



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de elementos finitos de
componentes optomecánicos para
modelar expansiones térmicas de
instrumentos astronómicos**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

José Ruben Chan Campos

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Alejandro Farah Simón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025

Agradecimientos

A mi papá José del Carmen y a mi mamá María Xochilt por darme todo su cariño, amor, aprendizajes y apoyo incondicional en todo momento. Son la principal razón por la cual nunca me doy por vencido.

A mis hermanos, Ana Cristina, Isela y José del Carmen por sus consejos, amor, su apoyo y nunca dejarme solo. Nosotros cuatro unidos somos la fuerza.

A mis perrhijos Apolo Chan y Waffle Chan por su amor y su perseverancia, por comprender aquellas veces que no pude sacarlos a pasear. Ahora podré pasar mucho más tiempo con ellos.

A mis sobrinos Max y Jojo por sus muestras de amor y sus enseñanzas.

A mi abuelita Consuelo García por siempre aconsejarme, darme su amor incondicional y motivación brindada para seguir adelante.

A mis tíos, tías y primos por motivarme a nunca rendirme.

A mis amigos por brindarme su apoyo y nunca dejar de creer en mí.

A la familia Chan y la familia Campos.

A mis profesores de la Facultad, por ser una fuente de inspiración y motivación.

A mi tutor de tesis Alejandro Farah por sus consejos, su comprensión, guía y por siempre estar dispuesto a brindarme su conocimiento. Es una aspiración profesional para mí a quien le tengo el más inmenso respeto y aprecio.

A mi alma mater la Universidad Nacional Autónoma de México, la Facultad de Ingeniería y el Instituto de Astronomía por brindarme la oportunidad de estudiar y realizar este documento en sus instalaciones y que contribuyen a mi desarrollo personal y profesional.

Finalmente pero no menos importante, quiero agradecer y mencionar a mi mentor Braian Tracy. Gracias a sus enseñanzas descubrí y aprendí los pasos que se deben seguir para alcanzar y tener éxito. Usted me mostró que todo sueño en la vida es posible. Espero algún día conocerlo en persona y que podamos tomar un café juntos.

*«Whatever the mind of man can conceive and believe, it can achieve. Thoughts are things!
Strong, deeply rooted desire is the starting point of all achievement»*

Napoleon Hill

Índice general

Agradecimientos	III
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos particulares	2
2. Conceptos fundamentales	3
2.1. Análisis de elementos finitos	3
2.1.1. Contexto histórico	3
2.1.2. Fundamentos básicos	5
2.1.2.1. Ecuación fundamental del elemento finito	5
2.2. Transferencia de calor	9
2.2.1. Panorama histórico	9
2.2.2. Formas de transferencia de calor	10
2.2.2.1. Conducción	10
2.2.2.2. Convección	11
2.3. Coeficiente de expansión térmica	12
2.4. Componentes optomecánicos	14
2.4.1. Conceptualización	14
2.5. Instrumentos astronómicos	15
2.5.1. Escenario histórico y su conceptualización	15
3. FEA en las expansiones térmicas	17
3.1. El espectrógrafo ESOPO	17
3.1.1. Aspectos generales	18
3.1.2. Objetivo de la simulación empleada	20
3.1.3. Uso de software para el análisis térmico	20
3.2. Barril de la cámara de OSIRIS	21
3.2.1. Descripción general	21
3.2.2. Observaciones	23
3.2.3. Uso del elemento finito	23
4. Componentes optomecánicos analizados	25
4.1. Especificaciones y requerimientos	25
4.2. Descripción de los modelos optomecánicos	25
4.3. Modificaciones realizadas en los modelos	26

4.3.1.	Cámara roja	27
4.3.1.1.	Cámara roja optimizada	28
4.3.2.	Cámara azul	29
4.3.2.1.	Cámara azul optimizada	30
4.4.	Importancia de la verificación de los subensambles	30
5.	Implementación de los análisis	31
5.1.	Cámara roja	31
5.1.1.	Modelo CAD simplificado de la cámara roja	31
5.1.2.	Descripción del análisis	32
5.1.2.1.	Descripción de las variables de interés	32
5.1.3.	Condiciones de frontera	33
5.1.4.	Mallado	34
5.2.	Cámara roja optimizada	35
5.2.1.	Modelo CAD simplificado de la cámara roja optimizada	35
5.2.2.	Descripción del análisis	35
5.2.2.1.	Descripción de las variables de interés	36
5.2.3.	Condiciones de frontera	37
5.2.4.	Mallado	37
5.3.	Cámara azul	38
5.3.1.	Modelo CAD simplificado de la cámara azul optimizada	38
5.3.2.	Descripción del análisis	39
5.3.2.1.	Descripción de las variables de interés	39
5.3.3.	Condiciones de frontera	40
5.3.4.	Mallado	41
5.4.	Cámara azul optimizada	42
5.4.1.	Modelo CAD simplificado de la cámara azul optimizada	42
5.4.2.	Descripción del análisis	42
5.4.2.1.	Descripción de las variables de interés	43
5.4.3.	Condiciones de frontera	44
5.4.4.	Mallado	44
6.	Resultados y conclusiones	45
6.1.	Resultados	45
6.1.1.	Deformación total cámara roja	45
6.1.2.	Deformación total cámara roja optimizada	46
6.1.3.	Deformación total cámara azul	47
6.1.4.	Deformación total cámara azul optimizada	47
6.2.	Análisis de resultados	48
6.2.1.	Cámara roja y cámara roja optimizada	48
6.2.2.	Cámara azul y cámara azul optimizada	49
6.3.	Conclusiones	51
	Apéndice A. Tablas de propiedades de los materiales	55
	Bibliografía	66

1 Introducción

A lo largo de la historia de la humanidad, desde el ser humano evolutivo hasta el ser humano que conocemos actualmente, se ha buscado la simplificación o facilidad de las cosas. El ser humano prehistórico en sus primeras pisadas cazaba con las manos, al ser este un método poco convincente, empezaron a utilizar y desarrollar herramientas para facilitar esta actividad. Como se puede apreciar no hay mucha diferencia entre nosotros y el ser humano prehistórico. Debido a que siempre buscamos la forma de facilitar nuestras actividades o ahorrar recursos económicos. La evolución del ser humano siempre estuvo de la mano con la evolución de la tecnología. Anteriormente, los instrumentos creados eran sobrediseñados para tener una capacidad o resistencia mayor de la necesaria de su propósito, lo que ocasionaba utilizar más recursos naturales siendo estos sobreexplotados debido al poco conocimiento y herramientas en esa época. Lo anterior va de la mano con las pruebas experimentales que se realizaban para corroborar que un instrumento u objeto funcionara. Los costos para este tipo de procedimientos eran exageradamente altos, un caso de ello son las pruebas que se realizaban a los aviones en los años 50. Actualmente, gracias a los avances de la tecnología podemos predecir con facilidad un eclipse, detectar enfermedades, comunicarnos con facilidad, etc., como se mencionó, las pruebas realizadas eran experimentales. Gracias al avance de la tecnología estas pruebas se realizan mediante software para poder evaluar su impacto, rendimiento, estabilidad estructural, etc., por ello, en este documento se utilizó el método de los elementos finitos con la finalidad de analizar la deformación total ocasionada por los cambios de temperatura de componentes optomecánicos para modelar sus expansiones térmicas y evaluar su impacto en el sistema.

En el título de este documento se mencionó que estos componentes pertenecen a instrumentos astronómicos, esto es debido a que los componentes optomecánicos analizados pertenecen al espectrógrafo óptico de mediana y baja resolución (ESOPO). Este es un instrumento diseñado y construido por el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México para el Telescopio de 2.1 metros del Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir. En el Capítulo 3 este instrumento se describe con mayor detalle su descripción general, su finalidad, sus aspectos generales así como las simulaciones realizadas utilizando la herramienta del método de elementos finitos, ya que durante el desarrollo de ese proyecto, esa herramienta fue de gran ayuda para el diseño y manufactura de los componentes que lo conforman.

Además de lo mencionado anteriormente, este documento surgió para solventar una problemática. Esta surge a partir de que los componentes cámara roja y cámara azul que pertenecen a la estructura de ESOPO no alcanzan los desplazamientos requeridos debido al cambio de temperatura. Por ello, se recurrió a la herramienta de métodos finitos para modelar los elementos, simular un entorno realista y aplicar las variables de interés para conocer y evaluar su impacto, comportamiento y estabilidad en el sistema.

Este documento esta conformado por seis capítulos que a continuación se describen tomando en cuenta su finalidad:

En el Capítulo 1 se describe de forma puntual lo realizado en este documento, la problemática resuelta y los objetivos del mismo, divididos en el objetivo general y los objetivos particulares.

En el Capítulo 2 se presentan de forma general el contexto histórico y los fundamentos básicos de algunos de los conocimientos previos necesarios para comprender la teoría involucrada en el uso de los elementos finitos como herramienta de simulación y análisis.

