



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MEXICO

---

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO, INTEGRACIÓN, VERIFICACIÓN Y  
VALIDACIÓN DE SOPORTES OPTOMECÁNICOS  
RATIR

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

INGENIERÍA ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN

P R E S E N T A:

RODRIGO GUERRERO MULIA

TUTOR:

DR. ALEJANDRO FARAH SIMÓN



2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO, INTEGRACIÓN, VERIFICACIÓN Y  
VALIDACIÓN DE SOPORTES OPTOMECÁNICOS  
RATIR

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

INGENIERÍA ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN

P R E S E N T A:

RODRIGO GUERRERO MULIA

TUTOR:

DR. ALEJANDRO FARAH SIMÓN

2011



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Naser Qureshi

Secretario: Dr. Maximino Avendaño Alejo

Vocal: Dr. Alejandro Farah Simón

1<sup>er</sup>. Suplente: Dra. Graciela Velasco Herrera

2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. J. Jesús González González

Lugares donde se realizó la tesis:

Instituto de Astronomía, Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Alejandro Farah Simón

---

**FIRMA**

*The true delight is in the finding out rather than in the knowing.*  
Isaac Asimov

## Agradecimientos

A Malú, por haber emprendido este viaje a mi lado y por darme todo su apoyo y amor en cada momento.

A mis padres, por su constante apoyo y comprensión y por todas sus enseñanzas que me han servido en cada momento de mi vida.

A mi hermana, por esas pláticas que me han servido de inspiración y por mostrarme que todo es posible.

A mi tía Yesi, por aguantarme y apoyarme durante esta aventura.

A la Facultad de Ingeniería, por su apoyo para poder asistir al congreso ISMOT 2011 en Praga a presentar este trabajo de tesis.

A Alex, por haber confiado en mí y por todas sus enseñanzas.

Al Dr. Naser, al Dr. Maximino, a la Dra. Graciela y al Dr. Jesús por su tiempo y apoyo.

A Ricardo, Mariana y Dulce, por haber hecho este tiempo más divertido.

A Mario, por haberme ayudado y enseñado a utilizar la CNC.

A Sami, Ángeles y Aguirre, que sé que aunque no nos veamos, siempre están ahí.

A ti... aunque te has ido, no pasa día alguno sin que piense en ti.

## Resumen

En este trabajo se presenta el diseño, la integración y la verificación de soportes optomecánicos para dicróicos para el instrumento astronómico RATIR (The Reionization and Transients InfraRed camera/telescope). RATIR es un instrumento que será instalado en el telescopio de 1.5 metros en San Pedro Mártir, México y cuya principal tarea es realizar seguimientos de las explosiones de rayos gamma (GRB) detectadas por Swift. Para lograr esto, RATIR ha sido diseñado con tres dicróicos que estudiarán la luz proveniente de estos GRB. Cada dicróico tiene un soporte que debe cumplir con ciertos requerimientos de peso y tamaño. El diseño de estos soportes debe minimizar la deformación y el esfuerzo generados sobre el dicróico para cumplir con las especificaciones de diseño. Se propusieron diferentes diseños y cada uno se analizó utilizando la teoría de placas delgadas y el método de los elementos finitos. Las deformaciones obtenidas fueron menores de 34 nm en la parte central del dicróico. El diseño que tuvo una deformación de 14.95 nm fue elegido para ser el diseño final. Utilizando una fresadora CNC, se construyó un prototipo del soporte que se utilizó para realizar pruebas en laboratorio. Estas pruebas consistirán en la detección de patrones de esfuerzos sobre el dicróico utilizando la técnica de la fotoelasticidad.

## Abstract

We present the design, integration and verification of the optomechanical support for the dichroics of the astronomical instrument RATIR (The Reionization and Transients InfraRed camera/telescope). RATIR is an instrument that will be installed in the 1.5 m telescope in San Pedro Mártir, México and whose primary function is to make a follow up of gamma ray bursts (GRB) detected by Swift. To achieve this, RATIR has been designed with three dichroics to study light coming from the GRB. Each dichroic has a support that has to meet specific weight and dimension requirements. Its design must minimize deformation and stress in the dichroic to comply with correct working specifications of the dichroic. Different designs were proposed and analyzed using classic thin plate theory and finite element analysis (FEA). The deformations obtained were less than 34 nm at the center of the dichroic. The design having the lowest deformation of 14.95 nm was selected to be the final design. Using a Computer Numerically Controlled (CNC), we build a prototype of the support that is going to be used to make laboratory tests. With this prototype we are going to study the stress patterns created by the support in the dichroic using the photoelasticity technique.

# Índice

|   |    |
|---|----|
| Resumen.....  | VI |
| Abstract.....   | VI |
| 1 Introducción.....   | 1  |
| 1.1 Destellos de rayos gama.....  | 2  |
| 1.2 Satélite Swift.....   | 7  |
| 1.3 The Reionization and Transients InfraRed camera/telescope: RATIR.....       | 8  |
| 1.3.1 Objetivos científicos de RATIR.....                                       | 9  |
| 1.3.2 Diseño Óptico de RATIR.....   | 10 |
| 1.3.3 Diseño mecánico de RATIR.....   | 11 |
| 1.4 Referencias.....  | 12 |
| 2 Marco teórico.....  | 15 |
| 2.1 Diseño mecánico.....  | 15 |
| 2.1.1 Proceso del diseño.....   | 15 |
| 2.1.2 Herramientas para el diseño.....  | 16 |
| 2.1.3 Materiales.....   | 18 |
| 2.2 Optomecánica.....   | 20 |
| 2.2.1 Proceso del diseño optomecánico.....                                      | 20 |
| 2.2.2 Influencias ambientales.....  | 22 |
| 2.2.3 Características de materiales optomecánicos.....                          | 22 |
| 2.3 Análisis de placas delgadas.....  | 22 |
| 2.3.1 Contexto histórico.....   | 23 |
| 2.3.2 Propiedades de las placas delgadas.....                                   | 23 |
| 2.3.3 Ecuación para la deformación de placas y sus condiciones de frontera..... | 24 |
| 2.4 Método de los Elementos Finitos.....  | 25 |
| 2.5 Referencias.....  | 26 |
| 3 Propuesta de diseño.....  | 27 |
| 3.1 Definición del problema.....  | 27 |
| 3.2 Análisis del problema.....  | 27 |
| 3.3 Justificación del problema.....   | 28 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.4   | Dimensiones y características del dicroico .....                          | 28 |
| 3.5   | Piezas que conforman el soporte.....                                      | 28 |
| 3.5.1 | Base del soporte.....   | 28 |
| 3.5.2 | Resortes.....   | 33 |
| 3.5.3 | Tornillos de ajuste .....   | 35 |
| 3.6   | Diseño completo .....   | 35 |
| 3.7   | Materiales propuestos .....   | 36 |
| 3.7.1 | Sílice fundida (Fused Silica Schott ML®Q) .....                           | 37 |
| 3.7.2 | Aluminio 6061-T6 .....  | 37 |
| 3.7.3 | Nylamid .....   | 37 |
| 3.8   | Integración con el instrumento RATIR .....                                | 37 |
| 3.9   | Referencias.....  | 38 |
| 4     | Verificación del dicroico e integración con su soporte optomecánico ..... | 40 |
| 4.1   | Dicroico .....  | 40 |
| 4.1.1 | Deformación debido a su peso.....   | 40 |
| 4.2   | Soporte.....  | 44 |
| 4.2.1 | Fuerza necesaria para sostener el dicroico .....                          | 44 |
| 4.2.2 | Modelo matemático de los resortes .....                                   | 45 |
| 4.3   | Deformación del dicroico montado en el soporte .....                      | 46 |
| 4.3.1 | Análisis matemático .....   | 46 |
| 4.3.2 | Análisis por elemento finito (FEA).....                                   | 49 |
| 4.4   | Comparación de deformaciones obtenidas .....                              | 57 |
| 4.5   | Referencias.....  | 57 |
| 5     | Manufactura del soporte .....   | 58 |
| 5.1   | Maquinado CNC .....   | 58 |
| 5.1.1 | Colaboración con la FI-UNAM .....   | 58 |
| 5.1.2 | Máquina y herramientas utilizadas.....                                    | 58 |
| 5.1.3 | Dimensiones del material.....   | 59 |
| 5.1.4 | Dimensiones de las piezas.....  | 59 |
| 5.1.5 | Generación de trayectorias.....   | 59 |
| 5.2   | Maquinado del sistema de resortes.....                                    | 65 |
| 5.3   | Piezas terminadas y ensamble del soporte.....                             | 65 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.4   | Referencias.....                                     | 66 |
| 6     | Simulación y validación del esfuerzo .....           | 67 |
| 6.1   | Análisis del esfuerzo por medio del FEA .....        | 67 |
| 6.2   | Método para medir el esfuerzo sobre el dicroico..... | 68 |
| 6.2.1 | Técnica utilizada .....                              | 68 |
| 6.2.2 | Diseño del experimento .....                         | 70 |
| 6.2.3 | Resultados obtenidos.....                            | 71 |
| 6.3   | Referencias.....                                     | 72 |
| 7     | Conclusiones.....                                    | 74 |
| A.    | Planos de Maquinado.....                             | 76 |
| A.1   | Soporte del dicroico .....                           | 76 |
| A.2   | Base del soporte.....                                | 77 |
| A.3   | Base del soporte.....                                | 78 |
| A.4   | Base del soporte.....                                | 79 |
| A.5   | Base del soporte.....                                | 81 |
| A.6   | Base del soporte.....                                | 82 |
| A.7   | Base del soporte.....                                | 84 |
| A.8   | Base del resorte.....                                | 86 |
| A.9   | Resorte .....  | 87 |
| A.10  | Dimensiones del dicroico .....                       | 88 |
| B.    | Código G .....                                       | 89 |
| B.1   | Contorno Interior .....                              | 89 |
| B.2   | Contorno exterior.....                               | 89 |
| B.3   | Caja de 14.5 mm de profundidad.....                  | 90 |
| B.4   | Caja de 3 mm de profundidad.....                     | 90 |
| B.5   | Caja de 5 mm de profundidad.....                     | 91 |
| C.    | Dimensiones de tornillos.....                        | 92 |
| C.1   | Tornillo 9276A157 .....                              | 92 |
| C.2   | Tornillo 92360A248.....                              | 93 |
| C.3   | Tornillo 92432A452 .....                             | 94 |
| C.4   | Tornillo 99154A313 .....                             | 95 |

## Tabla de Figuras

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1-1: DETECCIÓN DE PRIMEROS DESTELLOS DE RAYOS GAMA POR EL SATÉLITE VELA.....  | 1  |
| FIGURA 1-2: CURVAS DE DETECCIÓN DE TRES DESTELLOS DE RAYOS GAMA.....   | 2  |
| FIGURA 1-3: PRECURSORAS DE LAS GRB. IMAGEN TOMADA DE [7].....  | 3  |
| FIGURA 1-4: DESTELLOS GAMA DETECTADAS POR BATSE. IMAGEN TOMADA DE LA NASA. ....  | 3  |
| FIGURA 1-5: REMANENTE EN RAYOS X DETECTADO POR BEPPUSAX: (IZQUIERDA) OCHO HORAS DESPUÉS DE LA DETECCIÓN, (DERECHA): TRES DÍAS DESPUÉS (COSTA ET AL. 1997)..... | 4  |
| FIGURA 1-6: REMANENTES ÓPTICOS EN LAS BANDAS V E I DEL GRB 971214 [22]. ....   | 6  |
| FIGURA 1-7: SATÉLITE SWIFT (NASA).....   | 7  |
| FIGURA 1-8: EXPLOSIÓN DE RAYOS GAMA GRB090423, CON UN CORRIMIENTO AL ROJO DE $z=8.2$ .....   | 8  |
| FIGURA 1-9: LONGITUDES DE ONDA DE LAS BANDAS DE RATIR.....   | 9  |
| FIGURA 1-10: RATIR MONTADO EN EL FOCO CASSEGRAIN DEL TELESCOPIO DE 1.5 METROS. ....  | 9  |
| FIGURA 1-11: DISEÑO ÓPTICO DE RATIR [35].....  | 11 |
| FIGURA 1-12: DISEÑO MECÁNICO FINAL DE RATIR.....   | 11 |
| FIGURA 1-13: SIMULACIÓN POR ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE DE RATIR. ....  | 12 |
| FIGURA 2-1: MODELO CREADO EN SOLIDWORKS.....   | 17 |
| FIGURA 2-2: EJEMPLO DE ANÁLISIS EN ALGOR <sup>®</sup> .....  | 18 |
| FIGURA 3-1: DIMENSIONES DEL DICROICO.....  | 28 |
| FIGURA 3-2: SUPERFICIES DE CONTACTO DEL SOPORTE.....   | 28 |
| FIGURA 3-3: SUPERFICIE PARA SOSTENER EL DICROICO POR LA ARISTA DE SU SUPERFICIE INFERIOR. ....   | 29 |
| FIGURA 3-4: PROPUESTA I DE LA BASE DEL DICROICO. ....  | 30 |
| FIGURA 3-5: PROPUESTA II DE LA BASE DEL DICROICO. ....   | 31 |
| FIGURA 3-6: PROPUESTA III DE LA BASE DEL DICROICO.....   | 31 |
| FIGURA 3-7: PROPUESTA IV DE LA BASE DEL DICROICO.....  | 32 |
| FIGURA 3-8: PROPUESTA V DE LA BASE DEL SOPORTE.....  | 32 |
| FIGURA 3-9: PROPUESTA VI DE LA BASE DEL SOPORTE. ....  | 33 |
| FIGURA 3-10: EJE DEL RESORTE.....  | 34 |
| FIGURA 3-11: TORNILLO QUE APLICARÁ LA FUERZA AL RESORTE.....   | 34 |
| FIGURA 3-12: MODELO DEL RESORTE.....   | 34 |
| FIGURA 3-13: BASE DEL RESORTE. ....  | 34 |
| FIGURA 3-14: SISTEMA COMPLETO DE RESORTES. ....  | 35 |
| FIGURA 3-15: TORNILLO AJUSTABLE.....   | 35 |
| FIGURA 3-16: DISEÑO TERMINADO DEL SOPORTE. ....  | 36 |
| FIGURA 3-18: INTEGRACIÓN DEL SOPORTE CON EL INSTRUMENTO.....   | 38 |
| FIGURA 4-1: ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO DE LA DEFORMACIÓN DEL DICROICO DEBIDO A SU PROPIO PESO.....   | 44 |
| FIGURA 4-2: SISTEMA DICROICO-RESORTE. ....   | 45 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 4-3: DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL RESORTE.....  | 45 |
| FIGURA 4-4: EJES DE REFERENCIA EN EL DICROICO PARA EL MÉTODO DE LEVI. ....   | 46 |
| FIGURA 4-5: REPRESENTACIÓN DEL DICROICO CON SUS PUNTOS DE SOPORTE.....   | 48 |
| FIGURA 4-6: DIVISIÓN DEL DICROICO PARA CÁLCULOS ANALÍTICOS. ....   | 48 |
| FIGURA 4-7: RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN EL DICROICO, UTILIZANDO LA PROPUESTA I DE DISEÑO.<br>GRAVEDAD APLICADA EN DIRECCIÓN +Z. ....    | 49 |
| FIGURA 4-8: RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN EL DICROICO, UTILIZANDO LA PROPUESTA I DE DISEÑO.<br>GRAVEDAD APLICADA EN DIRECCIÓN -Z. ....    | 50 |
| FIGURA 4-9: RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN EL DICROICO, UTILIZANDO LA PROPUESTA II DE DISEÑO.<br>GRAVEDAD APLICADA EN DIRECCIÓN +Z. ....   | 51 |
| FIGURA 4-10: RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN EL DICROICO, UTILIZANDO LA PROPUESTA II DE DISEÑO.<br>GRAVEDAD APLICADA EN DIRECCIÓN -Z. ....  | 51 |
| FIGURA 4-11: RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN EL DICROICO, UTILIZANDO LA PROPUESTA III DE DISEÑO.<br>GRAVEDAD APLICADA EN DIRECCIÓN +Z. .... | 52 |
| FIGURA 4-12: RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN EL DICROICO, UTILIZANDO LA PROPUESTA III DE DISEÑO.<br>GRAVEDAD APLICADA EN DIRECCIÓN -Z. .... | 52 |
| FIGURA 4-13: RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN EL DICROICO, UTILIZANDO LA PROPUESTA IV DE DISEÑO.<br>GRAVEDAD APLICADA EN DIRECCIÓN +Z. ....  | 53 |
| FIGURA 4-14: RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN EL DICROICO, UTILIZANDO LA PROPUESTA IV DE DISEÑO.<br>GRAVEDAD APLICADA EN DIRECCIÓN -Z. ....  | 54 |
| FIGURA 4-15: RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN EL DICROICO, UTILIZANDO LA PROPUESTA V DE DISEÑO.<br>GRAVEDAD APLICADA EN DIRECCIÓN +Z. ....   | 55 |
| FIGURA 4-16: RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN EL DICROICO, UTILIZANDO LA PROPUESTA V DE DISEÑO.<br>GRAVEDAD APLICADA EN DIRECCIÓN -Z. ....   | 55 |
| FIGURA 4-17: RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN EL DICROICO, UTILIZANDO LA PROPUESTA VI DE DISEÑO.<br>GRAVEDAD APLICADA EN DIRECCIÓN +Z. ....  | 56 |
| FIGURA 4-18: RESULTADOS DE LA DEFORMACIÓN EL DICROICO, UTILIZANDO LA PROPUESTA VI DE DISEÑO.<br>GRAVEDAD APLICADA EN DIRECCIÓN -Z. ....  | 56 |
| FIGURA 5-1: FRESADORA EMCO VMC 300. ....   | 58 |
| FIGURA 5-2: SIMULACIÓN DEL MAQUINADO INTERIOR DEL SOPORTE. ....  | 59 |
| FIGURA 5-3: SIMULACIÓN DEL MAQUINADO DE LAS CAJAS DE 3, 5 Y 14.5 MM DE PROFUNDIDAD. ....   | 60 |
| FIGURA 5-4: SIMULACIÓN DEL MAQUINADO DEL BORDE ANTERIOR. ....  | 60 |
| FIGURA 5-5: SIMULACIÓN DEL MAQUINADO INFERIOR. ....  | 60 |
| FIGURA 5-7: BLOQUE DE MATERIAL FIJO EN LA MÁQUINA CNC.....   | 61 |
| FIGURA 5-6: SIMULACIÓN DEL MAQUINADO PARA EL DESBASTE INFERIOR. ....   | 61 |
| FIGURA 5-8: MAQUINADO PARA REMOVER EL MATERIAL INTERIOR. ....  | 62 |
| FIGURA 5-9: MAQUINADO DEL CONTORNO INTERIOR. ....  | 62 |
| FIGURA 5-10: CONTORNO INTERIOR Y PRIMERAS CAJAS TERMINADAS. ....   | 63 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 5-11: MAQUINADO TERMINADO DE LA SEGUNDA CAJA. ....                   | 63 |
| FIGURA 5-12: MAQUINADO SUPERIOR TERMINADO. ....                             | 64 |
| FIGURA 5-13: MATERIAL POSICIONADO PARA MAQUINADOS INFERIORES.....           | 64 |
| FIGURA 5-15: ENSAMBLE DEL SISTEMA DE RESORTES. ....                         | 65 |
| FIGURA 5-14: SISTEMA DE RESORTE. ....                                       | 65 |
| FIGURA 5-16: ENSAMBLE FINAL DEL SOPORTE. ....                               | 66 |
| FIGURA 6-1: SIMULACIÓN DE ESFUERZOS SOBRE EL DICROICO. ....                 | 67 |
| FIGURA 6-2: SIMULACIÓN DE ESFUERZOS SOBRE EL DICROICO. ....                 | 68 |
| FIGURA 6-3 SIMULACIÓN DE ESFUERZOS SOBRE EL DICROICO, VISTA INFERIOR. ....  | 68 |
| FIGURA 6-4: RETARDADOR.....   | 69 |
| FIGURA 6-5: POLARISCOPIO LINEAL. ....                                       | 69 |
| FIGURA 6-6: ZONAS DE GENERACIÓN DE ESFUERZOS. ....                          | 70 |
| FIGURA 6-7: ARREGLO DE POLARISCOPIO LINEAL CON EL SOPORTE DEL DICROICO..... | 71 |
| FIGURA 6-8: VISTA A TRAVÉS DEL ANALIZADOR. ....                             | 72 |

# 1 Introducción

En este primer capítulo se presenta una introducción a conceptos astronómicos que se utilizarán a lo largo de la tesis así como una introducción del estudio y las características de los destellos de rayos gama. Se presentará el satélite Swift de la NASA, sus objetivos, sus instrumentos y sus descubrimientos más importantes. Por último, se presentará una descripción del proyecto RATIR.

La instrumentación astronómica es la rama de la ingeniería que se encarga de diseñar, fabricar y construir instrumentos para el estudio del universo. Estos instrumentos varían desde cámaras para realizar fotometría, radiotelescopios, espectrógrafos, interferómetros y detectores de partículas [1], cada uno teniendo características y objetivos de estudio diferentes. Uno de estos objetivos a estudiar son los destellos de rayos gama.

Los destellos de rayos gama (Gamma Ray Bursts, GRB) son los destellos de más alta energía que existen en el universo. Las GRB pueden ocurrir en cualquier momento, en cualquier lugar del universo y pueden tener una duración variable. Para estudiar estas GRB, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) envió al espacio los satélites SWIFT [2] y Fermi [3] cuya misión es detectar estos destellos y estudiarlos.

Una vez detectada la explosión de rayos gama por cualquiera de estos satélites, se envía a la Tierra las coordenadas donde se detectó la explosión para que telescopios terrestres puedan detectar, estudiar y recopilar la mayor información posible de ese GRB en particular.

Uno de los telescopios terrestres seleccionados para trabajar en conjunto con Swift y Fermi es el telescopio de 1.5 metros del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir (OAN/SPM). Para poder estudiar los destellos de rayos gama con este telescopio, la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad de California (Berkeley) y el Goddard Space Flight Center (NASA), están desarrollando el instrumento RATIR (The Reionization and Transients InfraRed camera/telescope).

Este trabajo de tesis contribuyó a modificar y concluir el diseño del soporte para dióicos que utilizará RATIR. También se contribuyó con el análisis conceptual de este soporte y con la construcción del primer prototipo del mismo para realizar más pruebas y poder determinar el correcto funcionamiento del soporte.

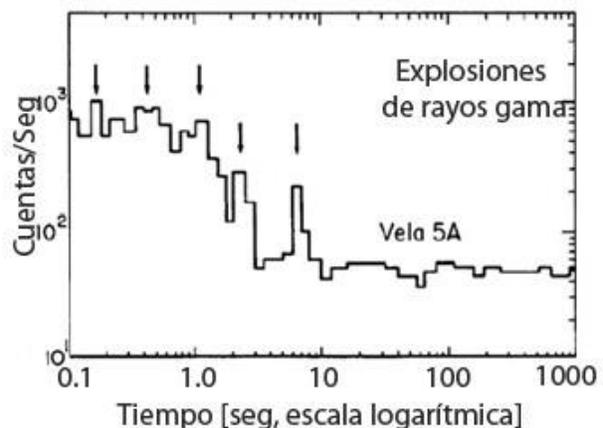


Figura 1-1: Detección de primeros destellos de rayos gama por el satélite Vela.

## 1.1 Destellos de rayos gama

El estudio de los destellos de rayos gama (GRB) comenzó a finales de la década de los sesenta de manera accidental. Los primeros descubrimientos de estos destellos se llevaron a cabo por los satélites militares Vela de Estados Unidos. Estos satélites tenían como misión detectar explosiones nucleares en el espacio [4].

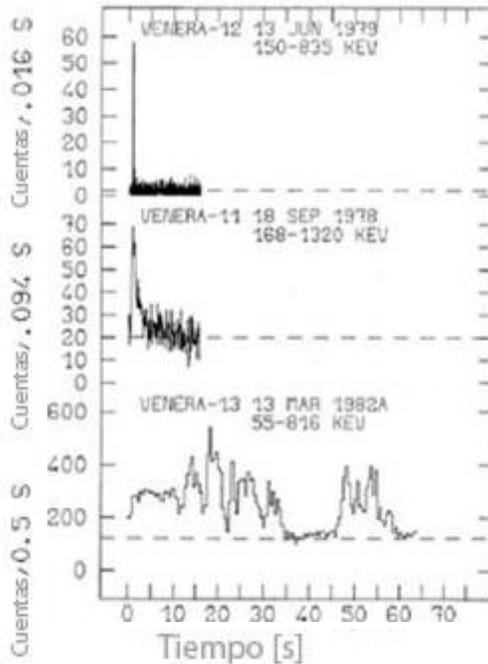


Figura 1-2: Curvas de detección de tres destellos de rayos gama.

Los eventos más brillantes ya que en su máximo tienen un brillo de más de cien mil veces el brillo de una galaxia [6]. Estas características dieron a estos destellos un gran interés en la comunidad científica que se ha dado la tarea de investigar de dónde provienen estos destellos y por qué se originan.

El estudio de estos destellos se convirtió en todo un reto, ya que éstos se producían de manera aleatoria en cualquier parte del cielo en cualquier momento y con una duración muy pequeña, desde unos cuantos milisegundos hasta unos cuantos minutos. Esto hizo que la detección de los destellos fuera muy difícil de realizar. Otro problema para la detección de estos destellos fue el poder determinar con precisión la dirección de la cual provenían.

Conforme se fueron obteniendo más datos de distintos destellos se pudo observar una característica peculiar: todos los destellos eran distintos. No tenían un período de puntos máximos determinado y la curva de cada explosión era diferente a las demás (Figura 1-2).

A partir de la década de los noventa se lanzaron diversos satélites para estudiar más a fondo estos destellos. Entre las misiones más importantes destacan BATSE, BeppoSAX, HETE-2 y uno de los más recientes, el satélite Swift. Los datos obtenidos de estas misiones han ayudado para

En el año de 1973 se publicó un artículo en el cual se presentan resultados de dieciséis destellos de alta energía (entre 0.2 y 1.5 MeV) detectados entre 1969 y 1972 por los satélites Vela [5]. Estos satélites contaban con un contador de centelleos como detector. Estos destellos tuvieron una duración de entre menos de un segundo y treinta segundos (Figura 1-1). Después de analizar estas detecciones se llegó a la conclusión de que su origen no se debía a la Tierra ni al Sol. Así mismo se descartó que el origen de estos destellos fueran las supernovas y también se descartó como origen una explosión de una bomba nuclear.

Los destellos de rayos gama son los eventos más impresionantes, energéticos y violentos que ocurren en el Universo desde el Big Bang. Se ha observado que estos destellos son también los

comprender mejor algunas características de los destellos de rayos gama, así como del origen de las mismas, de su ubicación en el espacio y de la distancia que las separa de nosotros.

### 1.1.1.1 Origen y características de los destellos de rayos gama

En 1991 inició el experimento BATSE (Experimento de Fuentes de Destellos y Transitorios) a bordo del Observatorio de Rayos Gama Compton de la NASA (<http://www.batse.msfc.nasa.gov/>). Con los resultados obtenidos de este experimento se pudieron estudiar más a fondo algunas características de los destellos de rayos gama. También comenzaron a desarrollarse teorías para explicar el origen de las mismas.

Se confirmó la diferencia en la morfología de los destellos, comprobando que cada una es diferente y única. También se comprobó que tienen duraciones desde milisegundos hasta varios segundos.

Una característica que se descubrió con estos experimentos fue que algunos destellos están precedidos por destellos de menor intensidad y menor duración [7]. Los autores definen como actividad precursora cuando *el primer episodio de la explosión tiene una intensidad pico menor que la emisión restante y que además está separada de la emisión de la explosión restante por lo menos un período de tiempo igual a la duración del resto de la emisión*

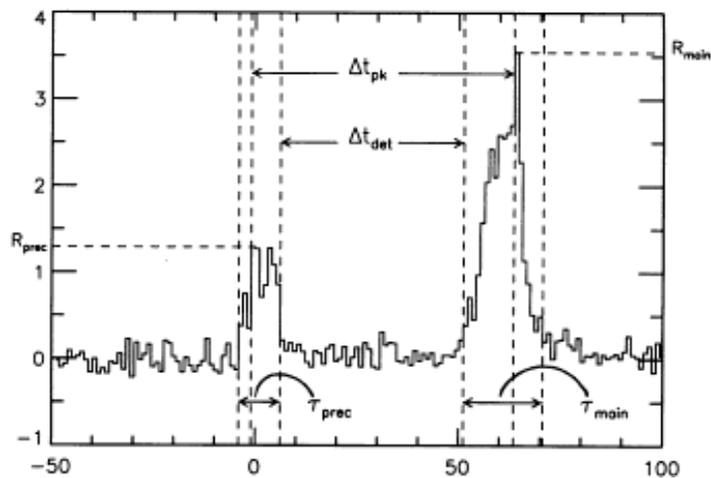


Figura 1-3: Precursoras de las GRB. Imagen tomada de [7]

(Figura 1-3). Si bien esta característica es importante en los destellos de rayos gama, solamente se descubrió en alrededor del 3% de los destellos detectados por el experimento BATSE.

En el año de 1995 un estudio demostró que existe una relación entre la duración de la explosión y la energía de la misma [8]. Entre mayor sea la energía de la explosión, su duración es menor.

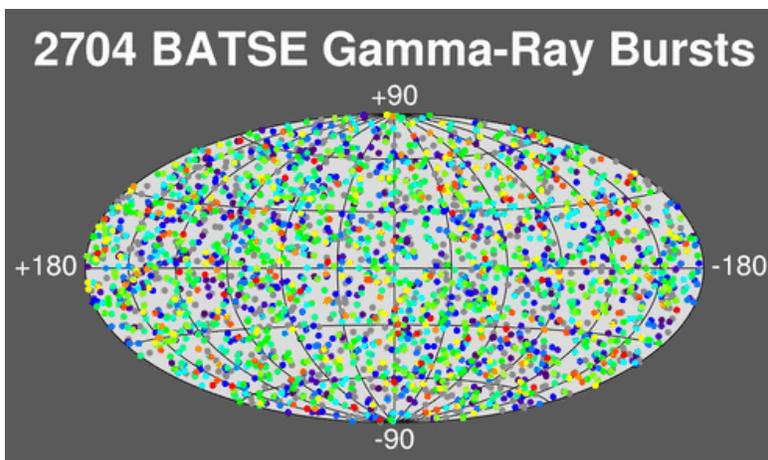


Figura 1-4: Destellos gama detectados por BATSE. Imagen tomada de la NASA.

Otra característica importante que se fue descubriendo con los resultados de BATSE fue el origen de los destellos. Se propusieron varias hipótesis sobre el origen de los destellos. Una de las primeras

fue que se originaban dentro de la galaxia. También se propuso la hipótesis que los destellos se originaban en un halo ubicado alrededor de la galaxia. Estudiando la distribución angular y la distribución de la intensidad de los destellos captadas por BATSE, se observaron limitaciones para aceptar estas dos hipótesis [9].

Posteriormente se propusieron dos grupos de origen de los destellos: un grupo de destellos con origen dentro de la galaxia y otro grupo con origen a distancias cosmológicas [10]. La existencia de estos grupos se propuso principalmente por la isotropía que se encontró de todos los destellos detectados por BATSE (Figura 1-4).

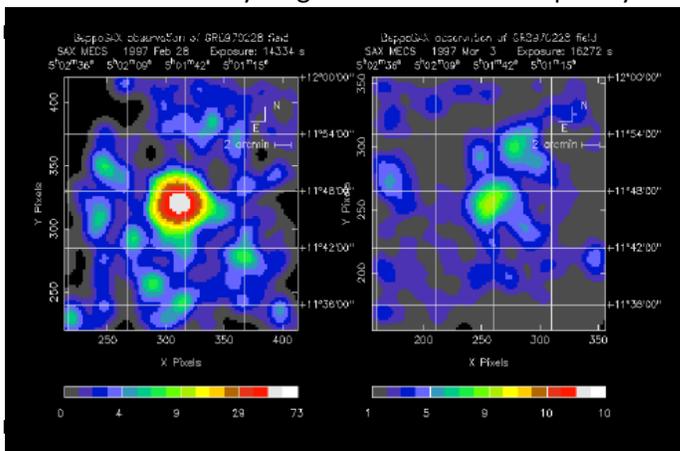
La distancia cosmológica a las que se propone que se encuentran estos destellos son de 3 Gpc que es aproximadamente igual a un corrimiento al rojo de  $z \sim 1$ . El corrimiento al rojo permite a los astrónomos determinar la distancia que existe a un punto determinado en el Universo. Es un fenómeno en el cuál la luz emitida por un objeto se desplaza en el espectro electromagnético hacia el rojo, lo cual indica que la fuente de luz se aleja del observador.

Al tener estas distancias tan grandes y al poder ser capaces de observar estos destellos, en el momento de su origen debieron de tener una gran cantidad de energía. Esta gran cantidad de energía debía de poder ser visible al chocar la energía con el medio interestelar [11]. Estas bolas de fuego o remanentes de los destellos deberían de emitir radiación óptica e infrarroja por lo que en caso de comprobarse esta teoría, sería más sencillo detectar y estudiar los destellos de rayos gama porque estos remanentes durarían más tiempo que la explosión.

Se necesitan encontrar pruebas cosmológicas, como estas bolas de fuego o detectar un espectro con corrimiento al rojo hacia energías menores para poder confirmar que los destellos de rayos gama se originan a distancias cosmológicas.

### 1.1.1.2 Remanentes de los destellos de rayos gama

Para poder estudiar mejor estas bolas de fuego, o remanentes, en el año de 1996 se lanzó el satélite italiano BeppoSAX. Tenía como objetivos científicos estudiar y detectar los remanentes de los destellos de rayos gama de manera rápida y realizar observación en rayos X de estos



detectó un **Figura 1-5: Remanente en rayos X detectado por BeppoSAX: (izquierda) ocho horas después de la detección, (derecha): tres días después (Costa et al. 1997).**

remanentes, debía de avisar a los telescopios terrestres para que realizaran observaciones en óptico, radio e infrarrojo.

El 28 de febrero de 1997 se detectó la explosión GRB 970228. Esta explosión fue con una duración de 80 segundos. Se

pico de gran intensidad

seguido por tres picos de menor intensidad, entre 600 y 150 cuentas por segundo [12]. Se pidió a la comunidad astronómica internacional que realizara observaciones de esta explosión en todas las bandas del espectro electromagnético.

BeppoSAX realizó observaciones ocho horas y tres días después de la detección de la explosión [13]. Sus instrumentos detectaron el primer remanente en rayos X en esta explosión. Tres días después de esta primera observación se realizó una segunda observación. Se pudo observar el mismo remanente, pero la energía del mismo había disminuido en un factor de veinte (Figura 1-5).

Un logro muy importante de esta explosión fue que los astrónomos lograron identificar la galaxia de la cuál provenía la explosión. Estas observaciones se realizaron con el *New Technology Telescope* de la ESO [14] y con el telescopio Keck de diez metros [15]. Posteriormente en el año de 1999 se realizaron estudios espectrográficos a esta galaxia utilizando el telescopio Keck II de diez metros. Se observaron líneas de emisión de O II, Ne III y O III obteniendo un corrimiento al rojo de  $z = 0.695$  [16].

Otra explosión de rayos gama de gran interés para los científicos fue la que se detectó el ocho de mayo de 1997. Esta explosión, GRB 970508, fue a la primera que se le encontraron remanentes en radio y también fue la primera explosión a la cual se le detectó directamente la distancia a la que se encontraba. Esta explosión fue una explosión muy débil y de corta duración; solamente duró quince segundos y se tuvo una cuenta máxima en los detectores de 450 cuentas por segundo [17].

Esta explosión presentó un comportamiento peculiar ya que durante cinco horas, ocho horas después de su detección, mantuvo un brillo óptico constante. Cuarenta horas después de su detección, la explosión llegó a su máximo brillo y después de estas cuarenta horas el brillo decayó exponencialmente.

En esta explosión se detectó una línea espectral de hierro en rayos X la cual desapareció un día después de su observación [18]. Esta observación dio origen a una nueva teoría acerca del origen de los destellos de rayos gama: El sitio en donde se originó esta explosión estaba envuelto en masa de material que fue pre-expulsado por una estrella masiva antes de explotar. Con esta observación se inició la búsqueda de una relación entre estrellas masivas y los destellos de rayos gama.

