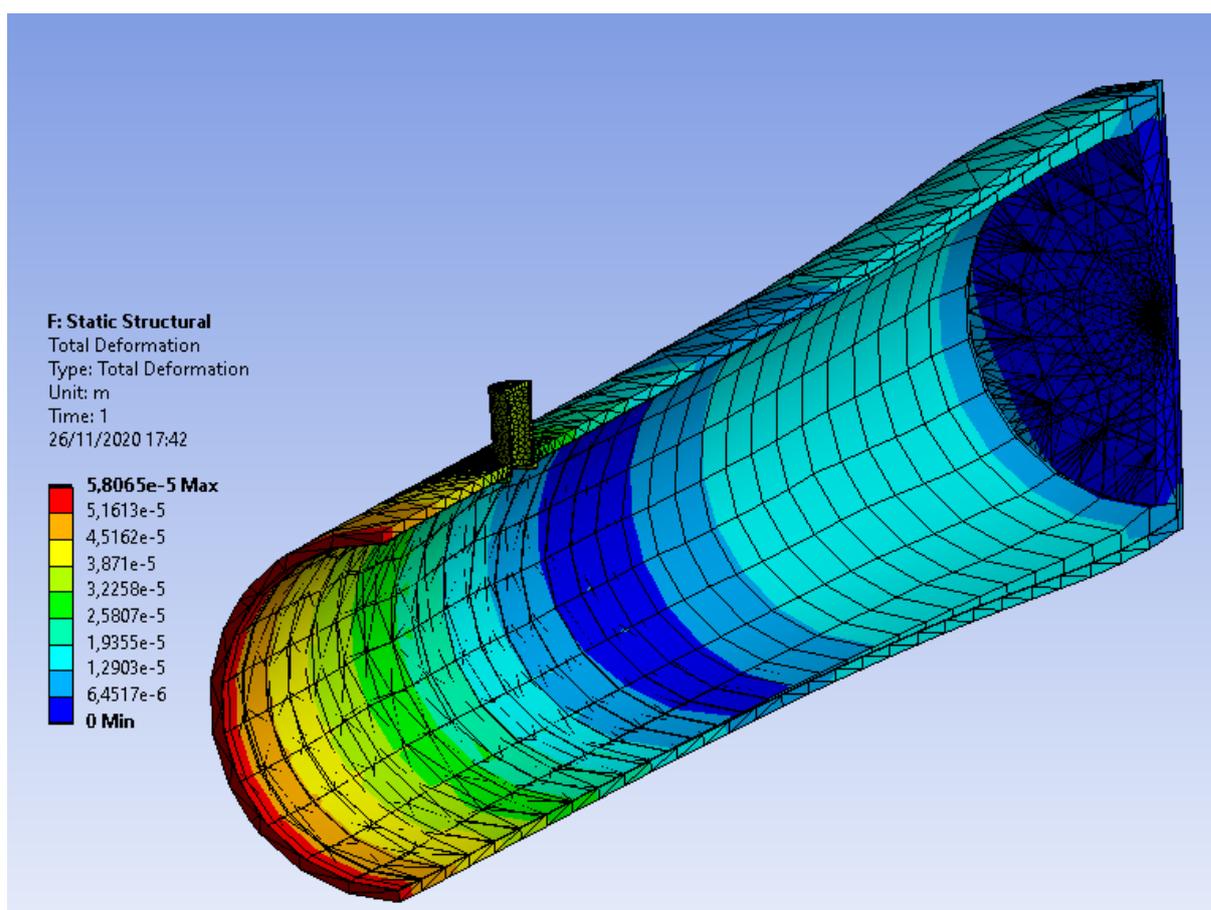


Figura 86 – Deformação na estrutura após 900 segundos de simulação.