Posteriormente, en el Capítulo 3 se menciona los proyectos que han utilizado esta herramienta como apoyo para el análisis en el comportamiento de sistemas o componentes debido a las expansiones térmicas. Además de que se describe el espectrógrafo óptico de mediana y baja resolución ESOPO.

En el Capítulo 4 se presentan los procedimientos realizados previamente a la simulación efectuada por la implementación térmica y la fuerza de acción de la gravedad de los componentes optomecánicos analizados. También se presentan las especificaciones, requerimientos, las descripciones de los elementos por los cuales están conformados los modelos y los materiales seleccionados para cada elemento de los componentes.

El Capítulo 5 presenta el desarrollo efectuado previo a la obtención de resultados de la simulación. En él se muestra los análisis empleados, las condiciones de frontera y mallado de los elementos.

Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos, su análisis, alcances y las conclusiones de este documento.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

- Analizar el efecto de la expansión térmica en componentes optomecánicos de instrumentos astronómicos mediante simulaciones y análisis hechos por el método de los elementos finitos, con el fin de evaluar su impacto en el rendimiento y la estabilidad estructural del sistema.

1.1.2. Objetivos particulares

- Definir y aplicar condiciones de frontera y cargas térmicas representativas de un entorno realista.
- Comparar y analizar los resultados obtenidos con criterios de diseño y tolerancias aceptables en sistemas optomecánicos de instrumentos astronómicos.
- Modelar los componentes optomecánicos de interés por el método de elementos finitos
- Proponer recomendaciones para mitigar los efectos de la expansión térmica en los sistemas optomecánicos analizados.

2 Conceptos fundamentales

2.1. Análisis de elementos finitos

2.1.1. Contexto histórico

Cuando existe una situación que es complicada, difícil o prácticamente imposible de realizar en una sola operación, es cuando surge el proceso de subdividir todos los elementos de un sistema en componentes individuales o elementos. Esta técnica la realizamos en nuestra vida cotidiana. Un ejemplo claro es al comer. Cuando consumimos nuestros alimentos, dividimos la proteína en porciones más pequeñas para poder consumirla sin ningún problema. De la misma forma ocurre en los problemas de ingeniería cuando las limitaciones de la mente humana no puede captar el comportamiento de su entorno complejo y de sus creaciones en una sola operación. Por ello, el proceso de subdividir todos los sistemas en sus componentes individuales o “elementos”, cuyo comportamiento se entiende fácilmente, y luego reconstruir el sistema original a partir de esos componentes para estudiar su comportamiento en una forma natural. Retomando lo anterior, en la ingeniería existen situaciones en las cuales se obtienen modelos utilizando un número finito de elementos. Estos sistemas se definen como “problemas discretos”. Mientras que en otros la subdivisión continúa indefinidamente y el problema solo puede definirse utilizando funciones o expresiones matemáticas infinitesimales. Lo que conduce a ecuaciones diferenciales o enunciados equivalentes que implican un número infinito de elementos. Estos sistemas se definen como “problemas continuos” [Zienkiewicz, 2013]. Un claro ejemplo de esto es el método del agotamiento que utilizaban los antiguos griegos hace unos 2500 años, ellos sabían cómo encontrar el área de cualquier polígono dividiéndolo en triángulos y sumando las áreas de cada uno de ellos. En el caso de las superficies curvadas, inscribían y circunscribían polígonos para encontrar el área de la geometría como se muestra en la Figura 2.1

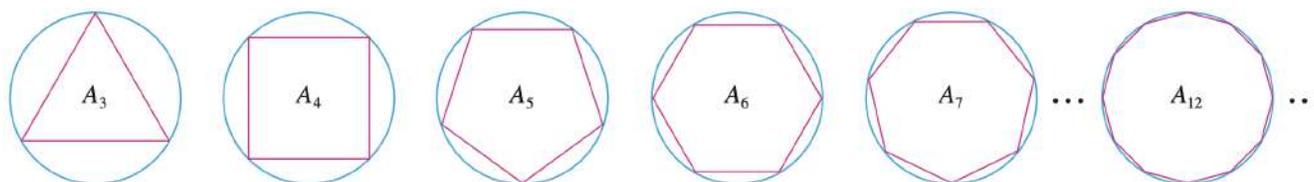


Figura 2.1: Método de agotamiento [Stewart, 2012].

A medida que se aumenta “n” el área “A” tiende a ser más precisa, de modo que si “n” tendía a infinito (problema continuo) obtendríamos el área del círculo que hoy en día calculamos con mucha facilidad, sin embargo, si nos quedamos con un número medible de “n” tendríamos un problema discreto [Stewart, 2012]. Se puede notar que, en este caso, hay un número finito de “n” en el que la variación del área no es tan relevante. Esto es un concepto que se explicará más adelante, que en

el análisis por elementos finitos se conoce como la convergencia del sistema. Los antiguos griegos tenían una idea referente al elemento finito, sin embargo, diversos autores han considerado que Arquímedes utilizó un método semejante al del elemento finito para determinar el volumen de algunos sólidos. Aunque él calculó áreas, longitudes y volúmenes de objetos geométricos, dividiéndolos en otros más sencillos y luego sumando sus contribuciones. [Ortiz, 2013]. A su vez, en 1941, Hrenikoff presentó una solución para problemas elásticos usando el “método de trabajo del marco”. Posteriormente, en 1943, Courant usó la interpolación polinomial por partes sobre subregiones triangulares para modelar problemas de torsión, sin embargo, fue hasta el periodo de 1950-1962 cuando Turner y otros autores perfeccionaron el método por rigidez directa en el cual obtuvieron matrices de rigidez para armaduras, vigas y otros elementos. No fue hasta el año 1955 cuando Argyris publica un libro sobre teoremas de energía y métodos matriciales. Esto dio los cimientos en los estudios de elemento finito. Con esto para el año 1960, por primera vez se introduce el término de elemento finito, el cual fue empleado por Clough. En esa década se tienen indicios de ingenieros trabajando con ese método para obtener soluciones aproximadas en problemas de análisis de esfuerzos, flujo de fluidos, transferencia de calor y otras áreas. El primer libro sobre elementos finitos fue publicado en 1967 por los autores Olgierd Zienkiewicz y Cheng. Hasta 1972 apareció el libro de Oden sobre continuos no lineales. [Ortiz, 2013]. Determinar el origen del método de elementos finitos es difícil debido a que muchos contribuyeron en su construcción, sin embargo, podemos describir el proceso de evolución que llevó a los conceptos que conocemos hoy en día del análisis de elementos finitos. Su historia se puede resumir como se muestra en la Figura 2.2

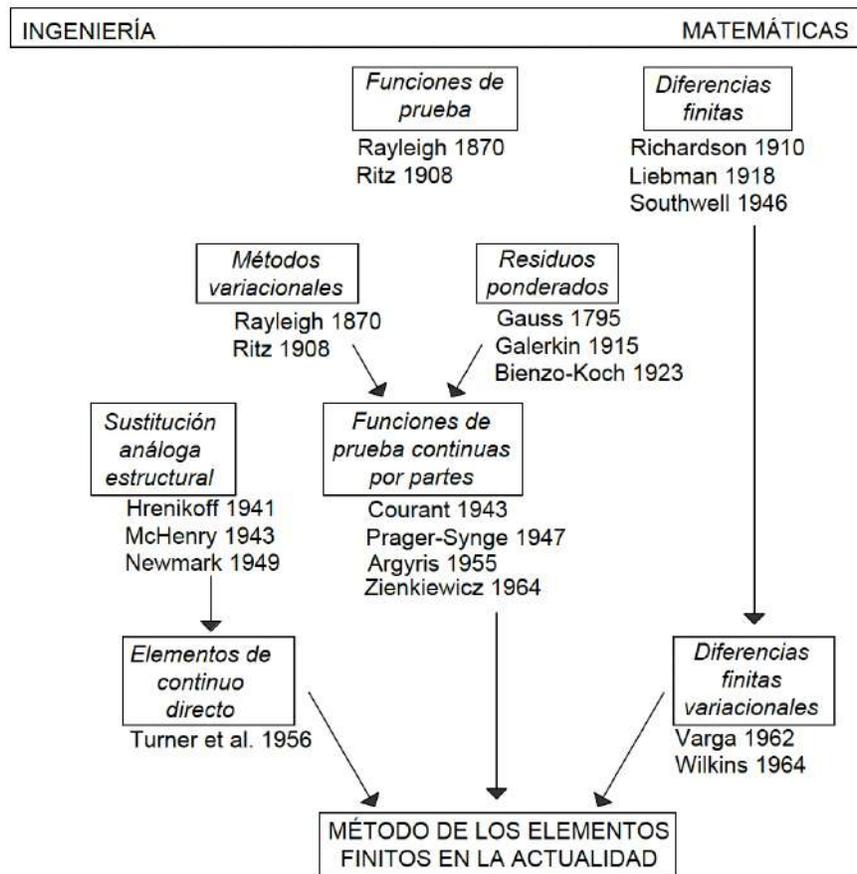


Figura 2.2: Historia del elemento finito [Zienkiewicz, 2013].