La GRB 970508 fue observada por el telescopio Keck. La radiación óptica emitida por esta explosión duró más de dos días y se pudieron observar líneas de absorción de Fe II, Mg I y Mg II. Se midieron dos corrimientos al rojo de estas líneas de absorción y fueron de  $z = 0.835$  y de  $z = 0.767$  [19]. Esta distancia indica que esta explosión ocurrió hace siete mil millones de años cuando el Universo tenía 54% de su tamaño actual. Observaciones posteriores descubrieron la galaxia de origen de esta explosión y al medir se obtuvo un valor de  $z = 0.835$  lo cual comprueba que este valor es el correcto para la explosión [20].

La última característica importante que se descubrió de esta explosión fue el descubrimiento de remanentes en radio. Después de analizar y estudiar este remanente en radio se llegó a la

conclusión de que la fuente de emisión se expandía a una velocidad muy alta [21]. Al descubrir esta emisión en radio de los remanentes de la explosión, se apoyó la teoría de que los remanentes son originados por el choque de la bola de fuego producida por la explosión con el medio interestelar.

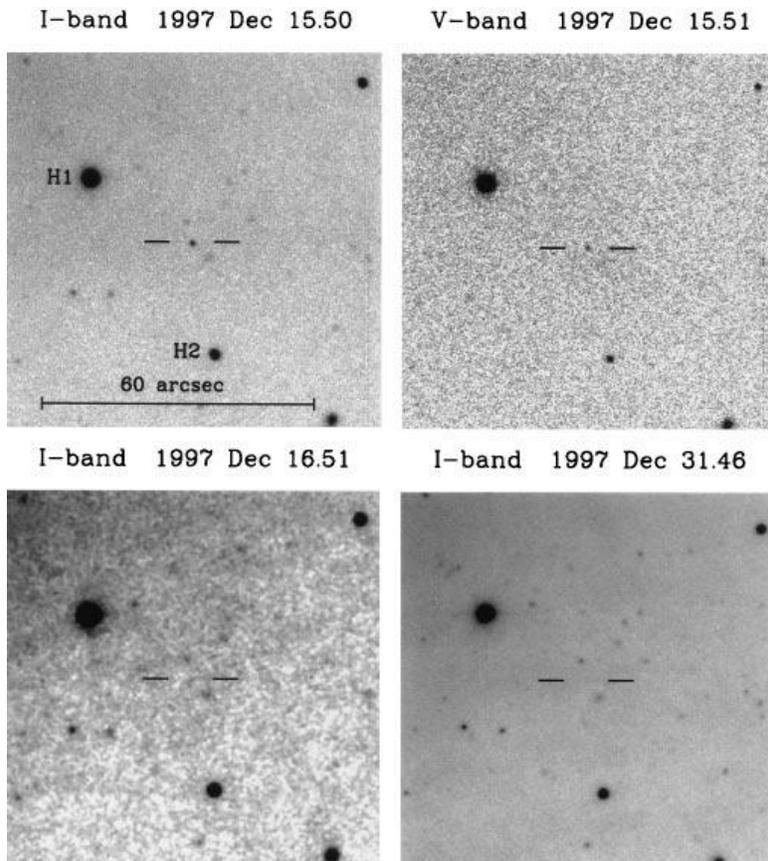


Figura 1-6: Remanentes ópticos en las bandas V e I del GRB 971214 [22].

El 14 de diciembre de 1997 se detectó una explosión de rayos gama denominada GRB 971214. En esta explosión se detectó un remanente óptico. Este remanente fue observado doce horas después de la detección de la explosión por el satélite BeppoSAX. Esta observación se llevó a cabo en el telescopio Kitt Peak, Estados Unidos, de 2.4 metros [22].

Estas imágenes fueron obtenidas en las bandas V e I y al realizar observaciones posteriores se pudo observar que el remanente había disminuido su intensidad (Figura 1-6).

También se realizaron observaciones en el infrarrojo cercano 3.5 horas después de la detección de la explosión y también se pudo observar un

remanente en estas longitudes de onda [23]. Estas observaciones se realizaron en el observatorio Calar Alto.

Observaciones realizadas con el espectrógrafo del telescopio Keck II revelaron la galaxia de origen de esta explosión. Así mismo, los astrónomos determinaron el corrimiento al rojo de esta galaxia en  $z = 3.42$  [24]. Este corrimiento al rojo indica que la galaxia de origen, y por ende la explosión, se encuentra a una edad de dos mil millones de años del Universo. Al encontrarse tan lejos y poder ser observadas estos destellos significa que éstas emiten una gran cantidad de energía. Esta energía es tanta como la que se produce con una colisión de dos estrellas de neutrones o en una colisión entre una estrella de neutrones y un hoyo negro [25] y es dos órdenes superior a la energía que libera una supernova. Es por eso que se empezó a mencionar a las hipernovas como las generadoras de estos destellos. Estas hipernovas son estrellas masivas que colapsan emitiendo energía muy alta debido a su masa y a que está rotando a una velocidad muy alta [26].

Como se puede observar, se han realizado varios descubrimientos importantes estudiando los remanentes y contrapartes de los destellos de rayos gama. Se puede concluir que este es el

camino a seguir para poder entender mejor estos destellos y tratar de determinar la manera en que se originan. Es por esto que los nuevos instrumentos que se encarguen de estudiar estos remanentes deben de estudiar las longitudes de onda rayos X, visibles, en infrarrojo y en radio.

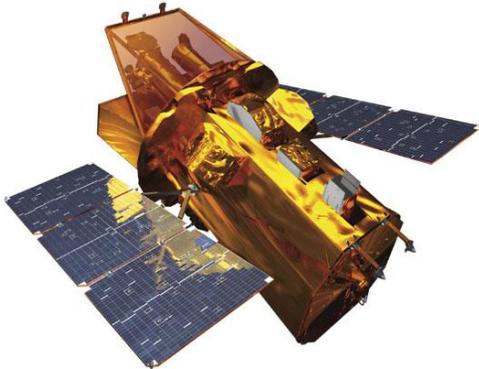


Figura 1-7: Satélite Swift (NASA)

## 1.2 Satélite Swift

El satélite Swift (Figura 1-7), construido por la NASA, fue lanzado al espacio el 20 de noviembre del 2004. El objetivo principal de Swift es detectar destellos de rayos gama y realizar un seguimiento en rayos X, ultravioleta y óptico. Para lograr esto, después de detectar una explosión, el satélite se mueve rápidamente de posición para poder apuntar sus telescopios ópticos y de rayos X en la dirección de donde proviene la explosión. Es por esto que el satélite lleva el nombre de un ave que realiza maniobras rápidas en el aire, el vencejo (Swift en inglés) [27].

El satélite cuenta con tres instrumentos: BAT (Burst Alert Telescope, Telescopio de Alerta de Destellos), XRT (Telescopio de Rayos X) y UVOT (Telescopio UltraVioleta/Óptico). El instrumento BAT es el encargado de monitorear el universo en busca de destellos de rayos gama. Al detectarse una explosión, el satélite envía a Tierra las coordenadas de ésta, en un tiempo no mayor a diez segundos después de haberse localizado. Posteriormente el satélite comenzará a moverse para alinear sus otros dos instrumentos, los cuales se pueden utilizar entre 50 y 70 segundos después de la detección de la explosión, para el caso de XRT, y entre 80 y 100 segundos para el caso de UVOT. Los tres instrumentos tienen campos de visión alineados por lo cual pueden realizar observaciones simultáneas.

Los instrumentos a bordo de Swift presentan las siguientes características [28]. El instrumento BAT cuenta con un mosaico de detectores de CdZnTe con 32,768 elementos de 4x4x2 mm cubriendo un área de 5240 m<sup>2</sup>. Trabaja en un rango de energía de 15 a 150 keV. Después de diez segundos de haber detectado la explosión, el instrumento calcula sus coordenadas y decide si el satélite se va a mover para observar con sus otros instrumentos. Tiene un campo de visión de 1.4 sr y posee una sensibilidad 2.5 veces mayor a la del experimento BATSE. El instrumento cuenta con una resolución angular de 20' de FWHM y una vez calculadas las coordenadas de la explosión, las envía a Tierra por medio de la Red de Coordenadas de Destellos de Rayos Gama (GRBCN).

El instrumento XRT es un telescopio de rayos X con un área efectiva de 110 cm<sup>2</sup>, un campo de visión de 23' con una resolución de 18". Trabaja en un rango de energía de 0.2 a 10 keV.

Por último, el instrumento UVOT, que se encuentra alineado con el XRT, es un telescopio Ritchey-Chretien de 30 cm de apertura. Tiene un F/12.72 con un campo de visión de 17' x 17'. Sus

detectores CCD son de 2048x2048 pixeles teniendo así 0.5"/pixel. Este instrumento va a observar las longitudes de onda de 170 a 600 nm.

Con estos tres instrumentos se tiene planeado que Swift detecte y estudie alrededor de 90 destellos de rayos gama al año. Al ser mejor que sus antecesores, el satélite puede ver GRB más lejanos, hasta ahora con un promedio de  $z \approx 2.72$ , ya que puede observar GRB más débiles. En el mes de abril del 2010, Swift llegó a la marca de 500 GRB detectadas.

El 23 de abril de 2009, Swift detectó la explosión que se denominó GRB 090423 (Figura 1-8) [29]. Esta explosión duró aproximadamente diez segundos. Inmediatamente comenzaron las observaciones de sus remanentes y se descubrió un remanente en rayos X, pero no en visible. También se pudo observar un remanente en infrarrojo tres horas después desde el observatorio de Mauna Kea en Hawaii. Simultáneamente, los telescopios de Galileo en La Palma, y el VLT en Chile, midieron el corrimiento al rojo de la explosión obteniendo un resultado de

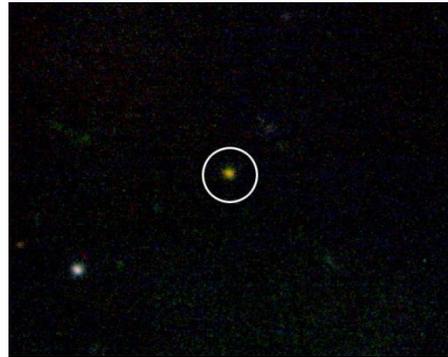


Figura 1-8: Explosión de rayos gama GRB090423, con un corrimiento al rojo de  $z=8.2$

$z = 8.2$ . Este corrimiento al rojo indica que la explosión ocurrió hace 13.035 mil millones de años, 630 millones de años después del Big Bang, cuando el Universo tenía un 5% de la edad actual.

Se cree que esta explosión se originó cuando una estrella masiva colapsó y dio origen a un hoyo negro. Esta explosión de rayos gama es hasta ahora, la explosión más lejana detectada.

### 1.3 The Reionization and Transients InfraRed camera/telescope: RATIR

RATIR es un instrumento que proveerá imágenes en seis diferentes colores de manera simultánea:  $r$  (con una rueda de filtros se podrán seleccionar colores  $u$  y  $g$ ),  $i$ ,  $Z$ ,  $Y$ ,  $J$  y  $H$  (Tabla 1-1 y Figura 1-9). Estas imágenes se van a obtener sobre un campo de visión  $FoV \geq 5 \times 5$  arcmin<sup>2</sup>. En este campo de visión se capturará luz de los remanentes de los destellos de rayos gama y esto permitirá determinar los corrimientos al rojo (*red shifts*,  $z$ ) fotométricos de ese GRB. Esto se hará para corrimientos al rojo de  $z > 6$ .

| Banda | Longitudes de onda |
|-------|--------------------|
| $r$   | 560 – 675 nm       |
| $i$   | 700 – 820 nm       |
| $Z$   | 830 – 925 nm       |
| $Y$   | 970 – 1070 nm      |
| $J$   | 1170 – 1330 nm     |
| $H$   | 1490 – 1780 nm     |

Tabla 1-1: Longitudes de onda para las diferentes bandas de RATIR

El instrumento estará montado en el telescopio de 1.5 metros del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir. Para el correcto funcionamiento del telescopio para obtener imágenes de los destellos de rayos gama, el telescopio debe de ser robotizado. Esto se está llevando a cabo bajo el proyecto de nombre RATTEL. Una vez que el telescopio esté completamente automatizado, se dedicará el 100% del tiempo a seguir las alertas de GRB detectados por los satélites espaciales durante dos años. Se tiene previsto comenzar operaciones a finales del

año 2011. [30]

La mayoría de los componentes a utilizar para RATIR serán componentes comerciales. Se utilizarán cámaras ópticas de la marca Finger Lakes Instrumentation, FLI ([www.flicamera.com](http://www.flicamera.com)). Está garantizado que estas cámaras no tendrán condensación durante toda su vida útil.

Para la porción en el Infrarrojo Cercano (Near InfraRed, NIR), se utilizarán detectores Teledyne-Hawaii – 2RG (H2RG)<sup>1</sup>. Estos detectores necesitan una ingeniería especial, ya que necesitan ser enfriados y aislados para disminuir los niveles de ruido térmico de fondo generado por el instrumento y por el telescopio.

RATIR estará montado en el foco Cassegrain del telescopio de 1.5 metros (Figura 1-10), el cual tiene un número F/13. El peso total del instrumento debe de ser de no más de 172 kilogramos, que es el peso que tiene el instrumento que se encuentra actualmente en el foco Cassegrain del telescopio. También se debe de mantener el torque total en la placa de montura del instrumento menor a 60 kilogramos por metro. Por último el instrumento debe de permanecer fijo en su posición, no debe de permitirse su rotación.

### 1.3.1 Objetivos científicos de RATIR

El principal objetivo del instrumento RATIR es atender a las alertas de destellos de rayos gama emitidas por los satélites Swift y Fermi. Se espera poder estudiar destellos de rayos gama con grandes corrimientos al rojo (Very High

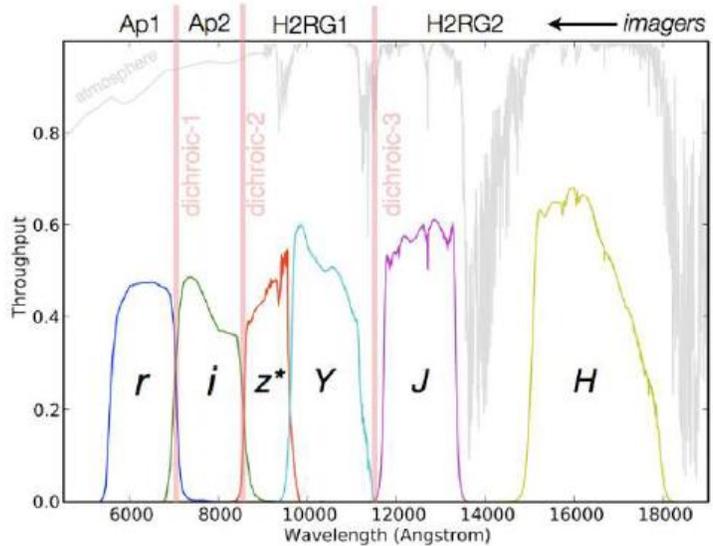


Figura 1-9: Longitudes de onda de las bandas de RATIR

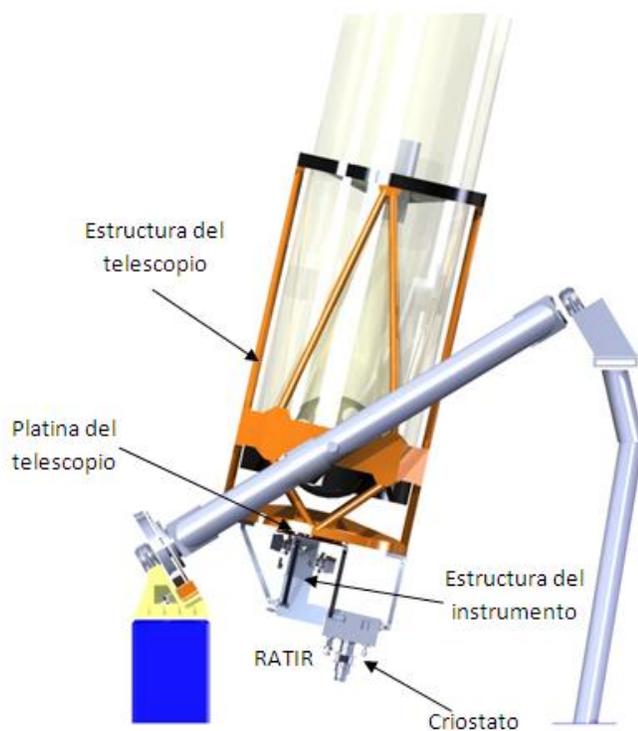


Figura 1-10: RATIR montado en el foco Cassegrain del telescopio de 1.5 metros.

<sup>1</sup> <http://www.teledyne-si.com/imaging/hawaii2rg.html>



Las longitudes de onda reflejadas por estos dos dicróicos irán a los detectores CCD. El primer CCD va a contar con una rueda de filtros localizada a 243 mm por delante del detector.

Figura 1-11: Diseño Óptico de RATIR [35].

Posteriormente la luz pasará por un reductor focal para luego entrar al criostato. Dentro de este criostato se tendrá la parte infrarroja del instrumento.

Un tercer dicróico ubicado dentro del criostato, posicionado a 20°, se encargará de separar la luz de la siguiente manera:

1. Reflejará las longitudes de onda de 810 a 1070 nm (bandas ZY) y transmitirá las longitudes de onda de 1170 a 1800 nm. Las bandas ZY irán a un detector H2RG mientras que las bandas JH irán al otro detector H2RG.



Figura 1-12: Diseño mecánico final de RATIR

### 1.3.3 Diseño mecánico de RATIR

Debido a que el instrumento debe de estar listo para finales del año 2011, se tomó la filosofía de utilizar una mayoría de componentes comerciales.

RATIR es un instrumento que cuenta con varios componentes ( Figura 1-12). La estructura principal tiene poco menos de un metro de longitud mientras que la parte del criostato

añade 0.2 metros más a la longitud de la estructura. Las piezas de la estructura de soporte serán de aluminio AL 6061 T6 o Alu-Mold 1-500. Las placas son de tamaño comercial con un espesor de 0.25 pulgadas. Se pretende manufacturar las piezas en CNC.

| Componentes             | Kilogramos |
|-------------------------|------------|
| Estructura de Soporte   | 45         |
| Crióstato               | 44         |
| Óptica                  | 9          |
| Optomecánica            | 15         |
| Cámaras FLI             | 8          |
| Unidades de enfoque     | 6          |
| Rueda de filtros        | 3          |
| Unión con el telescopio | 15         |
| Cámaras (ZY y JH)       | 10         |
| Unidades de enfoque IR  | 8          |
| Electrónica             | 7          |
| <b>Total</b>            | <b>170</b> |

Tabla 1-2: Presupuesto de pesos para los componentes de RATIR.

El criostato que utilizará RATIR será un criostato comercial de la marca ColdEdge (<http://www.coldedgetech.com/>). La bomba de vacío y todos los componentes internos al criostato están incluidos. La parte infrarroja del instrumento está siendo desarrollada en el Goddard Space Flight Center de la NASA.

Debido a que el peso total del instrumento no debe exceder los 170 kilogramos se realizó un presupuesto del peso de cada componente. Para estos cálculos se

utilizó un factor de seguridad de 1.3. En la Tabla 1-2 se pueden observar los pesos estimados de los diferentes componentes de RATIR.

Para garantizar el buen desempeño del diseño de la estructura de soporte de RATIR, se sometió a un Análisis por Elemento Finito (FEA). Estas simulaciones se realizaron para dos posiciones del instrumento: la primera posición es cuando el telescopio esté apuntando hacia el cenit y la otra posición es cuando el telescopio y el instrumento estén a una inclinación de 90° (Figura 1-13). Los desplazamientos máximos obtenidos fueron de 22  $\mu\text{m}$  para la posición de calibración y de 58  $\mu\text{m}$  para la inclinación a 90°. Por lo tanto, se tendrá un desplazamiento máximo de 36  $\mu\text{m}$  lo cual equivale a 6  $\mu\text{m}/\text{h}$ . Este es un valor aceptable de desplazamiento para las tolerancias del desempeño óptico.

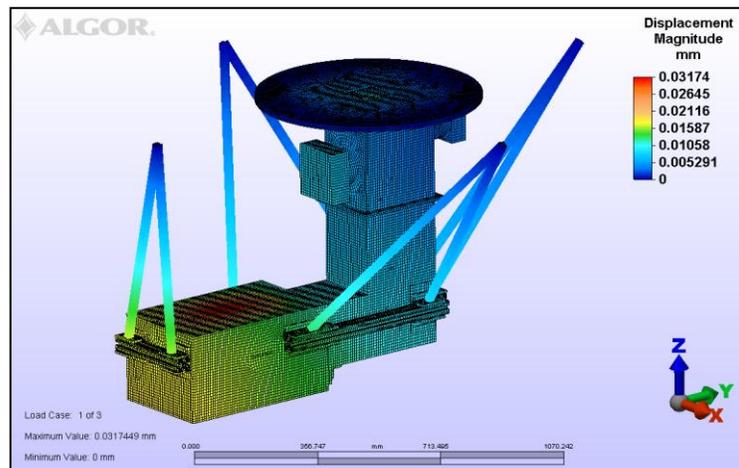


Figura 1-13: Simulación por Análisis por Elemento Finito de la estructura de soporte de RATIR.

## 1.4 Referencias

- [1]. **Léna, P.** *Observational Astrophysics*. Paris : Springer, 1996.
- [2]. **NASA.** The Swift Gamma-Ray Burst Mission. *Official NASA Swift Homepage*. [Online] Mayo 14, 2010. [Cited: Junio 29, 2010.] <http://heasarc.nasa.gov/docs/swift/swiftsc.html>.
- [3]. **NASA.** Fermi Gamma-Ray Space Telescope. *Official NASA Fermi Website*. [Online] Abril 6, 2010. [Cited: Junio 29, 2010.] <http://fermi.gsfc.nasa.gov/>.
- [4]. *The Vela Satellite Program for Detection of High-Altitude Nuclear Detonations*. **Singer, Sidney**. 12, s.l. : Proceedings of the IEEE , December 1965, Vol. 53. 0018-9219.
- [5]. *Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin*. **Klebesadel, Ray W., Strong, Ian B. and Olson, Roy A.** s.l. : The Astrophysical Journal, 1973, Vol. 182.
- [6]. **Katz, John I.** *The Mystery of Gamma-Ray Bursts*. New York : Oxford University Press, 2002.
- [7]. *Gamma-Ray Burst Precursor Activity as Observed with BATSE*. **Koshut, Thomas M., et al.** s.l. : Astrophysical Journal, 1995, Vol. 452.
- [8]. *Gamma-Ray Burst Peak Duration as a Function of Energy*. **Fenimore, E. E., et al.** s.l. : Astrophysical Journal, 1995, Vol. 448.

- [9]. *Constraints on Galactic Distributions of Gamma-Ray Burst Sources From BATSE Observations.* **Hakkila, Jon, et al.** s.l. : Astrophysical Journal, 1994, Vol. 422.
- [10]. *Two Populations and Models of Gamma Ray Bursts.* **Katz, J. I.** s.l. : Astrophysical Journal, 1992, Vol. 422.
- [11]. *Spectrum of cosmic fireballs.* **Cavallo, G. and Horstman, H. M.** 1, s.l. : Astrophysics and Space Science, 1981, Vol. 75.
- [12]. **Costa, E. and Feroci, M.** *GRB 970228.* Cambridge, USA : International Astronomy Union Circular, 1997. *Circular No. 6576.*
- [13]. *Discovery of the X-Ray Afterglow of the Gamma-Ray Burst of February 28 1997.* **Costa, E. and Frontera, F.** 387, s.l. : Nature, 1997.
- [14]. **Groot, P. J. and Galama, T. J.** *GRB 970228, International Astronomical Union Circular No. 6588.* Cambridge : International Astronomical Union, 1997.
- [15]. **Metzger, M. R. and Kulkarni, S. R.** *GRB 970228: International Astronomical Union Circular No. 6588.* Cambridge : International Astronomical Union, 1997.
- [16]. **Djorgovski, S. G. and Kulkarni, S. R.** *GRB 970228: Redshift and properties of the host galaxy.* s.l. : GCN GRB Observation Report, 1999.
- [17]. **Costa, E. and Feroci, M.** *GRB 970508: International Astronomical Union Circular No. 6649.* Cambridge : International Astronomical Union, 1997.
- [18]. *The X-Ray Afterglow of the Gamma-Ray Burst of 1997 May 8: Spectral Variability and Possible Evidence of an Iron Line.* **Piro, L. and Costa, E.** 514, s.l. : The Astrophysical Journal, 1999.
- [19]. *Spectral constraints on the redshift of the optical counterpart to the big gamma-ray burst of 8 May 1997.* **Metzger, M. R. and Djorgovski, S. G.** 387, s.l. : Nature, 1997.
- [20]. *Hubble Space Telescope Observations of the Host Galaxy of GRB 970508.* **Fruchter, A. S. and Pian, E.** 545, s.l. : The Astrophysical Journal, 2000.
- [21]. *The radio afterglow from the big gamma-ray burst of 8 May 1997.* **Frail, D. A. and Kulkarni, S. R.** 389, s.l. : Nature, 1997.
- [22]. *Optical afterglow of the gamma-ray burst of 14 December 1997.* **Halpern, J. P., et al.** 393, s.l. : Nature, 1998.
- [23]. *Detection of the near-infrared counterpart of GRB 971214 3.2 hours after the gamma-ray event.* **Gorosabel, J., Castro-Tirado, A. J. and Willott, C. J.** 335, s.l. : Astronomy and Astrophysics, 1998.

- [24]. *Identification of a host galaxy at redshift  $z = 3.42$  for the big gamma-ray burst of 14 December 1997.* **Kulkarni, S. R. and Djorgovski, S. G.** 393, s.l. : Nature, 1998.
- [25]. *Gamma-ray bursts as the death throes of massive binary stars.* **Narayan, R. and Paczynski, B.** 395, s.l. : Astrophysical Journal, 1992.
- [26]. *Gamma-Ray Bursts as Hypernovae.* **Paczynski, Bohdan.** 428, s.l. : American Institute of Physics Conference Series, 1997.
- [27]. **Sonoma State University.** *Swift. Swift: What's in a name?* [Online] Marzo 28, 2008. [Cited: Agosto 31, 2010.] [http://swift.sonoma.edu/about\\_swift/name.html](http://swift.sonoma.edu/about_swift/name.html).
- [28]. *The Swift Gamma-Ray Burst Mission.* **Gehrels, N. and Chincarini, G.** 611, s.l. : Astrophysical Journal, 2004.
- [29]. **Reddy, Francis.** *Swift. NASA - New Gamma-Ray Burst Smashes Cosmic Distance Record.* [Online] NASA Goddard Space Flight Center, Abril 28, 2009. [Cited: Agosto 31, 2010.] [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/swift/bursts/cosmic\\_record.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/swift/bursts/cosmic_record.html).
- [30]. **Butler, Nathaniel R., et al.** *RATIR Second Design Review Report.* 2010.
- [31]. **Bradt, Hale.** *Electromagnetic Radiation. Astronomy Methods: A Physical Approach to Astronomical Observations.* Cambridge : Cambridge University Press, 2004.
- [32]. **Hecht, Eugene.** *Capítulo 2: Teoría electromagnética, fotones y luz. Óptica.* España : Pearson - Addison Wesley, 2003.
- [33]. **Carroll, Bradley W. and Ostlie, Dale A.** *Chapter 27: The Structure of the Universe. An Introduction to Modern Astrophysics.* USA : Pearson, 2007.
- [34]. **Appenzeller, Immo.** *Space, time and redshift. High-Redshift Galaxies.* Heidelberg, Germany : Springer, 2009.
- [35]. **González, J. J., Kutyrev, A. and Wilson, M.** *RATIR Optical Design.* 2010.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Diseño mecánico

#### 2.1.1 Proceso del diseño

El diseño mecánico es un proceso creativo que involucra una gran variedad de habilidades y conocimientos. Es un proceso que requiere una manera nueva y diferente de ver la realidad en la que vivimos para poder mejorarla en algún aspecto. En el más amplio sentido, el diseño se puede definir como la “formulación de un plan para satisfacer una necesidad particular” [1].

El diseño mecánico puede tener dos objetivos: diseñar y crear un nuevo producto o pieza, o mejorar algún producto o pieza existente. En ambos casos se requiere de un gran talento por parte del diseñador para poder llevar a la realidad sus ideas y diseños.

Como todo proceso, es recomendable que el diseño mecánico cumpla con ciertos pasos para lograr su objetivo. De acuerdo con Childs [2], los pasos dentro del proceso de diseño mecánico son: Reconocer la necesidad a resolver, definir el problema, síntesis del problema, análisis del diseño, optimización y evaluación del diseño final.

El proceso del diseño mecánico comienza cuando existe una necesidad que se debe de resolver, ya sea creando algún producto nuevo o mejorando alguno existente. Una vez encontrada la necesidad a resolver, se debe de definir de manera adecuada el problema.

Estas necesidades pueden variar en su naturaleza. Puede necesitarse el nuevo diseño de un avión con más capacidad de pasajeros y que pueda recorrer mayor distancia con un menor combustible o puede necesitarse una pieza con un nuevo diseño para algún instrumento astronómico.

La fase más crítica dentro del proceso de diseño, cualquiera que sea la necesidad a resolver, es la definición del problema [3]. En la definición del problema se deben de abarcar todas las especificaciones del producto que se va a diseñar. Esta fase en el proceso de diseño se convierte en el más crítico debido a que una mala definición del problema a resolver llevará a un diseño deficiente e incluso hasta erróneo, que no cumpla con su objetivo. Es importante que se dedique el tiempo suficiente a realizar la definición del problema para evitar tener resultados imprevistos.

Durante la fase de la síntesis se lleva a cabo la generación y la creación de la nueva idea o producto [1]. Es aquí el momento en el que se combinan las ideas que se desarrollaron para llevarlas a un concepto tangible, el cual lleve a la solución del problema definido previamente.

Es en esta fase donde se requiere de una gran creatividad. Ser creativo se define como “*explorar y tal vez transformar el espacio conceptual o la estructura conceptual*” [4]. Este es el objetivo que se quiere alcanzar mediante un nuevo diseño mecánico.

Aún cuando la creatividad es una parte fundamental del diseño, también es importante que la creatividad y las especificaciones del diseño vayan de la mano. Se deben de tener en cuenta todas las consideraciones ya que de ellas dependen la geometría, las dimensiones y los materiales que

se utilizarán [5]. Estas consideraciones son aquellas que influyen en el diseño de la pieza o elemento. Entre las consideraciones más importantes se encuentran: la funcionalidad, la fuerza, el esfuerzo al que estará sometida la pieza, las dimensiones, el ambiente en el que se utilizará, etcétera.

En la fase de análisis se aplican los conceptos y el conocimiento de ingeniería. Es durante esta fase en donde los ingenieros deben de verificar, por medio de herramientas como la física de sólidos, las matemáticas, y métodos de análisis, si el diseño creado en la fase de síntesis podrá cumplir con las especificaciones. Es aquí en donde se debe de garantizar que el diseño será lo suficientemente rígido para soportar la carga, donde se verifique que las funciones destinadas se van a llegar a cumplir. En caso de que el diseño falle en la fase de análisis, se debe de volver a la fase de síntesis para modificarlo hasta obtener los resultados deseados en esta fase.

Durante esta fase del proceso se puede hacer uso de herramientas computacionales para simular situaciones a las que será sometido el diseño final y tener una idea de si el diseño cumple con las especificaciones o si se tiene que hacer algún cambio. Así mismo, se puede construir un prototipo del diseño para realizar pruebas.

La fase de optimización es donde el diseño se mejora. El objetivo de esta fase es buscar la manera de que el diseño cumpla con el objetivo de la mejor manera posible. También es en esta fase en donde el aspecto económico entra en juego. Se debe de crear el mejor diseño, pero a la vez, se debe de mantener dentro del presupuesto del proyecto.

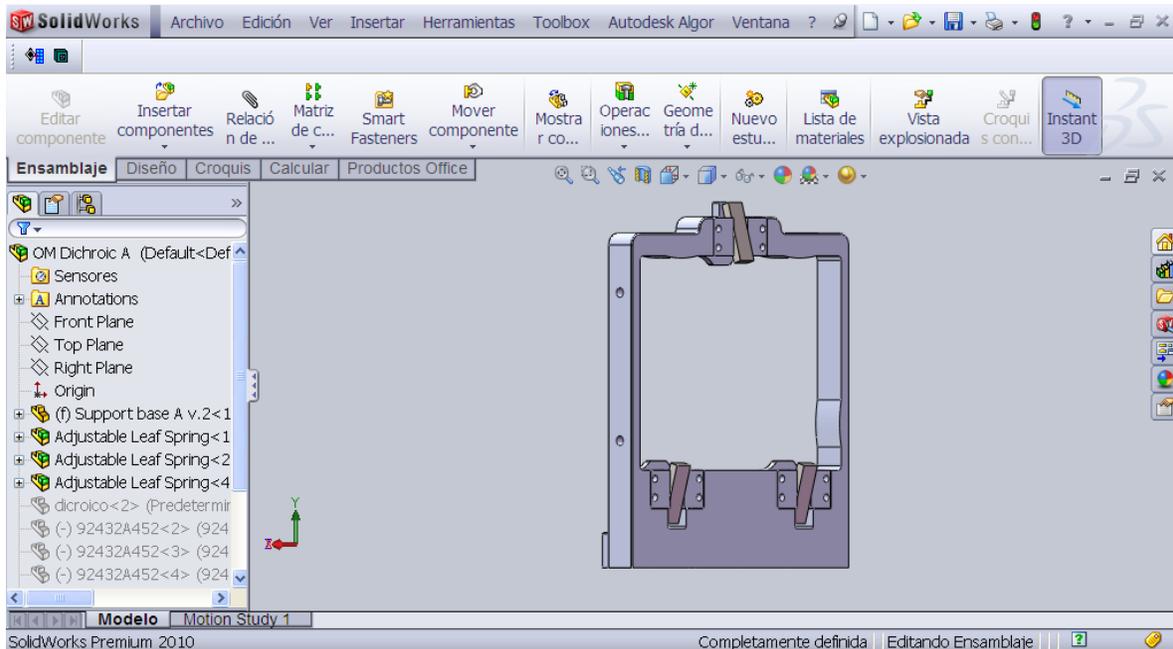
Por último, durante la fase de la evaluación se lleva a cabo la identificación de si el diseño resuelve o no el problema. Es en esta fase cuando se evalúa si se cumplen todos los requerimientos planteados al principio del proceso. Estas evaluaciones se realizan con pruebas en el laboratorio, una vez que se haya construido un modelo con las características finales del diseño.

Cabe mencionar que el riesgo de un mal funcionamiento del diseño disminuye utilizando las herramientas computacionales de hoy día. Esto lleva ventajas ya que el costo del diseño disminuye considerablemente y puede disminuir el tiempo de su desarrollo.

### **2.1.2 Herramientas para el diseño**

A lo largo de la historia el proceso de diseño mecánico ha ido evolucionando. Se ha buscado la manera de facilitar cada vez más este proceso para que los diseñadores mecánicos dediquen más tiempo a la labor creativa y para garantizar un mejor diseño y desempeño del mismo.

Se ha aprovechado recientemente el aumento en procesamiento de las computadoras para facilitar el trabajo del diseño mecánico. Actualmente existen diversas herramientas computacionales que facilitan el proceso. Estas herramientas computacionales se utilizan en cada fase del proceso, desde el diseño hasta la evaluación, teniendo diversas ventajas: el proceso de diseño puede realizarse en menor tiempo, se puede estudiar el comportamiento de un diseño antes de su fabricación para asegurarse de que cumpla con sus objetivos así como reducir el costo del proceso.



**Figura 2-1: Modelo creado en SolidWorks.**

El software de Diseño Asistido por Computadora (CAD) tiene como objetivo asistir a los ingenieros en la creación, modificación, análisis y despliegue de resultados [6]. El CAD utiliza la capacidad de procesamiento de las computadoras para poder cumplir con su objetivo.

Solid Works<sup>®</sup> es un ejemplo de software CAD. En este programa se pueden realizar diseños de piezas y ensamblajes, así como la creación de planos para manufactura e instrucciones para el ensamble del producto final (Figura 2-1).

Dentro del software CAD, el diseñador puede realizar diversas propuestas de diseño sin tener que manufacturar las piezas para posteriormente analizar cada propuesta y seleccionar la que cumpla con todos los requisitos de diseño. Al no tener que construir las diferentes propuestas y poder analizar y mejorar el diseño final antes de su construcción, se obtiene un ahorro significativo en cuestión de presupuesto.