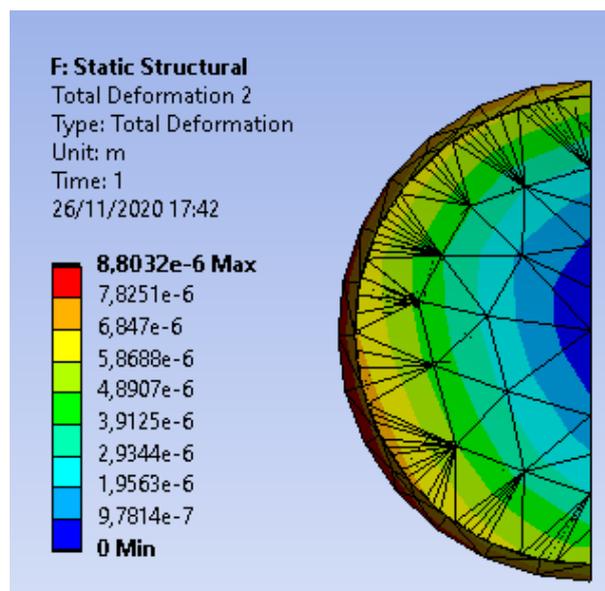


Figura 87 – Deformação na face frontal do espelho ao final da simulação.

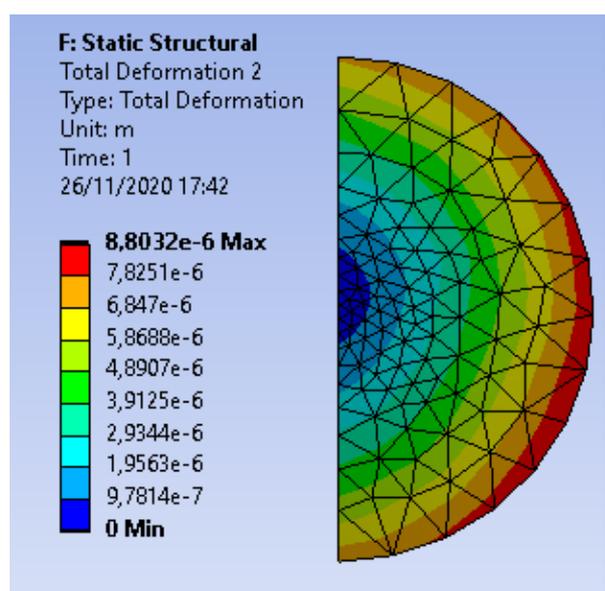


Figura 88 – Deformação na face traseira do espelho ao final da simulação.

Como pode-se ver, a *dew band* de fato foi uma boa adição para elevar a temperatura do espelho primário, sendo sua temperatura final próxima bem próxima à desejada. No entanto, o calor gerado pela banda também acaba causando um gradiente de temperatura em relação ao outro lado do tubo muito grande, de quase  $12^{\circ}\text{C}$ , o que causou as maiores deformações noticiadas em todas as nossas simulações. Ademais, pela estrutura das partes do tubo em contato com o espelho também, há um gradiente de temperatura de aproximadamente  $3^{\circ}\text{C}$  para cada face do espelho primário, e conseqüentemente suas deformações foram similares às observadas na seção 4 (não muito altas mas maiores do que para as simulações com a tampa modificada, na subseção 5.1).

Enfim, podemos dizer que a adição da *dew band* de fato elevou a temperatura do espelho a um número próximo ao desejado para um tempo de simulação não muito alto, mas mesmo assim não previne a formação de orvalho em grande parte do tubo que permaneceu a temperatura abaixo de  $21^{\circ}\text{C}$  (inclusive na lente ocular). Por mais que possa parecer uma boa ideia adicionar mais *dew band* às partes da estrutura cujas temperaturas permaneceram abaixo da que deseja também devemos levar em consideração que para isso teremos que ter mais baterias (aumentando o custo do projeto) e agravar os problemas de correntes de convecção e deformação (principalmente se fosse colocada ao redor do pequeno tubo que envolve a lente ocular: isso geraria uma assimetria na estrutura do telescópio e deformaria a estrutura tornando-a curva e prejudicando fortemente a formação da imagem observada). Assim, consideramos a adição de um escudo protetor na lente, a ser checado na próxima subseção.