Las contribuciones anteriores conformaron lo que hoy en día se conoce como método de elementos finitos. En la actualidad con la llegada de las computadoras, existen softwares que resuelven y nos dan soluciones aproximadas de sistemas continuos transformados en sistemas discretos, como se mencionará más adelante.

2.1.2. Fundamentos básicos

De manera general, el análisis de elementos finitos (o su acrónimo FEA del inglés *Finite Element Analysis*) es una técnica numérica que consiste en dividir una estructura en un número finito de elementos. En este método todas las complejidades de los problemas, como variación de la forma, las condiciones de frontera y las cargas se mantienen tal y como están, pero las soluciones obtenidas son aproximadas. En los problemas de ingeniería se puede predecir el comportamiento de toda una estructura si se conocen algunas incógnitas básicas. Las incógnitas básicas o las variables de campo que se encuentran en dichos problemas son los desplazamientos en mecánica de sólidos, las velocidades en mecánica de fluidos, los potenciales eléctricos y magnéticos en ingeniería eléctrica y las temperaturas en problemas de flujo de calor [Bhavikatti, 2005].

En un continuo, estas incógnitas son infinitas como se mencionó, si utilizamos el procedimiento de elementos finitos, el sistema continuo se puede reducir a un sistema discreto dividiendo la solución en partes pequeñas llamadas elementos y expresando las variables de campo desconocidas en términos de funciones de aproximación supuestas dentro de cada elemento. Las funciones de aproximación se definen en términos de variables de campo de puntos específicos llamados nodos o puntos nodales. Por lo tanto, en el análisis de elementos finitos, las incógnitas son las variables de campo de los puntos nodales [Bhavikatti, 2005]. Dos nodos son adyacentes sí pertenecen al mismo elemento finito, además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se conoce como malla [Ortiz, 2013].

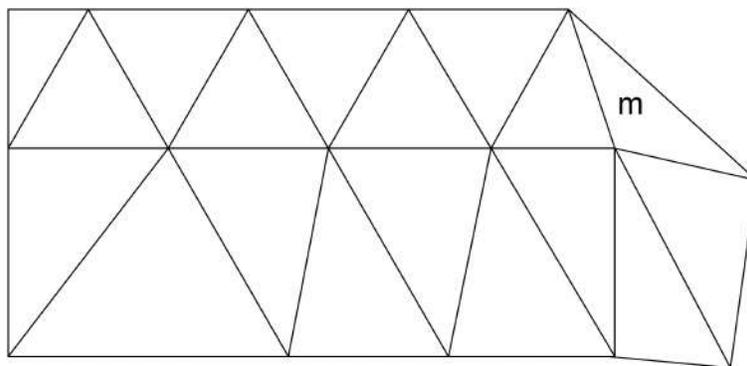


Figura 2.3: Ejemplo de mallado inspirado en [Deméneghi, 2000].

En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo de mallado de un medio continuo.

2.1.2.1. Ecuación fundamental del elemento finito

En la Figura 2.3, se dividió nuestro medio continuo en triángulos de manera ilustrativa. Esto debido a que nos interesa llegar a la *Ecuación Fundamental del Elemento Finito* la cual es utilizada por los diferentes softwares comerciales de elemento finito que existen.

Imaginemos un caso particular de un sistema del cual conocemos sus características. Supongamos que a este sistema se le aplican fuerzas externas en los nodos de los triángulos sin generar momentos. Esto ocasionaría que el elemento se deforme y se presenten desplazamientos en dichos vértices. Si aislamos el "triángulo m" de la Figura 2.3 y asociado con los nodos i, j y k , las fuerzas que actúan en ellos están definidas de manera única por los desplazamientos de estos nodos y su deformación inicial. Lo anterior nos indica que las fuerzas en los vértices están en función de los desplazamientos y las deformaciones (caso elástico lineal).

Las fuerzas y los desplazamientos correspondientes están definidos por el sistema de referencia mostrado en la Figura 2.4.

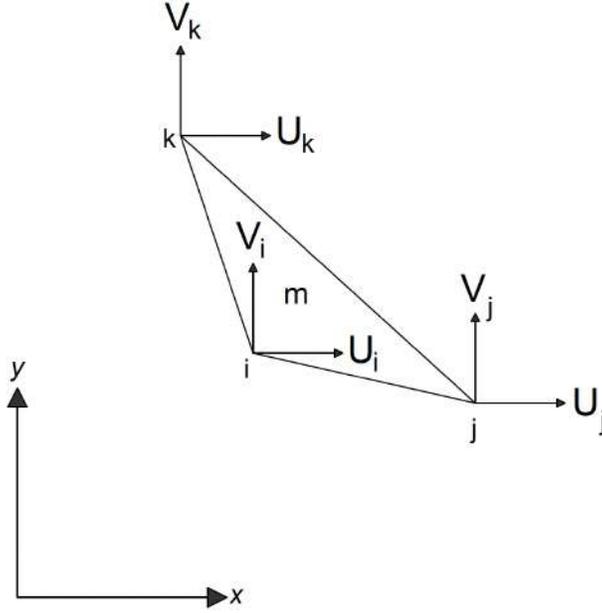


Figura 2.4: Desplazamientos en nodos del triángulo [Deméneghi, 2000].

A partir de la Figura 2.4, podemos enumerar las fuerzas que actúan sobre todos los nodos.

$$\mathbf{r}^m = \begin{Bmatrix} \mathbf{r}_i^m \\ \mathbf{r}_j^m \\ \mathbf{r}_k^m \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{r}_i^m = \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{r}_j^m = \begin{Bmatrix} U_j \\ V_j \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{r}_k^m = \begin{Bmatrix} U_k \\ V_k \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

Entonces, análogamente, los desplazamientos nodales correspondientes:

$$\mathbf{u}^m = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_i^m \\ \mathbf{u}_j^m \\ \mathbf{u}_k^m \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{u}_i^m = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{u}_j^m = \begin{Bmatrix} u_j \\ v_j \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{u}_k^m = \begin{Bmatrix} u_k \\ v_k \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

Es importante notar que, el superíndice m indica el elemento y los subíndices i, j y k indican los nodos del elemento.

Retomando que el comportamiento es elástico lineal, se tiene lo siguiente:

$$\mathbf{r}^m = \mathbf{K}^m \mathbf{u}^m - \mathbf{F}^m \quad (2.3)$$

En donde de la Ecuación 2.3, se tiene que:

- \mathbf{r} representa las fuerzas inducidas por el desplazamiento de los nodos.
- La matriz \mathbf{K} se conoce como la matriz de rigidez.
- \mathbf{u} muestra los desplazamientos nodales correspondientes.
- \mathbf{F} representa las fuerzas nodales requeridas para equilibrar cualquier carga concentrada o distribuida que actúe sobre el elemento.

La Ecuación 2.3 ilustra un ejemplo de un elemento con tres nodos, sin embargo, estos mismos argumentos y definiciones se aplican de forma general en un elemento hipotético para dos o más puntos de interconexión.

De manera general:

$$\mathbf{r}^e = \begin{Bmatrix} \mathbf{r}_1^e \\ \mathbf{r}_2^e \\ \vdots \\ \mathbf{r}_n^e \end{Bmatrix} \quad \text{y} \quad \mathbf{u}^e = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_1^e \\ \mathbf{u}_2^e \\ \vdots \\ \mathbf{u}_n^e \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

Los nodos fueron enumerados arábigamente hasta llegar a un enésimo número n , mientras que para indicar el elemento se utilizó la forma literaria.

Es importante notar que el vector de fuerza y de desplazamientos debe tener el mismo número de componentes o grados de libertad.

Por otro lado, la matriz de rigidez K debe ser siempre cuadrada y de la siguiente forma:

$$\mathbf{K}^e = \begin{bmatrix} K_{11}^e & K_{12}^e & \cdots & K_{1n}^e \\ K_{21}^e & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ K_{n1}^e & \cdots & \cdots & K_{nn}^e \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Se observa que los elementos de la matriz son submatrices nuevamente cuadradas de tamaño $l \times l$, en la cual l es el número de componentes de fuerza y desplazamiento que se deben considerar en cada nodo.