Existen diferentes representaciones de objetos dentro de las herramientas CAD: Modelado por alambre, modelado de superficie y modelado de sólidos. El modelado de alambre despliega el esqueleto de un objeto en tres dimensiones. Consiste solamente de puntos y líneas que conforman el modelo. El modelado de superficie define, además del borde del objeto tridimensional, sus superficies. Por último, el modelado de sólidos define el borde del objeto y su superficie y además también define la masa y el volumen del objeto. Con cada una de estas representaciones, se puede tener un modelo tridimensional del diseño para facilitar la visualización y análisis del mismo previo a su construcción.

Una vez realizado del diseño final en el software CAD se requiere pasar a la fase de evaluación para comprobar el buen funcionamiento del diseño y el cumplimiento de todos los requerimientos. Previamente se debía de construir un prototipo del diseño para realizar las

pruebas de la fase de evaluación. Actualmente existen herramientas computacionales que permiten realizar análisis previos a la construcción del producto. Aún con el uso de estas herramientas, existen casos en los que aun es recomendable realizar los prototipos.

ALGOR<sup>®</sup> es un software de simulación que provee una amplia variedad de herramientas de simulaciones mecánicas para ayudar a los diseñadores e ingenieros a tomar decisiones en etapas tempranas del proceso de diseño<sup>2</sup>. Este software permite realizar análisis de deformaciones, dinámica lineal, simulación de eventos dinámicos y dinámica de fluidos (Figura 2-2).

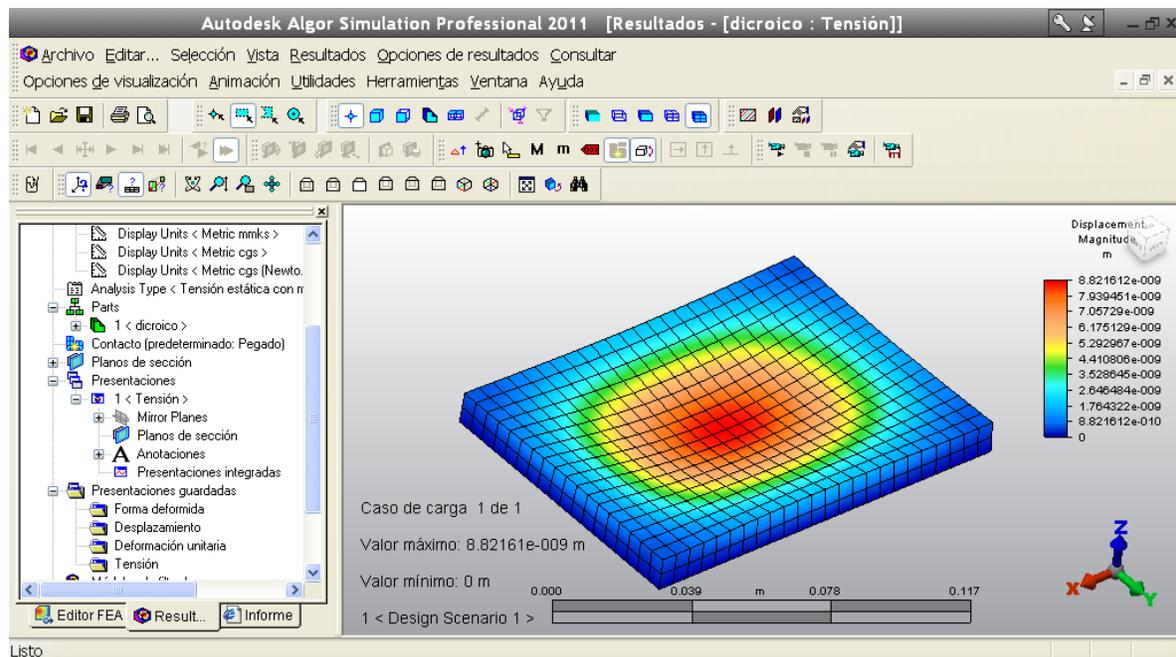


Figura 2-2: Ejemplo de análisis en ALGOR<sup>®</sup>

Este software nos brinda la opción de introducir las características de los materiales utilizados en el diseño, como lo son su densidad y su coeficiente de dilatación térmica. Una vez seleccionados los materiales que se utilizarán, se procede a asignar las condiciones de frontera y las fuerzas que actúan sobre el diseño para posteriormente, utilizando el método de los elementos finitos, realizar simulaciones para obtener el comportamiento del diseño bajo las fuerzas que actúan sobre él.

Cabe mencionar que utilizando este tipo de software de análisis, en especial los de Elemento Finito, es la única manera, en sistemas complejos, en la que se puede realizar este análisis debido a que se necesita una gran capacidad de procesamiento que solamente pueden brindar las computadoras [7].

### 2.1.3 Materiales

Una de las decisiones más importantes durante el diseño mecánico es la selección de los materiales que se van a utilizar para construirlo. La selección de los mejores materiales garantizará

<sup>2</sup> [www.algor.com](http://www.algor.com)

un buen desempeño del nuevo diseño. Esta selección depende de las temperaturas a las que trabajará el diseño, de las fuerzas que actúen sobre él, el tiempo estimado de su uso y del presupuesto que se tenga [8].

La mecánica de materiales es la rama de la ingeniería mecánica que se encarga de estudiar las propiedades y características de los materiales [9]. Algunas características que se deben de considerar al seleccionar los materiales para un nuevo diseño son: la fuerza, la dureza, la rigidez, la densidad, la conductividad térmica, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión. También se deben de considerar algunas características como lo son el esfuerzo y la deformación.

La fuerza de un material es la habilidad que tiene dicho material de soportar la aplicación de un esfuerzo sin sufrir algún tipo de ruptura o falla. La dureza de un material se define como la cantidad de energía que éste puede absorber antes de romperse. La densidad del material es la masa por unidad de volumen y está relacionada con el peso y las dimensiones que el material tendrá. Una propiedad muy importante es la conductividad térmica del material, ya que, dependiendo del diseño, se puede requerir de un total aislamiento del calor.

### **2.1.3.1 Esfuerzo**

La resistencia de un material depende de varios factores: de la carga que se le aplique, de la fuerza interna del material y del área transversal del mismo. La fuerza aplicada por unidad de área se conoce como esfuerzo  $\sigma = \frac{F}{A}$  (2-1).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2-1)$$

La fuerza puede actuar hacia afuera del material, convirtiéndose en una fuerza de tensión, o puede actuar directamente sobre el material, convirtiéndose en una fuerza de compresión. Este tipo de esfuerzo se denomina esfuerzo normal.

El esfuerzo cortante se obtiene cuando dos fuerzas transversales actúan sobre un elemento. Al llegar al valor máximo de esfuerzo cortante, el material se rompe.

Se deben de conocer los valores máximos del esfuerzo que puede soportar el material seleccionado sin romperse y realizar verificación de cálculos para comprobar que el material que se eligió es el adecuado para el diseño.

El factor de seguridad es una relación entre la carga o el esfuerzo máximo que se le aplicará al material y la carga o el esfuerzo permitido  $F.S. = \frac{\text{carga máxima aplicada}}{\text{carga permitida}}$

(2-2).

$$F.S. = \frac{\text{carga máxima aplicada}}{\text{carga permitida}} \quad (2-2)$$

Con el factor de seguridad se puede comprobar que el material va a soportar la fuerza aplicada sin sufrir rupturas ni daños.

### 2.1.3.2 Deformación

La deformación normal es la deformación que sufre el material después de aplicarle una carga en forma normal; la deformación que sufre el material por unidad de longitud está dada por la siguiente ecuación

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2-3)$$

donde  $\delta$  es el cambio en la deformación y  $L$  es la longitud original del material.

### 2.1.3.3 Ley de Hooke

El comportamiento que describe un material sobre su deformación cuando se le aplica un esfuerzo es característico de diferentes tipos de materiales. Para ciertos valores de esfuerzos y deformaciones obtenidas, el comportamiento de los materiales es lineal, significando que el esfuerzo  $\sigma$  es directamente proporcional a la deformación  $\varepsilon$ . Esta relación se conoce como Ley de Hooke y su ecuación matemática está dada por

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2-4)$$

donde  $E$  se conoce como módulo de Young o módulo de elasticidad. Es una medida de la dureza que presenta un material.

### 2.1.3.4 Relación de Poisson

Es la relación que existe entre deformación lateral que sufre un material al aplicarle una carga y la deformación axial que sufre. La relación de Poisson está dada por

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad (2-5)$$

## 2.2 Optomecánica

La optomecánica es la rama de la ingeniería que se encarga del diseño y creación de elementos y soportes mecánicos para sistemas ópticos. En la instrumentación astronómica el correcto diseño de estos elementos es de suma importancia para garantizar la calidad de las imágenes que se desean obtener [10].

### 2.2.1 Proceso del diseño optomecánico

El diseño optomecánico se apega al proceso de diseño mecánico clásico, con la diferencia que los diseños generados serán para sostener elementos ópticos. La primera fase en el diseño optomecánico es el reconocimiento de la necesidad de un dispositivo para llevar a cabo un

propósito específico [10]. Se deben de definir los requerimientos de alto nivel, las especificaciones y los subsistemas que se requerirán, así como los componentes ópticos que se utilizarán en el instrumento. El diseño óptico del instrumento es un comienzo para este proceso.

Una vez definido el propósito del instrumento y los subsistemas que se requerirán para lograr su objetivo, se deben de establecer las especificaciones para el buen funcionamiento del instrumento y las limitaciones que existirán en el diseño.

Las especificaciones van a definir el rendimiento del instrumento y será la escala que se utilizará para determinar si el instrumento tiene un buen funcionamiento o no. Las limitaciones del diseño definen las características físicas del diseño como lo son el peso, las dimensiones, consumo de energía, etcétera. Estas características se deben de tener en cuenta para que el diseño final sea adecuado. Al tratarse de instrumentos astronómicos de precisión, las especificaciones y las limitaciones son muy rígidas, haciendo que el diseño optomecánico sea más exigente y desafiante. Es importante que dentro de las especificaciones se describan las tolerancias máximas que pueden tener los diferentes componentes.

Algunas especificaciones que se deberán tomar en cuenta son: la resolución del instrumento, distancia focal, campo de visión, tamaño y posición de las pupilas, requerimientos de transmisión espectrales, limitaciones de peso, forma y tamaño, características del sensor a utilizar, condiciones de operación del instrumento, etcétera. También se debe de tener en cuenta la manera en que estas especificaciones se traducen a especificaciones mecánicas.

Es importante mencionar que durante el proceso de diseño optomecánico se requiere el trabajo conjunto de diseñadores ópticos y mecánicos, ingenieros ópticos, ingenieros mecánicos y astrónomos.

Una vez que se tienen definidas las especificaciones y limitaciones del instrumento, se procede a la fase de diseño y el modelado por computadora. Ya que se tienen varias propuestas de diseño, se deben de analizar cada una para comprobar que cumplen con las especificaciones. Para esto se puede utilizar la técnica del Análisis por el Método de los Elementos Finitos.

Aun cuando las simulaciones que se puedan realizar por computadora pueden entregar resultados muy cercanos al comportamiento real del diseño, lo mejor que se puede hacer es construir un prototipo y realizarle pruebas en el laboratorio. Puede ser que el prototipo a construir sea más pequeño que el diseño final, siempre y cuando mantenga las mismas características físicas.

Una vez terminado el diseño y comprobado que cumple con las especificaciones, se procede a realizar los planos de manufactura. Con estos planos de manufactura, y también con los archivos de las piezas del diseño, se pueden manufacturar las piezas y llevar a la realidad el diseño optomecánico.

La manufactura del diseño comprende desde la adquisición de materiales, el manejo de los materiales, la manufactura en sí, la inspección de las piezas terminadas, el ensamblaje y el control

de calidad. Para poder cumplir con las especificaciones, se requieren métodos de manufactura especiales como lo es el control numérico (CNC).

### **2.2.2 Influencias ambientales**

En las especificaciones del instrumento se deben de tener en cuenta las características ambientales que existen en el lugar donde funcionará el instrumento. Algunos parámetros ambientales a tener en consideración son: la temperatura de operación, la humedad que exista en el lugar, la corrosión a la que se verá expuesto el instrumento, la contaminación que exista en el lugar, la abrasión y erosión que pueda sufrir.

Es importante tener en cuenta la temperatura de operación, ya que en casos como los observatorios terrestres, estarán expuestos a altas temperaturas en el día y a bajas temperaturas en la noche, mismas que estarán presentes durante el tiempo de utilización del instrumento. Si no se tiene en cuenta este factor, los componentes ópticos no sólo no darán las especificaciones requeridas sino que pueden sufrir un shock térmico, llevando incluso al rompimiento de los mismos. Los soportes optomecánicos que contendrán a los elementos ópticos, deben de diseñarse de ciertos materiales para evitar que se expandan de más (dejando suelto al componente óptico) o se contraiga de más (generando fracturas y rompimiento).

La humedad presente en un instrumento astronómico puede llevar al deterioro de los componentes ópticos así como a la oxidación de los componentes mecánicos. Por eso es importante tener en cuenta este factor y no exponer el instrumento a humedades altas y aislarlo de ésta lo más que se pueda y evitar la condensación en las superficies ópticas.

### **2.2.3 Características de materiales optomecánicos**

Existen diferentes tipos de materiales que se utilizan en diseños optomecánicos. Los materiales que conforman la óptica y los materiales que conforman los componentes mecánicos son los más importantes.

En cuanto a los componentes ópticos, la característica más importante es que transmita y difracte la luz en las longitudes de onda que se requieren. Estos valores deben de estar presentes en la especificación del instrumento.

Para los componentes mecánicos, varios materiales se pueden utilizar como lo son aluminio, berilio, cobre, invar (aleación de hierro y níquel), magnesio, acero, titanio, entre otros.

El aluminio casi nunca se utiliza en su forma pura, se utilizan ciertas aleaciones. Este material es ligero y fuerte y es de bajo costo y su maquinado es sencillo. El problema que existe con el aluminio es que sufre de oxidación por lo que se debe de proteger con algún tipo de cubierta química o anodización.

En cuanto a sus aleaciones, la más común es la 6061, está compuesta de 0.6% silicio, 0.25% de cobre, 1.0% de magnesio y 0.2% de cromo.

## 2.3 Análisis de placas delgadas

Las placas [11-12] son componentes estructurales rectos y planos en dos dimensiones en los cuales una dimensión,  $h$  que es el ancho, es mucho menor que las otras dos. Dependiendo de la aplicación que vayan a tener estas placas, pueden sostenerse de diferentes maneras. Estas maneras de sujeción, al momento de analizar matemáticamente el comportamiento de las placas, se conocen como condiciones de frontera.

Las placas pueden tener diferentes condiciones de frontera: libres, simplemente apoyadas y fijas. También, las cargas que se le aplican a la placa, se pueden aplicar de manera perpendicular a la superficie de la placa. Teniendo las dimensiones de las placas, sus condiciones de frontera y la carga aplicada, se puede resolver la ecuación diferencial para obtener la deformación que sufre la placa.

El estudio de las placas delgadas es importante ya que se utilizan en diversas áreas de la ingeniería, desde la ingeniería civil hasta la mecánica. Un ejemplo del uso de las placas delgadas es su utilización en la construcción de barcos y en las industrias aeroespaciales.

El principal objetivo en el análisis estructural de cualquier componente es asegurar que la estructura, las placas, tendrán un factor de seguridad adecuado y evitarán llegar a fallar. Una característica importante en el diseño funcional de una placa es mantener la deformación de la misma dentro del rango tolerable por las especificaciones.

El análisis de placas delgadas se basa en la aplicación de las ecuaciones de la teoría de la elasticidad. Soluciones exactas para diferentes ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento de las placas, solamente se pueden obtener para ciertas condiciones de frontera y ciertas cargas de fuerza. Para realizar este análisis, además del método analítico, también se pueden utilizar métodos numéricos, como el Análisis por Elemento Finito para poder obtener soluciones al comportamiento de las placas delgadas.

### 2.3.1 Contexto histórico

El estudio del comportamiento de las placas delgadas ha recorrido un largo camino en la historia. El primer acercamiento matemático fue formulado por Euler en 1766. Resolvió los problemas de vibraciones para membranas elásticas. Bernoulli continuó con el trabajo de Euler y extendió el concepto a las placas, para describir su comportamiento.

Aún después de que varios científicos trabajaron en el problema del estudio de placas delgadas, L. Navier fue el primero que desarrolló ecuaciones diferenciales para placas que están expuestas a cargas laterales. Navier también introdujo un método que transforma las ecuaciones diferenciales de la placa en ecuaciones algebraicas. Este método se basa en series trigonométricas que introdujo Fourier.

Uno de los científicos más importantes en el desarrollo de la teoría de placas delgadas fue Gustav R. Kirchhoff. Él desarrolló la primera teoría completa de la deformación de placas delgadas.

### 2.3.2 Propiedades de las placas delgadas

La aplicación de la teoría de placas delgadas de Kirchhoff entrega resultados lo suficientemente precisos sin la necesidad de realizar un estudio tridimensional. Para poder utilizar esta teoría, se requieren las siguientes suposiciones:

- El material del cual está hecho la placa es homogéneo y linealmente elástico (está sujeto a un comportamiento descrito por la Ley de Hooke).
- La placa está inicialmente recta, sin deformación.
- La superficie media permanece inalterable durante la deformación.
- El ancho de la placa es constante y es lo suficientemente pequeño en comparación con las otras dimensiones de la placa. Esto quiere decir, que el lado más corto de la placa debe de ser al menos diez veces mayor que el ancho.
- Las deformaciones generadas son menores comparadas al ancho de la placa.

Al cumplirse estas suposiciones, se puede utilizar la teoría de placas delgadas para analizar la placa en cuestión. El problema tridimensional de la placa se convierte en un problema de dos dimensiones [11], lo cual facilita su análisis.

### 2.3.3 Ecuación para la deformación de placas y sus condiciones de frontera

La ecuación diferencial que gobierna la deformación de las placas es

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{P}{D} \quad (2-6)$$

donde  $w$  es la deformación,  $P$  es la carga que se le aplica a la placa y  $D$  representa la flexión o la rigidez a la flexión de la placa y está dada por

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2-7)$$

donde  $E$  es el módulo de Young,  $h$  es el espesor de la placa y  $\nu$  es el coeficiente de Poisson.

(2-6) es una ecuación de cuarto orden, no homogénea con coeficientes constantes. Se conoce también como una ecuación no homogénea biarmónica. El problema de deformación de placas se considera resuelto si se encuentra una expresión que satisfaga (2-6) y las condiciones de frontera.

Debido a que (2-6) es de cuarto orden, se necesitan dos condiciones de frontera para cada borde de la placa. Dentro de las condiciones de frontera que se pueden tener, existen las condiciones fijas y libres.

Las condiciones de frontera libres suceden cuando los bordes de la placa no están sujetos a ninguna fuerza.

Las condiciones de frontera fijas existen cuando la deformación y el movimiento de los bordes es cero. Por lo tanto se tiene que,

$$\begin{aligned} \psi &= 0, \quad \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)_x = 0 \quad \text{en } x = 0, a \\ \psi &= 0, \quad \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)_y = 0 \quad \text{en } y = 0, b \end{aligned} \quad (2-8)$$

Para el problema presentado en este trabajo de tesis, se utilizó el método de Navier, de Levy y el trabajo de Nadai como soluciones para (2-6). En el Capítulo IV se presenta el método para obtener la solución de (2-6) utilizando las condiciones de frontera mostradas en (2-8).

## 2.4 Método de los Elementos Finitos

El método de los elementos finitos [13]-[15], es una técnica numérica cuyo objetivo es obtener soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales dividiendo la geometría en pequeñas secciones. Para ciertos conjuntos de la vida real, como lo son piezas o componentes mecánicos, no existe una solución analítica para determinar su comportamiento, debido a su geometría compleja. En estos casos es cuando el elemento finito se puede utilizar para tener una solución aproximada del comportamiento de estos componentes.

El método de los elementos finitos se compone de tres características:

1. El dominio complejo de la geometría a estudiar se representa como una colección de subdominios más simples. Cada subdominio se conoce como elemento finito.
2. Sobre cada elemento finito, se obtienen las funciones de aproximación.
3. Se obtienen relaciones algebraicas entre las fronteras de los elementos finitos, llamadas nodos. Se obtienen resolviendo las ecuaciones diferenciales para cada elemento.

El primer paso en el método de los elementos finitos es discretizar el dominio. La discretización consiste en representar el dominio o la geometría a analizar como una colección de elementos finitos. Un elemento es cada subdominio individual en el que se ha discretizado la geometría, mientras que la colección de elementos se conoce como malla. Esta malla puede constar de elementos con simetrías idénticas, ya sean cubos, tetraedros u otra figura geométrica. A la intersección de cada elemento finito se le conoce como nodo. Son a estos nodos a los que se les encontrará la solución de la ecuación.

Debido a que se tienen varios nodos a los que se les va a encontrar una solución de acuerdo a la ecuación utilizada, se obtienen ecuaciones matriciales. Dependiendo de la geometría del elemento a analizar, se tendrán diferente número de nodos y matrices con un número importante de elementos. Esto hace que resolver esta ecuación sea prácticamente imposible sin la ayuda de la computadora.

Los elementos finitos están sujetos a las condiciones de frontera. Es importante determinar correctamente las condiciones de frontera que existen sobre el dominio completo para tener resultados confiables.

Al ser un método aproximado, no se va a tener una solución idéntica a la solución exacta. Por lo tanto, la exactitud del método de los elementos finitos se refiere a la diferencia entre la solución exacta y la solución obtenida por medio de este método. Cabe mencionar, que entre el número de elementos que conforman la malla aumenta, la solución aproximada es más exacta.

## 2.5 Referencias

- [1]. **Ugural, Ansel C.** *Mechanical Design, An Integrated Approach*. New York : McGraw-Hill, 2004.
- [2]. **Childs, Peter.** *Mechanical Design*. s.l. : Elsevier Ltd., 2004.
- [3]. **Dieter, George E.** *Engineering Design: A Materials and Processing Approach*. s.l. : McGraw-Hill, 1991.
- [4]. **Meheus, Joke and Nickles, Thomas.** *Models of Discovery and Creativity*. New York : Springer, 2009.
- [5]. **Budynas-Nisbett.** *Shigley's Mechanical Engineering Design*. s.l. : McGraw-Hill, 2006.
- [6]. **Kutz, Myer.** *Mechanical Engineers' Handbook: Materials and Mechanical Design*. Hoboken : John Wiley & Sons, 2006.
- [7]. **Farah, Alejandro.** *Diseño y Fabricación Optomecánicos en la Instrumentación Astronómica: OSIRIS*. Mexico : s.n., 2008.
- [8]. **Charles, J. A., Crane, F. A. and Furness, J. A.** *Selection and Use of Engineering Materials*. s.l. : Butterworth Heinemann, 2001.
- [9]. **Beer, P. Ferdinand and Johnston, E. Russell.** *Mechanics of Materials*. s.l. : McGraw Hill, 2009.
- [10]. **Yoder, Paul R.** *Opto-Mechanical Systems Design*. Boca Raton : SPIE Press, 2006.
- [11]. **Szilard, Rudolph.** *Theories and Applications of Plate Analysis*. s.l. : John Wiley & Sons, 2004.
- [12]. **Timoshenko, S. and Woinowsky-Krieger, S.** *Theory of Plates and Shells*. s.l. : McGraw-Hill, 1959.
- [13]. **Becker, Eric B., Carey, Graham F. and Oden, J. Tinsley.** *Finite Elements An Introduction*. New Jersey : Prentice Hall, 1981.
- [14]. **Ciarlet, P. G. and Lions, J. L.** *Handbook of Numerical Analysis: Finite Element Methods*. Amsterdam : Elsevier, 1991.
- [15]. **Reddy, J. N.** *An Introduction To The Finite Element Method*. s.l. : McGraw-Hill, 1993.

[16]. **Charles, J.A.** Part 2: Selection for Mechanical Properties. *Selection and Use of Engineering Materials*. Great Britain : Butterworth-Heinemann, 1997.

### **3 Propuesta de diseño**

En este capítulo se presenta el problema a solucionar con el soporte optomecánico del dicroico para RATIR. Se presentan diferentes opciones para sostener el dicroico, las cuales se tomarán en cuenta al momento de realizar las propuestas de la base del dicroico, que se presentan posteriormente. Así mismo, se mencionan y describen las piezas que forman parte del soporte, así como los materiales propuestos para su construcción. Por último, se presenta la forma en cómo el soporte se debe de integrar con el instrumento RATIR.

#### **3.1 Definición del problema**

El instrumento RATIR va a observar los remanentes de los destellos de rayos gamma, GRB, en seis colores simultáneos (ópticos y cercanos al infrarrojo). Para poder estudiar estas GRB la luz necesita ser separada utilizando dicroicos, esto con el objetivo de tener luz infrarroja y luz óptica capturada cada una en diferentes detectores.

Se van a utilizar tres dicroicos para filtrar la luz y obtener los seis colores diferentes. Estos dicroicos van a estar sujetos por soportes optomecánicos, los cuales deben cumplir con ciertas características para que la imagen captada sea de muy buena calidad. Así mismo, los soportes deben de cumplir con otras características físicas para poder adecuarse al instrumento.

Se debe diseñar un soporte optomecánico que minimice la deformación y el esfuerzo generado sobre el dicroico; a la vez, debe de mantener al dicroico fijo en su lugar sin importar la inclinación que tenga el telescopio. También debe de alinearse en el camino óptico sin causar interferencia. En cuanto a cuestiones físicas, se debe de optimizar el peso y el tamaño del soporte para cumplir con las especificaciones requeridas por el instrumento. Por último, el funcionamiento del soporte debe de comprobarse en laboratorio para garantizar que la deformación y el esfuerzo que se genere sobre el dicroico sean mínimos y asegurarse que mantendrá al dicroico fijo en su posición [1].

Se pretenden generar diferentes propuestas de soporte para el dicróico. Cada propuesta de soporte debe de mantener fijo al dicróico y debe de generar la menor deformación posible sobre él, manteniendo esta deformación dentro del rango permitido. La mejor propuesta del soporte será aquella que cumpla con los siguientes requisitos: mantener la deformación dentro del rango permitido, introducir el menor esfuerzo al dicroico y que su manufactura sea lo más sencilla posible.

#### **3.2 Análisis del problema**

Para el análisis de las diferentes propuestas del soporte se utilizarán dos técnicas: el análisis clásico de placas delgadas y el método del elemento finito. Con estas técnicas se busca medir la

deformación sufrida por el dicróico cuando esté montado en el soporte. Una vez obtenido este resultado se pueden descartar propuestas de soporte y seleccionar la que mejor cumpla con el objetivo.

El diseño se va a evaluar en el laboratorio mediante pruebas ópticas sobre el dicróico para obtener la deformación real que sufre una vez montado en el soporte. Esta evaluación se realiza para comprobar los cálculos hechos con el análisis de placas delgadas y con el método del elemento finito.

### 3.3 Justificación del problema

El diseño del soporte de dicróico de RATIR debe garantizar la posición del dicróico en todo momento así como minimizar la deformación que se genera sobre éste manteniendo sus dimensiones y peso dentro de los límites establecidos. Así mismo, se necesita comprobar que el diseño realizado va a cumplir con las especificaciones.

Este proyecto de tesis presenta varias propuestas de diseño que buscan cumplir con las especificaciones. Se utilizó como base el diseño propuesto en [1]. También se presenta el análisis por el método de los elementos finitos y por el método de análisis de placas delgadas. Se presentan pruebas de laboratorio realizadas utilizando la prueba de la fotoelasticidad. Con estos diseños y estos análisis y pruebas de puede demostrar que al menos una de las propuestas de diseño cumple con los requerimientos.

### 3.4 Dimensiones y características del dicroico

El diseño de RATIR necesita que el dicroico tenga una longitud de 120 mm, un ancho de 90 mm y un espesor de 10 mm (Figura 3-1) [2].

El soporte debe diseñarse para poder sostener el dicroico con estas dimensiones.

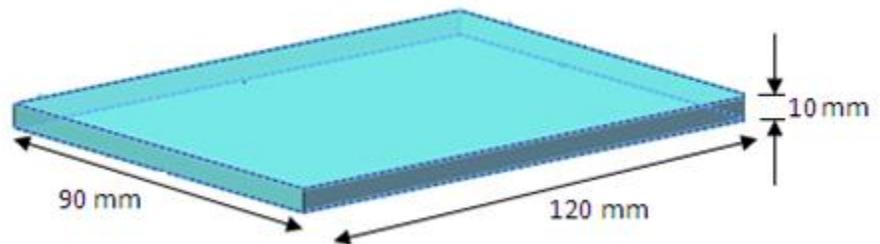


Figura 3-1: Dimensiones del Dicroico

De acuerdo al Reporte de Diseño de RATIR [3], los dicroicos tendrán un ángulo de operación de 45° mientras que trabajarán a una temperatura de 5°C.

### 3.5 Piezas que conforman el soporte

#### 3.5.1 Base del soporte

La base del soporte es la pieza principal del mismo, ya que en es en esta pieza en donde descansará el

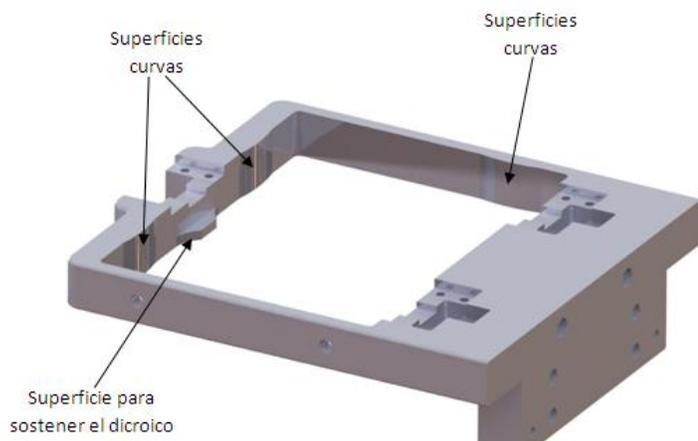


Figura 3-2: Superficies de contacto del soporte

dicroico. El dicroico debe ser sostenido por sus seis caras; la base proveerá soporte a la cara inferior y a dos caras laterales del dicroico. El soporte para las caras laterales del dicroico consiste de tres superficies curvas. Estas superficies mantendrán fijo el dicroico actuando como un tope (Figura 3-2).

Para mantener fijo el dicroico de manera lateral, y para ajustar su posición en el soporte, se utilizarán tornillos ajustables, los cuales se describirán más adelante.

### 3.5.1.1 Opciones para sostener el dicroico

La parte más importante de la base del soporte es la manera de sostener el dicroico en sus caras inferior y superior.

El primer enfoque que se dio para sostener la superficie inferior del dicroico fue sostenerlo por medio de sus aristas. Este enfoque se dio ya que el dicroico es recubierto con una película delgada (de dimensiones moleculares) para lograr que tenga sus propiedades ópticas, y al generar un contacto con la superficie, esta capa sufriría deformaciones. Esto lleva a la modificación de las propiedades del dicroico, cambiando las longitudes de onda que se reflejan y se transmiten. Generando el contacto sobre la arista inferior del dicroico se evita el contacto sobre la superficie, manteniendo las propiedades del dicroico (Figura 3-3). El soporte contará con tres superficies similares, la que se observa en (Figura 3-3) y dos más que se localizarán en la cara opuesta del soporte.

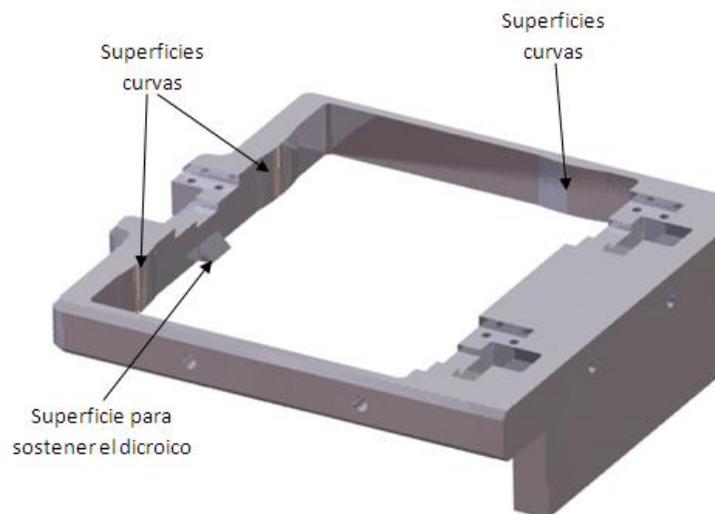


Figura 3-3: Superficie para sostener el dicroico por la arista de su superficie inferior.

Posteriormente se trabajó en un segundo enfoque, ya que al contactar al fabricante del dicroico se proporcionó la información de que al fabricar el dicroico se puede poner una máscara en sus superficies para que en ciertas áreas esté libre de la capa atómica haciendo que se pueda tener contacto directo sobre las superficies sin deformar la capa y sin modificar sus propiedades.

Con este enfoque, se propuso la superficie que se observa en (Figura 3-2) la cual en lugar de estar en contacto con la arista del dicroico, está en contacto directamente con la superficie.

Una vez hechas estas propuestas para sostener la base del dicroico, se procedió a diseñar el soporte completo y proponer diferentes configuraciones para sostener el dicroico.

### 3.5.1.2 Propuestas para la base del soporte

Se realizaron seis diferentes propuestas para la base del soporte del dicroico. Las seis propuestas contienen las superficies curvas mencionadas previamente así como las dos superficies (o modificaciones basadas en estas superficies) para sostener el dicroico en su superficie o arista inferior.

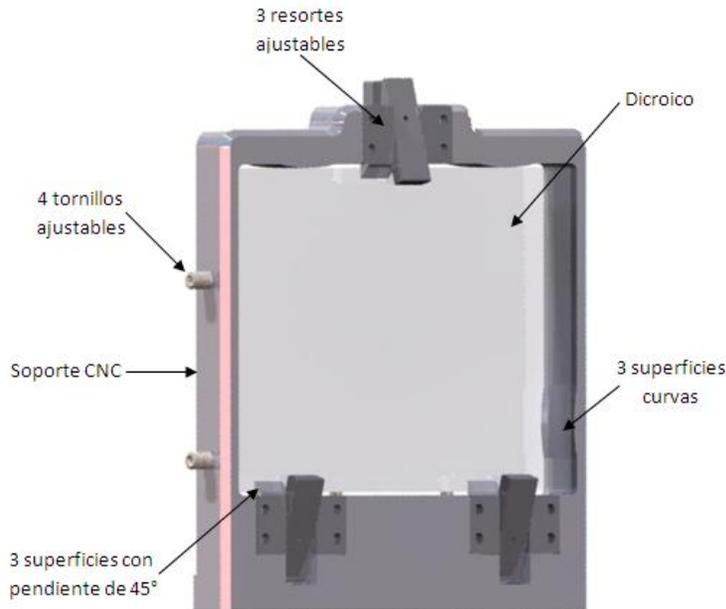


Figura 3-4: Propuesta I de la base del dicroico.

#### 3.5.1.2.1 Propuesta I

En este diseño se tienen tres superficies en la parte inferior del soporte con 45° de inclinación para sostener el dicroico mediante sus aristas inferiores (Figura 3-4).

La cara anterior del dicroico se va a detener utilizando dos superficies curvas, mientras que una de las superficies laterales se va a detener utilizando una superficie curva. Las otras dos superficies laterales se van a detener y ajustar a su posición utilizando tornillos de ajuste.

La superficie superior del dicroico se va a sostener utilizando tres resortes que estarán en contacto con las aristas del dicroico. Los resortes se localizan justamente sobre las superficies que detienen al dicroico en su superficie inferior.

Las ventajas que presenta esta propuesta es que el dicroico va a estar sostenido de la misma manera en ambas superficies superior e inferior, por lo que éste tendrá la misma deformación en ambas direcciones. También la manufactura de esta pieza no cuenta con grandes dificultades para llevarse a cabo. Por último, al detener el dicroico por sus aristas no se tiene que modificar el proceso de fabricación del mismo.

#### 3.5.1.2.2 Propuesta II

Para la segunda propuesta, se modificó la manera de sostener la cara inferior del dicroico. En esta propuesta, la cara inferior está en contacto directo con tres superficies de la base (Figura 3-5). Se mantienen tres superficies de este tipo: dos en la parte posterior y una en la parte anterior.

Las superficies curvas se mantienen para sostener la cara anterior y una de las caras laterales.

También se mantienen en la misma posición los tornillos para ajustar y sostener las otras dos caras laterales del dicroico.

De la misma manera, los resortes para sostener la superficie superior se mantienen directamente por encima de las superficies que sostienen la superficie inferior.