### 5.3.6 Escudo protetor para a lente

Os escudos protetores de orvalho, ou *dew shield*, tal qual a patente de Thompson (THOMPSON, 1988) mencionada na seção 2, agem como uma barreira física, podendo ser utilizados para evitar a formação e escoamento de orvalho para dentro do tubo o que potencialmente causaria os problemas mencionados no início desta subseção. Isso seria excelente em nosso caso pois pelas simulações percebe-se que as menores temperaturas concentrariam-se no orifício do tubo e o escudo evitaria a entrada de orvalho por ele.



Figura 89 – *Dew shield* artesanal. Retirado de: <<https://tinyurl.com/y6hpcrp8>>. Acesso em 25 de novembro de 2020.

A imagem acima mostra um *dew shield* artesanalmente criado e disponibilizado pela revista especializada em astronomia *Sky at Night*. A solução em questão é construída

a partir de uma lata metálica, forrada e recoberta com manta de neopreno e fita adesiva. Dessa forma, não só haverá proteção contra o escoamento do orvalho para a lente primária como também haverá impermeabilidade no escudo (Sky at Night, 2018) e extensão do tubo (o que pode melhorar a imagem formada devido a menor incidência de reflexão de luz dentro do tubo, tal qual mencionado na subseção 4.5.1).

Enfim, o escudo também poderia contar com aquecimento para maior prevenção da formação do orvalho na parte frontal do telescópio. Porém, isso teria eficácia duvidosa devido à dilatação de grande parte da estrutura e possível formação de correntes de convecção (SMITH; CATON; HAWKINS, 2016).

## 5.4 Correntes de convecção

Após estudos na bibliografia, viu-se que a instalação de um sistema de resfriamento no espelho, na forma de um *cooler* de computador, como mostrado na figura 90 era a forma mais prática e eficiente para se contornar os problemas de corrente de convecção. Como é citado em (SERONIK, 2010), ventoinhas com um fluxo de ar acima 20 CFM (*cubic feet per meter*) já atingem o máximo de eficiência, sendo que a partir desse valor, o gargalo para a dissipação de calor no espelho é o próprio material e sua condutividade térmica.

O ventilador tem que resfriar o espelho de forma que o mesmo não funcione como uma "bateria de calor", esquentando o ar dentro do tubo e fazendo-o não homogêneo. O sistema de refrigeração também pode gerar efeitos na deformação do espelho, assim ajudando a compensar a deformação de sua curvatura.

Assim sendo, para se completar a proposta de compensadores térmicos a serem usados, o grupo propõe a instalação de um ventilador ao fundo do espelho, envolvendo o mesmo com uma fita de borracha para se diminuir os problemas com vibração. O ventilador usado seria um cooler de computador facilmente achado na *Amazon*, como o mostrado na figura 91, o mesmo funciona ligado a uma bateria de 12V e gera 41.4 CFM, mais do que necessário segundo a bibliografia.

Para a utilização desse compensador, é recomendável que se ligue o ventilador 30 minutos antes da observação, de forma que o espelho esteja completamente resfriado. Durante a observação é mais adequado que o mesmo fique desligado, para que as vibrações de seu funcionamento não afetem as observações.

Porém essa solução como um todo é apenas possível de se instalar caso o telescópio não tenha problemas com orvalho, já que o sistema de resfriamento do espelho confronta-se diretamente com a *dew band* que esquentam a mesma região. Dessa forma, os integrantes do grupo decidiram concentrar-se no problema do orvalho, pois além da condensação de

vapor d'água contribuir para a distorção da imagem, a mesma pode provocar a deposição e aderência de partículas sobre as superfícies óticas e contribuir para o crescimento de fungos, de tal maneira que o grupo decidiu simular apenas a análise da solução da condensação do orvalho, como visto nas seções acima.