Para casos lineales, la matriz de deformación debe ser simétrica.

$$\mathbf{K}^e = (\mathbf{K}^e)^T \quad (2.6)$$

Retomando pues la Figura 2.4, para obtener la solución completa deben existir las siguientes condiciones:

- Compatibilidad de desplazamientos
- Equilibrio

Para cualquier sistema de desplazamientos nodales u

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u^1 \\ \vdots \\ u^n \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

Como se mencionó, los nodos son continuos y no presentan discontinuidades, por lo cual se cumple la primera condición. Para cumplir con la segunda ecuación se debe establecer un equilibrio entre los elementos que se encuentran en el nodo, es por ello que si consideramos todos los componentes de fuerza tenemos:

$$\sum_{e=1}^{n_e} \mathbf{r}_a^e = \mathbf{r}_a^1 + \mathbf{r}_a^2 + \dots = \mathbf{0} \quad (2.8)$$

En donde los subíndices nos indican el nodo y los superíndices el elemento. Sustituyendo las fuerzas que contribuyen al nodo a de la definición 2.3 y observando que las variables nodales son comunes (para omitir los superíndices), tenemos

$$[K]\{u\} - \{F\} = 0$$

Es decir:

$$\{F\} = [K]\{u\} \quad (2.9)$$

Para una mayor comprensión, consultar las bibliografías [Zienkiewicz, 2013] y [Deméneghi, 2000]. Ya que la demostración mostrada se recopiló de esas fuentes de consulta.

Después de seleccionar los elementos y las incógnitas nodales, como siguiente paso se debe reunir las propiedades de cada elemento, ya que los componentes de la ecuación general del elemento finito mostrada, pueden cambiar dependiendo de la aplicación, es decir del comportamiento físico que se pretende analizar. En la Tabla 2.1 se muestran las diferentes aplicaciones de la ecuación fundamental del elemento finito.

Tabla 2.1: Variables según el tipo de análisis [Zuñiga, 2023].

Análisis	Matriz [K]	Vector {u}	Vector {F}
Elasticidad	Rigidez	Desplazamiento	Fuerza
Electrostático	Dieléctrico	Potencial eléctrico	Carga
Fluidos	Viscosidad	Velocidad	Fuerza del cuerpo
Térmico	Conductividad	Temperatura	Fuente de calor

La Ecuación 2.9 da lugar a un sistema de ecuaciones, que con anterioridad se resolvía por métodos analíticos convencionales, hoy en día con el avance de la tecnología existen diferentes tipos de softwares que resuelven la ecuación fundamental del elemento finito mediante iteraciones. Se debe mencionar que el número de ecuaciones del sistema es proporcional al número de nodos. Por lo general, este método es comúnmente programado computacionalmente dependiendo de la variable de interés por analizar, ya que es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculos complejos en dos o tres dimensiones. [Ortiz, 2013]. Encontrar la solución analítica del problema, es algo que puede convertirse en un problema debido al tiempo que nos tomaría resolverlo con los métodos convencionales, incluso existe la posibilidad de no encontrar la solución analítica de estos problemas.

En el contexto histórico se mencionó que mientras más elementos haya, es decir, más particiones existan, mejor será la aproximación que se pretende obtener, sin embargo, conforme se agreguen más elementos, más recurso o memoria computacional se utiliza. Esto es un parámetro de suma

importancia de comprender y aplicar, ya que en ocasiones el ahorrarnos minutos, horas e incluso días de solución es de gran importancia en el desempeño académico y laboral, sin embargo, no siempre un mallado muy fino es lo más adecuado para nuestro modelo, cuando en nuestro modelado se incrementan o se agregan más elementos y los resultados del sistema con respecto al anterior son despreciables, indica que hemos llegado al mallado óptimo del sistema.

2.2. Transferencia de calor

2.2.1. Panorama histórico

A lo largo de la historia humana, el calor ha sido un objeto de interés muy llamativo pero complicado de definir debido a las múltiples interpretaciones y definiciones propuestas. Hoy en día es un concepto que utilizamos muy frecuentemente en nuestra vida cotidiana, sin embargo, erróneamente, ya que frecuentemente confundimos la palabra calor con temperatura, puesto que nos referimos a calor con *que tan caliente* o *frío* se siente un objeto. Es decir, definimos el concepto calor en términos del cambio de temperatura de un cuerpo, basándonos en nuestro sentido del tacto. Por ejemplo cuando compramos un café, para evitar escaldarnos la lengua por lo general lo acercamos a nuestros labios para determinar su temperatura, donde erróneamente solemos decir *está caliente*. Confundir calor con temperatura fue una tarea difícil de diferenciar ya que están muy relacionados entre sí, por ello su definición fuera un concepto arduo de construir.

Se conoce que uno de los primeros autores en hablar sobre el calor fue Heráclito (535 aC - 484 aC), el mencionó y sostuvo que el fuego era el origen de la materia. Un poco más tarde, en esa misma época, Anaxímenes (590 aC - 534 aC) propuso los estados comunes de la materia como lo *frío* y lo *caliente*, sin embargo, Aristóteles (384 aC - 322aC), decía que el calor era un elemento oculto formado por partes en movimiento perpetuo.

Estas ideas predominaron hasta mediados del siglo XVI, cuando las ideas de Aristóteles fueron cuestionadas por G. Galilei (1564-1642) quién discrepaba con Aristóteles debido a que él sostuvo la definición de calor como elemento material y fluido, mientras que para R. Descartes (1596-1650) el calor era una agitación de las partes de los cuerpos. Con la información que se tenía en esa época, J.B. Van Helmost (1580-1644) discrepaba a su vez con las ideas de Galileo y Descartes, es por ello que realizó observaciones sobre la calcinación del azufre y el carbón, posteriormente llegó a la conclusión de que el fuego no es un elemento, debido a que lo determinó como agente de transformación.

Todo fue especulación y superstición sobre este concepto ya que no había fundamento experimental, a pesar de ello, en ese punto de la historia y durante el siglo XVII existieron dos teorías sobre el calor, la teoría del flogisto y la de los atomistas griegos. La palabra flogisto fue introducida por L.P. Euler (1707-1783), quien lo describió como un principio inflamable en la composición de todos los cuerpos (más tarde conocido como calórico). Se creía que los metales que contenían más flogisto eran más fácilmente transformables, sin embargo, esta teoría no explicaba el incremento del peso al transformarse, por lo tanto, la teoría de los atomistas griegos tomaba relevancia, ya que definía al fuego como materia constituida por átomos que tienen peso y materia que se convertía en un fluido hipotético, indestructible denominado calórico. Uno de los principales defensores de la teoría del calórico fue A. Lavoisier (1743-1794) y sus discípulos que a su vez se vio fortalecida con la construcción del termómetro utilizado por J. Black (1728-1799).

Un paso grande en la historia del concepto de calor fue hasta los años 1740-1750 cuando M. V. Lomonosov (1711-1755) demostró en diferentes experimentos la imposibilidad de transmitir el calor de un cuerpo menos caliente a un cuerpo más caliente. Con este gran descubrimiento J. Black pudo concebir el concepto de calor específico [Picos et al., 2022].

Con esto la teoría del calórico tomaba fuerza puesto que se podía explicar hechos como la dilatación y la contracción térmica, sin embargo, no explicaba el peso del calórico al calentar o enfriar los cuerpos. Posteriormente debido a muchas observaciones de Benjamin Thompson (1753-1814) se convenció de que el calor no era un fluido sino una forma de movimiento. Así es como Joule (1818-1889) establece que el calor y el trabajo son manifestaciones de la energía quien postula que si bien la energía mecánica y térmica pueden transformarse una en otra, la energía en sí no podía ser creada ni destruida [Camelo and Rodríguez, 2008]. Debido a lo anterior y por causa de las múltiples discrepancias acerca de este concepto y gracias al desarrollo de trabajos experimentales conocemos que el calor es la transferencia de energía desde cuerpos de mayor temperatura a menor temperatura.

2.2.2. Formas de transferencia de calor

De manera general en palabras de [Incropera and Witt, 1999] señalan que "La transferencia de calor (o calor) es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas"(p. 2). De otro modo, siempre que exista una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos debe ocurrir una transferencia de calor. Esta transferencia de energía se puede agrupar en tres mecanismos de transferencia distintos, por ejemplo, cuando existe un gradiente de temperatura o existe una variación de temperatura en un espacio o material en relación con la distancia en un medio estacionario que puede ser un sólido o un fluido, se utiliza el término de **conducción**. Cuando existe una superficie y un fluido en movimiento a diferentes temperaturas, esta transferencia de calor se conoce como **convección**. Finalmente, el tercer modo de transferencia de calor se denomina **radiación**, la cual es el intercambio neto de calor por radiación entre dos superficies [Incropera and Witt, 1999]. Aunque para autores como [Kreith et al., 2012] mencionan que solo la conducción y la radiación se debe clasificar como procesos de transferencia de calor, puesto que sólo estos dependen para su operación de la simple existencia de una diferencia de temperatura. Por ello, debido a los objetivos establecidos anteriormente, la radiación no fue un tema de interés.