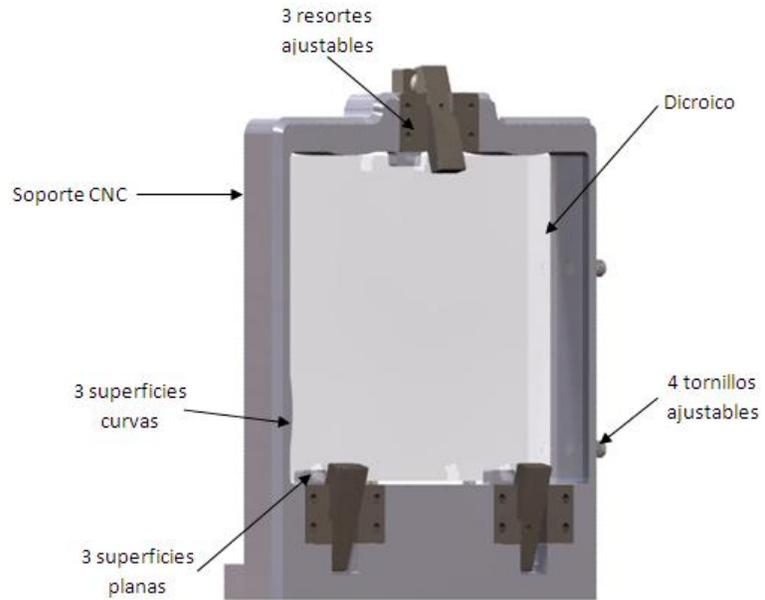


Figura 3-5: Propuesta II de la base del dicroico.

Esta propuesta es de manufactura sencilla, con la desventaja que se tendría que especificar el área en la cual se debe de colocar la máscara en la fabricación del dicroico para evitar que se deposite la capa atómica en las áreas que estarán en contacto directo con la base del soporte.

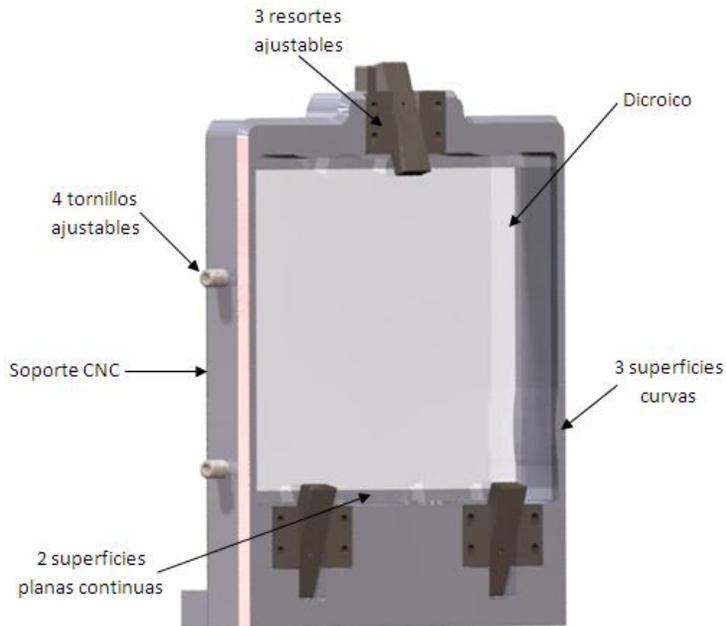


Figura 3-6: Propuesta III de la base del dicroico

### 3.5.1.2.3 Propuesta III

La tercera propuesta es una modificación de la Propuesta II. La modificación consiste en mantener la superficie de contacto de la base a lo largo de todo el ancho del dicroico (Figura 3-6).

Esta propuesta tendría que modificar las especificaciones para la fabricación del dicroico para modificar la máscara que se tendría que utilizar para evitar que la capa atómica se deposite a lo largo de toda el área que estaría en contacto con la base.

Una desventaja que aparecería con esta propuesta es que la deformación del dicroico no sería uniforme en ambas direcciones ya que las condiciones para sostenerlo son diferentes en la superficie inferior que en la superior.

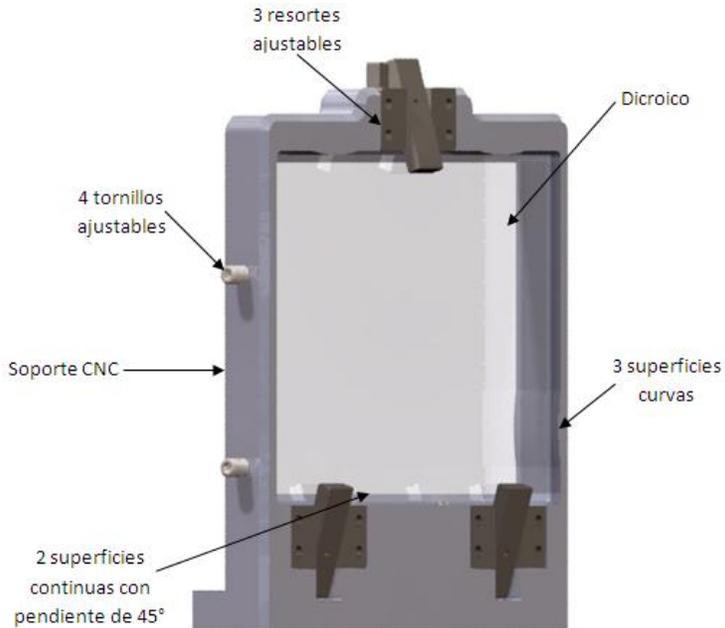


Figura 3-7: Propuesta IV de la base del dicroico

#### 3.5.1.2.4 Propuesta IV

Esta propuesta se basa en la propuesta III, con la diferencia de que la superficie que hace contacto con el dicroico tendría una inclinación de 45° para tener el contacto en la arista del dicroico (Figura 3-7).

La desventaja de este diseño es la dificultad que aparece al tratar de manufacturar el área que se encuentra debajo de las superficies curvas.

También la deformación del dicroico sería completamente diferente en ambas direcciones.

#### 3.5.1.2.5 Propuesta V

En esta propuesta se invirtió la posición de las superficies de contacto con la superficie inferior del dicroico. También se modificaron las posiciones de las superficies curvas, ubicándolas en la superficie de enfrente, con respecto a su ubicación en la Propuesta I. Por último, se modificó la posición de los tornillos de ajuste. En esta propuesta, se encuentran en la parte anterior del soporte, a los lados de la base donde se encuentra el resorte individual que sostiene la superficie superior del dicroico (Figura 3-8).

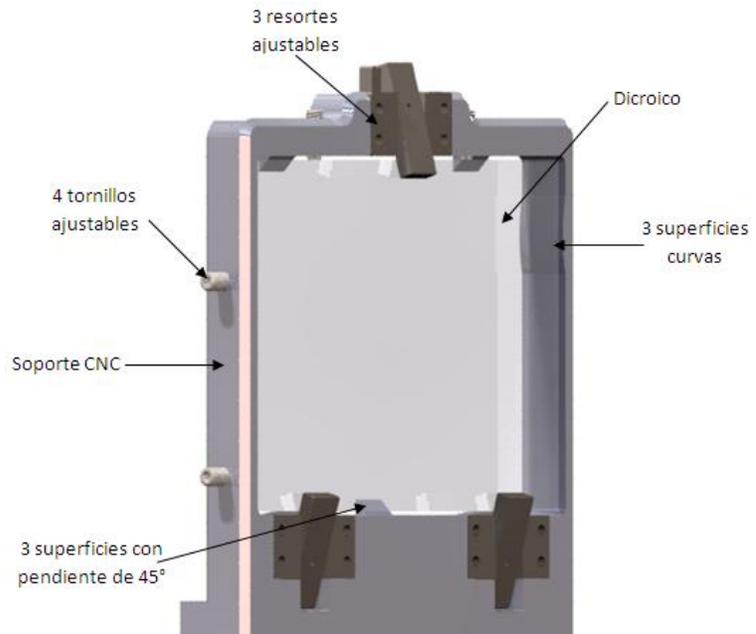


Figura 3-8: Propuesta V de la base del soporte.

Una desventaja de esta propuesta es la ubicación de los tornillos de ajuste. Al encontrarse en una posición muy cercana a la base del resorte, se complica su manufactura y además se complica el ajuste.

Al modificar la posición de las superficies de contacto, el contacto que sufre la superficie superior y la inferior ya no son iguales.

### 3.5.1.2.6 Propuesta VI

A diferencia de la propuesta V, esta propuesta mantiene las bases de contacto inferiores en la misma posición que la Propuesta I. La diferencia consiste en modificar la posición de los tres resortes que sostienen la superficie superior (Figura 3-9).

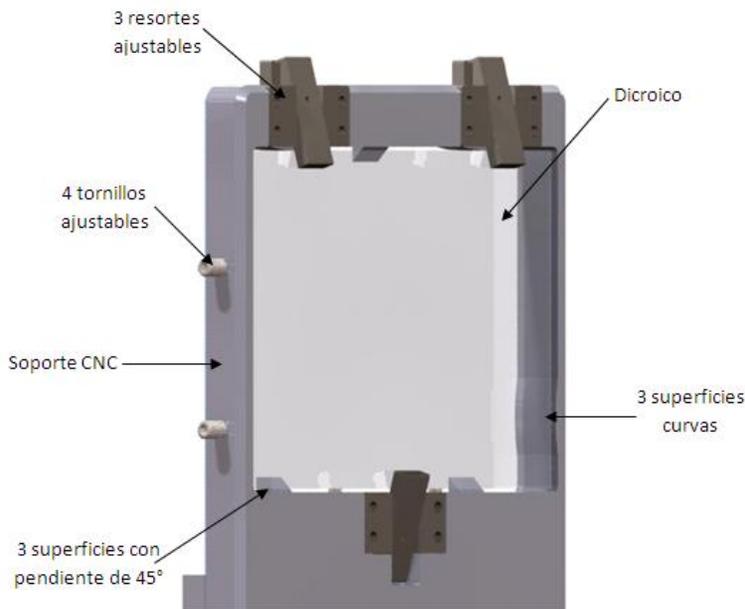


Figura 3-9: Propuesta VI de la base del soporte.

Esta modificación de posición facilita la manufactura de la pieza además de que utilizando las superficies curvas y los tornillos de ajuste, garantiza que el dicroico se mantendrá fijo en su lugar.

### 3.5.2 Resortes<sup>3</sup>

Los resortes ajustables tienen como propósito sostener al dicroico en su superficie superior. Están diseñados para sostenerlo haciendo contacto con las aristas superiores y así minimizar la generación de deformaciones sobre esa superficie.

Cada resorte va a contar con un tornillo<sup>4</sup> que tendrá la función de eje (Figura 3-10). El resorte girará sobre este eje para mantener al dicroico en su posición. Una vez ajustado el resorte en la posición adecuada, se le aplicará una fuerza en uno de sus extremos mediante un tornillo ajustable<sup>5</sup> (Figura 3-11). Este tornillo evitará que el resorte gire y deje libre al dicroico. La fuerza aplicada debe de ser suficiente para mantener al dicroico en su lugar y a la vez, debe generar los mínimos esfuerzos y deformaciones sobre el dicroico.

En todas las propuestas de la base del soporte se cuenta con tres resortes. Esta cantidad de resortes es suficiente para mantener el dicroico en su lugar. El resorte (Figura 3-12) estará montado en su base (Figura 3-13), la cual estará atornillada a la base del soporte. En la (Figura 3-14) se puede ver el sistema completo de resortes.

<sup>3</sup> En el Apéndice C se pueden consultar las dimensiones de los tornillos utilizados.

<sup>4</sup> Parte 99154a313 de catálogo de McMaster-Carr. [www.mcmaster.com](http://www.mcmaster.com)

<sup>5</sup> Parte 92765A157 de catálogo de McMaster-Carr. [www.mcmaster.com](http://www.mcmaster.com)



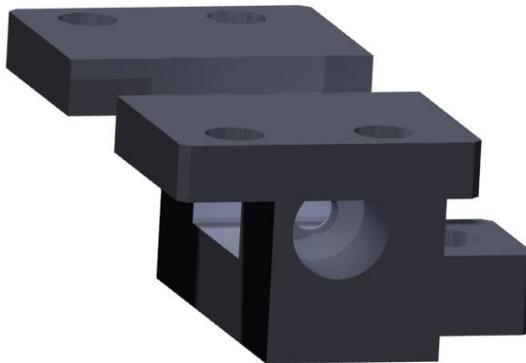
**Figura 3-10: Eje del resorte.**



**Figura 3-11: Tornillo que aplicará la fuerza al resorte.**



**Figura 3-12: Modelo del resorte.**



**Figura 3-13: Base del resorte.**

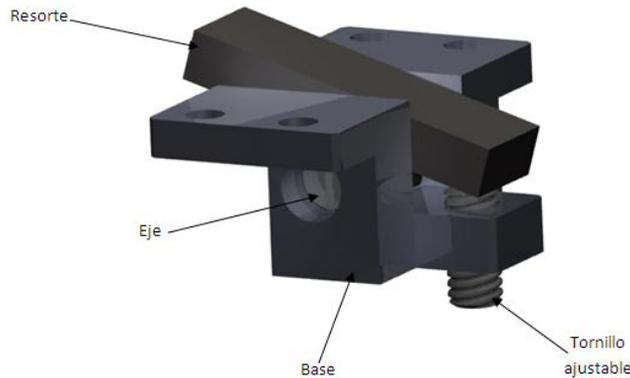


Figura 3-14: Sistema completo de resortes.

### 3.5.3 Tornillos de ajuste

El soporte cuenta con cuatro tornillos ajustables con punta de Nylon<sup>6</sup> (Figura 3-15). Estos tornillos se encontrarán posicionados en una cara lateral y en una cara posterior del dicroico.

Su función consiste en sostener a los dicroicos lateralmente para mantenerlo en su posición. También se utilizarán para garantizar la posición del dicroico y ajustarla una vez que se coloque el dicroico en su lugar. Estos tornillos deben de ser de un material suave para no dañar al dicroico. Otro propósito de estos tornillos es la absorción de vibraciones que éste pueda sufrir.



Figura 3-15: Tornillo ajustable.

### 3.6 Diseño completo

En la (Figura 3-16) se puede observar el modelo CAD del diseño completo. Se pueden apreciar los tres sistemas de resortes atornillados al soporte<sup>7</sup>. También se pueden apreciar dos de los cuatro tornillos de ajuste que sostendrán al dicroico en su lugar. Los otros dos tornillos de ajuste se encuentran posicionados en la parte posterior del soporte.

<sup>6</sup> Parte 92432A452 del catálogo de McMaster-Carr. [www.mcmaster.com](http://www.mcmaster.com)

<sup>7</sup> Los tornillos utilizados son el modelo 92360A248 del catálogo de McMaster-Carr. [www.mcmaster.com](http://www.mcmaster.com)

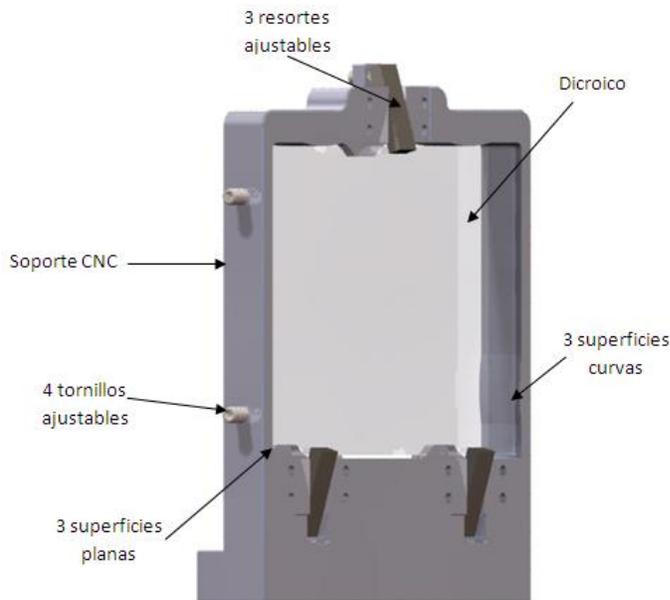


Figura 3-16: Diseño terminado del soporte.

El maquinado de la base del dicroico en esta configuración resulta más sencillo que en las otras configuraciones. Así mismo, se decidió utilizar superficies planas en contacto con la superficie inferior del dicroico ya que con los análisis por el método de los elementos finitos se corroboró que la deformación sufrida está dentro de los límites permitidos. Los sistemas de resortes se utilizaron en esa configuración y material ya que absorben de mejor manera la fuerza generada sobre el dicroico evitando así generar daño sobre el mismo.

La propuesta II de diseño fue la que se seleccionó como propuesta final. Este es el diseño que se maquinó y con el cual se realizaron las pruebas descritas en capítulos posteriores.

### 3.7 Materiales propuestos

La selección de materiales es un paso clave en el proceso de diseño debido a que es una decisión crucial que llevarán los cálculos y diseños hechos en computadora a un diseño real y en correcto funcionamiento [4]. Los materiales que se seleccionen deben de tener un conjunto de propiedades que sean adecuadas para el correcto funcionamiento del soporte del dicroico.

Principalmente las propiedades que se deben de estudiar y tener en cuenta para la selección de materiales son cuatro: la dureza, la rigidez, la maquinabilidad y la estabilidad dimensional (referida al Coeficiente de Expansión Térmica) [5].

Otra característica que se debe de tener en cuenta en el momento de seleccionar los materiales es el rango de temperatura en el cual trabajará el soporte. Es importante seleccionar un material adecuado ya que los materiales sufren una expansión al ser sometidos a una mayor temperatura y una contracción cuando la temperatura decrece. La deformación que sufre el material por grado de temperatura se conoce como *coeficiente de expansión térmica* [6]. La deformación sufrida por el soporte debe de ser mínima para garantizar la estabilidad del dicroico así como garantizar que el

|                                   |                       |
|-----------------------------------|-----------------------|
| <b>Densidad</b>                   | 2.2 g/cm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de elasticidad</b>      | 72 GPa                |
| <b>Módulo de Poisson</b>          | 0.17                  |
| <b>Coef. De expansión térmica</b> | 0.5                   |
| <b>Módulo de corte</b>            | 31 GPa                |

soporte no vaya a realizar una compresión considerable sobre el mismo.

Tabla 3-1: Propiedades mecánicas de la sílice fundida (7)

Los materiales propuestos junto con sus propiedades mecánicas se presentan a continuación.

### 3.7.1 Sílice fundida (Fused Silica Schott ML®Q)

Los dicróicos van a ser bloques de sílice fundida, los cuales van a ser tratados para darles sus propiedades de dicróicos. Este tratamiento consiste en el depósito de partículas que se realiza en vacío. La cantidad de capas depositadas y el ancho de cada una determinan las longitudes de onda que serán reflejadas y las que serán transmitidas<sup>8</sup>.

|                                   |                       |
|-----------------------------------|-----------------------|
| <b>Densidad</b>                   | 2.7 g/cm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de elasticidad</b>      | 68.9 GPa              |
| <b>Módulo de Poisson</b>          | 0.33                  |
| <b>Coef. De expansión térmica</b> | 23.6 μ                |
| <b>Módulo de corte</b>            | 26 GPa                |

Tabla 3-2: Propiedades mecánicas del aluminio 6061-T6

### 3.7.2 Aluminio 6061-T6

Este material tiene una amplia variedad de aplicaciones desde piezas destinadas a la aviación hasta partes de bicicletas. Las características físicas que hacen al aluminio el metal más económico y atractivo para gran variedad de usos son su apariencia, su peso ligero, su fabricación, sus propiedades físicas y mecánicas y su resistencia a la corrosión [8].

El aluminio se utilizó para la construcción del soporte del dicróico y para las bases de los resortes.

|                                   |                        |
|-----------------------------------|------------------------|
| <b>Densidad</b>                   | 1.16 g/cm <sup>3</sup> |
| <b>Módulo de elasticidad</b>      | 2.76 GPa               |
| <b>Módulo de Poisson</b>          | 0.34                   |
| <b>Coef. De expansión térmica</b> | 90 μ                   |
| <b>Módulo de corte</b>            | 970 MPa                |

Tabla 3-3: Propiedades mecánicas del nylamid [9]

### 3.7.3 Nylamid

El Nylamid es un tipo de polímero el cual se puede utilizar para la creación de engranes, poleas, ruedas dentadas y piezas personalizadas. Tiene un balance ideal entre fuerza y resistencia al mismo tiempo que tiene buenas propiedades mecánicas y eléctricas(10).

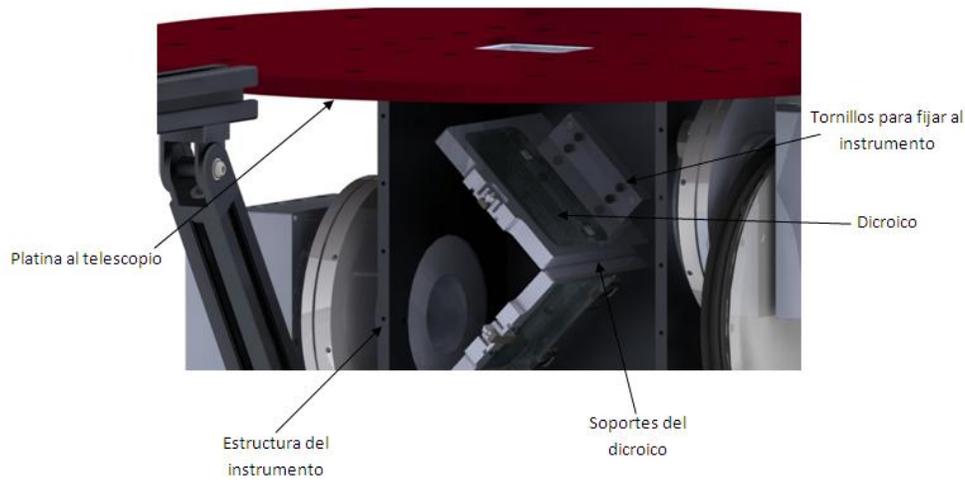
El Nylamid se utilizó para la construcción de los resortes ajustables. Se utilizó el nylamid debido a que absorbe la fuerza de contacto en un grado mayor que el aluminio, además de que debido a su composición evita causar daño sobre el dicróico al momento de entrar en contacto con el.

## 3.8 Integración con el instrumento RATIR

La parte posterior del soporte optomecánico se utilizará para integrar y posicionar el soporte en el instrumento RATIR (Figura 3-17). Con los tornillos a utilizar se garantiza que el soporte va a permanecer fijo en su lugar.

<sup>8</sup> Diferentes compañías realizan este proceso, siendo Reynard Corporation ([http://www.reynardcorp.com/coating\\_dichroic\\_filters.php](http://www.reynardcorp.com/coating_dichroic_filters.php)) una de ellas.

Los soportes se fijarán en una de las paredes del instrumento, permitiendo a los dicroicos estar en el camino óptico.



**Figura 3-17: Integración del soporte con el instrumento**

Así mismo, se colocarán de manera adecuada para que un dicroico quede alineado con el sensor CCD para las bandas U-R, y el otro dicroico para que quede alineado con el grupo de lentes que enfocarán la luz para ingresar al criostato y también para quedar alineado con el sensor CCD que tendrá los filtros i.

### 3.9 Referencias

[1]. **Farah, Alejandro, et al.** *RATIR Mechanical design: Conceptual Analysis of the Dichroic Support*. 2009.

[2]. **J., González.** *RATIR Optical Design*.

[3]. **Butler, Nathaniel R., et al.** *RATIR Second Design Review Report*. 2010.

[4]. **Dieter, George E.** Chapter 6: Materials Selection. *Engineering Design: A Materials and Processing Approach*. United States of America : McGraw-Hill, 1991.

[5]. **Charles, J.A.** Part 2: Selection for Mechanical Properties. *Selection and Use of Engineering Materials*. Great Britain : Butterworth-Heinemann, 1997.

[6]. **Ashby, Michael F.** Chapter 3: Engineering Materials and Their Properties. *Materials Selection in Mechanical Design*. London : Elsevier, 2005.

[7]. **Lithotec, SCHOTT.** Schott Fused Silica: DUV/UV, VIS and IR applications. *Schott*. [Online] 2010. [Cited: Julio 13, 2010.]  
[http://www.us.schott.com/advanced\\_optics/english/download/schott\\_fused\\_silica\\_jan\\_2010\\_us.pdf](http://www.us.schott.com/advanced_optics/english/download/schott_fused_silica_jan_2010_us.pdf).

[8]. **Nunes, Rafael, Adams, J. H. and Ammons, Mitchell.** *ASM Metals Handbook Vol. 2. Properties and Selection.* s.l. : ASM International, 1992.

[9]. Quadrant Matweb. *Quadrant Product Search.* [Online] Quadrant, 2011. [Cited: 04 05, 2011.] <http://quadrant.matweb.com/SpecificMaterial.asp?bassnum=P1SM23>.

[10]. Nylatron GSM PA6. *Quadrant Plastics.* [Online] 2011. [Cited: 04 05, 2011.] <http://www.quadrantplastics.com/na-en/products/machinable-plastics/engineering-175-325-f/extruded-and-cast-nylons/nylatron-R-gsm-pa6.html>.

## 4 Verificación del dicroico e integración con su soporte optomecánico

### 4.1 Dicroico

Los dicroicos son los componentes ópticos que le permiten al instrumento trabajar simultáneamente en cuatro longitudes de onda. Debido a esta función, los dicroicos son de gran importancia para RATIR. Esta función es determinante para el buen funcionamiento del instrumento por lo que se debe de garantizar que este proceso se lleve a cabo de manera óptima. Para garantizar esto, se realizaron cálculos y simulaciones para determinar la deformación que sufrirá el dicroico en diferentes circunstancias. Se utilizó la Teoría de Placas Delgadas para realizar los cálculos matemáticos y también se modeló la deformación del dicroico utilizando el Método del Elemento Finito. Estos cálculos se presentan a continuación para las seis propuestas del soporte del dicroico.

#### 4.1.1 Deformación debido a su peso

##### 4.1.1.1 Análisis matemático

Para obtener la deformación del dicroico debido a su propio peso se utilizó la teoría clásica de placas delgadas o teoría de Kirchoff [1]. Esta teoría obtiene la ecuación diferencial que describe la deformación de placas delgadas. Se desarrolló a finales de 1800 por lo que esta ecuación y sus soluciones son conocidas. Se deben de establecer condiciones de frontera para poder resolver esta ecuación. Se han propuesto varias soluciones para esta ecuación, dependiendo de las condiciones de frontera que se tengan, de acuerdo a la naturaleza del problema que se quiera resolver.

La ecuación diferencial que describe la deformación de placas delgadas está dada por las ecuaciones (2-6) y (2-7), la cual se puede escribir como

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{P}{D} \quad (4-1)$$

donde  $P$  es la carga aplicada a la placa y  $D$  es la rigidez a la flexión de la placa, la cual está dada por

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (4-2)$$

donde  $E$  es el módulo de Young,  $h$  es el espesor de la placa y  $\nu$  es el radio de Poisson del material. Es en la rigidez a la flexión en donde se toma en cuenta el espesor de la placa. De este punto en adelante el problema se convierte en un problema en dos dimensiones.

Debido a sus dimensiones<sup>9</sup>, el dicroico se puede considerar como una placa delgada. Las condiciones de frontera utilizadas para obtener su deformación debido a su propio peso, se pueden establecer como fijas en todos los bordes, ya que no tendrán rotación ni traslación.

Las condiciones de frontera se pueden definir matemáticamente de la manera siguiente. Sean  $a$  y  $b$  el largo y el ancho de la placa, respectivamente. El desplazamiento  $w$  en todos los bordes será cero, esto es

$$w = 0 \Big|_{x=0,a} \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \Big|_{x=0,a} \quad w = 0 \Big|_{y=0,b} \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \Big|_{y=0,b} \quad (4-3)$$

Se utilizó el método de Navier<sup>10</sup> para resolver (4-1). Navier propuso como solución a la ecuación para  $W(x,y)$  y  $p(x,y)$  las series dobles de Fourier

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} w_{mn} \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{a} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{b} \quad (4-4)$$

$$p(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} p_{mn} \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{a} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{b} \quad (4-5)$$

Se puede observar que para  $x = 0, a$  y para  $y = 0, b$  el desplazamiento  $w(x,y)=0$ , cumpliéndose las condiciones de frontera.

Posteriormente, se necesita encontrar el valor de  $p_{mn}$  para  $p(x,y)$

$$\int_0^a \int_0^b p(x, y) \operatorname{sen} \frac{l\pi x}{a} \operatorname{sen} \frac{k\pi y}{b} dx dy = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} p_{mn} \int_0^a \int_0^b \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{a} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{b} \operatorname{sen} \frac{l\pi x}{a} \operatorname{sen} \frac{k\pi y}{b} dx dy \quad (4-6)$$

Cuando  $m = l$  y evaluando en las fronteras se obtiene:

$$\int_0^a \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{a} \operatorname{sen} \frac{l\pi x}{b} dx = \int_0^a \operatorname{sen}^2 \frac{m\pi x}{a} dx = \frac{x}{2} - \frac{1}{4 \frac{m}{a} \pi} \operatorname{sen} \frac{2m\pi x}{a} \Big|_0^a = \left[ \frac{a}{2} - 0 \right] - [0 - 0] = \frac{a}{2}$$

Lo mismo para  $\int_0^b \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{a} \operatorname{sen} \frac{k\pi y}{b} dy = \frac{b}{2}$  para  $n = k$

Sustituyendo en (4-6) para  $m = l$  y  $n = k$  se obtiene

<sup>9</sup> Las dimensiones del dicroico son 120x90x10 mm.

<sup>10</sup> Esta solución se presentó en 1820 a la Academia Francesa de las Ciencias.

$$P_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b p(x, y) \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{a} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{b} dx dy \quad (4-7)$$

Sustituyendo (4-4) en (4-1) se tiene

$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ w_{mn} \left[ \left( \frac{m\pi}{a} \right)^4 + 2 \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{b} \right)^4 \right] \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{a} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{b} \right\} = \frac{1}{D} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_{mn} \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{a} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{b}$$

$$\therefore \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ w_{mn} \left[ \left( \frac{m\pi}{a} \right)^4 + 2 \left( \frac{m\pi}{a} \right)^2 \left( \frac{n\pi}{b} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{b} \right)^4 \right] - \frac{P_{mn}}{D} \right\} = 0$$

$$w_{mn} \pi^4 \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 - \frac{P_{mn}}{D} = 0$$

donde

$$w_{mn} = \frac{1}{\pi^4 D} \frac{P_{mn}}{\left[ \left( \frac{m}{a} \right)^2 + \left( \frac{n}{b} \right)^2 \right]^2} \quad (4-8)$$

Sustituyendo (4-8) en (4-4) se obtiene el desplazamiento

$$w(x, y) = \frac{1}{\pi^4 D} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P_{mn}}{\left[ \left( \frac{m}{a} \right)^2 + \left( \frac{n}{b} \right)^2 \right]^2} \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{a} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{b} \quad (4-9)$$

La carga que se le aplicará al diroico es la gravedad la cual es constante sobre toda la superficie haciendo  $p(x,y)$  constante. Para obtener  $P_{mn}$  se resuelve (4-7) tomando en cuenta que  $p(x,y)$  es constante. Por lo tanto se tiene

$$P_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b p(x, y) \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{a} \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{b} dx dy = \frac{4p_o}{ab} \int_0^a \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{a} dx \int_0^b \operatorname{sen} \frac{n\pi y}{b} dy$$

$$\int_0^a \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{a} dx = \frac{a}{m\pi} \int_0^a \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{a} dx = -\frac{a}{m\pi} \cos \frac{m\pi x}{a} \Big|_0^a = -\frac{a}{m\pi} [\cos m\pi - \cos 0]$$

$$= -\frac{a}{m\pi} [-1 - 1] = \frac{2a}{m\pi}$$

Se sigue el mismo procedimiento para el término  $\int_0^b \text{sen} \frac{n\pi y}{b} dy$ .

Para valores impares de  $m$  se tiene  $\frac{2a}{m\pi}$ . Para valores impares de  $n$  se tiene  $\frac{2b}{n\pi}$ . Por lo tanto para  $p_{mn}$  se tiene

$$p_{mn} = \frac{4}{ab} \frac{2a}{m\pi} \frac{2b}{n\pi} = \frac{16p_0}{nm\pi^2}$$

Finalmente, sustituyendo en (4-9) se obtiene la ecuación completa del desplazamiento en cualquier punto de la placa.

$$w(x, y) = \frac{1}{\pi^4 D} \frac{16p_0}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen} \frac{m\pi x}{a} \text{sen} \frac{n\pi y}{b}}{mn \left[ \left( \frac{m}{a} \right)^2 + \left( \frac{n}{b} \right)^2 \right]^2} \quad (4-10)$$

Debido a la geometría del dicroico, se puede observar que la máxima deformación se dará justo en el centro del mismo, es decir en  $\frac{a}{2}$  y  $\frac{b}{2}$ . Por lo tanto, en (4-10) se tiene que

$$\text{sen} \frac{m\pi x}{a} \text{sen} \frac{n\pi y}{b} = 1 \text{ para valores impares de } m \text{ y } n.$$

Para obtener la fuerza ejercida sobre la placa, que en este caso es la fuerza de gravedad, se tiene

$$p_0 = g\zeta$$

en donde  $g = 9.81 \text{ m/s}$  y  $\zeta$  es la densidad de superficie del material, la cual tiene un valor de  $\zeta = \frac{m}{A} = 22 \text{ kg/m}^2$ .

Utilizando los valores específicos para el dicroico de RATIR<sup>11</sup> se obtiene la rigidez a la flexión del dicroico (4-2) y sustituyendo los valores en (4-10), se obtiene un máximo desplazamiento en el centro del dicroico de

$$w_{\max} = 15.64 \text{ nm}$$

<sup>11</sup> Ver sección 3.4

Este es el desplazamiento que sufre el dicroico en el centro debido a su propio peso.

Este modelo matemático se utilizó ya que se asemeja en gran medida al modelo real además de que otros modelos son más complejos y no reflejan las condiciones de frontera necesarias. Además, este modelo ha sido utilizado ampliamente y se ha verificado en múltiples ocasiones.

#### 4.1.1.2 Análisis por elemento finito (FEA)

Se realizó el análisis por elemento finito para obtener la deformación del dicroico debido a la gravedad. Se utilizó el software ALGOR<sup>12</sup> para realizar esta simulación. Las condiciones de frontera que se utilizaron fueron todas las orillas fijas. Se utilizó un mallado de 5 mm (Figura 4-1).

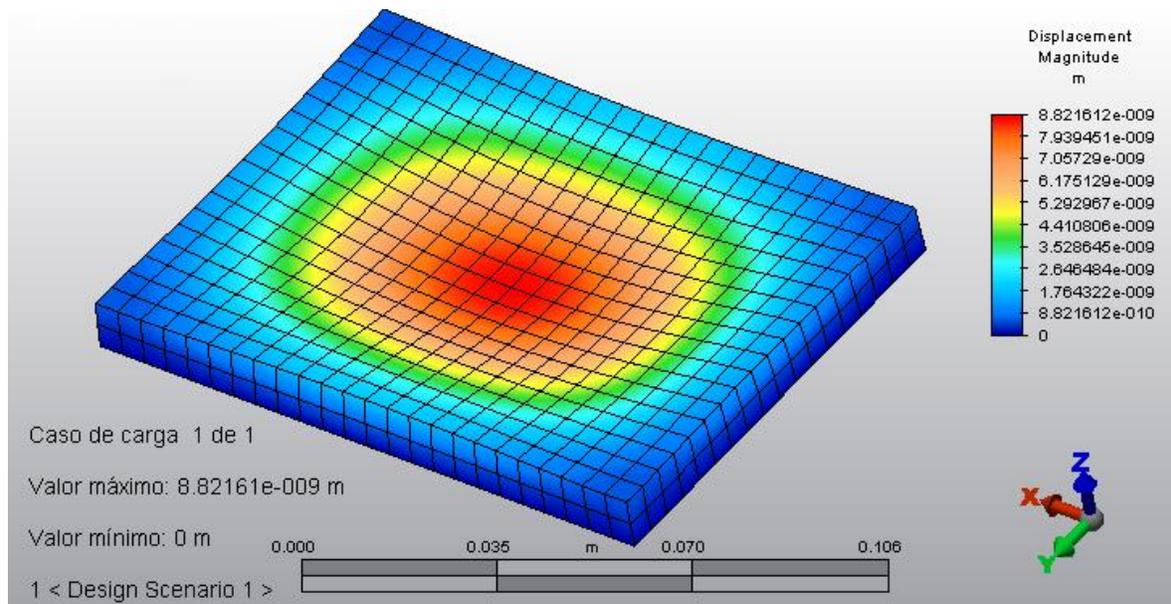


Figura 4-1: Análisis por Elemento Finito de la deformación del dicroico debido a su propio peso

Se puede observar que la máxima deformación ocurre en el centro del dicroico y tiene un valor de  $w_{\max} = 16.80\text{nm}$ .