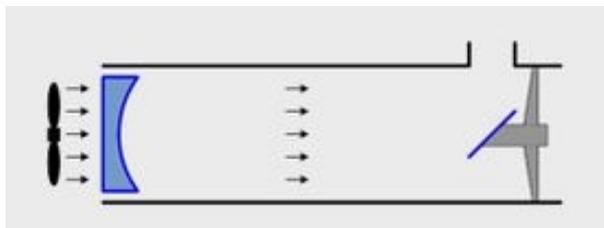


Figura 90 – Forma de instalação de um sistema de resfriamento no espelho



Figura 91 – Cooler para o sistema de resfriamento no espelho

## 6 Conclusão

Nesse trabalho foram discutidas e estudadas as consequências dos efeitos térmicos dois tipos de telescópios amadores (dobsoniano em treliça e tubular refletor) e foram propostas algumas soluções, tais como substituição dos materiais da estrutura dos tubos e construção de uma banda aquecedora ao redor da região do espelho, para compensar a ação de tais efeitos na tentativa de que o desempenho óptico dos telescópios fosse afetado em menor intensidade. Foram realizadas, para os dois modelos de telescópio, simulações com o *software* Ansys para descobrirmos e analisarmos como ocorre a distribuição de temperaturas e suas decorrentes deformações totais a partir de algumas condições de contorno de temperatura inicial, convecção e radiação em algumas superfícies de forma a criar posteriores soluções para tentar mitigar os gradientes de temperatura nas faces do espelho, a formação de orvalho, a deformação da estrutura e as correntes de convecção que atrapalham a captação das imagens que se deseja observar.

Para a tentativa de compensação de diferenças de temperaturas no espelho foi proposta uma solução de modificação da tampa de contato, adicionando uma camada intermediária de mesmo raio da tampa e altura de 5 mm do material poliuretano, cuja condutividade térmica é bem menor que a do alumínio. Entretanto, após analisar-se os resultados, constatamos que a proposição dessa camada fez com que a face de contato com o poliuretano se mantivesse mais aquecida ao longo do tempo do que planejavamos, e assim concordou-se que não foi uma modificação útil para resolver nosso problema. Concluiu-se que a troca de materiais de contato deve ser feita caso o projetista deseje apenas manter a temperatura de uma superfície com maior temperatura por tempo maior, visto que tentar trocar tais materiais ao analisar os resultados para um menor período de tempo pode agravar problemas identificados.

Os projetos de compensação dos efeitos térmicos foram pensados se inspirando em soluções utilizadas em telescópios profissionais, soluções já utilizadas no meio da astronomia amadora e em soluções de engenharia de precisão. Para o controle da deformação, foi simulado vários modelos de soluções, e a solução escolhida foi a de substituir os materiais convencionais pelo CFRP (carbon fiber reinforced polymer), cujo coeficiente de expansão térmica é negativo e suas propriedades mecânicas foram previamente citadas. Para a solução das correntes de convecção, optou-se pela solução que utiliza um *cooler* instalado atrás do espelho, assim mantendo o espelho resfriado e o impedindo de virar uma bateria de calor que aqueceria o ar interno do tubo. Concluiu-se que de fato o uso do material em questão melhora a questão da deformação na estrutura do telescópio.

Para o controle de formação de orvalho foram analisados os gráficos de temperatura

de formação de orvalho a partir da fórmula de Magnus-Tetens. Para contornar este problema foi projetado um sistema que consiste de uma *Dew Band*, um microprocessador Arduino Uno, um sensor de temperatura, uma associação de resistores ligados em série conectados a uma bateria de 12V, fitas isolantes térmicas e elétricas e um transistor MOSFET NPN com *enhancement mode* que age como chave para possibilitar o aquecimento do telescópio caso o sensor identifique que a região de contato está numa temperatura menor que a de entrada. Foram dados casos e instruções de uso, bem como vantagens e desvantagens de se utilizar tal sistema. Para as simulações da *dew band*, concluiu-se que, de fato, é uma solução eficaz para se prevenir a formação do orvalho na parte aquecida, porém por ser uma solução de geração de calor localizada em apenas parte do telescópio também agrava o problema das deformações e, possivelmente, pode causar correntes de convecção indesejadas. Por fim, também foi proposta a criação de um escudo contra o orvalho, que age como barreira física para impedir o escoamento nas regiões de menor temperatura do tubo.