2.2.2.1. Conducción

Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas [Çengel and Ghajar, 2015]. Visto de otro modo y coloquialmente hablando, de un cuerpo más caliente a un cuerpo menos caliente. Un ejemplo de esto es cuando vertemos café en una taza. La taza inicialmente se encuentra a la temperatura ambiente, sin embargo, cuando vertemos café en ella, su temperatura incrementa debido a que el café tiene una temperatura mayor a la temperatura ambiente. Es por ello que para que exista la conducción debe existir un gradiente de temperatura en el cual el calor fluirá de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura [Kreith et al., 2012].

La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, es decir, su espesor y el material del cual está constituido. Se puede concluir

que mientras mayor sea el área superficial, mayor será la razón de pérdida del calor. En la Ecuación 2.10 se muestra el modelo matemático de la conducción [Farah et al., 2008]. Nos indica que la velocidad a la que el calor se transfiere por conducción es proporcional al gradiente de temperatura a través del área de transferencia del calor pero inversamente proporcional al espesor o longitud en la dirección del gradiente de temperatura. La constante k es una medida de la capacidad de un material para conducir calor [Çengel and Ghajar, 2015].

$$q_{cond} = kA \frac{\Delta(T)}{L} \quad (2.10)$$

Donde:

- q = flujo de calor
- k = conductividad térmica
- A = área de la cara del elemento
- $\Delta(T)$ = gradiente de temperatura en la dirección normal al área
- L = longitud en la dirección del gradiente de temperatura

2.2.2.2. Convección

Es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos [Çengel and Ghajar, 2015]. Coloquialmente hablando lo anterior se reduce a la transferencia de calor que existe entre una superficie y un fluido. Por ejemplo, supongamos que estamos a punto de comer una sopa muy caliente, en ocasiones muchas veces decimos que *estamos esperando que se enfríe* en este caso en particular nuestra superficie sólida es el plato con sopa y el fluido es el aire, esto es denominado **convección natural**, se nombra de esta forma porque el fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura de este fluido. Retomando el mismo ejemplo, si en vez de esperar que se enfríe, maleducadamente empezamos a soplar la el plato con sopa estaremos provocando una **convección forzada** porque ahora el fluido es forzado a fluir sobre la superficie por un medio externo. El modelo matemático que expresa la convección se muestra en la Ecuación 2.11. Esta Ecuación nos indica que la rapidez de la transferencia de calor por convección es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas. Expresada de forma conveniente por la ley de enfriamiento de Newton [Çengel and Ghajar, 2015].

$$q_{conv} = hA\Delta(T) \quad (2.11)$$

Donde:

- h = coeficiente de transferencia de calor por convección
- A = área del elemento sujeta a convección
- $\Delta T = T_s - T_\infty$
- T_s = temperatura de la superficie del elemento
- T_∞ = temperatura del fluido

2.3. Coeficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica (CTE por sus siglas en inglés *Coefficient of Thermal Expansion*) es el cambio fraccional en dimensión lineal de un material por grado de temperatura, representado por la letra α . Está relacionado con la energía de unión o las curvas de fuerza-distancia interatómica y la asimetría y simetría de la curva de energía-separación. Cuando el material tiene un bajo CTE la curva es simétrica. Que la curva sea simétrica nos indica que conforme suministramos energía, es decir, ocurre un cambio de energía, la separación entre los átomos no se ve perjudicada, es decir, no se separan. A diferencia de un material con un alto CTE ya que la separación entre los átomos aumenta cuando se suministra energía o existe un cambio de temperaturas en el material. Para este caso se tiene una curva de separación asimétrica. En la Figura 2.5 se puede ver para el inciso *a*) un material con un coeficiente de expansión térmica bajo y en el inciso *b*) un material con un coeficiente de expansión térmica alto [Askeland et al., 2012].

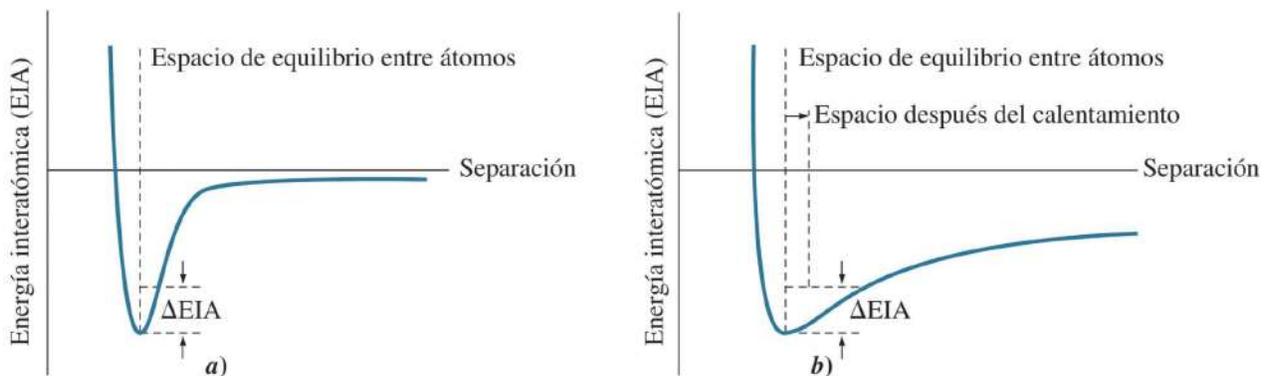


Figura 2.5: En el inciso *a*) se muestra una curva simétrica mientras que en el inciso *b*) se muestra una curva asimétrica [Askeland et al., 2012].

El CTE *grosso modo* es el cambio del tamaño del material como respuesta a un cambio de temperatura. [Farah, 2008]. La ciencia detrás de esto ocurre debido a que los átomos que ganan energía térmica empiezan a vibrar y comportarse como si tuvieran un radio atómico más grande, aumentando la distancia promedio entre los átomos y por lo tanto se incrementan las dimensiones totales del material. El cambio en dimensiones del material por unidad de longitud está dado por el coeficiente lineal de expansión térmica [Askeland et al., 2012]. Como se puede ver en la Ecuación 2.12.

$$\alpha = \frac{l_f - l_0}{l_0(T_f - T_0)} = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} \quad (2.12)$$

En donde se tiene que T_0 y T_f son las temperaturas inicial y final mientras que l_0 y l_f son las dimensiones inicial y final del material.

El hierro se considera un material con un coeficiente de expansión térmica relativamente bajo, esto se debe por su configuración atómica. Lo anterior nos indica que requiere más energía, es decir, un cambio de temperatura más alto para que pueda expandirse. Materiales como el aluminio con un coeficiente de expansión térmica alto su estructura atómica permite su expansión con un porcentaje de menor energía o un cambio de temperatura menos abrupta como ocurre con el hierro [Askeland et al., 2012].

Lo anterior se puede observar en la Figura 2.6. Ya que al incrementar la temperatura existe un cambio de forma abrupta con el coeficiente lineal de expansión térmica del hierro.

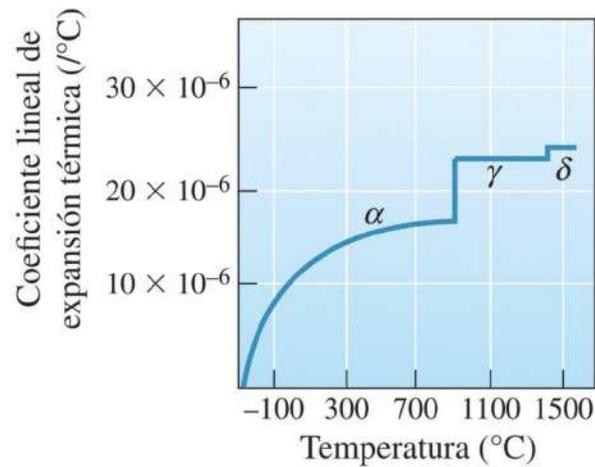


Figura 2.6: Coeficiente lineal de expansión térmica del hierro conforme incrementa la temperatura [Askeland et al., 2012].

Por otro lado, autores como [Hibbeler, 2011] expresan la Ecuación 2.12 de la siguiente forma:

$$\delta_T = \alpha \Delta T L \quad (2.13)$$

De la misma forma, se tiene que:

- δ_T : Deformación térmica (el cambio algebraico en la longitud del elemento).
- α : Coeficiente de expansión térmica.
- ΔT : Cambio algebraico de temperatura.
- L : Longitud original del cuerpo.

Como se puede observar, a simple vista no existe diferencia entre las Ecuaciones 2.12 y 2.13, sin embargo, su diferencia radica en la interpretación, si el elemento se contrae o se expande.

La Ecuación 2.13 se conoce también como *esfuerzo térmico*. De la misma forma que la Ecuación 2.12 expresa que un cambio en la temperatura puede causar que un cuerpo cambie sus dimensiones. Cuando la temperatura aumenta, el cuerpo se expande, mientras que si la temperatura disminuye, éste se contraerá. Como se mencionó anteriormente, esto ocurre cuando el CTE es lineal. Únicamente para materiales con propiedades homogéneas e isotrópicas, lo que nos quiere decir es que sus propiedades físicas en todos sus puntos y en todas las direcciones son las mismas. Es decir, que no existe ninguna variación de las propiedades físicas del material [Hibbeler, 2011].