Este resultado es 7.48% mayor que el resultado matemático, haciendo que este resultado concuerde adecuadamente con el resultado analítico.

## 4.2 Soporte

### 4.2.1 Fuerza necesaria para sostener el dicroico

El dicroico, al tener dimensiones de 120 x 90 x 10 mm y al tener una densidad de  $\rho = 2200\text{ kg/m}^3$ , cuenta con una masa de 0.2376 kg. Esta masa estará distribuida sobre tres resortes, por lo que cada soporte debe de sostener 79.2 gr.

<sup>12</sup>Para más información del software, visitar <http://www.algor.com/>.

Por la Segunda Ley de Newton, se obtiene la fuerza mínima necesaria que se requiere aplicar a estos tres resortes para sostener el dicroico. Esta fuerza está dada por

$$F = ma = 0.0792 \text{ kg} \left( 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 0.7769 \text{ N}$$

Este cálculo nos indica la fuerza mínima necesaria para sostener el dicroico. Los requerimientos del proyecto indican que se debe de tener un factor de seguridad de tres, por lo tanto se diseñó el sistema con una fuerza de 3 N aplicada en cada resorte. Con este diseño, cada resorte es capaz, por si mismo, de sostener al dicroico en su lugar.

#### 4.2.2 Modelo matemático de los resortes

Los tres resortes que van montados en la base del soporte se encargarán de detener el dicroico en el plano medio del soporte (Figura 4-2). Cada resorte ejercerá una fuerza determinada sobre las aristas del dicroico para mantenerlo fijo en su lugar. Esta fuerza debe de ser menor al esfuerzo cortante del dicroico para evitar que éste se rompa.

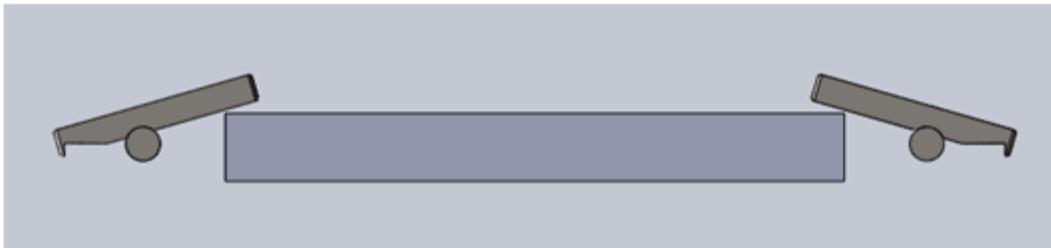
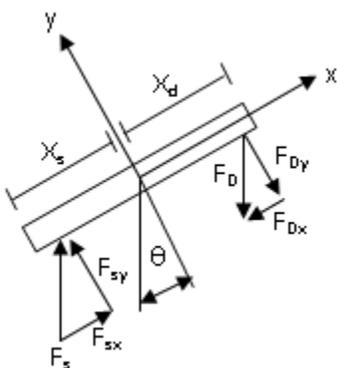


Figura 4-2: Sistema dicroico-resorte.

Para el modelo matemático del resorte, se tomaron las siguientes suposiciones:

1. La masa del resorte es despreciable.
2. Se desprecia la gravedad.
3. El resorte es rígido.



Del diagrama de cuerpo libre del resorte (Figura 4-3) es evidente que

$$\begin{aligned} F_{sy} &= F_s \cos\theta \\ F_{Dy} &= F_D \cos\theta \end{aligned} \quad (4-11)$$

Se realizan dos consideraciones para el análisis del resorte. La primera consideración es el uso de la Segunda Ley de Newton en condición de equilibrio:

Figura 4-3: Diagrama de cuerpo libre del resorte.

$$\begin{aligned}\sum F_x &= F_{sx} + F_{Dx} = 0 \\ \sum F_y &= F_{sy} + F_{Dy} = 0\end{aligned}\quad (4-12)$$

La segunda consideración es la suma de los momentos:

$$\sum M_z = F_{sy} X_s + F_{Dy} X_D = 0 \quad (4-13)$$

De (4-13) se obtiene la relación

$$\frac{X_D}{X_s} = -\frac{F_{sy}}{F_{Dy}} \quad (4-14)$$

Esta relación es la que se utiliza para diseñar el resorte y conocer la fuerza que se le tiene que aplicar para mantener al dicroico en su posición.

Sabiendo que al menos se necesita una fuerza de  $F_{Dy} = 0.7769 \text{ N}$ , se propone el tamaño del resorte de  $30 \text{ mm}$ , siendo  $X_s = 12 \text{ mm}$  y  $X_D = 18 \text{ mm}$ . Por lo tanto, utilizando

(4-14) se tiene que se debe de aplicar una fuerza al menos de  $F_{Sy} = 0.5179 \text{ N}$  para detener al dicroico en su lugar.

### 4.3 Deformación del dicroico montado en el soporte

#### 4.3.1 Análisis matemático

Para poder realizar el análisis matemático de la deformación que sufre el soporte utilizando las diferentes propuestas de diseño, se realizaron dos modelos matemáticos. El modelo matemático para dos bordes fijos se utilizó para las propuestas de diseño III y IV, mientras que el modelo matemático modificado se utilizó para las demás propuestas.

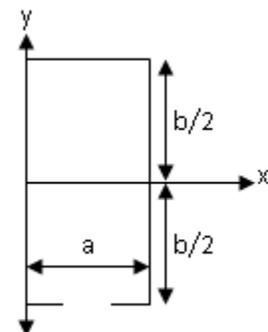
##### 4.3.1.1 Modelo matemático para dos bordes fijos

Para obtener la deformación de la placa con las condiciones de frontera de dos bordes opuestos fijos y los otros dos bordes libres, se utilizó el método de Levy<sup>13</sup> [1][2].

En este método, el cero de referencia se encuentra a la mitad de la placa (Figura 4-4).

Se tienen en cuenta las siguientes consideraciones en el método de Levy:

- Los ejes fijos están localizados en  $x = 0$  y  $x = a$ .
- La carga aplicada es uniforme a lo largo de toda la placa.



<sup>13</sup> En 1899, Lévy publicó su artículo *Sur l'équilibre élastique d'une plaque rectangulaire* en la revista de la Academia de las Ciencias de Francia.

- La deformación obtenida es simétrica en x.

Las ecuaciones de frontera son

$$\left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right)_{y=\frac{b}{2}} = 0 \quad D \left[ \frac{\partial^3 \omega}{\partial y^3} + \nu \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^2 \partial y} \right]_{y=\frac{b}{2}} = \left( EI \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} \right)_{y=\frac{b}{2}} \quad (4-15)$$

Figura 4-4: Ejes de referencia en el dicroico para el método de Levi.

La deformación de la placa con estas condiciones de frontera fue propuesta por Levi y está dada por

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 \quad (4-16)$$

Donde

$$\omega_1 = \frac{4qa^4}{\pi^5 D} \sum_{m=1,3,5,\dots} \frac{1}{m^5} \operatorname{sen} \left( \frac{m\pi x}{a} \right) \quad \omega_2 = \sum_{m=1,3,5,\dots} Y_m \operatorname{sen} \left( \frac{m\pi x}{a} \right) \quad (4-17)$$

El coeficiente  $Y_m$  fue propuesto por Nádai<sup>14</sup> como

$$Y_m = \frac{qa^4}{D} \left[ A_m \cosh \left( \frac{m\pi y}{a} \right) + B_m \frac{m\pi y}{a} \operatorname{senh} \left( \frac{m\pi y}{a} \right) + C_m \operatorname{senh} \left( \frac{m\pi y}{a} \right) + D_m \frac{m\pi y}{a} \cosh \left( \frac{m\pi y}{a} \right) \right] \quad (4-18)$$

Debido a la simetría de la deformación en x, los coeficientes  $C_m = D_m = 0$ . Utilizando las condiciones de frontera se obtienen los coeficientes  $A_m$  y  $B_m$  y se obtienen las ecuaciones

$$A_m \left[ -\nu \cosh \alpha_m + B_m \left[ \cosh \alpha_m + \nu \alpha_m \operatorname{senh} \alpha_m \right] \right] = \frac{4\nu}{m^5 \pi^5} \quad (4-19)$$

$$-A_m \left[ -\nu \alpha_m \operatorname{sinh} \alpha_m + m\pi \lambda \cosh \alpha_m \right] + B_m \left[ +\nu \operatorname{sinh} \alpha_m - \nu \alpha_m \cosh \alpha_m - m\pi \lambda \alpha_m \operatorname{sinh} \alpha_m \right] = \frac{4\lambda}{m^4 \pi^4} \quad (4-20)$$

siendo  $\alpha_m = \frac{m\pi b}{2a}$  y  $\lambda = \frac{EI}{aD}$ .

Resolviendo las ecuaciones

(4-19) y

(4-20)

$$A_m = \frac{4}{m^5 \pi^5} \frac{\nu \left[ +\nu \operatorname{sinh} \alpha_m - \nu \left[ -\nu \alpha_m \cosh \alpha_m - m\pi \lambda \cosh \alpha_m + \alpha_m \operatorname{sinh} \alpha_m \right] \right]}{\left[ +\nu \left[ -\nu \operatorname{sinh} \alpha_m \cosh \alpha_m - \left[ -\nu \alpha_m + 2m\pi \lambda \cosh^2 \alpha_m \right] \right] \right]} \quad (4-21)$$

<sup>14</sup> En 1915, Nádai publicó su artículo de placas delgadas *Die Formänderungen un die Spannungen von rechteckigen elastischen Platten*.

$$B_m = \frac{4}{m^5 \pi^5} \frac{v(-v) \sinh \alpha_m + m\pi\lambda \cosh \alpha_m}{(v+v)(-v) \sinh \alpha_m \cosh \alpha_m - (-v)^2 \alpha_m + 2m\pi\lambda \cosh^2 \alpha_m} \quad (4-22)$$

Finalmente para obtener la deformación del dicroico, y debido a que dos de sus bordes están fijos y dos están libres, se hace  $\lambda = 0$  en (4-21) y (4-22). Con los coeficientes  $A_m$  y  $B_m$  se obtiene el coeficiente  $Y_m$  de (4-18) y sustituyendo en (4-17) y en

(4-16) se obtiene la deformación en la placa

$$\omega = \frac{qa^4}{D} \sum \left( \frac{4}{\pi^5 m^5} + A_m \cosh \frac{m\pi y}{a} + B_m \frac{m\pi y}{a} \sinh \frac{m\pi y}{a} \right) \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (4-23)$$

Sustituyendo en (4-23) con las dimensiones y propiedades del dicroico, y sabiendo que el máximo desplazamiento se origina en la mitad de la placa, se obtiene un desplazamiento de

$$\omega = 29.54 \text{ nm}$$

#### 4.3.1.2 Modelo matemático modificado

Para calcular la deformación del dicroico tomando en cuenta su soporte, se necesitan modificar las condiciones de frontera del dicroico del modelo matemático anterior. En la (Figura 4-5) se muestra el dicroico con los puntos de soporte. En esta imagen se puede observar que las condiciones de frontera en este caso no son continuas a lo largo de todo el borde. Por lo tanto, la teoría de placas clásica no se puede utilizar directamente por lo que un modelo matemático para esta geometría no se puede obtener.

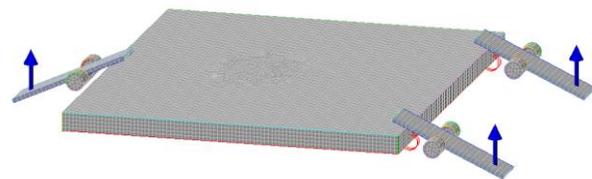
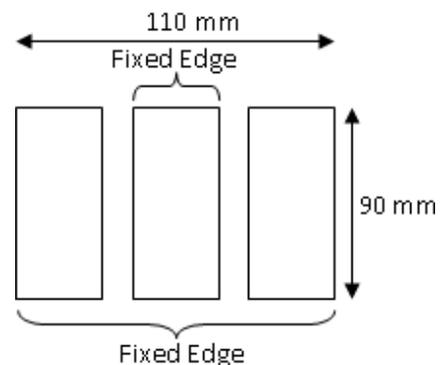


Figura 4-5: Representación del dicroico con sus puntos de soporte

Sin embargo, se pueden hacer ciertas consideraciones para poder utilizar la teoría de placas clásica:

1. El dicroico se divide en tres partes iguales, teniendo un ancho de 40 mm en cada placa.
2. El borde que está en contacto con los dos soportes se asume que está fijo a lo largo de toda su longitud.
3. En la placa de en medio, que resulta de dividir el dicroico en tres, el borde que está en contacto con el soporte está completamente fijo.



Ya que la deformación máxima del dicroico se presenta en el centro del mismo, solamente se toma en consideración la placa de en medio de la (Figura 4-6). Con esta consideración, el modelo de placa que se va a analizar será una placa con dos bordes opuestos fijos y los otros dos bordes libres.

**Figura 4-6: División del dicroico para cálculos analíticos.**

Utilizando (4-23), y obteniendo el valor de  $D$  utilizando (4-2) y utilizando un ancho  $b$  de 0.04 mm, se obtiene un desplazamiento en la mitad de la placa de

$$w = 30.24 \text{ nm}$$

Es importante mencionar que el valor de este desplazamiento obtenido es un valor aproximado ya que las condiciones de frontera utilizadas en el modelo matemático no son las condiciones de frontera reales en el dicroico.

### **4.3.2 Análisis por elemento finito (FEA)**

#### **4.3.2.1 Deformación para la Propuesta I**

Se realizó el análisis por elemento finito para obtener la deformación del dicroico debido a la gravedad una vez que éste está montado en su soporte. La simulación se realizó aplicando la gravedad en las direcciones +Z y -Z. Se utilizó el software ALGOR para realizar las simulaciones.

Las condiciones de frontera que se utilizaron fueron fijas en los nodos de los bordes del dicroico donde está en contacto con los resortes y con la base del soporte. Se utilizó un mallado de 5 mm.

En la (Figura 4-7) se puede observar el resultado obtenido del análisis aplicando la gravedad en dirección +Z. En la (Figura 4-8) se puede observar el resultado obtenido del análisis aplicando la gravedad en dirección -Z.

Se puede observar que la máxima deformación ocurre en las orillas del dicroico teniendo un valor de  $w_{\max} = 46.03 \text{ nm}$ . La deformación que sufre el dicroico en el centro es de  $w = 32.23 \text{ nm}$ .

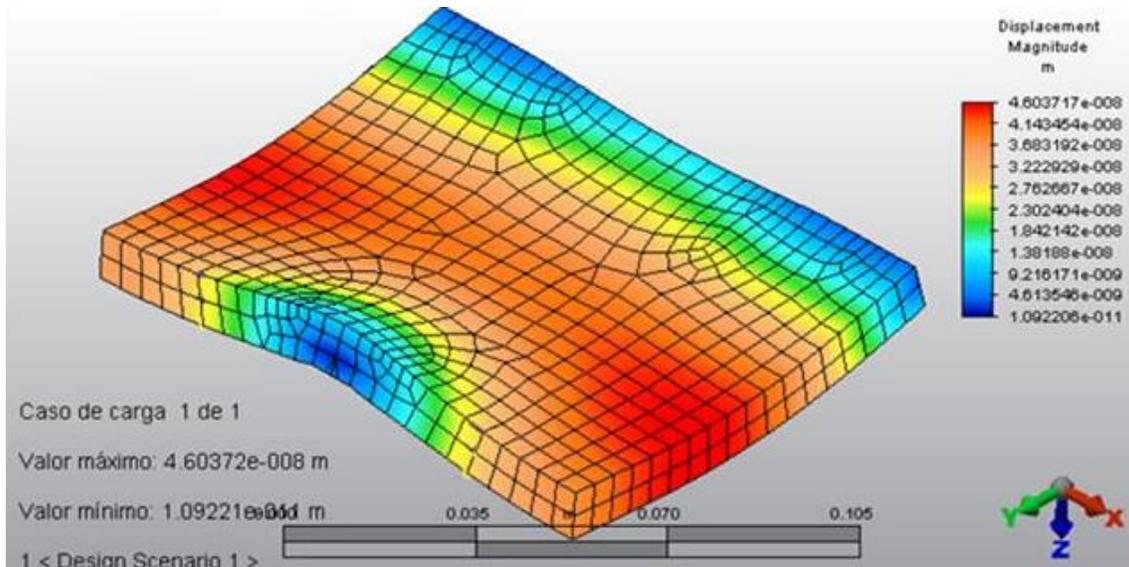


Figura 4-7: Resultados de la deformación el dicroico, utilizando la Propuesta I de diseño. Gravedad aplicada en dirección +Z.

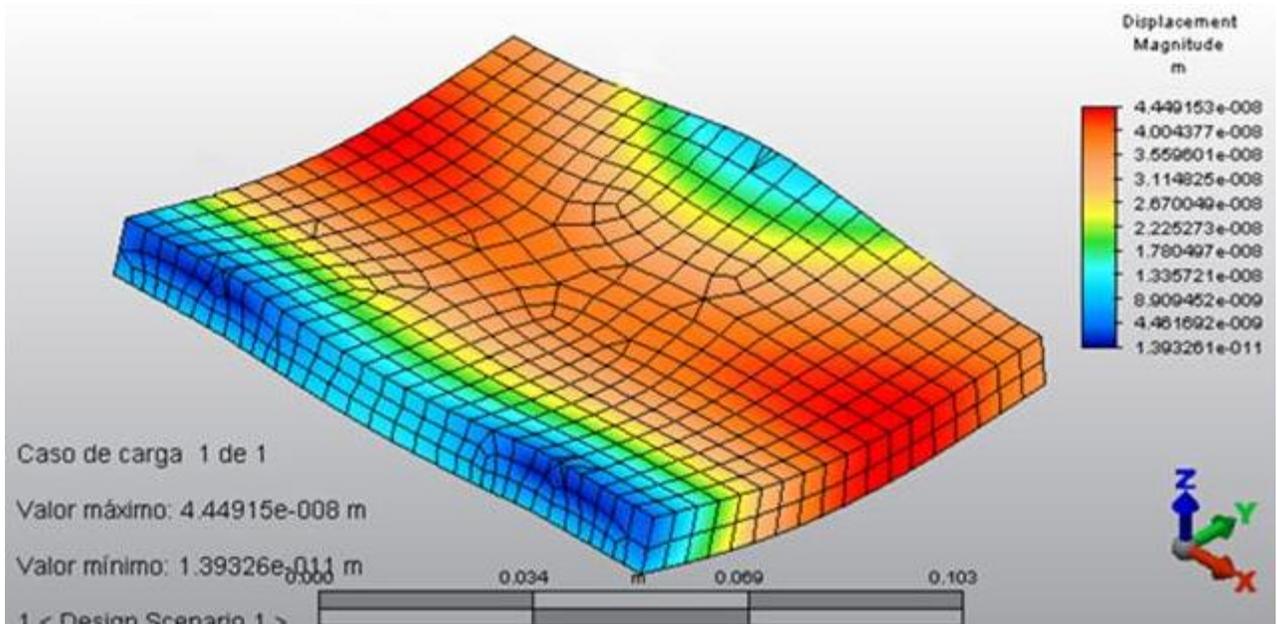


Figura 4-8: Resultados de la deformación el dicroico, utilizando la Propuesta I de diseño. Gravedad aplicada en dirección -Z.

#### 4.3.2.2 Deformación para la Propuesta II

Para el análisis por elemento finito de la propuesta II del soporte, se utilizaron las condiciones de frontera fijas en los nodos donde toca con el dicroico. Se utilizó un mallado de 5 mm.

En la (Figura 4-9) se puede ver el resultado de la deformación del dicroico aplicando la gravedad en dirección +Z. Se tiene una deformación máxima de  $w_{\max} = 34.17nm$ . La deformación máxima ocurre en los extremos del dicroico.

Se puede observar que la deformación en el centro del dicroico es de  $w = 27.77nm$ .

En la (Figura 4-10) se puede observar el resultado de la deformación del dicroico cuando se aplica la gravedad en dirección -Z. Se tiene un desplazamiento en el centro del dicroico de  $w = 34.32nm$

Se puede observar que el desplazamiento del dicroico mantiene la misma forma, pero los valores máximos son diferentes aplicando la gravedad en ambas direcciones.

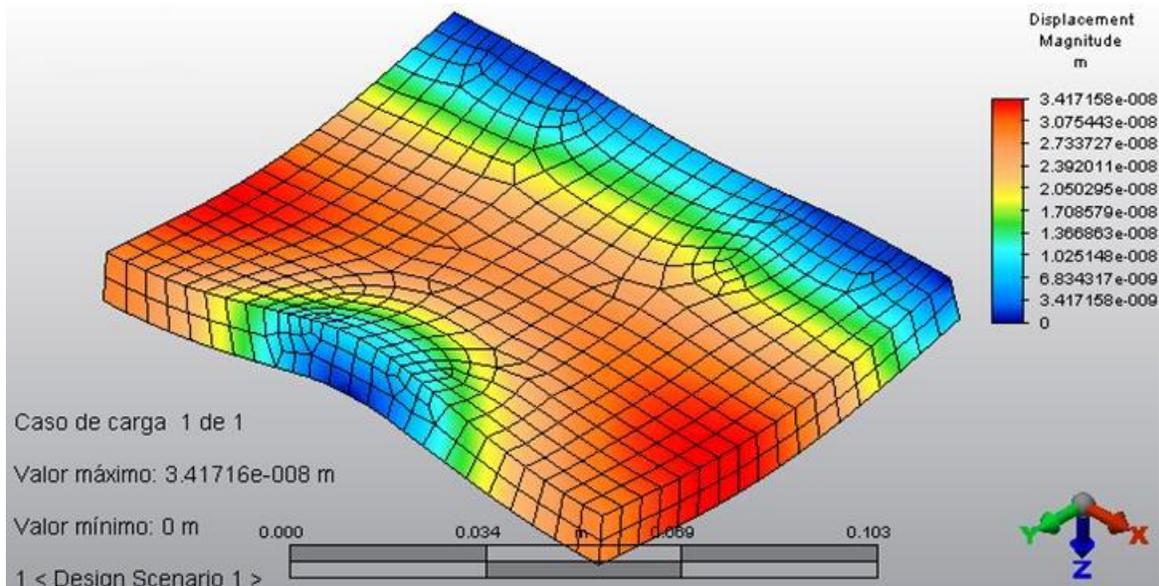


Figura 4-9: Resultados de la deformación el dicroico, utilizando la Propuesta II de diseño. Gravedad aplicada en dirección +Z.

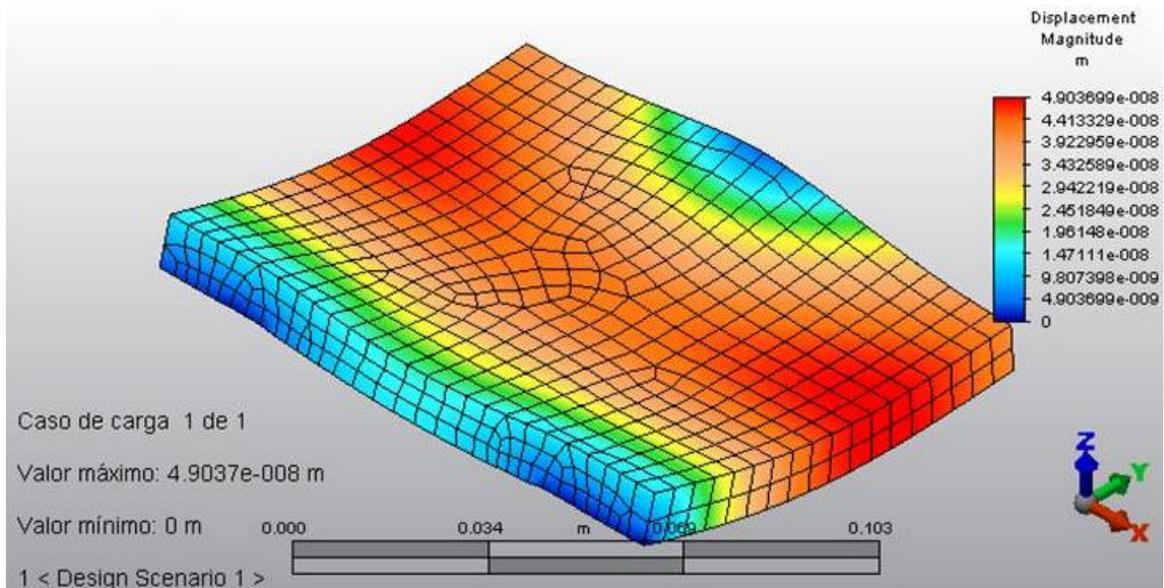


Figura 4-10: Resultados de la deformación el dicroico, utilizando la Propuesta II de diseño. Gravedad aplicada en dirección -Z.

#### 4.3.2.3 Deformación para la Propuesta III

Las condiciones de frontera utilizadas para el análisis de esta propuesta son: las aristas inferiores opuestas del dicroico, que están en contacto con la base, se encuentran fijas. Así mismo, los nodos que están en contacto con los bordes de la base se encuentran fijos.

En la (Figura 4-11) se puede observar el resultado de la deformación para esta propuesta, aplicando la gravedad en dirección +Z. Se observa que el dicroico se deforma de manera simétrica. Se puede observar que la deformación máxima se encuentra a lo largo del centro del dicroico y es de  $w_{\max} = 14.95 \text{ nm}$ .

En la (Figura 4-12) se puede observar el resultado de la simulación aplicando la gravedad en dirección -Z. La deformación que sufre el dicroico es diferente a la deformación que sufre aplicando la gravedad en la dirección opuesta. El valor de la deformación en el centro es de  $w = 28.65 \text{ nm}$  y se tiene un desplazamiento máximo en los extremos de  $w_{\max} = 34.74 \text{ nm}$ .

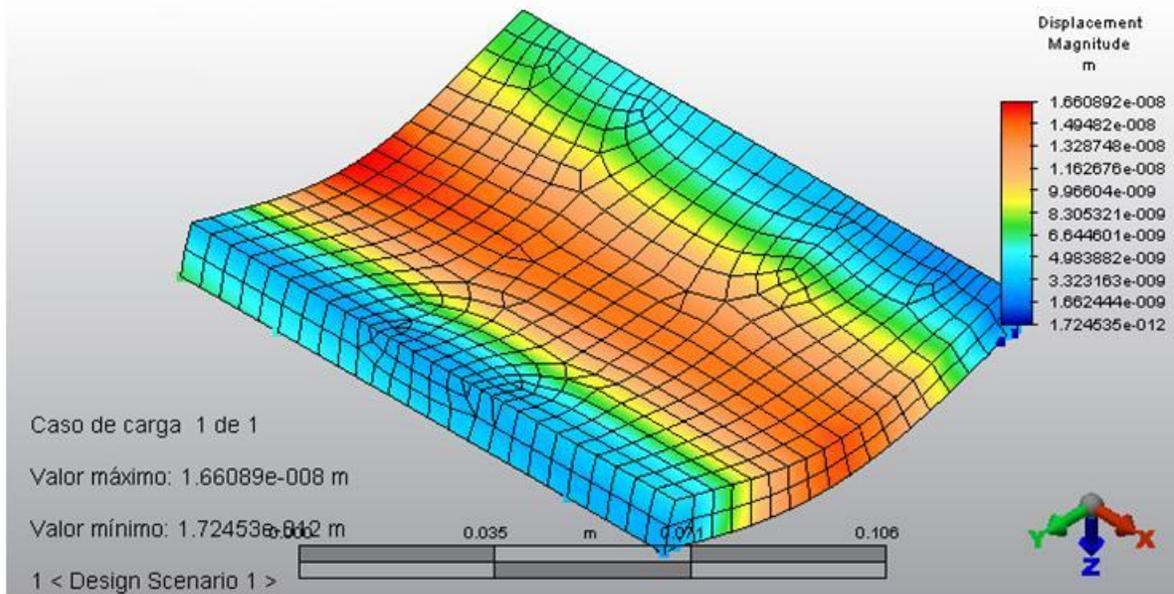


Figura 4-11: Resultados de la deformación el dicroico, utilizando la Propuesta III de diseño. Gravedad aplicada en dirección +Z.

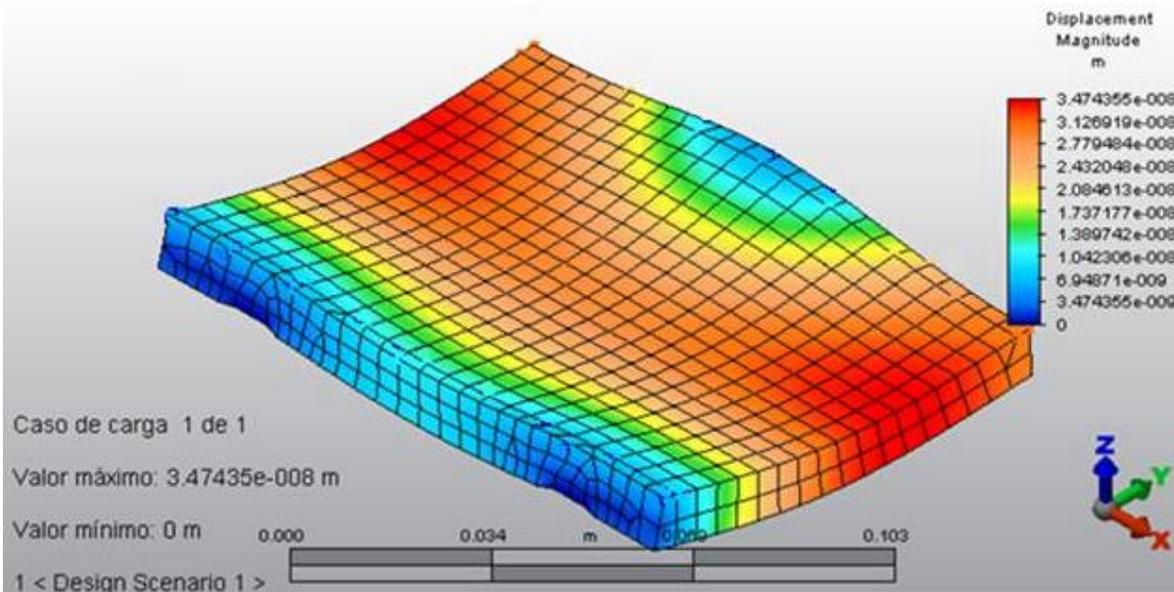


Figura 4-12: Resultados de la deformación el dicroico, utilizando la Propuesta III de diseño. Gravedad aplicada en dirección -Z.

#### 4.3.2.4 Deformación para la Propuesta IV

Las condiciones de frontera utilizadas para el análisis por elemento finito de la propuesta IV son las siguientes: los nodos inferiores del dicroico que están en contacto con el soporte, se consideran fijos.

Se puede observar que el dicroico no se deforma de la misma manera que las propuestas anteriores, si no que tiene una deformación más uniforme, casi simétrica. En la (Figura 4-13) se

puede observar el resultado de la deformación de la simulación cuando se aplica la gravedad en dirección +Z. Se puede observar que se tiene una deformación máxima de  $w_{\max} = 32.59nm$  y una deformación de  $w = 27.71nm$  en el centro.

Así mismo, se realizó la simulación de la misma propuesta aplicando la gravedad en dirección -Z. En la (Figura 4-14) se puede observar el resultado de esta deformación.

Se tiene una deformación en el centro de  $w = 34.94nm$  .

Se puede observar que el microco sufre una deformación diferente a la que sufre cuando se le aplica la gravedad en la dirección contraria.

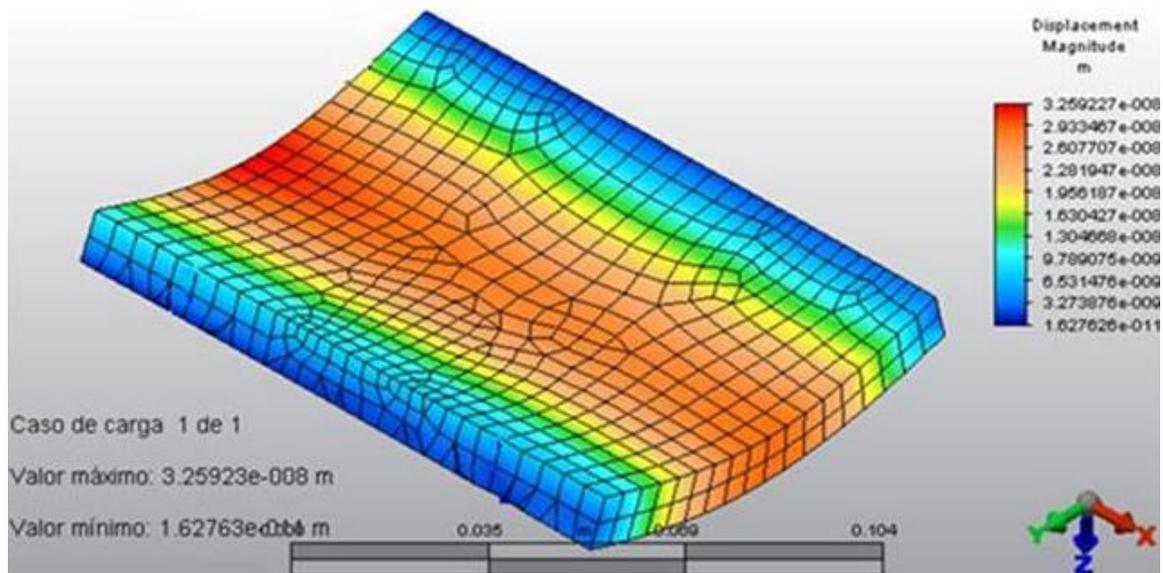


Figura 4-13: Resultados de la deformación el microco, utilizando la Propuesta IV de diseño. Gravedad aplicada en dirección +Z.

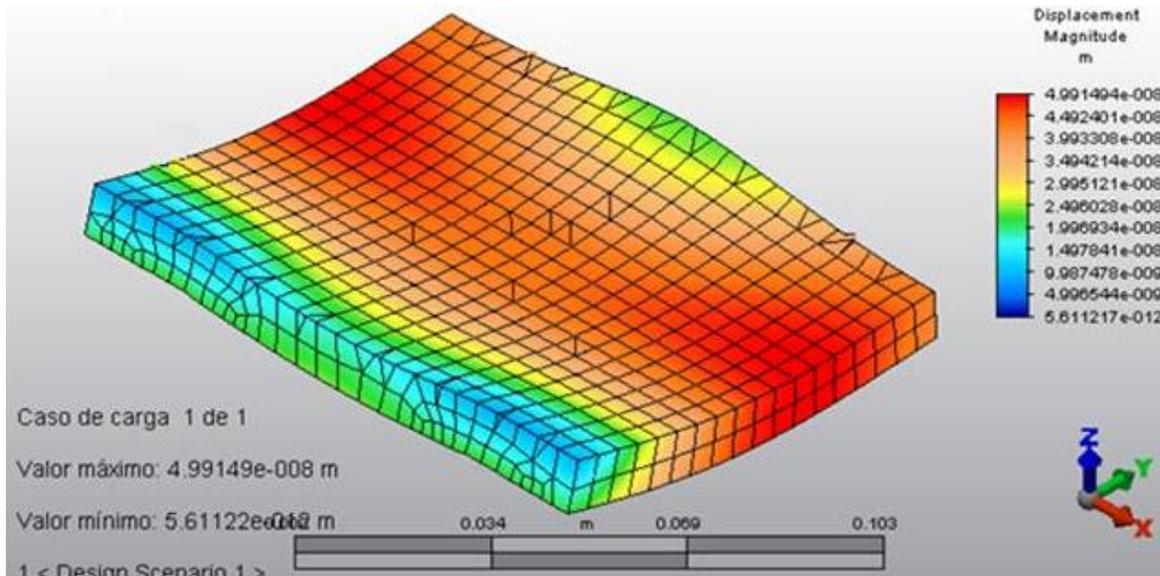


Figura 4-14: Resultados de la deformación el dicroico, utilizando la Propuesta IV de diseño. Gravedad aplicada en dirección -Z.

#### 4.3.2.5 Deformación para la Propuesta V

Para la simulación de esta propuesta, las condiciones de frontera son fijas en los nodos que están en contacto con el soporte.