Para o problema de formação de correntes de convecção foi estudada a criação e instalação de um sistema de resfriamento utilizando pequenos *coolers* controlados por computador. No entanto, por ser difícil de se comprovar sua eficácia (visto que o próprio sistema gera convecção dentro do tubo) e por conflitar com a solução da *dew band*, decidiu-se não seguir em frente com a proposta.

Assim, ao fim deste trabalho de conclusão de curso, concluímos que a compensação dos efeitos térmicos indesejados, tanto para o modelo em questão utilizado nas simulações como para outros modelos gerais (assim cremos que seja), é uma tarefa complexa: por mais que se tente compensar um dos efeitos térmicos em específico a tentativa de compensação terá grandes chances de resultar numa outra consequência indesejada, seja na transferência de calor a curto ou longo prazo, deformação de outras partes da estrutura, interferência direta com outras soluções, aumentando demais o custo do projeto ou, inclusive, fazendo-o ocupar mais espaço e tornando o telescópio mais difícil de ser deslocado.

Vale ressaltar que esse trabalho, além de relevância científica, pode gerar futuramente relevância econômica uma vez que um produto pode ser criado a partir dos compensadores propostos nesse trabalho e comercializado na comunidade astronômica. Outra relevância é que, no futuro, trabalhos cujo tema é relacionado podem usar este como referência e projetar compensadores mais precisos ou que corrijam outros efeitos térmicos negligenciados nessa tese.

## A Método de cálculo utilizado pelo Ansys

Segundo o *site* oficial, o Ansys utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) como método de cálculo para a análise estrutural mecânica e para análise de transferência de calor. Esse método é composto de diversas etapas e é consistentemente usado para resolver problemas estruturais e de transferência de calor.

A primeira etapa é a de discretização na estrutura em elementos cúbicos e/ou tetraédricos, criando a malha para a simulação. O *software* assim usa a equação de interpolação de Lagrange, mostradas abaixo, para aproximar o resultado no domínio do elemento discretizado, dando cada ponto da estrutura um valor unitário.

$$u_x = N_1 u_1 + N_2 u_2 + \dots + N_n u_n \quad (\text{A.1})$$

$$N_n = \frac{(x - x_1)(x - x_2) \dots (x - x_{n-1})}{(x_n - x_1)(x_n - x_2) \dots (x_n - x_{n-1})} \quad (\text{A.2})$$

sendo  $u_1, u_2 \dots u_n$  os deslocamentos nodais e  $u_x$  sendo o deslocamento de determinado ponto dentro do elemento.

O método então consiste em juntar os sistemas matriciais calculadas para cada elemento (primeiro para transferência de calor, e a partir disso para análise estrutural) em um sistema com matriz global. As condições iniciais e de contorno são aplicadas e o sistema de equações lineares restantes é resolvido. A equação para cada elemento é dada por:

$$[M_e]\{\ddot{U}_e\} + [C_e]\{\dot{U}_e\} + [K_e]\{U_e\} = [F_e] \quad (\text{A.3})$$

Sendo:  $M_e$  - matriz de massa do elemento;  $U_e$  - deslocamento do elemento;  $C_e$  - matriz de amortecimento do elemento;  $K_e$  - matriz de rigidez do elemento;  $F_e$  - vetor de forças aplicadas em cada nó.

Consequentemente, o sistema global é dado por:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = [F] \quad (\text{A.4})$$

Há métodos padronizados para calcular as matrizes de massa, amortecimento e rigidez. No entanto, quais desses métodos foram implementados exatamente pelo Ansys não foram divulgados pelo público.