Conocer la deformación térmica de los objetos de análisis es un aspecto muy importante, puesto que nos permite saber si el elemento se expande o contrae y con ello evitar los esfuerzos que se generen (sea térmico o mecánico) y de esta forma contemplarlo en el diseño y manufactura. Un ejemplo común de esto es en las justas de los puentes vehiculares, puesto que se diseñan con juntas de dilatación para permitir los movimientos térmicos y evitar cualquier esfuerzo térmico o mecánico [Hibbeler, 2011].

2.4. Componentes optomecánicos

2.4.1. Conceptualización

La optomecánica es un área que estudia la interacción física de los sistemas ópticos y los sistemas mecánicos para configurar un sistema óptico con el objetivo de garantizar el correcto desempeño de la luz a través de ellos. [Farah, 2008].

Se utiliza para proporcionar una gran variedad de opciones de montaje o de posicionamiento para una amplia gama de productos y aplicaciones ópticas. El reto de la optomecánica se encuentra en la preservación de la posición, la forma y las propiedades ópticas de los elementos que tienen tolerancias muy estrechas. Estos sistemas requieren de un buen rendimiento, estabilidad dimensional e integridad estructural para hacer frente a cargas mecánicas, ambientales y térmicas [Yoder and Vukobratovich, 2015].

En la Figura 2.7 se muestra el dibujo de una interfaz optomecánica donde se puede apreciar sus dimensiones críticas y las características clave de un conjunto de lentes.

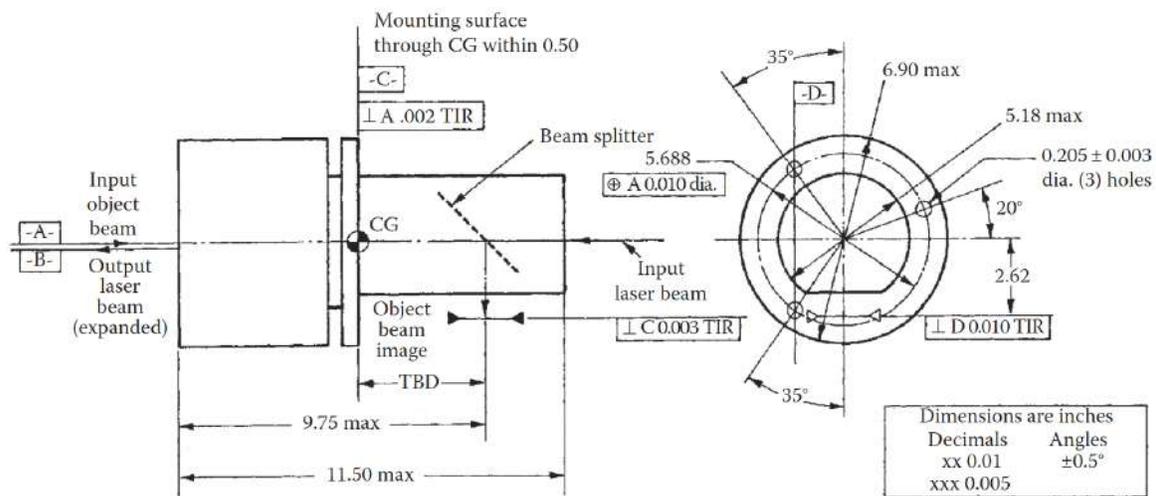


Figura 2.7: Ejemplo de un sistema optomecánico [Yoder and Vukobratovich, 2015].

Para el desarrollo y diseño de este tipo de dispositivos el diseñador óptico y el ingeniero mecánico trabajan en conjunto para minimizar los efectos inducidos por las razones de cambio debidas a las expansiones y contracciones de los materiales [Farah, 2008]. El primer paso en la evolución del diseño de un sistema optomecánico es reconocer la necesidad de que un dispositivo cumpla un propósito específico. En los problemas de ingeniería cuando existe una necesidad se busca una solución y en este caso no es la excepción. Para un ingeniero de diseño la necesidad trae a la mente soluciones creativas que podrían satisfacer hasta cierto punto la sugerencia de una necesidad con al menos un concepto vago en la instrumentación. El conocimiento de cómo diseños anteriores satisfacían, en cierta medida, necesidades similares desempeña un papel importante en este punto. La experiencia indica no solo cómo podría configurarse el nuevo dispositivo, sino también cómo no debería configurarse [Yoder and Vukobratovich, 2015].

2.5. Instrumentos astronómicos

2.5.1. Escenario histórico y su conceptualización

La astronomía es una ciencia básica que tiene como objetivo entender el comportamiento físico del universo que a partir de modelos matemáticos trata de describirlo. La herramienta principal para poder verificar estos modelos, desde el primer astrónomo de la historia hasta el más contemporáneo, ha sido la observación [Farah, 2008]. La curiosidad del ser humano por su tendencia de dar una explicación a todo lo que ocurre en la vida, lo ha llevado a un desarrollo tecnológico increíble. La bóveda celeste siempre fue un objeto de estudio discrepante por el sin fin de disputas existentes entre la teoría geocéntrica y la teoría heliocéntrica. La teoría geocéntrica fue razonalmente establecida por la mayoría de los filósofos de la antigua Grecia y esto es porque la observación inmediata nos proporciona de cierto modo una imagen natural geocéntrica del universo, es decir, la sensación que la Tierra está fija en el centro. Despojar esta idea necesitó veinte siglos y el cambio de los esquemas conceptuales de la Física antigua. Esta acción otorgó los principios fundacionales de la nueva Física [Ten and Monros, 1984].

Parte fundamental para establecer el modelo heliocéntrico fueron los instrumentos astronómicos. Cuando escuchamos la palabra *instrumentos astronómicos* muy probablemente pensamos o lo asociamos a telescopios, cámaras astronómicas, etc., se entiende como un instrumento astronómico aquel dispositivo para observar, medir o registrar datos astronómicos [Kitchin, 2003]. En los inicios de la astronomía la precisión no era el objetivo principal puesto que se buscaba resolver las inquietudes o los pensamientos de la época con las herramientas que tenían. Uno de los primeros instrumentos astronómicos, el más simple y a su vez el más antiguo es el Gnomon. Constaba únicamente de una varilla fijada verticalmente sobre una superficie plana horizontal. Se basaba en la proyección de la sombra de un objeto, sin embargo, debido a la carencia de la trigonometría se obligaron a desarrollar otros instrumentos de la mano del avance de la tecnología. En la Figura 2.8 se muestran de forma ilustrativa los primeros instrumentos astronómicos.

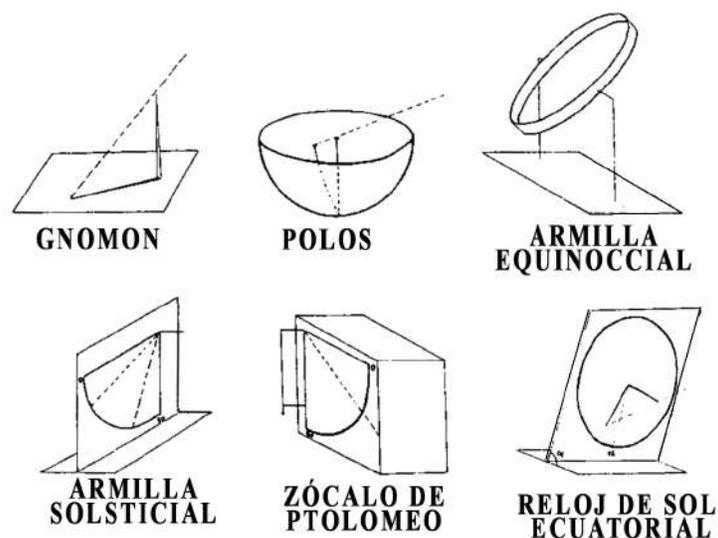


Figura 2.8: Primeros instrumentos astronómicos: Gnomon, Polos, Armilla equinoccial, Armilla solsticial, Zocalo de Ptolomeo y Reloj de sol ecuatorial. [Ten and Monros, 1984].