En la (Figura 4-15) se puede observar el resultado de esta simulación aplicando la gravedad en dirección +Z.

Se obtuvo un desplazamiento máximo de  $w_{\max} = 46.57 \text{ nm}$  en los extremos del dicroico.

En la parte central se obtuvo un desplazamiento de  $w = 32.59 \text{ nm}$ .

En la (Figura 4-16) se puede observar el resultado de la simulación aplicando la gravedad en dirección -Z. Se obtuvo un desplazamiento máximo de  $w_{\max} = 47.71 \text{ nm}$  en los extremos del dicroico.

En el centro del dicroico se obtuvo un desplazamiento de  $w = 33.39 \text{ nm}$ .

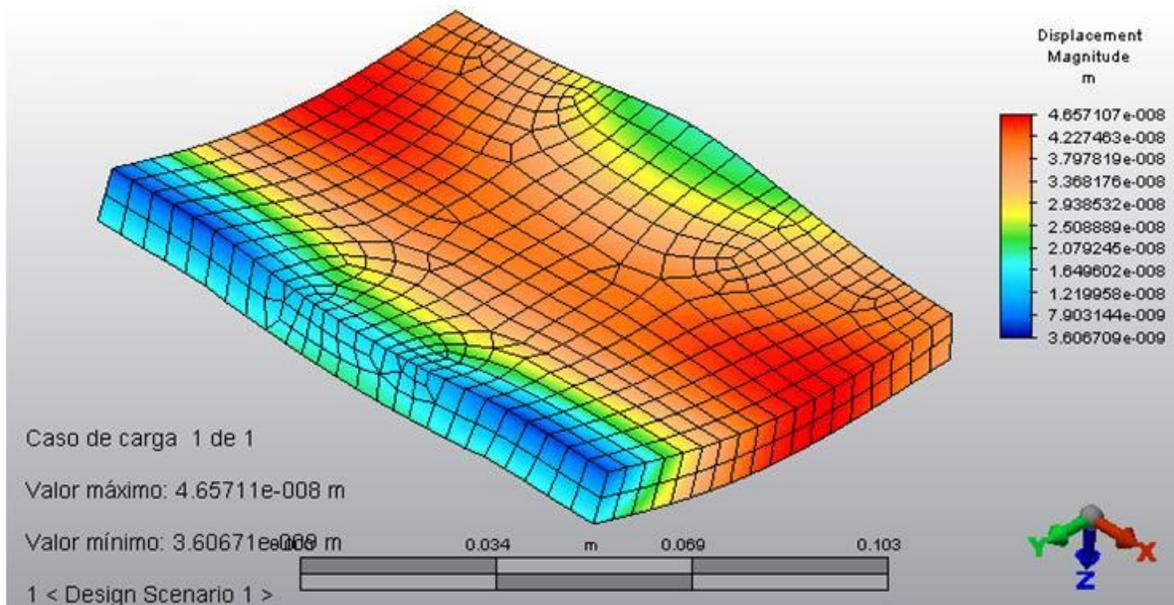


Figura 4-15: Resultados de la deformación el dicroico, utilizando la Propuesta V de diseño. Gravedad aplicada en dirección +Z.

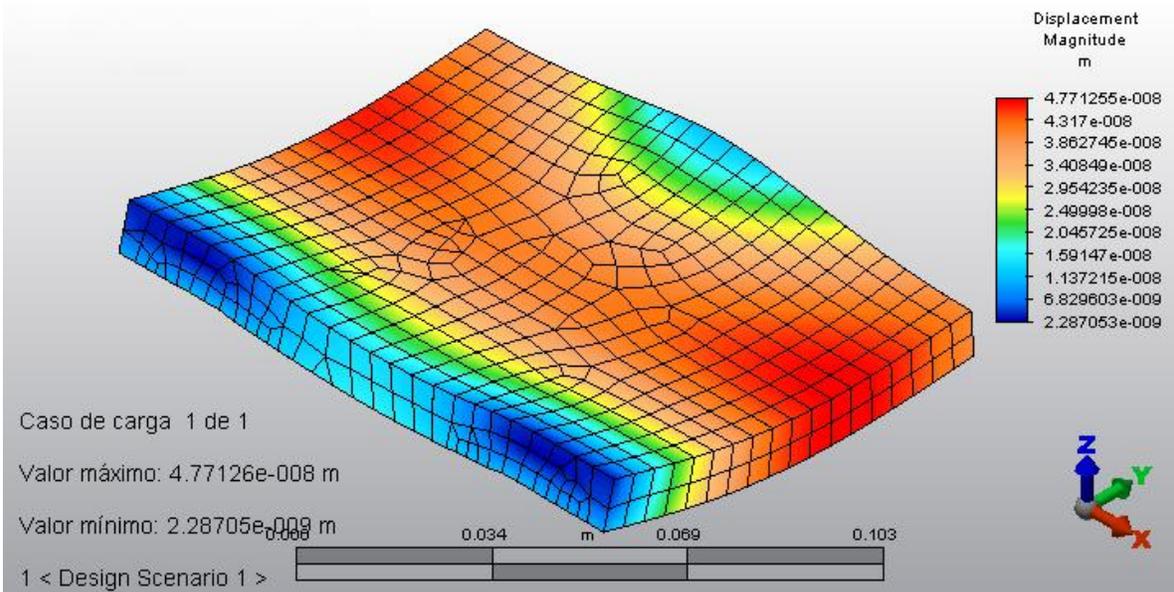


Figura 4-16: Resultados de la deformación el dicroico, utilizando la Propuesta V de diseño. Gravedad aplicada en dirección -Z.

#### 4.3.2.6 Deformación para la Propuesta VI

Las condiciones de frontera para esta simulación son los segmentos de la arista del dicroico que están en contacto con el soporte se encuentran fijas.

El resultado de la simulación aplicando la gravedad en la dirección +Z se puede observar en la (Figura 4-17). Se obtuvo un desplazamiento máximo de  $w_{\max} = 47.38\text{nm}$  en los extremos del dicroico y un desplazamiento en el centro de  $w = 33.17\text{nm}$ .

En la Figura 4-18 se puede observar el resultado de la simulación aplicando la gravedad en dirección  $-Z$ . Se tiene un desplazamiento máximo de  $w_{\max} = 48.03nm$  en los extremos del dicroico y un desplazamiento en el centro de  $w = 33.62nm$ .

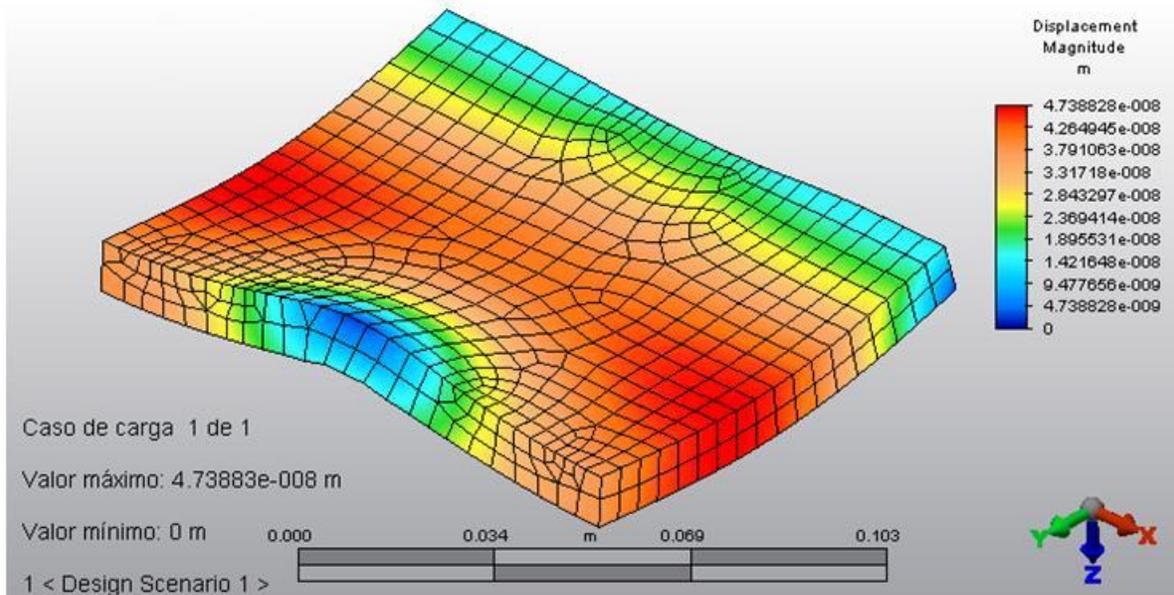


Figura 4-17: Resultados de la deformación el dicroico, utilizando la Propuesta VI de diseño. Gravedad aplicada en dirección  $+Z$ .

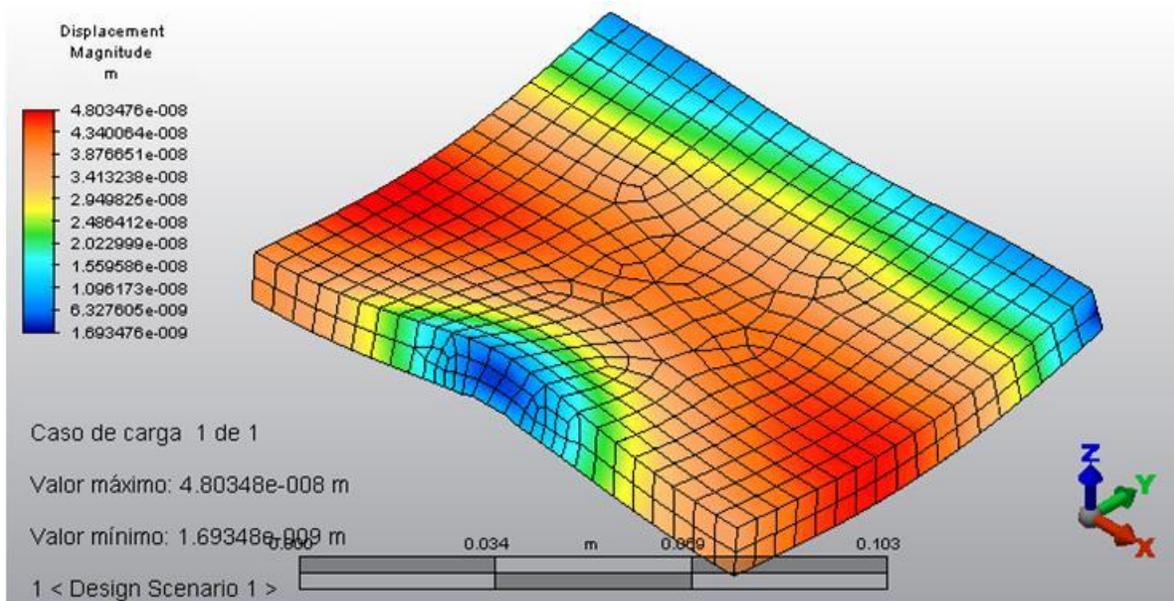


Figura 4-18: Resultados de la deformación el dicroico, utilizando la Propuesta VI de diseño. Gravedad aplicada en dirección  $-Z$ .

#### 4.4 Comparación de deformaciones obtenidas

En la Tabla 4-1 se puede observar el resumen de las deformaciones obtenidas del dicroico para cada propuesta de diseño. Se puede observar que todas las propuestas, excepto la propuesta III, tienen una diferencia con el cálculo analítico menor al 10%. Con este margen de diferencia entre los resultados analíticos y los resultados obtenidos por medio del método del elemento finito, se puede garantizar que las simulaciones son válidas.

| Propuesta | Deformación Analítica | Deformación por FEA | Diferencia |
|-----------|-----------------------|---------------------|------------|
| I         | 30.24 nm              | 32.23 nm            | +6.58%     |
| II        | 30.24 nm              | 27.77 nm            | -8.16%     |
| III       | 29.54 nm              | 14.95 nm            | -49.39%    |
| IV        | 29.54 nm              | 27.71 nm            | -6.19%     |
| V         | 30.24 nm              | 32.59 nm            | +7.77%     |
| VI        | 30.24 nm              | 33.17 nm            | +9.68%     |

Tabla 4-1: Deformación sufrida por el dicroico para las seis propuestas de diseño. Resultados obtenidos aplicando la gravedad en dirección +Z.

| Propuesta | Deformación Analítica | Deformación por FEA | Diferencia |
|-----------|-----------------------|---------------------|------------|
| I         | 30.24 nm              | 32.23 nm            | +6.58%     |
| II        | 30.24 nm              | 27.77 nm            | -8.16%     |
| III       | 30.24 nm              | 28.65 nm            | -5.25%     |
| IV        | 30.24 nm              | 34.94 nm            | +15.54%    |
| V         | 30.24 nm              | 33.39 nm            | +10.42%    |
| VI        | 30.24 nm              | 33.63 nm            | +11.21%    |

Tabla 4-2: Deformación sufrida por el dicroico para las seis propuestas de diseño. Resultados obtenidos aplicando la gravedad en dirección -Z.

Para el caso de la Propuesta III, en el cual se tiene una diferencia de 49.39% entre el resultado analítico y el resultado de la simulación por elemento finito, la diferencia en los resultados es causada por las condiciones de frontera utilizadas en ambos casos. El dicroico no solamente está en contacto con el soporte en sus aristas, teniendo condiciones de frontera fijas, también el área del dicroico que está en contacto con el soporte tiene condiciones de frontera fijas. Al tener un área de contacto y soporte mayor, la deformación sufrida por el dicroico disminuye. El cálculo analítico solamente considera las aristas del dicroico fijas, y es por esa razón que se tiene esta diferencia entre ambos resultados.

#### 4.5 Referencias

- [1]. Szilard, Rudolph. *Theories and Applications of Plate Analysis*. New Jersey : John Wiley & Sons, 2004.
- [2]. Timoshenko, S. *Theory of Plates and Shells*. s.l. : McGraw-Hill, 1959.

## 5 Manufactura del soporte

En este capítulo se describe el proceso de manufactura del soporte del dicróico y de sus componentes. Se presenta el proceso seguido para el maquinado en CNC del soporte así como los diferentes programas en código G que se utilizaron. Se presenta el proceso seguido para el maquinado convencional de las demás piezas del soporte. Por último se presentan imágenes de las piezas individuales terminadas y de las piezas ensambladas.

### 5.1 Maquinado CNC

Para maquinar el soporte del dicróico, se decidió utilizar maquinado CNC (Computer Numerically Controlled) [1] debido a la geometría del mismo. Es importante que el maquinado del soporte sea preciso ya que se necesita tener la referencia para posicionar el dicroico.

Para realizar el maquinado en CNC, se utiliza el modelo 3D generado en SolidWorks®. Utilizando este modelo se generan las trayectorias que se necesitan para generar la forma de la pieza. Una vez generadas las trayectorias, se genera el código G que se introducirá en la máquina CNC para realizar las trayectorias.

Al utilizar como base el modelo 3D generado en SolidWorks® se puede garantizar que el maquinado final será como el modelo diseñado.

#### 5.1.1 Colaboración con la FI-UNAM

Se buscó realizar una colaboración con el Centro de Diseño Mecánico (CDM) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM para realizar el maquinado del soporte del dicroico. Dentro del CDM se encuentra el Laboratorio de Manufactura Avanzada el cual cuenta con diversas máquinas CNC.

El laboratorio proporcionó apoyo técnico para generar las trayectorias y los programas en código G utilizando el software MasterCam 9, cargar los códigos en la máquina, configurar y montar las herramientas así como posicionar el material y utilizar la CNC. Así mismo, también proporcionó algunas herramientas que fueron necesarias para realizar el maquinado.

#### 5.1.2 Máquina y herramientas utilizadas



Figura 5-1: Fresadora EMCO VMC 300.

Se utilizó una fresadora CNC EMCO VMC 300<sup>15</sup> para realizar el maquinado del soporte. Esta fresadora cuenta con un motor de 15 HP y un husillo de 4000 RPM. Su mesa tiene las dimensiones de 420 x 330 x 400 mm. Cuenta con un portaherramientas que puede albergar hasta 12 herramientas diferentes. Su control es Sinumerik 810M (Figura 5-1)

<sup>15</sup> Sitio web del fabricante: <http://www.emco.co.uk/>

### 5.1.3 Dimensiones del material

Se compró un bloque de Aluminio 6061 T6 de 10 x 6 x 2 pulgadas (254 x 152 x 50 mm). En primera instancia, se tenía contemplado utilizar sujetadores para sostener el material en la mesa de la fresadora. Posteriormente, se verificó que la prensa de la fresadora sí podía contener la pieza con sus dimensiones finales. Por esta razón, se tuvo que rebajar el material, utilizando la misma máquina CNC y una sierra, para delimitarlo a sus dimensiones finales, teniendo un bloque de 140x132x40 mm.

### 5.1.4 Dimensiones de las piezas

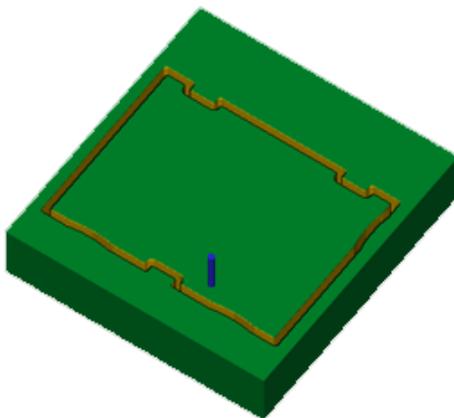
En el Apéndice A se pueden encontrar los planos de maquinado de las piezas que conforman el soporte.

### 5.1.5 Generación de trayectorias

Se utilizó el software MasterCam 9<sup>16</sup> para generar las trayectorias y generar el código G para programar la máquina CNC. El modelo 3D generado en SolidWorks® se importó directamente a MasterCam®. Se cargó al software la interfaz adecuada de la máquina CNC a utilizar y posteriormente se tradujo el modelo 3D a código G.

Una vez que se dejó el material con las dimensiones finales, se colocó en la prensa de la máquina CNC y se fijó adecuadamente. Posteriormente, se obtuvo el cero pieza, el cual lo establecimos en el centro de la misma. Antes de montar cada herramienta en la máquina, se midió la compensación para cada una y se introdujo este valor en la computadora de la máquina. La importancia de realizar la compensación de las herramientas radica en garantizar el cero de referencia en el eje Z.

El maquinado del soporte se dividió en varias etapas debido a la poca capacidad en memoria que posee la máquina CNC. Esto limita la cantidad de líneas de código que se pueden cargar en la memoria.

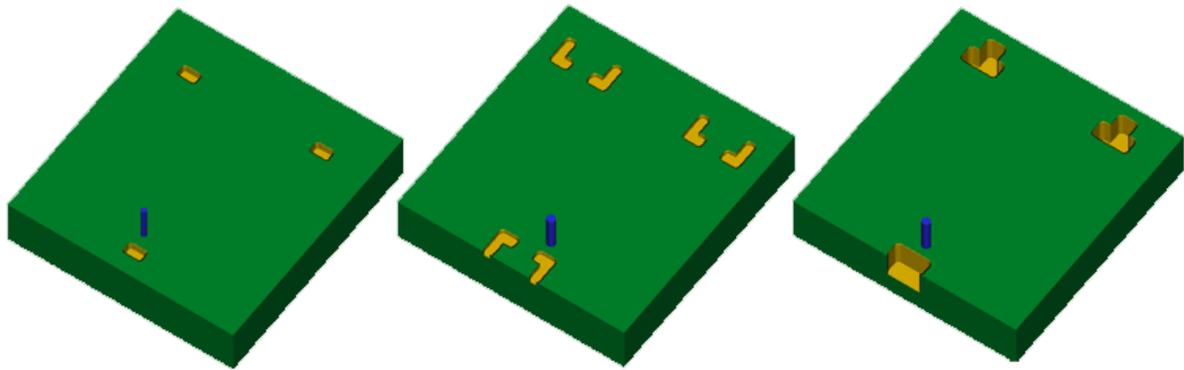


El primer código generado y ejecutado fue para remover el material de la parte interna del soporte. Se generó una trayectoria de contorno para minimizar el tiempo de maquinado y preservar la mayor cantidad de material. Para esta operación se utilizó un cortador de 1/2 pulgada.

Una vez removido el material, se prosiguió a maquinar el borde interior. Este maquinado era el más importante y delicado de todo el soporte debido a su geometría.

**Figura 5-2: Simulación del maquinado interior del soporte.**

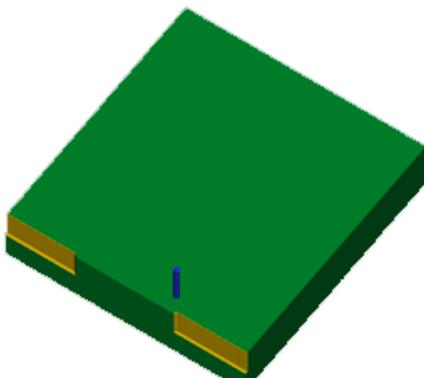
<sup>16</sup> Para mayor información acerca del software, consultar el sitio web <http://www.mastercam.com/>.



**Figura 5-3: Simulación del maquinado de las cajas de 3, 5 y 14.5 mm de profundidad.**

Se generó una trayectoria de contorno y se utilizó un cortador de  $3/16$  pulgadas para remover el material y uno de  $1/8$  para realizar el acabado. En la (Figura 5-2) se puede observar la simulación realizada en MasterCam para esta trayectoria. Este maquinado fue a través de todo el material.

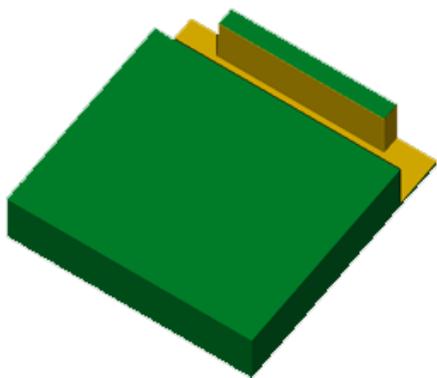
Posteriormente, se realizaron los maquinados de las cajas donde se van a montar los resortes. Se cuenta con tres cajas diferentes a profundidades de 3, 5 y 14.5 mm. Para los tres tipos de cajas se generó la trayectoria de caja con la profundidad específica de cada una. Se realizó el primer maquinado con un cortador de  $3/16$  pulgadas y posteriormente se utilizó un cortador de  $1/8$  pulgadas para realizar los acabados. En la (Figura 5-3) se puede observar la simulación en MasterCam de estos maquinados.



**Figura 5-4: Simulación del maquinado del borde anterior.**

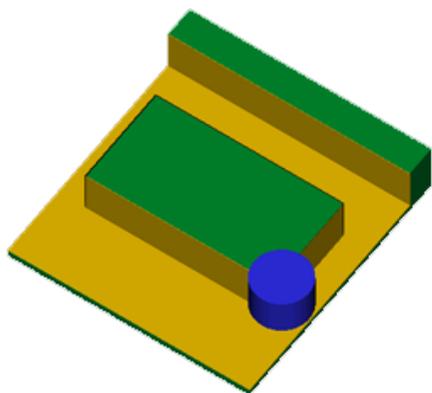
Para el maquinado del contorno exterior, se utilizó un contorno abierto y un cortador de  $3/16$  pulgadas. Se maquinó solamente el borde anterior del soporte hasta una profundidad de 15 mm. En la (Figura 5-4) se puede observar la simulación en MasterCam de este maquinado.

Una vez terminados los maquinados descritos previamente, se prosiguió a voltear la pieza para realizar los maquinados inferiores. Una vez que se fijó la pieza en su nueva posición, se tuvo que obtener el cero pieza nuevamente y volver a obtener las compensaciones para las herramientas. En este proceso la posición no era crítica, ya que la superficie inferior del soporte no requería de precisión en el maquinado.



**Figura 5-5: Simulación del maquinado inferior.**

El primer maquinado inferior que se realizó fue el maquinado para detallar la pared saliente del soporte en el cual se localizarán los tornillos que lo fijarán al instrumento. Para este maquinado se utilizó un cortador de  $1/2$  pulgada y se realizó hasta una profundidad de 25.4 mm. En la (Figura 5-5) se puede observar la

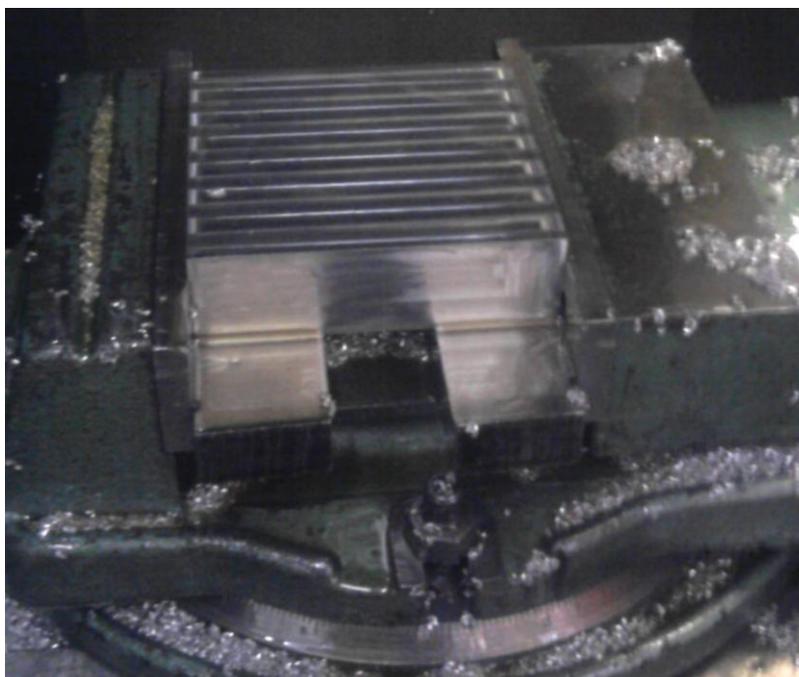


**Figura 5-6: Simulación del maquinado para el desbaste inferior.**

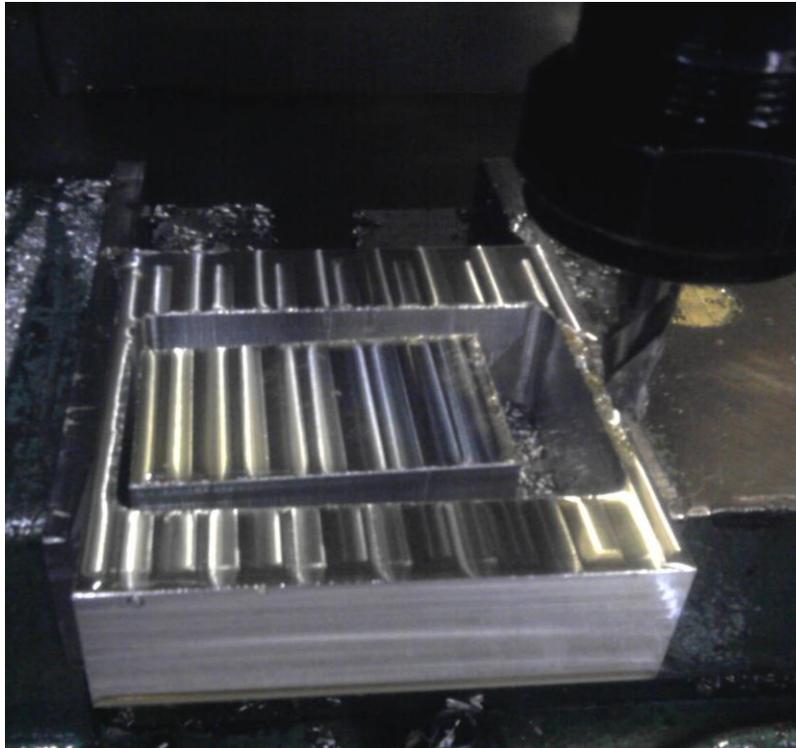
simulación obtenida en MasterCam de este maquinado.

El último maquinado realizado fue para generar el desbaste del material sobrante de la parte inferior del soporte. Esto con la finalidad de establecer el espesor del soporte en sus dimensiones finales de 14.5 mm. Para este maquinado se utilizó una herramienta de 30 mm para realizar el desbaste en el menor tiempo. En la (Figura 5-6) se puede observar la simulación de este maquinado.

De la (Figura 5-7) a la (Figura 5-13) se puede observar fotografías del proceso de maquinado del soporte.



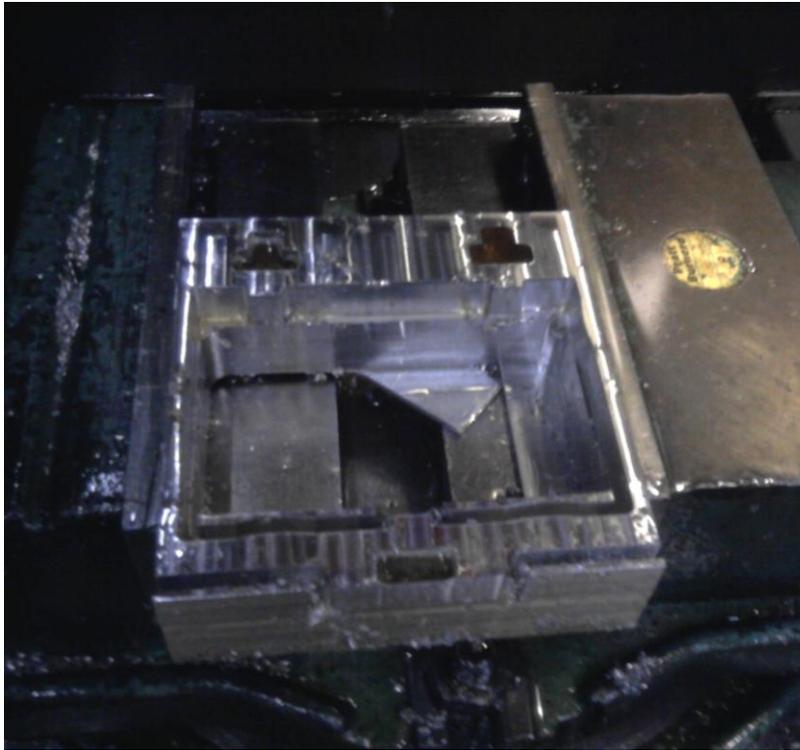
**Figura 5-7: Bloque de material fijo en la máquina CNC.**



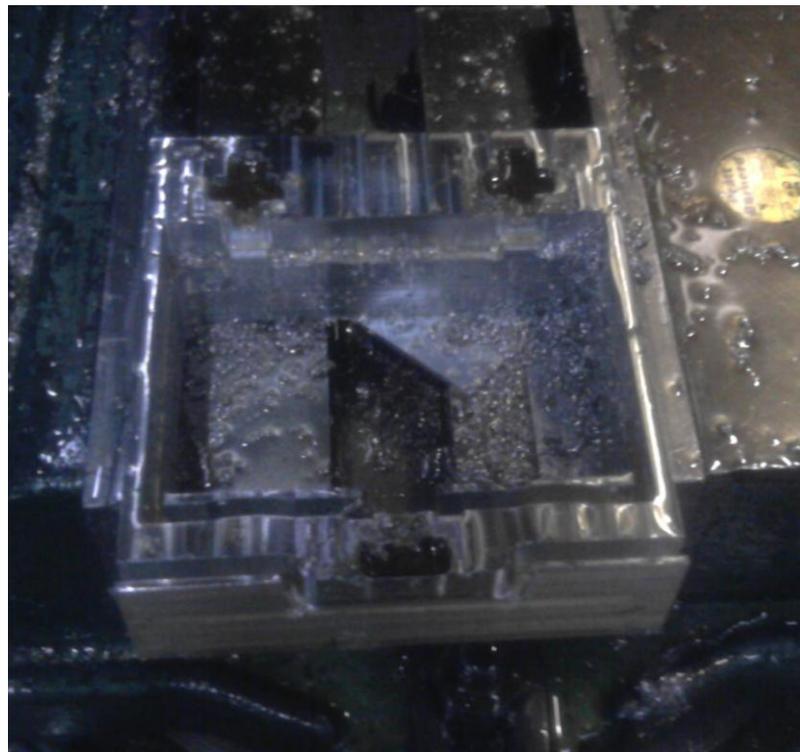
**Figura 5-8: Maquinado para remover el material interior.**



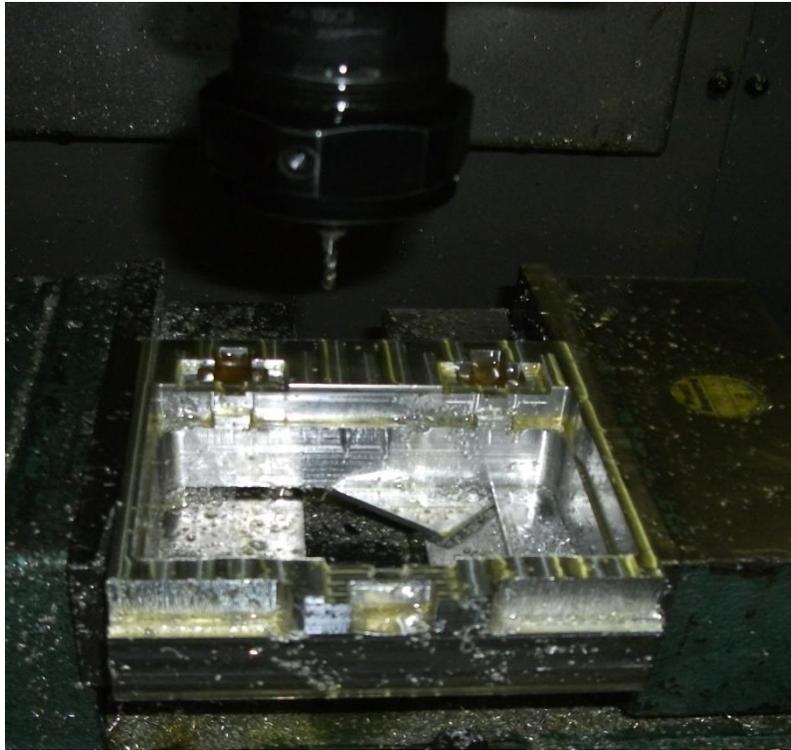
**Figura 5-9: Maquinado del contorno interior.**



**Figura 5-10: Contorno interior y primeras cajas terminadas.**



**Figura 5-11: Maquinado terminado de la segunda caja.**



**Figura 5-12: Maquinado superior terminado.**



**Figura 5-13: Material posicionado para maquinados inferiores.**

## 5.2 Maquinado del sistema de resortes

El maquinado de las piezas que conforman el sistema de resortes del soporte, fue maquinado en los talleres del Instituto de Astronomía de la UNAM. En la (Figura 5-14: Sistema de resorte.) se puede observar el diseño CAD de este sistema.

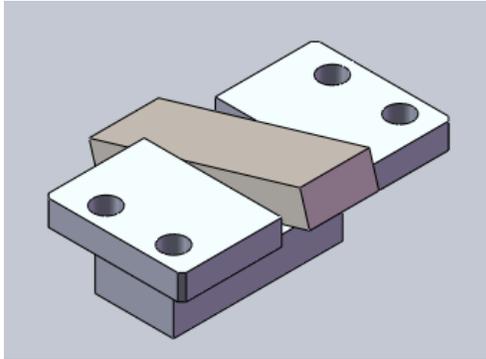


Figura 5-14: Sistema de resorte.

El sistema cuenta con un resorte, su base y el tornillo que actúa como eje. El material utilizado para maquinar el resorte fue Nylamid mientras que la base del resorte se maquinó en Aluminio 6061 T6.

En el Apéndice A se pueden observar los planos de manufactura de estas piezas.

## 5.3 Piezas terminadas y ensamble del soporte

Una vez terminado el maquinado de todas las piezas del soporte, se procedió a ensamblarlo. En la Figura 5-15 se puede observar el ensamble del sistema de resortes, mientras que en la (Figura 5-15) se puede observar el ensamble completo del soporte.