A resolução da matriz global para a equação de transferência de calor resulta em gradientes de temperatura ao longo dos pontos da estrutura, que causam deformação e então podemos obter os deslocamentos em cada nó dos elementos. Assim, pode-se usar tais resultados para se obter as tensões e as deformações em qualquer ponto da estrutura a partir de equações estruturais e interpolação (bem como a temperatura em qualquer ponto, também por interpolação dos valores obtidos em cada nó).

$$\vec{\phi} = \nabla \vec{U} \quad (\text{A.5})$$

$$\vec{V} = EI \nabla^3 \vec{U} \quad (\text{A.6})$$

$$\vec{M} = EI \nabla^2 \vec{U} \quad (\text{A.7})$$

Sendo:  $\phi$  - deflexão angular; V - força cortante; E - coeficiente de elasticidade; I - momento de inércia de área transversal do elemento; M - Momento fletor;

## B Códigos

```
1 import matplotlib.pyplot as plt
2 import numpy as np
3
4 rh_ = []
5 td_ = []
6
7 for tamb in range(5, 45, 5):
8     for rh in range(1, 10001):
9         rh = float(rh/100)
10        f = 17.27*tamb/(237.7+tamb)+np.log(rh/100)
11        td = 237.7*f/(17.27-f)
12
13        rh_.append(rh)
14        td_.append(td)
15
16        plt.plot(rh_, td_, label=str(tamb)+" C ")
17        rh_, td_ = ([], [])
18
19
20 plt.xlabel('Umidade relativa (%)')
21 plt.ylabel('Temperatura de formação de orvalho ( C )')
22 plt.legend()
23 plt.grid()
24 plt.show()
```

Código utilizado para plotar as curvas de *temperatura de formação de orvalho x umidade relativa* (autoria própria).

# Referências

- 3M. *Catálogo de produtos*. 2018. 7 p. Acesso em 20 de novembro de 2020. Disponível em: <<https://multimedia.3m.com/mws/media/1420336O/product-catalog-electric-2018.pdf>>. Citado na página 79.
- AGENA ASTROPRODUCTS. 20–. Acesso em 8 de maio de 2020. Disponível em: <<https://agenaastro.com/gso-parabolic-primary-telescope-mirror-6-f-5-ad046.html>>. Citado na página 28.
- ALLAN, R.; PEREIRA, L.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. [S.l.: s.n.], 1998. v. 56. 35–36 p. Citado na página 74.
- Aosong Electronics Co. *DHT22 Datasheet*. 20–. Acesso em 3 de outubro de 2020. Disponível em: <<https://datasheetspdf.com/pdf-file/792211/Aosong/DHT22/1>>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 74.
- Arduino. *Arduino Uno Datasheet*. 2005. Acesso em 3 de outubro de 2020. Disponível em: <<https://datasheet.octopart.com/A000066-Arduino-datasheet-38879526.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 75.
- Astrobackyard. 2020. Acesso em 8 de agosto de 2020. Disponível em: <<https://astrobackyard.com/dew-heaters-astrophotography/>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 72.
- ASTROFOX ASTRONOMICAL INSTRUMENTS. *Glass for Telescope mirrors*. 20–? Acesso em 12 de outubro de 2019. Disponível em: <[http://www.astrofox.nl/contents/en-uk/d16\\_Glass-telescope-mirrors.html](http://www.astrofox.nl/contents/en-uk/d16_Glass-telescope-mirrors.html)>. Citado na página 24.
- BANYAL, R. K.; RAVINDRA, B.; CHATTERJEE, S. Opto-thermal analysis of a lightweighted mirror for solar telescope. *Opt. Express*, OSA, v. 21, n. 6, p. 7065–7081, 2013. DOI: 10.1364/OE.21.007065. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.
- BEISH, J. Practical calculations for the newtonian secondary mirror. *The Digital Lens: Newsletter of the Association of Lunar and Planetary Observers Computing Section*, 2000. Citado na página 39.
- BEISH, J. *Tubes for Reflecting Telescopes*. 2017. Acesso em 8 de maio de 2020. Disponível em: <[http://www.alpo-astronomy.org/jbeish/Tel\\_Tube.pdf](http://www.alpo-astronomy.org/jbeish/Tel_Tube.pdf)>. Citado na página 39.
- BERGMAN, T.; LAVINE, A.; INCROPERA, F. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Edition*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2011. ISBN 9781118137253. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=5cgbAAAAQBAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.
- BERGMAN, T.; LAVINE, A.; INCROPERA, F. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Edition*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2011. ISBN 9781118137253. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=5cgbAAAAQBAJ>>. Citado na página 52.