No fue hasta el siglo XV que la astronomía se vio potencialmente evolucionada con la teoría heliocéntrica de Nicolás Copernico (1473-1543) y su famoso libro *De revolutionibus orbium coelestium* (Sobre las revoluciones de las órbitas celestes) el cual fue la base de casi todo lo que hoy sabemos de la tierra [Tagüeña, 2023]. Su teoría heliocéntrica y sus exploraciones fueron los cimientos de la física clásica y la guía de otros astrónomos, como Galileo Galilei (1564-1642) quién construyó un telescopio con el cual realizó observaciones astronómicas [Martínez, 2021]. Él observó con su telescopio el movimiento de los satélites de Júpiter y concluyó que no todos los cuerpos giraban alrededor de la Tierra, sino que al igual que lo hacen los satélites, la Tierra y los demás planetas giraban alrededor del Sol. Fue enjuiciado por el Santo Juicio donde se le obligó a retractarse, aunque se dice que nunca renunció a la verdad científica [Tagüeña, 2023]. La revolución astronómica, anunciada por Copérnico y confirmada por las observaciones de Galileo, dio pie a los descubrimientos de Johannes Kepler (1571-1630) sobre las leyes que rigen el movimiento de los planetas, el tipo de órbita de estos, el telescopio kepleriano, etc [Torres, 2006]., fue hasta el siglo XVII y XVIII que la tecnología de los instrumentos astronómicos se vio mejorada por Isaac Newton (1643-1727) cuando desde un análisis de los experimentos sobre la naturaleza de la luz, decide realizar una mejora al telescopio. Consistía de un reflector, que utilizaba dos espejos (uno curvo y otro plano) como se puede ver en la Figura 2.9 [Martínez and Marlon, 2022].

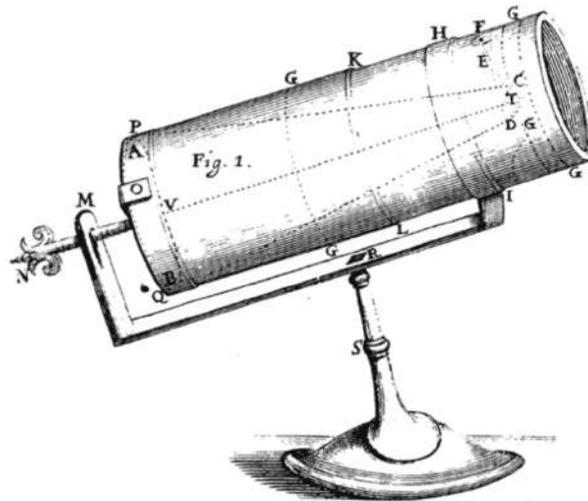


Figura 2.9: Telescopio modificado por Isaac Newton [Martínez and Marlon, 2022].

Newton realizó múltiples aportes a la humanidad y con su libro *Philosophiæ naturalis principia mathematica* cambió la percepción que se tenía de la naturaleza. Los avances tecnológicos siguieron progresando con el paso del tiempo.

Edwin Hubble (1889-1953) identificó estrellas variables cefeidas en la nebulosa de Andrómeda, determinó que existen más galaxias en el universo y demostró que el universo se está expandiendo [Sandage, 1989], mientras que Stephen Hawking (1942-2018) comprobó la existencia de los agujeros negros [Hawking, 2011]. Ellos, como todos los demás, lograron grandes descubrimientos en astronomía debido a la observación y la curiosidad por comprender y explicar la bóveda celeste. Conocer su historia nos permite entender el presente y darnos cuenta que la astronomía requiere de instrumentos adecuados para poder ser desarrollada. El desarrollo y las mejoras hacia los instrumentos astronómicos nos permiten dar un paso muy grande a los futuros avances y descubrimientos astronómicos.

3 FEA en las expansiones térmicas

El análisis de elementos finitos es una técnica muy frecuentemente utilizada en el ámbito académico, laboral o de investigación para el análisis de las expansiones térmicas de sistemas o componentes. En este capítulo se abordarán ejemplos en los que el análisis de elementos finitos fue un recurso para analizar su comportamiento ocasionado por las expansiones térmicas.

3.1. El espectrógrafo ESOPO

El espectrógrafo óptico de mediana y baja resolución ESOPO es un instrumento diseñado y construido para el Telescopio de 2.1 metros del Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir para modernizar y convertirlo en una instalación competitiva. Este proyecto fue diseñado por el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Es una de las instituciones en México encargada de la investigación en astronomía y astrofísica. Sus dos sedes se encuentran en Ciudad Universitaria, Ciudad de México y en Ensenada, Baja California.

El Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir se encuentra al norte del estado de Baja California, México y cuenta actualmente con tres telescopios cuyos diámetros son 2.1 metros, 1.5 metros y 0.84 metros. Su historia inicia hacia la década de 1960, sin embargo, las actividades profesionales del sitio comenzaron hasta el año 1971 con la instalación de los telescopios de 1.5 metros y 0.84 metros. Fue hasta el año de 1970 que se inauguró el telescopio de 2.1 metros [Barojas, 2013]. El análisis de expansiones térmicas fue de gran importancia en este proyecto. Ya que en el caso de los espectrógrafos cualquier cambio de temperatura los afecta significativamente [Farah et al., 2008].



Figura 3.1: Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir. Recuperado de Google Maps.

3.1.1. Aspectos generales

La estructura del espectrógrafo ESOPO está constituida por dos caminos ópticos. Esto es debido a que cuenta con un filtro óptico que consiste en reflejar y dividir el haz de luz común (cuenta con un espejo dicróico). Este haz de luz se divide entre los caminos ópticos del brazo rojo y del brazo azul. En la Figura 3.2 se muestra el camino óptico.

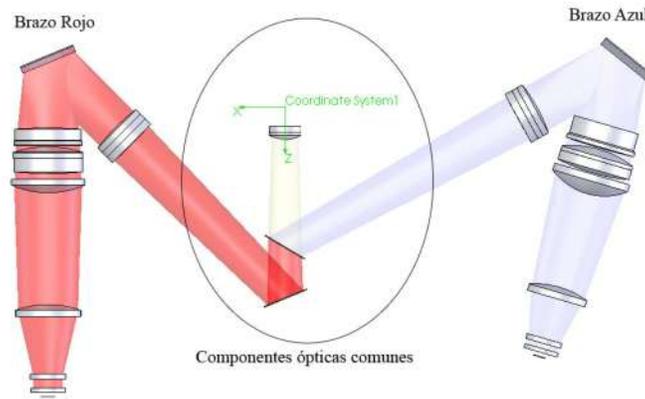


Figura 3.2: Camino óptico de ESOPO [Farah et al., 2008].

El brazo azul está optimizado para un rango de longitudes de onda de 3500-7000 Å (350 nanómetros a 700 nanómetros) mientras que el el brazo rojo está optimizado para 4500-9000 Å (450 nanómetros a 900 nanómetros). Estos se pueden utilizar separados o combinados [Sierra et al., 2008]. El diseño óptico se basa en una configuración no clásica, es decir, que las rejillas se iluminan en un modo cónico trabajando en una configuración quasi-Littrow, lo que nos indica que el haz incidente y el haz difractado no están exactamente en la misma dirección, sino que forman un ángulo pequeño entre sí [Echevarria et al., 2008].

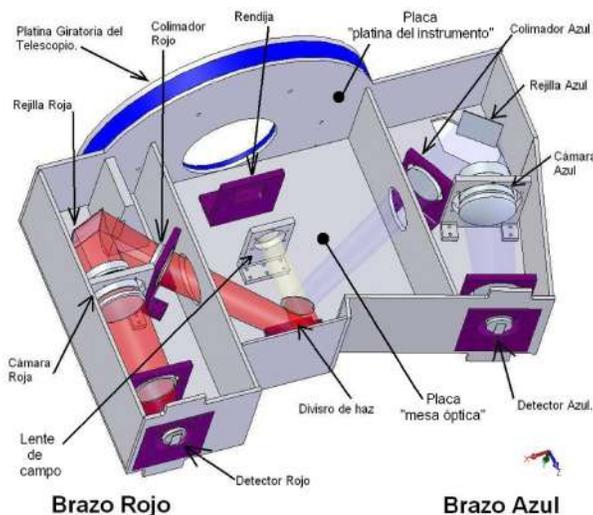


Figura 3.3: Componentes principales de ESOPO [Farah et al., 2008].

A pesar de que el tema principal de este documento no es la óptica, es importante comprender su estructura y la importancia que tiene en el espectrógrafo puesto que las expansiones térmicas se ven involucradas en su funcionamiento. De manera general, los componentes de ESOPO se

muestran en la Figura 3.3. Mientras que en la Figura 3.4 se pueden ver las dimensiones del modelo CAD. El modelo CAD está compuesto por 25 piezas que representan a los subsistemas, estructura e interfaz.