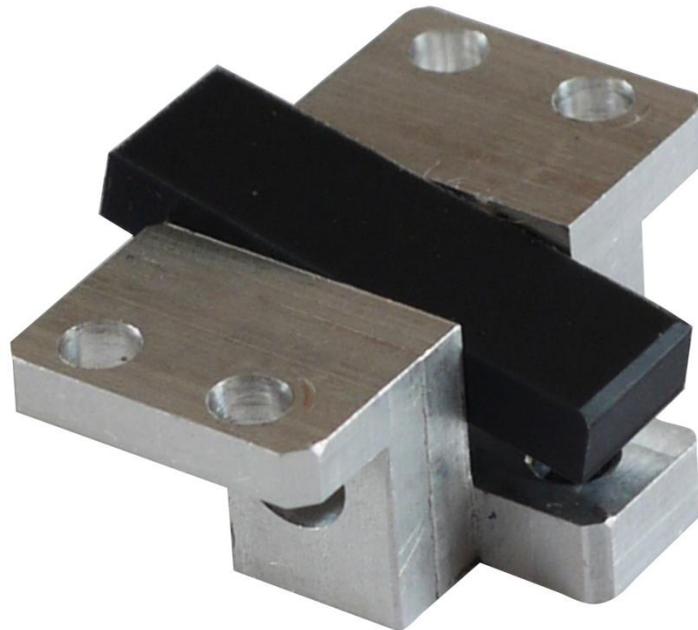


Figura 5-15: Ensamble del sistema de resortes.

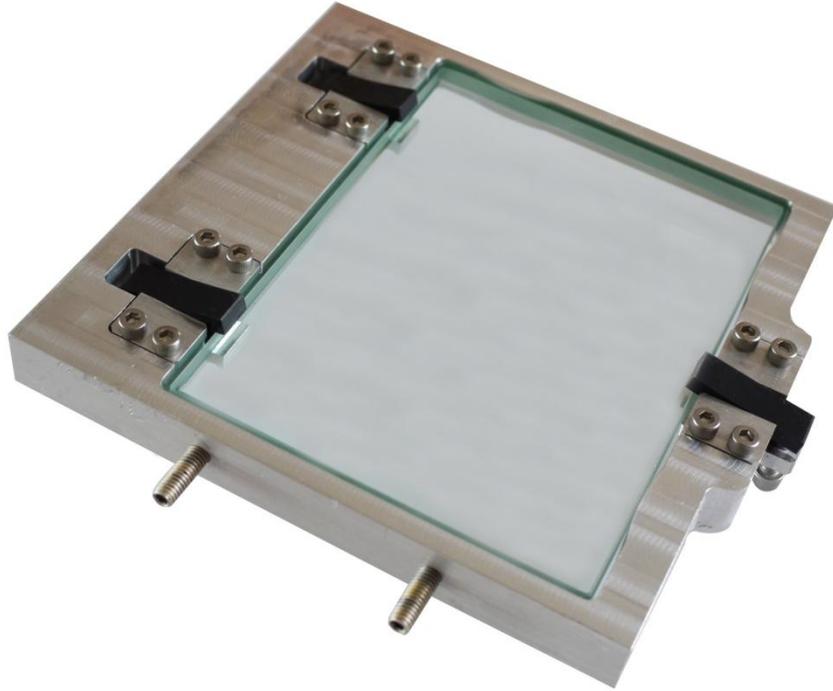


Figura 5-16: Ensamble final del soporte.

## 5.4 Referencias

1. Overby, Alan. *CNC Machining Handbook*. s.l. : McGraw-Hill, 2011.

## 6 Simulación y validación del esfuerzo

Además de la deformación causada por la gravedad, otra característica determinante para el buen funcionamiento del dicroico es el esfuerzo que se ejerce sobre él. Si el esfuerzo ejercido es de cierta magnitud, la película de partículas que le dan al dicroico sus propiedades se deformaría, causando una modificación en sus propiedades. En este capítulo se presenta la simulación por medio del Análisis por Elemento Finito del esfuerzo ejercido sobre el dicroico una vez montado en su soporte. Así mismo, se explica una propuesta de prueba de laboratorio para comprobar esta simulación. Se define la técnica utilizada para realizar esta prueba, el diseño del experimento y los resultados obtenidos.

### 6.1 Análisis del esfuerzo por medio del FEA

Se realizó la simulación por medio del elemento finito para observar el patrón de esfuerzos generado sobre el dicroico. Se aplicó una fuerza de 3 N, tomando en cuenta la fuerza mínima necesaria para sostener al dicroico y el factor de seguridad (descrito en el capítulo anterior). Esta fuerza es equivalente a la que proporcionan los resortes para mantener el dicroico fijo en su lugar. Los nodos localizados sobre la superficie del soporte, en la superficie inferior del dicroico, se les asignaron condiciones de frontera fijas. Se aplicó la fuerza de gravedad en dirección  $-Y$ , simulando la situación que se tendrá en el laboratorio al momento de realizar la prueba.

En las figuras (Figura 6-1), (Figura 6-2) y (Figura 6-3) se puede observar el patrón de esfuerzos generado por las fuerzas aplicadas en esta simulación. También se puede observar que el esfuerzo máximo se encuentra alrededor de 400 kPa. Este patrón de esfuerzos es el que se espera observar utilizando la técnica de fotoelasticidad.

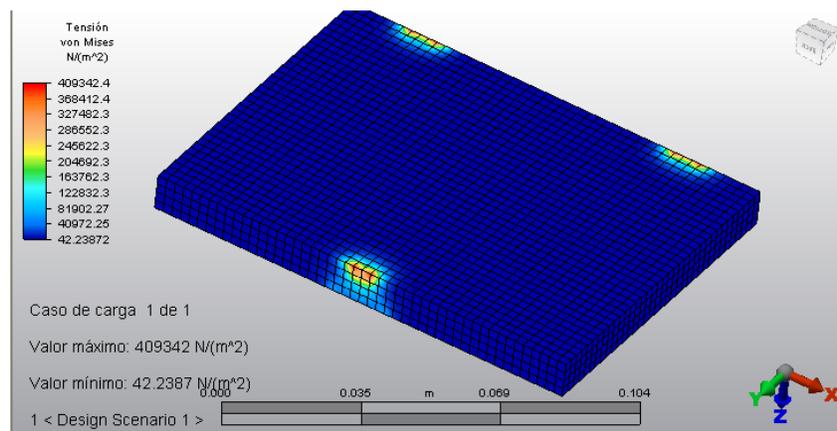


Figura 6-1: Simulación de esfuerzos sobre el dicroico.

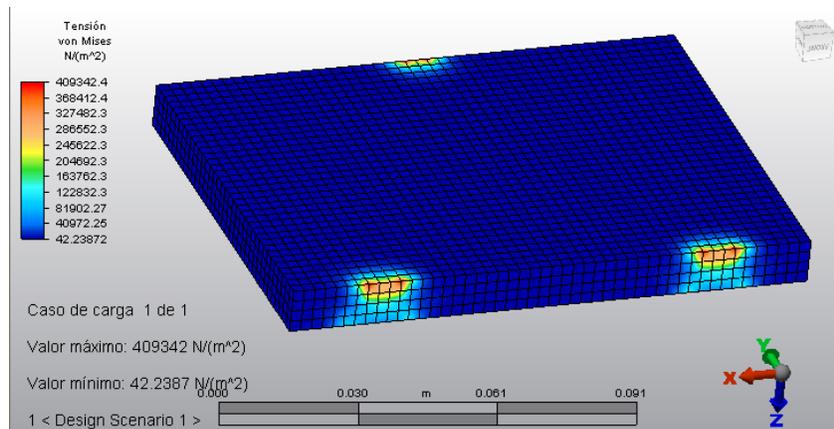


Figura 6-2: Simulación de esfuerzos sobre el dicroico.

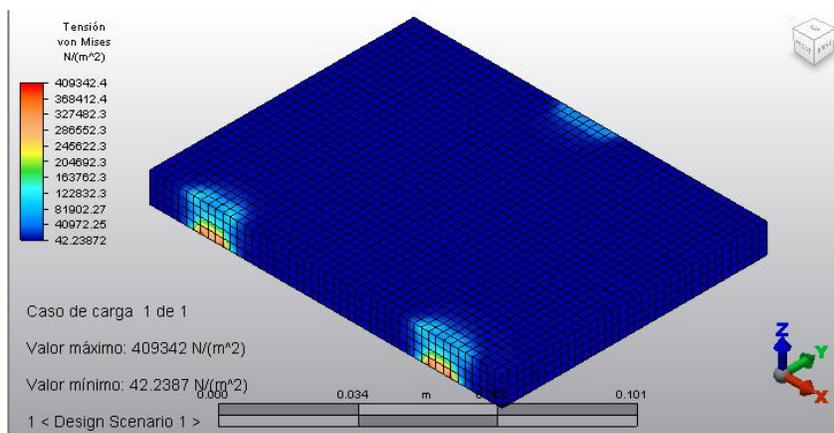


Figura 6-3 Simulación de esfuerzos sobre el dicroico, vista inferior.

## 6.2 Método para medir el esfuerzo sobre el dicroico

### 6.2.1 Técnica utilizada

La fotoelasticidad es un método experimental para el análisis de esfuerzos [1]-[3]. Este método utiliza el fenómeno de birrefringencia que algunos vidrios exhiben al ser sometidos a una carga. Este método es útil para modelos físicos cuya descripción analítica no puede ser obtenida. Esto sucede cuando los modelos tienen una geometría complicada y condiciones de cargas complejas. La fotoelasticidad implica el estudio por medio de la luz de las deformaciones y esfuerzos en medios elásticos.

El fenómeno de birrefringencia [4] que ocurre en estos materiales es artificial ya que está controlado por el estado de los esfuerzos en cada punto del objeto. Al eliminar la carga del material, esta propiedad de birrefringencia desaparece. La luz incidente en el material se separa en dos componentes cuyos planos de vibración son paralelos a los esfuerzos principales. Debido a que estos componentes de la luz atraviesan el material a diferentes velocidades, cada componente emerge del material con un cambio en su fase.



La configuración del polariscopio lineal se puede observar en la (Figura 6-5). El polarizador lineal que se encuentra más cercano a la fuente de luz se le conoce como polarizador. El polarizador lineal que se encuentra después del material a estudiar se le conoce como analizador.

Los ejes de polarización de ambos polarizadores se deben de colocar de manera perpendicular. Cuando esto sucede, no se transmite luz a través de los polarizadores lo que resulta en un campo oscuro cuando el material no se encuentra sometido a ningún esfuerzo.

La luz emitida de la fuente puede ser luz blanca sin polarizar. Una vez que pasa por el polarizador, la luz que emerge se encuentra polarizada. Al pasar a través del material, que actúa como un retardador, la luz polarizada se descompone en dos componentes en las direcciones de los esfuerzos principales y emerge del material con fases diferentes.

Se pueden observar dos tipos de patrones de franjas. Los patrones de franjas isoclínicas se utilizan para determinar la dirección del esfuerzo en cualquier punto. Este patrón ocurre cuando existe una ausencia de luz. Esto se debe a que alguno de los esfuerzos principales está alineado con el eje del polarizador. Las direcciones de los esfuerzos principales se pueden determinar por la dirección de los ejes del polarizador y el analizador. Se pueden ir girando ambos polarizadores para ir encontrando las direcciones de los esfuerzos.

Los patrones de franjas isocromáticas ocurren cuando la diferencia de los esfuerzos principales es cero o cuando la diferencia es algún número entero de la onda de luz. Al utilizar una fuente de luz blanca, estos patrones de franjas isocromáticas se observarán como franjas de varios colores debido a que la extinción que ocurre solamente es de una longitud de onda en particular. Si se utiliza una fuente de luz monocromática, se observarán franjas negras, ya que la longitud de onda que se extingue es la misma que la longitud de onda de la fuente.

Los diferentes colores observados representan el valor del esfuerzo en cada parte del material. Con esto se puede tener un patrón de esfuerzos que se puede comparar con simulaciones por elemento finito.

### 6.2.2 Diseño del experimento

Las secciones de interés donde se genera un esfuerzo sobre el dicroico, son las secciones donde está en contacto con los resortes deformables y con la base del dicroico (Figura 6-6).

Se utilizó el método del polariscopio lineal para realizar las pruebas en laboratorio. La fuente de luz, la pieza a analizar y los dos polarizadores se montaron de acuerdo a la (Figura 6-5). El arreglo montado en laboratorio se puede observar en la (Figura 6-7).

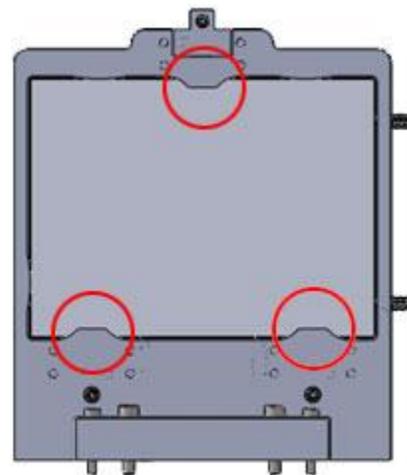


Figura 6-6: Zonas de generación de esfuerzos.

Se utilizó una fuente de luz blanca y dos polarizadores lineales Polaroid de 54 mm de diámetro. Estos polarizadores tienen una eficiencia de polarización del 95% y una transmisión de 30% cuando es un solo polarizador y de 0.15% cuando son dos polarizadores cruzados. Tienen un rango de longitud de onda de 400 nm a 700 nm<sup>18</sup>. El vidrio que se utilizó fue un vidrio BK-7 de 9 mm de espesor.

Se alinearon perpendicularmente los ejes de polarización de ambos polarizadores. Una vez alineados los polarizadores, se colocó el soporte con el vidrio montado y se analizaron las áreas marcadas en la (Figura 6-6).

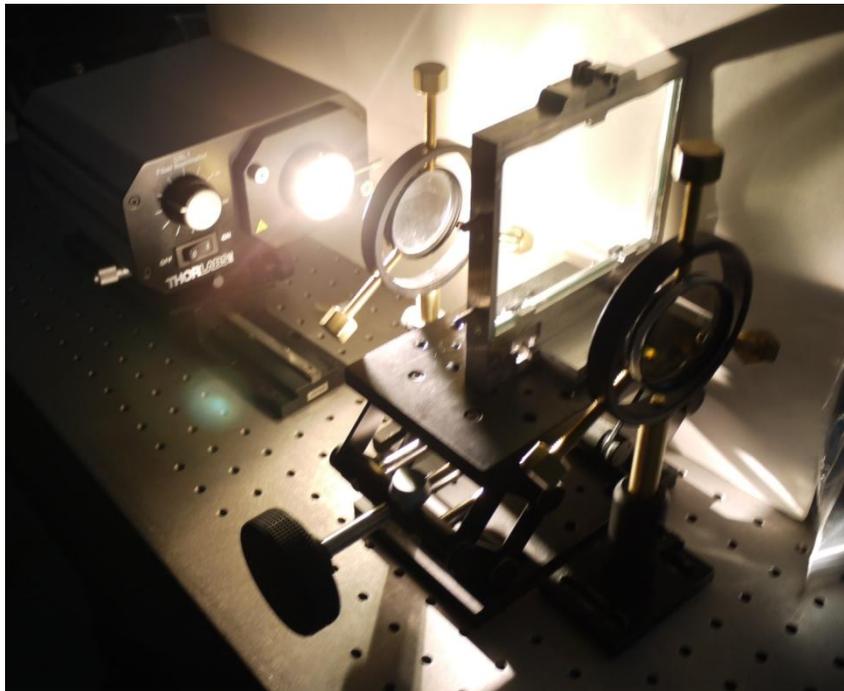


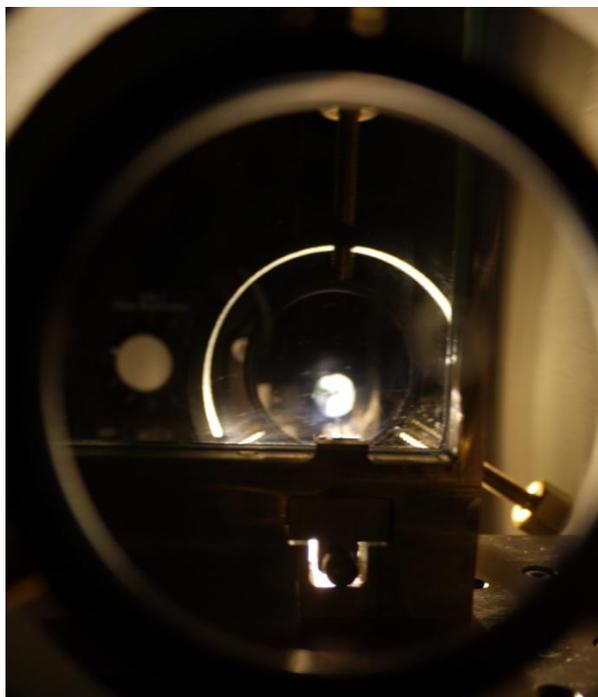
Figura 6-7: Arreglo de polariscopio lineal con el soporte del dicróico.

### 6.2.3 Resultados obtenidos

Una vez montado el experimento se procedió a analizar la luz emergente del vidrio que actúa como dicróico. No se pudieron detectar ningún tipo de patrón de franjas sobre el vidrio, como se muestra en la (Figura 6-8).

---

<sup>18</sup> De acuerdo con <http://www.edmundoptics.com/onlinecatalog/displayproduct.cfm?productID=1396>.



**Figura 6-8: Vista a través del analizador.**

Debido a que no se observaron patrones de franjas utilizando estos polarizadores, se procedió a repetir el experimento con un polarizador de calcita actuando como polarizador y un polarizador Polaroid actuando como analizador. El polarizador de calcita es un polarizador Glan-Thompson y funciona para longitudes de onda desde 300 nm hasta 2300 nm. Tienen un mayor campo de visión y una razón de extinción más alta<sup>19</sup>.

Aún al utilizar estos polarizadores de mejor calidad, no se observaron patrones de franjas sobre el vidrio. La razón por la cual no se pudo observar ningún patrón de franjas en el vidrio es la sensibilidad óptica del vidrio es mucho mayor a la carga aplicada al mismo.

Así mismo, de acuerdo con [2], utilizando una fuente de luz monocromática se podrían observar franjas más finas. Además, se puede utilizar un recubrimiento fotoelástico para realizar la prueba y ser capaces de observar las franjas.

### **6.3 Referencias**

[1]. **Doyle, James F.** *Modern Experimental Stress Analysis*. Sussex : John Wiley & Sons, 2004.

[2]. **Doyle, James F. y Phillips, James W.** *Manual on Experimental Stress Analysis*. s.l. : Society for Experimental Mechanics.

[3]. **Khan, Akhtar S. y Wang, Xinwei.** *Strain Measurements and Stress Analysis*. s.l. : Prentice Hall, 2000.

---

<sup>19</sup> De acuerdo con <http://www.edmundoptics.com/onlinecatalog/displayproduct.cfm?productID=2293>.

[4]. **Farah, Alejandro.** *Diseño y Fabricación Optomecánicos en la Instrumentación Astronómica: OSIRIS.* Mexico : s.n., 2008.

## 7 Conclusiones

En este trabajo de tesis se presentó el diseño, la integración, la verificación y la validación de soportes optomecánicos para dicróicos.

Se presentaron diversas propuestas de diseño para sostener el dicroico y mantenerlo fijo sin deformarlo de una manera considerable. Cada propuesta buscaba cumplir con los requisitos de diseño y proporcionar un soporte adecuado al dicroico. Se propusieron seis configuraciones diferentes para sostener al dicroico en su superficie inferior. Se utilizaron tres superficies semicirculares para actuar como referencias al momento de posicionar el dicroico. Para sostener al dicroico en su superficie superior se utilizaron tres sistemas de resortes deformables desmontables que proporcionan cierta fuerza para sostener el dicroico en la base. Se utilizó el software CAD SolidWorks© para realizar los modelos de las diferentes piezas que conforman cada una de las propuestas del soporte.

Para la integración y la verificación del soporte, se utilizó la teoría de placas delgadas de Kirchoff para analizar la interacción entre el soporte optomecánico y el dicroico. Con esta teoría se pudo calcular de manera aproximada la deformación generada en centro del dicroico debido a su peso e interactuando con las diferentes propuestas de diseño. Se obtuvo una deformación de 30.24 nm en el centro del dicroico para la propuesta seleccionada.

Debido a la geometría de las propuestas de diseño del soporte, no se pudieron tener condiciones de frontera precisas que describieran el modelo. Por esta razón, se procedió a utilizar el Análisis por Elemento Finito para obtener un comportamiento más adecuado a las condiciones de frontera reales. Se realizaron simulaciones a todos las propuestas de diseño, aplicando la fuerza de gravedad para observar la deformación sobre el dicroico. Con este método, se obtuvo una deformación de 27.77 nm en el centro del dicroico para la propuesta seleccionada.

La mejor propuesta de diseño fue la que se consideró más sencilla de manufacturar y que generara sobre el dicroico una deformación de menor magnitud. Se seleccionó la Propuesta II ya que cumplía con los límites de deformación generada sobre el dicroico y además su manufactura es sencilla. Al tener seleccionado el diseño óptimo, se procedió a manufacturarlo. Se utilizó el maquinado CNC debido a la importancia de la geometría del soporte. Para realizar las trayectorias y el código G necesarios para programar la CNC, se utilizó el software MasterCam 9©. El maquinado CNC se realizó en el Laboratorio de Diseño Mecánico de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Para validar los cálculos y las simulaciones realizadas, se realizó una prueba de fotoelasticidad en el laboratorio. Se pretendía obtener el patrón de esfuerzos generados por los resortes al momento de ejercer la fuerza sobre el dicroico. Al momento de realizar la prueba no se pudo observar ningún patrón debido a la naturaleza del vidrio utilizado. Se propone la utilización de una fuente de luz monocromática para tratar de observar las franjas. También se podría repetir la prueba utilizando un recubrimiento fotoelástico sobre el dicroico y así poder observar las franjas. Estas pruebas se realizaron en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM.

El trabajo realizado en este trabajo de tesis sirvió para evaluar y analizar el diseño del soporte. La propuesta seleccionada en este trabajo de tesis fue seleccionada y será manufacturada y colocada en el instrumento RATIR para sostener los dos primeros dicroicos del instrumento.

Debido a la inexistencia de soportes comerciales para dicroicos, el trabajo presentado en esta tesis pretende servir como base para el desarrollo de soportes para dicroicos, e incluso otros componentes ópticos destinados a la instrumentación astronómica. Utilizando la metodología aquí expuesta, se puede comprobar que el diseño cumple las características y especificaciones utilizando tanto los cálculos analíticos como las simulaciones por elemento finito. Dependiendo del material utilizado como componente óptico, la prueba de la fotoelasticidad puede ser utilizada para comprobar la simulación por elemento finito de los esfuerzos generados.

# A. Planos de Maquinado

## A.1 Soporte del dichroico

RATIR-ME-OMD-Vis-V1-000

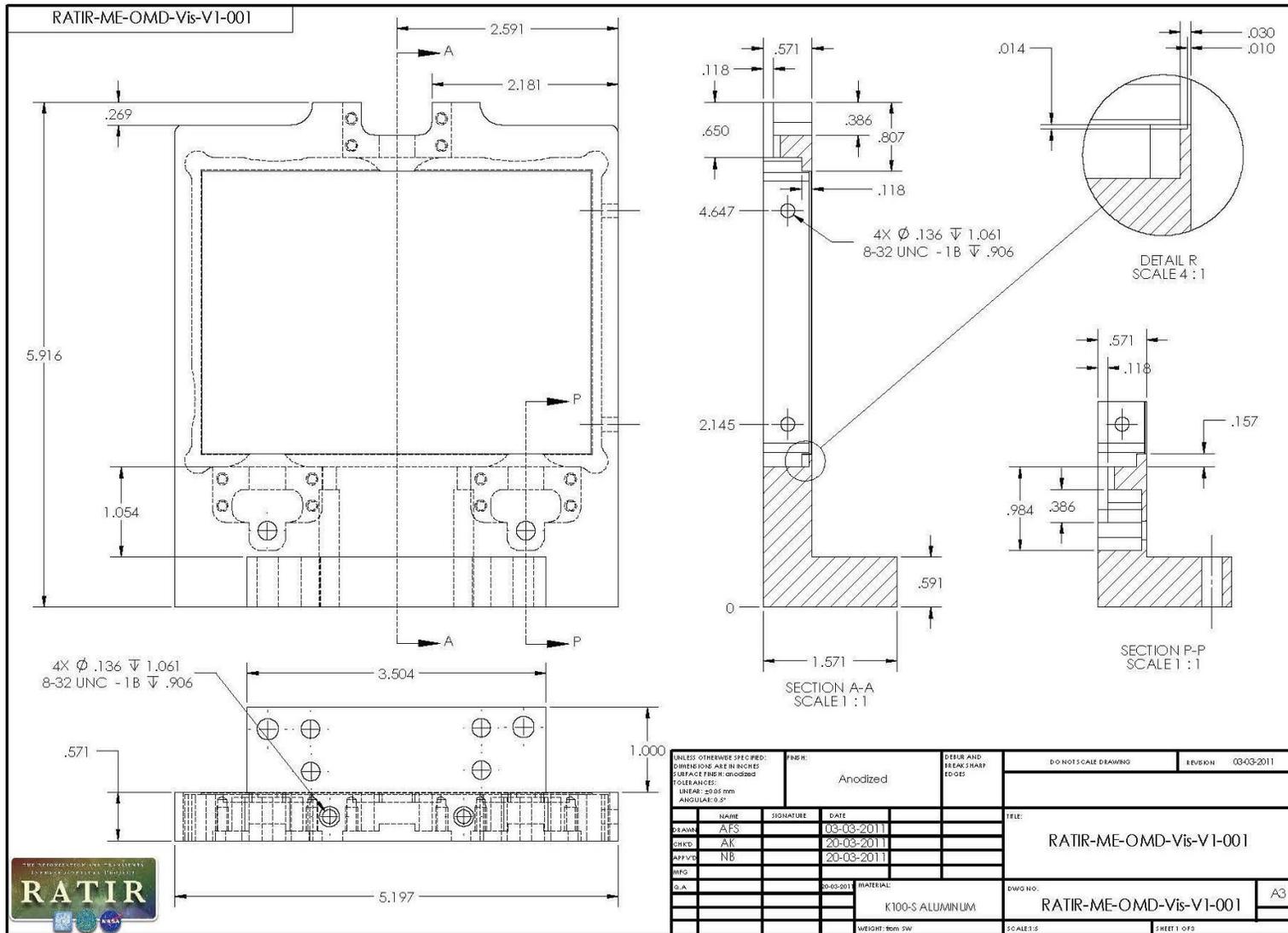
| List of Mechanical Drawings and Components (November 2010) |                         |   |                    |          |              |
|--|-------------------------|---|--------------------|----------|--------------|
| #  | Drawing                 | Component                                 | CAD File           | Qty      | Manufacturer |
| Visible OptoMechanics for the Dichroics                    |                         |   |                    |          |              |
| Vis  | RATIR-ME-OMD-Vis-V1-000 | General Assembly                          |                    |          | OSI          |
| 1  | RATIR-ME-OMD-Vis-V1-001 | Support for Dichroic Vis/IR               | Support base A v.2 | 1        | OSI          |
| 2  | RATIR-ME-OMD-Vis-V1-002 | Support for Dichroic zY/JH                | Support base B     | 1        | OSI          |
| 3  | RATIR-ME-OMD-Vis-V1-003 | Support for the Leaf Springs              | Leaf support       | 6        | OSI          |
| 4  | RATIR-ME-OMD-Vis-V1-004 | Leaf                                      | Leaf               | 6        | OSI          |
| List of Commercial Mechanical Hardware (February 2011)     |                         |   |                    |          |              |
| #  | Drawing                 | Component                                 | Part Number        | Quantity | Manufacturer |
| 5  | NA                      | Socket Head Cap Screw_A1 Std 2-56 1/4"    | 91251A077          | 12       | McMaster     |
| 6  | NA                      | Shoulder Screws Plain 2-56 3/8"           | 99154A313          | 3        | McMaster     |
| 7  | NA                      | Set Screws Oval 8-32 3/8"                 | 92765A157          | 3        | McMaster     |
| 8  | NA                      | Set Screws Tip Material Nylon 8-32 1/4"   | 94115A190          | 4        | McMaster     |
| 9  | NA                      | Set Screws Tip Material Nylon 1/4-20 3/4" | 92432A456          | 2        | McMaster     |
| 10   | NA                      | Socket Cap Screws 8-32 7/8"               | 91205A198          | 4        | McMaster     |

| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:<br>DIMENSIONS ARE IN INCHES<br>SURFACE FINISH: 0.0008"<br>TOLERANCES:<br>LINEAR: ±0.0015"<br>ANGULAR: 0.5°  |      | FINISH:<br>NA | DRILL AND<br>BREAK SHARP<br>EDGES  | DO NOT SCALE DRAWING | REVISION: 02-03-2011 |      |   |     |  |            |   |    |  |            |   |    |  |            |                                   |  |
|---|------|---------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|------|---|-----|--|------------|---|----|--|------------|---|----|--|------------|-----------------------------------|--|
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>NO.</th> <th>NAME</th> <th>SIGNATURE</th> <th>DATE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>AFS</td> <td></td> <td>02-03-2011</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>AK</td> <td></td> <td>20-03-2011</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>NE</td> <td></td> <td>20-03-2011</td> </tr> </tbody> </table> |      |               | NO.                                | NAME                 | SIGNATURE            | DATE | 1 | AFS |  | 02-03-2011 | 2 | AK |  | 20-03-2011 | 3 | NE |  | 20-03-2011 | TITLE:<br>RATIR-ME-OMD-Vis-V1-000 |  |
| NO.   | NAME | SIGNATURE     | DATE                               |                      |                      |      |   |     |  |            |   |    |  |            |   |    |  |            |                                   |  |
| 1   | AFS  |               | 02-03-2011                         |                      |                      |      |   |     |  |            |   |    |  |            |   |    |  |            |                                   |  |
| 2   | AK   |               | 20-03-2011                         |                      |                      |      |   |     |  |            |   |    |  |            |   |    |  |            |                                   |  |
| 3   | NE   |               | 20-03-2011                         |                      |                      |      |   |     |  |            |   |    |  |            |   |    |  |            |                                   |  |
| MATERIAL:<br>K100-S ALUMINUM  |      |               | DWG NO:<br>RATIR-ME-OMD-Vis-V1-000 | A3                   |                      |      |   |     |  |            |   |    |  |            |   |    |  |            |                                   |  |
| WEIGHT: 80m 2W  |      |               | SCALE: 1:1                         | SHEET 1 OF 1         |                      |      |   |     |  |            |   |    |  |            |   |    |  |            |                                   |  |

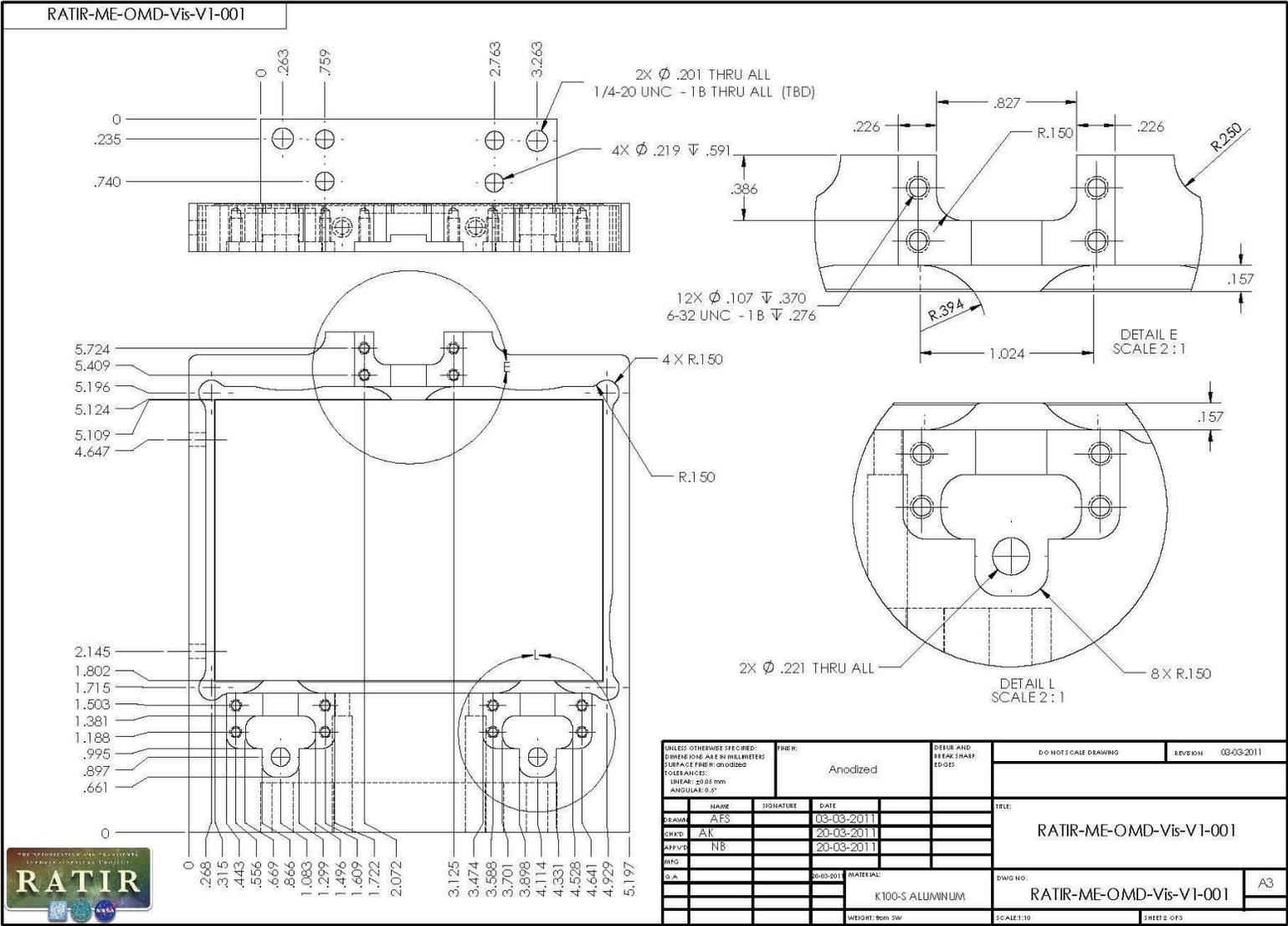
**RATIR** THE REPRODUCTION AND DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED.

Note: the general optomechanical assembly of the supports (see 3-7) for the dichroics is the same for both on the visible side.