BERGMAN, T.; LAVINE, A.; INCROPERA, F. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Edition*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2011. ISBN 9781118137253. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=5cgbAAAAQBAJ>>. Citado na página 71.

CHADWICK, P. M. et al. The formation of condensation on cherenkov telescope mirrors. *33rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro.*, 2013. DOI: 10.15161/oar.it/1446204343.51. Citado 4 vezes nas páginas 7, 18, 19 e 72.

CRAMER, C. et al. Precise measurement of lunar spectral irradiance at visible wavelengths. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, v. 118, p. 396, 10 2013. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 36.

Diodes Incorporated. *ZXMS6004N8Q Data sheet*. 2016. Acesso em 20 de novembro de 2020. Disponível em: <<https://br.mouser.com/datasheet/2/115/ZXMS6004N8Q-1019738.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 77.

GE, Z.; DING, X. Thermal error control method based on thermal deformation balance principle for the precision parts of machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 97, 07 2018. Acesso em 12 de novembro de 2020. Citado 4 vezes nas páginas 9, 63, 64 e 65.

GREER, B. *Using fans with Newtonian telescopes*. 2005. Acesso em 8 de outubro de 2019. Disponível em: <<https://www.fpi-protostar.com/bgreer/fanselect.htm>>. Citado na página 22.

GU, N. et al. Thermal control for light-weighted primary mirrors of large groundbased solar telescopes. *Journal of Astronomical Telescopes*, v. 5, n. 1, 2019. DOI: 10.1117/1.JATIS.5.1.014005. Citado 3 vezes nas páginas 7, 16 e 17.

HERAEUS CONAMICA. *Properties of Fused Silica*. 20-. Acesso em 16 de outubro de 2019. Disponível em: <[https://www.heraeus.com/en/hca/fused\\_silica\\_quartz\\_knowledge\\_base\\_1/properties\\_1/properties\\_hca.html](https://www.heraeus.com/en/hca/fused_silica_quartz_knowledge_base_1/properties_1/properties_hca.html)>. Citado na página 24.

KALIF, W. *How to Make an Eight Inch Reflector Telescope*. 20-. Disponível em: <<http://www.stormthecastle.com/telescopes/how-to-make-an-eight-inch-reflector-telescope-part2.htm>>. Citado na página 39.

LAWRENCE, M. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.86, 225-233 (2005), v. 86, 02 2005. Acesso em 1 de outubro de 2020. Citado na página 73.

MIYAWAKI, O.; PONGSAWATMANIT, R. Mathematical analysis of the effective thermal conductivity of food materials in the frozen state. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, Taylor Francis, v. 58, n. 7, p. 1222–1225, 1994. Acesso em 14 de novembro de 2020. Citado na página 53.

NASA Science. *How do Telescopes Work?*. 2019. Acesso em 8 de maio de 2020. Disponível em: <<https://spaceplace.nasa.gov/telescopes/en/>>. Citado na página 38.

PRASAD, K. et al. Numerical simulation of fire spread on polyurethane foam slabs. *Conference Proceedings - Fire and Materials 2009, 11th International Conference and Exhibition*, v. 28, 01 2009. Acesso em 15 de novembro de 2020. Citado na página 56.

RAO, C. et al. 1.8-m solar telescope in china: Chinese large solar telescope. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems. Chinese Academy of Sciences*, v. 1, n. 2, 2015. DOI: 10.1117/1.JATIS.1.2.024001. Citado na página 16.

SAINT GOBAIN. *Glass Properties*. 20–. Disponível em: <<https://www.saint-gobain-sekurit.com/glossary/glass-properties>>. Citado na página 24.

SCHOTT. *ZERODUR Extremely Low Expansion Glass Ceramic*. 20–. Acesso em 16 de outubro de 2019. Disponível em: <[https://www.schott.com/advanced\\_optics/english/products/optical-materials/zerodur-extremely-low-expansion-glass-ceramic/zerodur/index.html](https://www.schott.com/advanced_optics/english/products/optical-materials/zerodur-extremely-low-expansion-glass-ceramic/zerodur/index.html)>. Citado na página 24.

SERONIK, G. *Beat the Heat: Conquering Newtonian Reflector Thermals — Part 2*. 2010. Acesso em 9 de outubro de 2019. Disponível em: <[garyseronik.com/beat-the-heat-conquering-newtonian-reflector-thermals-part-2/](http://garyseronik.com/beat-the-heat-conquering-newtonian-reflector-thermals-part-2/)>. Citado 4 vezes nas páginas 7, 21, 22 e 85.

SERONIK, G. *Beat the Heat: Conquering Newtonian Reflector Thermals — Part 1*. 2014. Acesso em 9 de outubro de 2019. Disponível em: <[garyseronik.com/beat-the-heat-conquering-newtonian-reflector-thermals-part-1/](http://garyseronik.com/beat-the-heat-conquering-newtonian-reflector-thermals-part-1/)>. Citado 3 vezes nas páginas 7, 20 e 21.

SHITZER, A. Wind-chill-equivalent temperatures: Regarding the impact due to the variability of the environmental convective heat transfer coefficient. *International journal of biometeorology*, v. 50, p. 224–32, 04 2006. Acesso em 6 de outubro de 2020. Citado 3 vezes nas páginas 8, 42 e 43.

Sky at Night. *How to make a telescope dew shield*. 2018. Citado na página 85.

SMITH, A. B.; CATON, D. B.; HAWKINS, R. L. Implementation and operation of a robotic telescope on skynet. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, IOP Publishing, v. 128, n. 963, p. 055002, mar 2016. Citado na página 85.

STARIZONA. *Understanding Eyepieces*. 20–. Acesso em 8 de maio de 2020. Disponível em: <<https://starizona.com/tutorial/understanding-eyepieces/>>. Citado na página 39.

STELLAFANE - AMATEUR TELESCOPE MAKING. 20–. Acesso em 8 de maio de 2020. Disponível em: <<https://stellafane.org/tm/atm/grind/measure.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 29.

STIRNA, U. et al. Mechanical properties of rigid polyurethane foams at room and cryogenic temperatures. *Journal of Cellular Plastics - J CELL PLAST*, v. 47, p. 337–355, 07 2011. Acesso em 15 de novembro de 2020. Citado na página 56.

TAN, Y. et al. Thermal control analysis of a primary mirror for large-aperture telescope. *Journal of the Korean Physical Society*, v. 71, n. 1, p. 28–36, 2017. DOI: 10.3938/jkps.71.28. Citado 6 vezes nas páginas 7, 14, 15, 16, 18 e 21.

TE Connectivity. *Type 3502 Series*. 2019. Acesso em 20 de novembro de 2020. Disponível em: <[https://br.mouser.com/datasheet/2/418/4/NG\\_DS\\_1773204-4\\_A-1532746.pdf](https://br.mouser.com/datasheet/2/418/4/NG_DS_1773204-4_A-1532746.pdf)>. Citado na página 77.

- TEJRAJ AND CO. 20–. Acesso em 8 de maio de 2020. Disponível em: <<http://www.tejraj.com/pdf/GSO-16inch-Dob-Manual.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 31.
- THOMPSON, C. A. Functional shield for telescope. 1988. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US4729649A/en>>. Citado 5 vezes nas páginas 7, 18, 19, 20 e 84.
- THOMPSON, M. 20–. Acesso em 8 de Maio de 2020. Disponível em: <<http://www.markthompsonastronomy.com/wp-content/uploads/reflector-e1298072570991.jpg>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 38.
- VALLEY DESIGN CORP. *Pyrex Glass*. 20–. Acesso em 16 de outubro de 2019. Disponível em: <<http://valleydesign.com/pyrex.htm>>. Citado na página 24.