A.2 Base del soporte

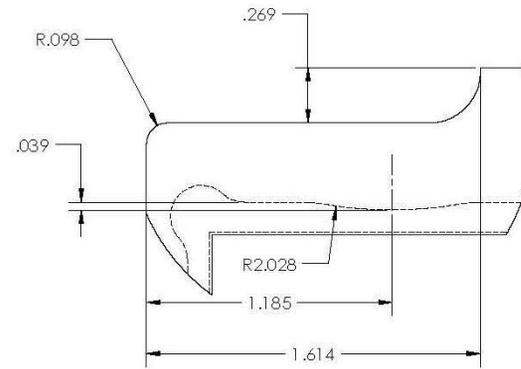
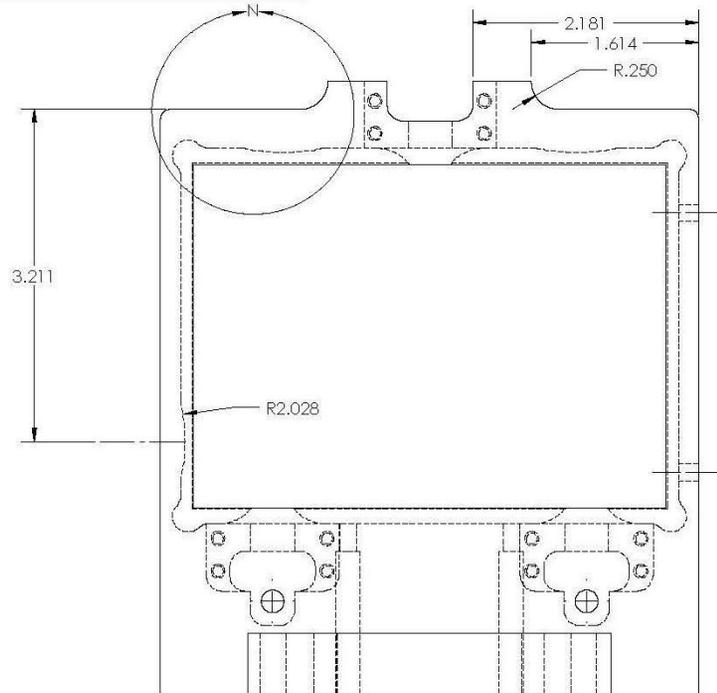


# A.3 Base del soporte

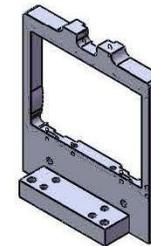


## **A.4 Base del soporte**

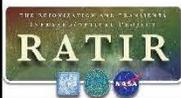
RATIR-ME-OMD-Vis-V1-001



DETAIL N  
SCALE 2:1

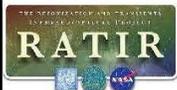
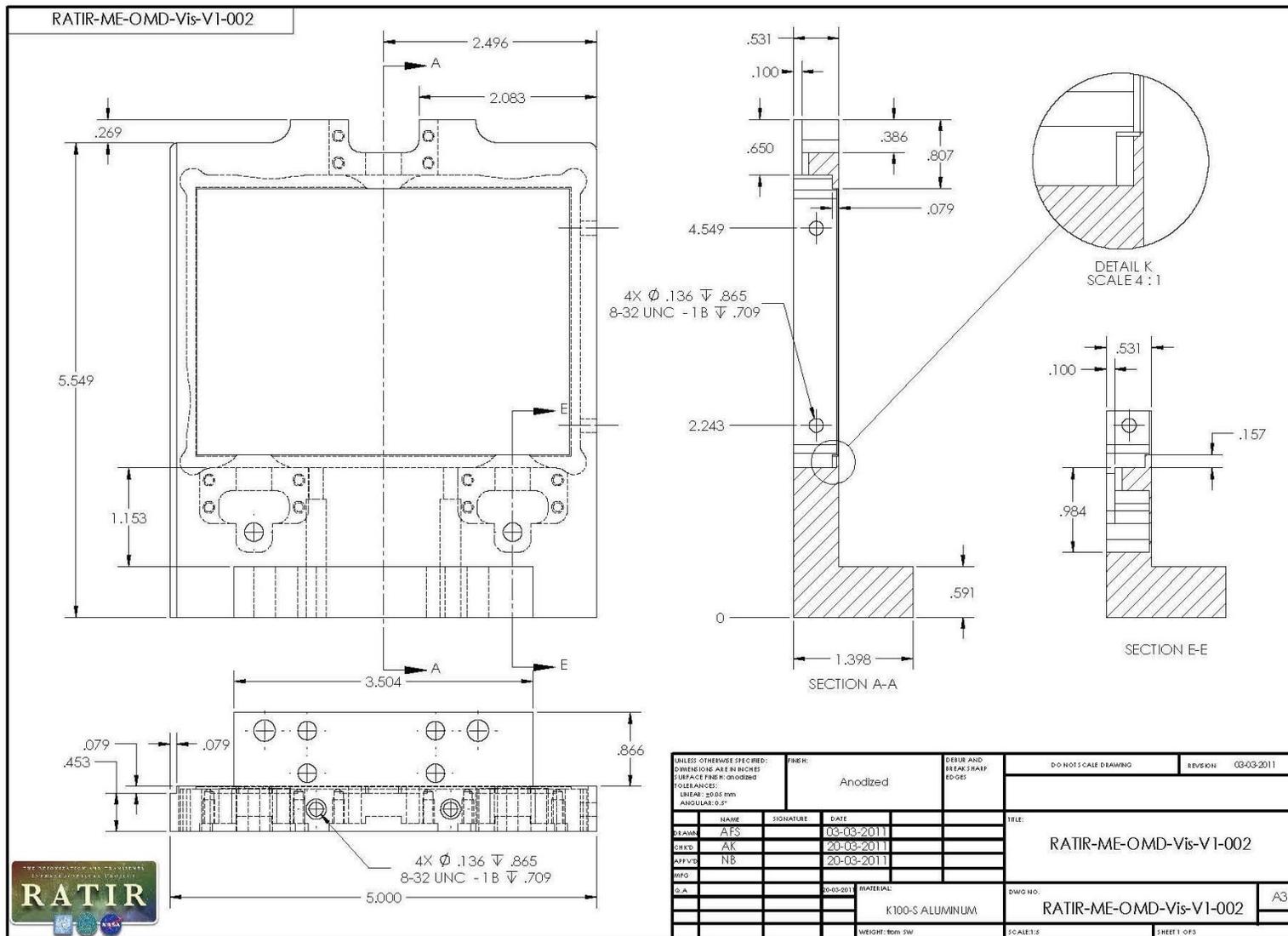


Isometric View  
Scale 1:3



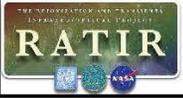
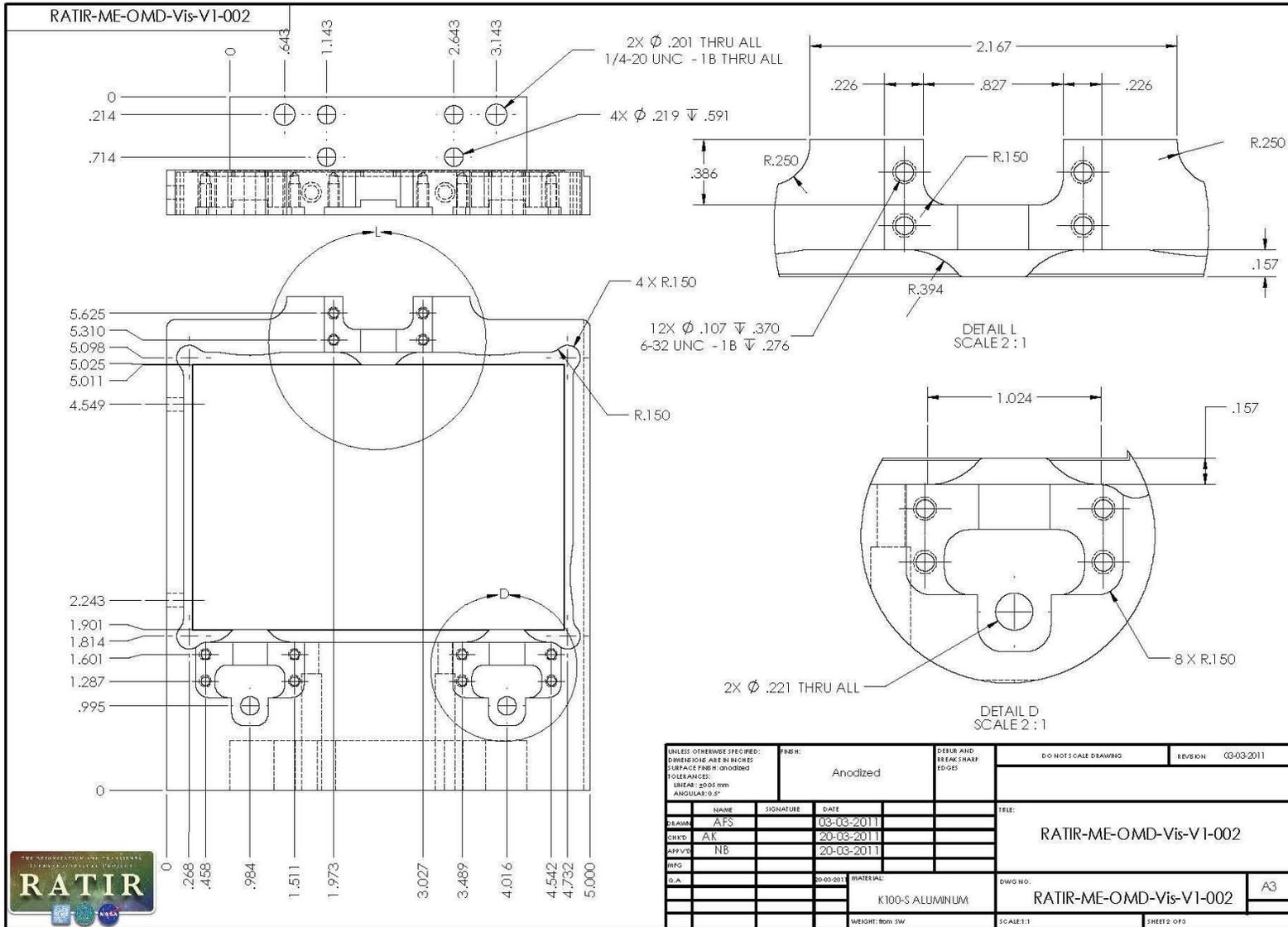
|  |           |                     |                  |                                    |  |                                   |  |                         |  |
|--|-----------|---------------------|------------------|------------------------------------|--|-----------------------------------|--|-------------------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:<br>DIMENSIONS ARE IN INCHES<br>SURFACE FINISH: ANODIZED<br>TOLERANCES:<br>LINEAR: .005 mm<br>ANGULAR: 0.5° |           | FINISH:<br>Anodized |                  | DIESEL AND<br>BREAK SHARP<br>EDGES |  | DO NOT SCALE DRAWING              |  | REVISION: 03-03-2011    |  |
| DESIGNER:  | NAME: AFS | SIGNATURE:          | DATE: 03-03-2011 |                                    |  | TITLE:<br>RATIR-ME-OMD-Vis-V1-001 |  |                         |  |
| CHECKED:   | NAME: AK  | SIGNATURE:          | DATE: 20-03-2011 |                                    |  |                                   |  |                         |  |
| APPROVED:  | NAME: NB  | SIGNATURE:          | DATE: 20-03-2011 |                                    |  |                                   |  |                         |  |
| MFG:   |           |                     |                  |                                    |  |                                   |  |                         |  |
| DRAWN:   |           |                     | 03-03-2011       | MATERIAL:<br>K100-S ALUMINUM       |  | DWG NO.:                          |  | RATIR-ME-OMD-Vis-V1-001 |  |
|  |           |                     |                  | WEIGHT: 80m SW                     |  | SCALE: 1:1                        |  | SHEET 3 OF 3            |  |

A.5 Base del soporte

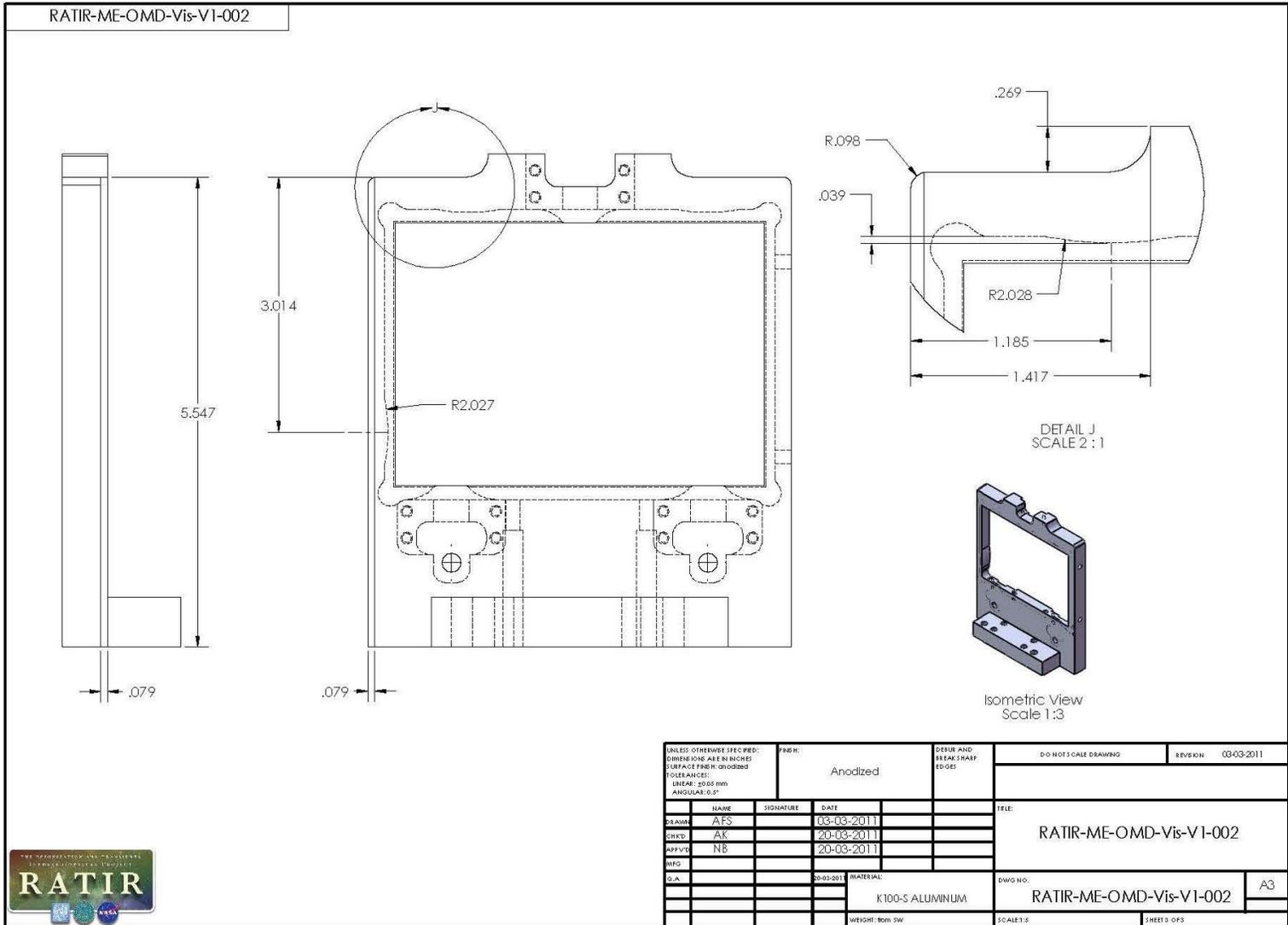


|  |            |                     |                                   |                      |                         |
|--|------------|---------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------------------|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:<br>DIMENSIONS ARE IN INCHES<br>SURFACE FINISH: ANODIZED<br>TOLERANCES:<br>LINEAR: .015 mm<br>ANGULAR: 0.5° |            | FINISH:<br>Anodized | DEBUR AND<br>BREAK SHARP<br>EDGES | DO NOT SCALE DRAWING | REVISION: 03-03-2011    |
| DRAWN:<br>AFS  | SIGNATURE: | DATE:<br>03-03-2011 | TITLE:<br>RATIR-ME-OMD-Vis-V1-002 |                      |                         |
| CHKD:<br>AK  |            | DATE:<br>20-03-2011 |                                   |                      |                         |
| APP'VD:<br>NB  |            | DATE:<br>20-03-2011 |                                   |                      |                         |
| MFG:   |            |                     |                                   |                      |                         |
| D.A.:  |            | 20-03-2011          | MATERIAL:<br>K100-S ALUMINUM      | DWG NO.:             | RATIR-ME-OMD-Vis-V1-002 |
|  |            |                     | WEIGHT: 308.25W                   | SCALE: 1:1           | SHEET 1 OF 3            |

## **A.6 Base del soporte**



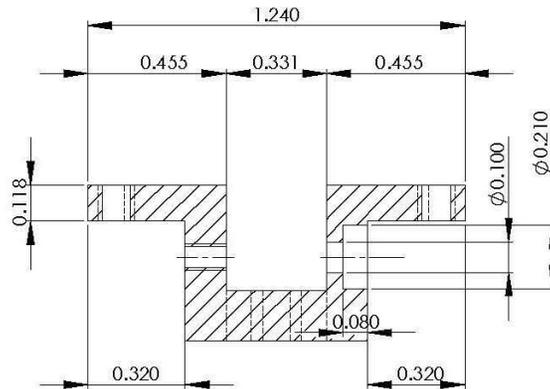
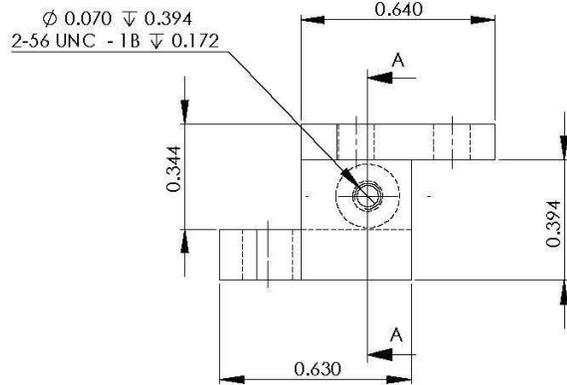
**A.7 Base del soporte**



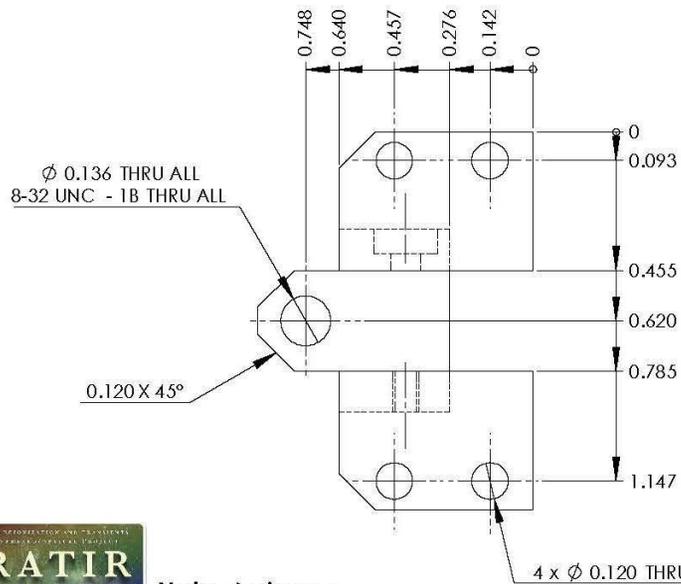


# A.8 Base del resorte

RATIR-ME-OMD-Vis-V1-003

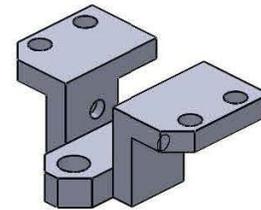


SECTION A-A  
SCALE 3:1

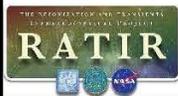


Note: 6 pieces.

4 x Ø 0.120 THRU ALL



Isometric View  
Scale 2:1



|   |            |                              |   |                      |                      |
|---|------------|------------------------------|---|----------------------|----------------------|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:<br>DIMENSIONS ARE IN INCHES<br>SURFACE FINISH: ANODIZED<br>TOLERANCES:<br>LINEAR: ±0.05 mm<br>ANGULAR: 0.5° |            | FINISH:<br><br>Anodized      | DEBUR AND<br>BREAK SHARP<br>EDGES                   | DO NOT SCALE DRAWING | REVISION: 03-03-2011 |
| DRAWN: AFS  | SIGNATURE: | DATE: 03-03-2011             | TITLE:<br>RATIR-ME-OMD-Vis-V1-003<br>(Leaf Support) |                      |                      |
| CHKD: AK  |            | DATE: 20-03-2011             |   |                      |                      |
| APP'VD: NB  |            | DATE: 20-03-2011             |   |                      |                      |
| INFO:   |            |                              |   |                      |                      |
| Q-A:  | 00-00-2011 | MATERIAL:<br>K100-S ALUMINUM | DWG NO:<br>RATIR-ME-OMD-Vis-V1-003                  | A3                   |                      |
|   |            | WEIGHT: From DWG             | SCALE: 1:1  | SHEET 1 OF 1         |                      |

A.9 Resorte

RATIR-ME-OMD-Vis-V1-004

1.024

0.157

0.157

0.094 THRU

0.492

0.098

0.098

0.323

0.236

Isometric View  
Scale 3:1

|   |            |                               |                                     |                         |                      |
|---|------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:<br>DIMENSIONS ARE IN INCHES<br>SURFACE FINISH: 32/100/320<br>TOLERANCES:<br>LINEAR: 20.05 mm<br>ANGULAR: 0.5° |            | FIRM:<br>Nylamid GSM Blue     | DEBUR AND<br>BREAK SHARP<br>EDGES   | D/D NOTES SCALE DRAWING | REVISION: 03-03-2011 |
| DRAWN: AFS  | SIGNATURE: | DATE: 03-03-2011              | FILE: RATIR-ME-OMD-Vis-V1-004       |                         |                      |
| CHK'D: AK   |            | DATE: 20-03-2011              |                                     |                         |                      |
| APPROV'D: NB  |            | DATE: 20-03-2011              |                                     |                         |                      |
| INFO:   |            |                               |                                     |                         |                      |
| Q.A.:   | 20-03-2011 | MATERIAL:<br>Nylamid GSM Blue | DWG NO.:<br>RATIR-ME-OMD-Vis-V1-004 | A3                      |                      |
|   |            | WEIGHT: 0.0015W               | SCALE: 1:1                          | SHEET 1 OF 1            |                      |

**Note: 6 pieces.**

# A.10 Dimensiones del dichroico

90

120

10

|   |  |                       |                          |                               |
|---|--|-----------------------|--------------------------|-------------------------------|
| INSTRUCCIONES PARA EL LECTOR:<br>DIMENSIONES EN MILIMETROS<br>SERVICIO TÉCNICO: 060000000<br>TOLERANCIA: ± 0.05mm<br>ANGULO MÁXIMO: 15° |  | FINISH<br>Anodized    | DRAWING NO.<br>000000000 | REVISION<br>03-28-2011        |
| DRAWN<br>RGM  |  | SIGNATURE             | DATE<br>03-28-2011       | TITLE:<br>Dichroic Dimensions |
| CHECKED   |  | MATERIAL<br>Vidio     | PART NO.                 |                               |
| APPROVED  |  | MANUFACTURER<br>Vidio | SCALE                    |                               |
| ENG.  |  | MADE IN               | SHEET 1 OF 1             |                               |
| D.A.  |  | MODEL                 | A3                       |                               |

## B. Código G

*Nota: El código aquí mostrado no es el código completo que se generó para cada maquinado. Solamente se presenta el primer ciclo completo a la primera profundidad. El mismo ciclo se repite hasta alcanzar la profundidad especificada.*

### B.1 Contorno Interior

```
%MPF100
N0000 G53 G54 G71 G94 G90 S1000
N0100 G00 X0. Y0. Z10. T12 D12 M03
N0102 G00 Z6.
N0104 G00 X-59.415 Y36.
N0106 G01 Z-1.5 F100.
N0108 G01 Y-52. F200.
N0110 G03 X-59. Y-52.415 I0.415 J0.
N0112 G01 X-46.1573
N0114 G02 X-36. Y-51.415 I10.157 J-51.085
N0116 G02 X-25.8427 Y-52.415 I0. J-52.085
N0118 G01 X-6.485
N0120 G01 Y-50.
N0122 G02 X-4.9 Y-48.415 I1.585 J0.
N0124 G01 X5.1
N0126 G02 X6.685 Y-50. I0. J-1.585
N0128 G01 Y-52.415
N0130 G01 X25.6462
N0132 G02 X35.9019 Y-51.4149 I10.256 J-52.085
N0134 G02 X46.1577 Y-52.415 I0. J-53.085
N0136 G01 X59.
N0138 G03 X59.415 Y-52. I0. J0.415
N0140 G01 Y7.6462
N0142 G02 X58.4149 Y17.901 I52.075 J10.255
N0144 G02 X59.415 Y28.1558 I53.075 J0.
N0146 G01 Y36.
N0148 G03 X59. Y36.415 I-0.415 J0.
N0150 G01 X45.085
N0152 G01 Y34.
N0154 G02 X43.5 Y32.415 I-1.585 J0.
N0156 G01 X33.5
N0158 G02 X31.915 Y34. I0. J1.585
N0160 G01 Y36.415
N0162 G01 X-31.915
N0164 G01 Y34.
N0166 G02 X-33.5 Y32.415 I-1.585 J0.
N0168 G01 X-43.5
N0170 G02 X-45.085 Y34. I0. J1.585
N0172 G01 Y36.415
N0174 G01 X-59.
N0176 G03 X-59.415 Y36. I0. J-0.415
N0826 G00 Z10.
N0828 M30
```

### B.2 Contorno exterior

```
%MPF300
N0000 G53 G54 G71 G94 G90 S1200
N0100 G00 X0. Y0. Z0. T05 D05 M03
N0102 G00 Z15.
```

N0104 G00 X-70.8602 Y-66.0395  
 N0106 G00 Z6.  
 N0108 G01 Z-1. F50.  
 N0110 G01 X-61. F100.  
 N0112 G01 X-27.3736  
 N0114 G03 X-20.0165 Y-72.8395 I7.357 J0.58  
 N0116 G01 X20.0165  
 N0118 G03 X27.3736 Y-66.0395 I0. J7.38  
 N0120 G01 X61.  
 N0122 G01 X69.2187  
 N0124 G00 Z15.  
 N0126 G00 X-70.8602  
 N0128 G00 Z9.  
 N0432 G00 Z15.  
 N0434 M30

### B.3 Caja de 14.5 mm de profundidad

%MPF400  
 N0000 G53 G54 G71 G94 G90 S1200  
 N0100 G00 X0. Y0. Z0. T05 D05 M03  
 N0102 G00 Z15.  
 N0104 G00 X-46.37 Y47.3301  
 N0106 G00 Z6.  
 N0108 G01 Z-.9688 F50.  
 N0110 G01 X-30.63 F100.  
 N0112 G01 Y50.59  
 N0114 G01 X-46.37  
 N0116 G01 Y51.87  
 N0118 G01 X-41.4289  
 N0120 G01 Y53.85  
 N0122 G01 X-35.6889  
 N0124 G01 Y57.1099  
 N0126 G01 X-41.4289  
 N0128 G01 Y60.3699  
 N0130 G01 X-35.6889  
 N0132 G00 Z15.  
 N0134 G00 X-46.37 Y47.3301  
 N0136 G00 Z9.0313  
 N0584 G00 X-35.4389 Y60.62  
 N0552 G00 Z15.  
 N0554 M30

### B.4 Caja de 3 mm de profundidad

%MPF600  
 N0000 G53 G54 G71 G94 G90 S1200  
 N0100 G00 X0. Y0. Z20. T05 D05 M03  
 N0102 G00 Z15.  
 N0104 G00 X-52.12 Y40.6301  
 N0106 G00 Z6.  
 N0108 G01 Z-1. F50.  
 N0110 G01 X-46.43 F100.  
 N0112 G01 Y42.07  
 N0114 G01 X-51.63  
 N0116 G01 Y43.44  
 N0118 G01 X-52.12  
 N0120 G01 Y46.25  
 N0122 G01 X-51.63  
 N0124 G01 Y49.06

N0126 G01 X-52.12  
 N0128 G01 Y51.8699  
 N0130 G01 X-51.63  
 N0132 G00 Z15.  
 N0134 G00 X-52.12 Y40.6301  
 N0136 G00 Z9.  
 N0138 G01 Z-2. F50.  
 N0140 G01 X-46.43 F100.  
 N0142 G01 Y42.07  
 N0144 G01 X-51.63  
 N0146 G01 Y43.44  
 N0148 G01 X-52.12  
 N0150 G01 Y46.25  
 N0152 G01 X-51.63  
 N0154 G01 Y49.06  
 N0156 G01 X-52.12  
 N0158 G01 Y51.8699  
 N0160 G01 X-51.63  
 N0162 G00 Z15.  
 N0164 G00 X-52.12 Y40.6301  
 N0166 G00 Z8.  
 N0168 G01 Z-3. F50.  
 N0170 G01 X-46.43 F100.  
 N0172 G01 Y42.07  
 N0174 G01 X-51.63  
 N0176 G01 Y43.44  
 N0178 G01 X-52.12  
 N0180 G01 Y46.25  
 N0182 G01 X-51.63  
 N0184 G01 Y49.06  
 N0186 G01 X-52.12  
 N0188 G01 Y51.8699  
 N0190 G01 X-51.63  
 N0192 G00 Z15.  
 N0194 G00 X-52.37 Y40.38  
 N0196 G00 Z10.  
 N0894 G00 Z15.  
 N0896 M30

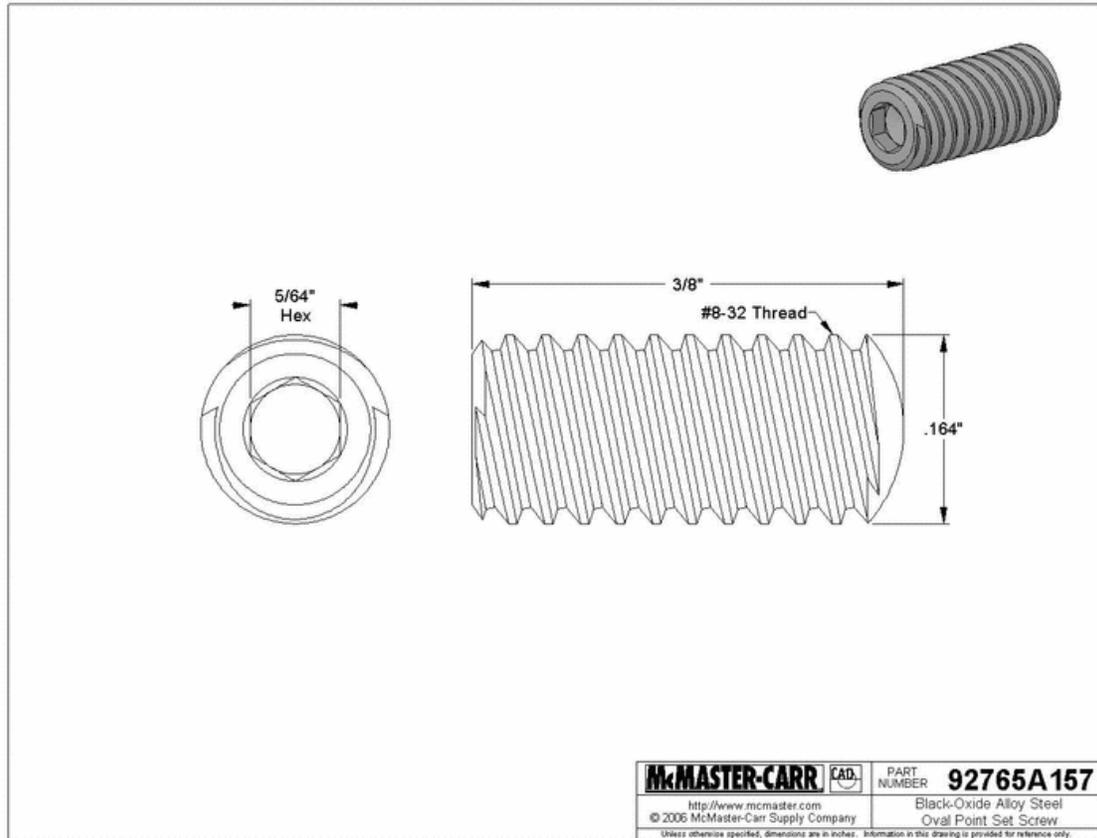
## B.5 Caja de 5 mm de profundidad

%MPF500

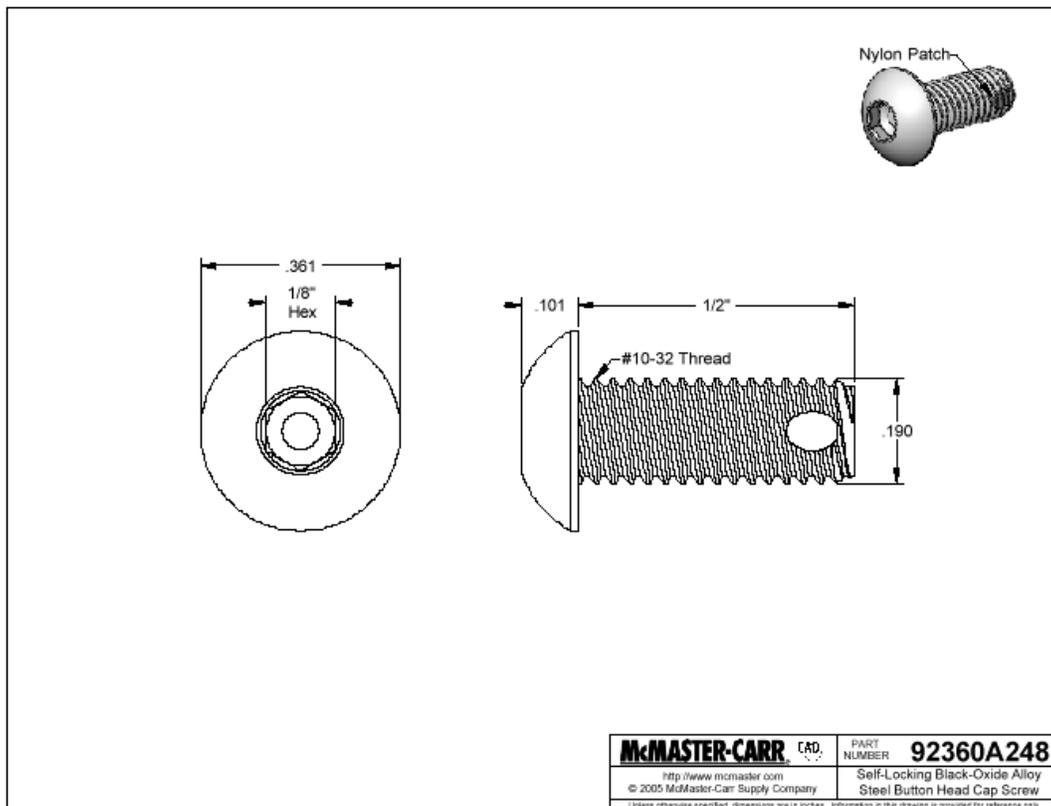
N0000 G53 G54 G71 G94 G90 S1200  
 N0100 G00 X0. Y0. Z15. T05 D05 M03  
 N0102 G00 Z10.  
 N0104 G00 X-41.17 Y40.6301  
 N0106 G00 Z6.  
 N0108 G01 Z-1. F50.  
 N0110 G01 X-35.83 F100.  
 N0112 G01 Y42.0699  
 N0114 G01 X-41.17  
 N0116 G00 Z15.  
 N0118 G00 Y40.6301  
 N0120 G00 Z9.  
 N0552 G00 Z15.  
 N0554 M30

## C. Dimensiones de tornillos

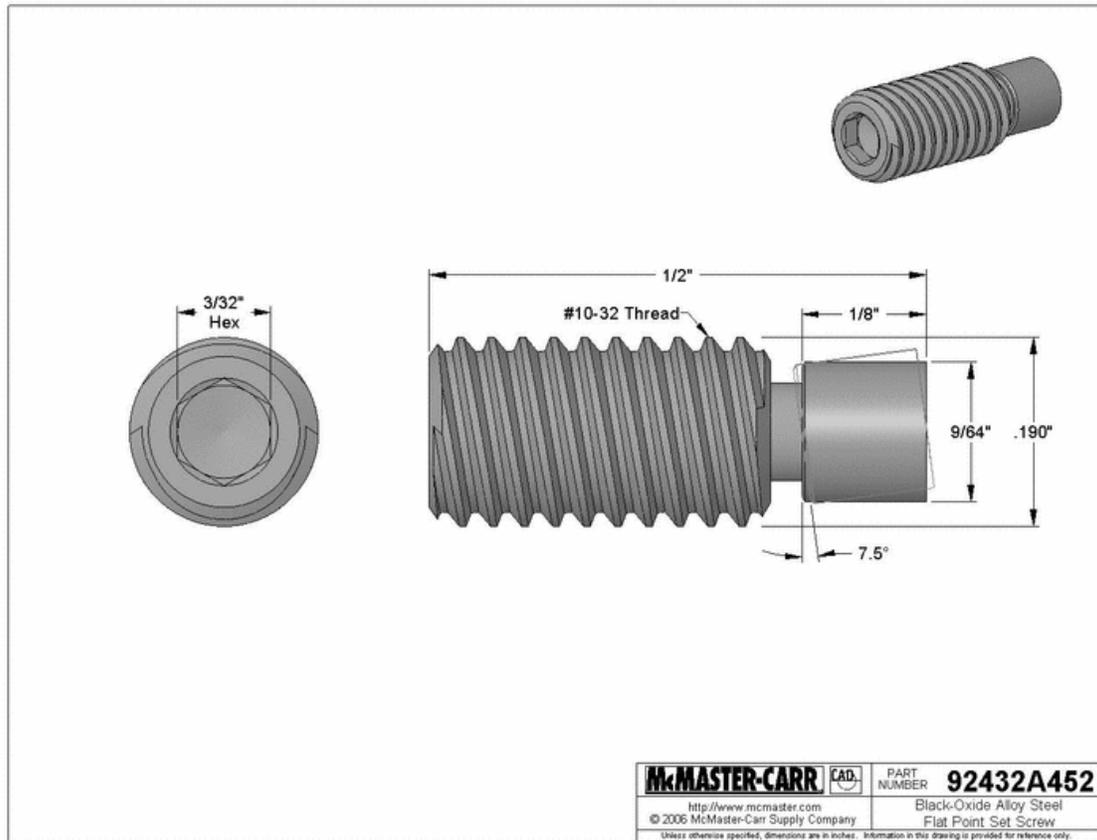
### C.1 Tornillo 9276A157



## C.2 Tornillo 92360A248



### C.3 Tornillo 92432A452



## C.4 Tornillo 99154A313