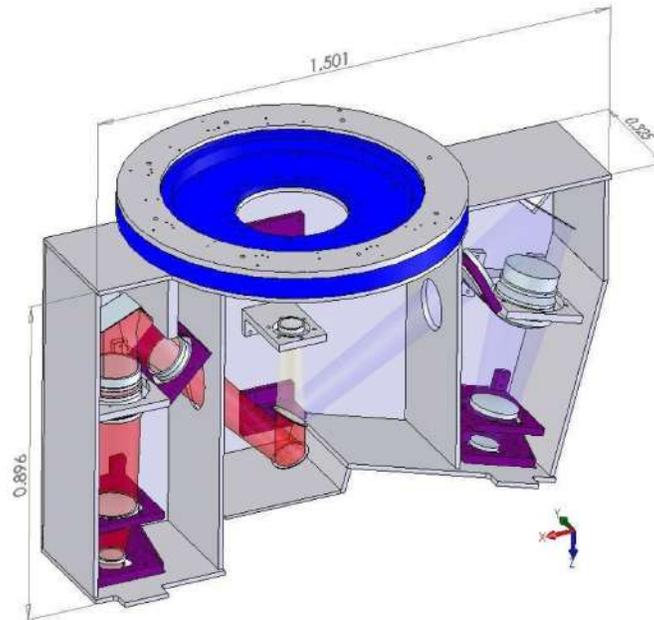


Figura 3.4: Dimensiones del modelo CAD del Espectrógrafo ESOPO [Sierra et al., 2008].

El material que fue utilizado en la estructura de ESOPO fue placa de aluminio 2024-T6 o T351 (1 pulgada, 3/4 pulgada y 1/2 pulgada de espesor) con todas sus uniones atornilladas. Las dimensiones externas finales de la estructura quedaron definidas por 1.5 metros x 0.54 metros x 0.90 metros como se muestra en la Figura 3.5. La estructura está hecha de placas de aluminio fresado con un bolsillo exterior para aligerarla. De esta manera, la caja estructural principal funciona como un marco tubular de sellado [Sierra et al., 2008].

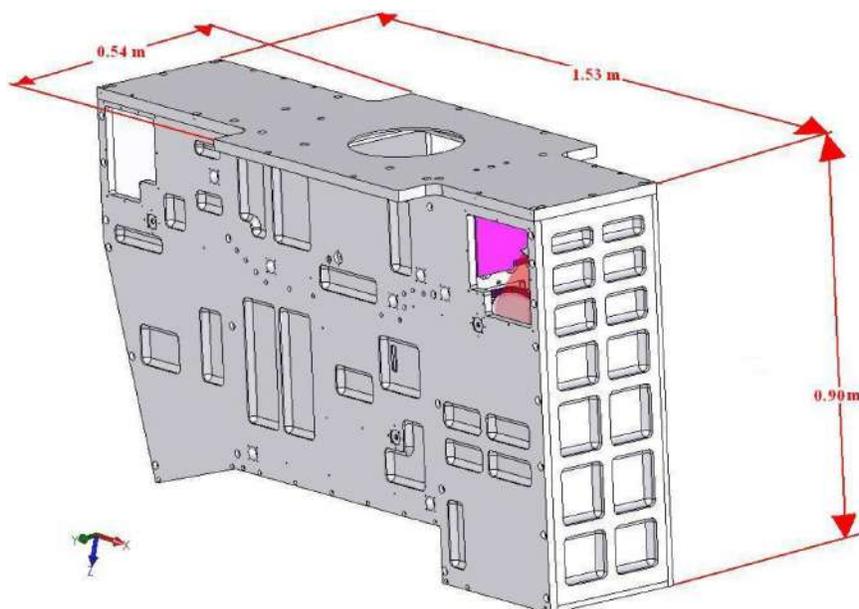


Figura 3.5: Dimensiones de su estructura [Sierra et al., 2008].

3.1.2. Objetivo de la simulación empleada

Como se mencionó, el análisis de las expansiones térmicas en este tipo de componentes es de gran importancia debido a que cualquier cambio de temperatura afecta significativamente a los espectrógrafos. Estos cambios en la temperatura son inevitables y son problemas comunes en este tipo de dispositivos, por lo cual las herramientas de elemento finito son de gran utilidad para su análisis. Generalmente los dos principales problemas que se presentan son los desplazamientos y rotaciones de los componentes ópticos debido a la acción de fuerza de la gravedad y temperatura. En el caso de ESPOPO para contrarrestar los movimientos mecánicos y la degradación de la calidad de la imagen durante la exposición se dio solución a partir de dos compensadores térmicos, debido a que son instrumentos muy sensibles a las relaciones de cambio de las propiedades ópticas durante las exposiciones.

3.1.3. Uso de software para el análisis térmico

El Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México, trabajó en conjunto con otros Institutos para la implementación de la simulación térmica y su análisis. Esto con el objetivo de verificar que los compensadores térmicos funcionaran o utilizar algún aislante térmico [Farah et al., 2008]. Con los resultados obtenidos pudieron tomar la opción más óptima con relación a su manufactura, precio, etc.

El software utilizado en el modelo de elementos finitos con el que se trabajó para realizar su análisis fue SolidWorks con un tiempo de cómputo de 288,000 segundo, es decir, 80 horas. En la Figura 3.6 se pueden apreciar los resultados que obtuvieron después de realizar la simulación térmica. La primera parte de la imagen muestra los resultados obtenidos sin aislante térmico y la segunda parte de la imagen muestra los resultados obtenidos con el aislante térmico.

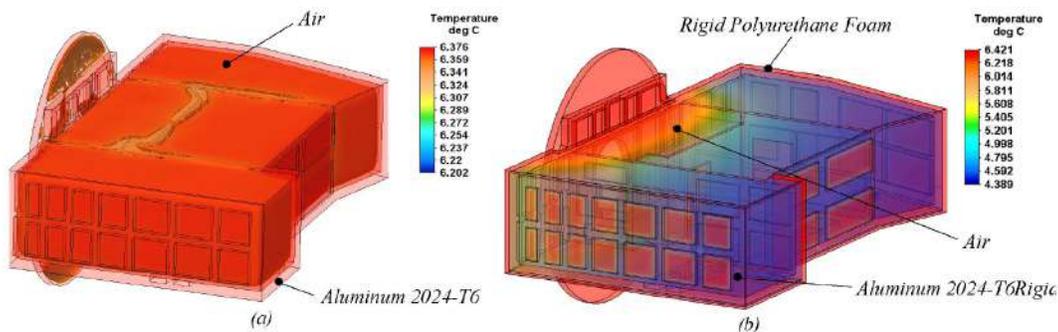


Figura 3.6: Resultados obtenidos del análisis térmico. En la imagen *a*) se observan los gradientes de temperatura sin aislante térmico, mientras que en la imagen *b*) se muestra con aislante térmico [Farah et al., 2008].

El análisis de elementos finitos juega un papel importante en el desarrollo de tecnología y toma de decisiones. Es por ello que el implementar estos análisis nos permite predecir futuros resultados en la vida real, optimizando los recursos materiales y económicos que emplearían las pruebas experimentales.

3.2. Barril de la cámara de OSIRIS

OSIRIS es un instrumento astronómico del Gran Telescopio de Canarias. En este proyecto el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México en colaboración con el Instituto de Astrofísica de Canarias, España, trabajaron en conjunto para el diseño y fabricación del barril de la cámara localizada en el instrumento astronómico OSIRIS.

La cámara está compuesta por ocho lentes, con sus respectivos soportes, celdas y dos compensadores. El primer compensador es de enfoque y el segundo compensador es de desplazamiento pasivo. OSIRIS utiliza su tercer lente, el cual está compuesto por dos lentes (su tercer lente es un doblete, denominado D3), para mantener la longitud focal de la cámara y la calidad de la imagen cuando la temperatura varíe [Farah, 2008].



Figura 3.7: Gran Telescopio de Canarias. Recuperado de Google Maps.

3.2.1. Descripción general

El sistema óptico de OSIRIS tiene como objetivo la adquisición de imágenes de baja resolución. También puede funcionar como un espectrógrafo cubriendo longitudes de onda en el intervalo de 0.365 a 1 micrómetros. Su diseño es modular, esto significa que sus componentes son independientes, lo cual permite ensamblar y desarmar fácilmente. Por otro lado, el barril de la cámara está ensamblado por medio de tornillos con tuerca.

Hablar de su sistema óptico es de gran importancia para comprender el porqué es tan relevante el análisis de expansiones térmicas de estos dispositivos. De forma general, el sistema óptico se divide en dos secciones:

- La primera parte está conformada por: Un doblete (un lente doble denominado D1) y la Unidad de Enfoque.
- La segunda parte está conformada por: Singletes (lentes compuestos de un solo elemento, denominados S1,S2,S3 debido a que son tres lentes) y dos dobletes (denominados D2 y D3).

Cada uno de ellos tiene un papel importante, sin embargo, en la celda D3 se encuentra el compensador de desplazamiento pasivo para mantener la calidad de la imagen debido a los cambios

que puedan haber en la temperatura. Los autores de este proyecto mencionan que los lentes fueron los elementos más costosos del proyecto, esto debido a los usos y requerimientos que debían de cumplir. Algunas de las especificaciones y requerimientos establecidos fueron: el comportamiento térmico, temperaturas de maquinado diferentes a la de diseño, el peso de la cámara, el intervalo de temperatura de operación del instrumento, entre otros. En la Figura 3.8 se puede ver una vista explosiva de los barriles [Farah, 2008].

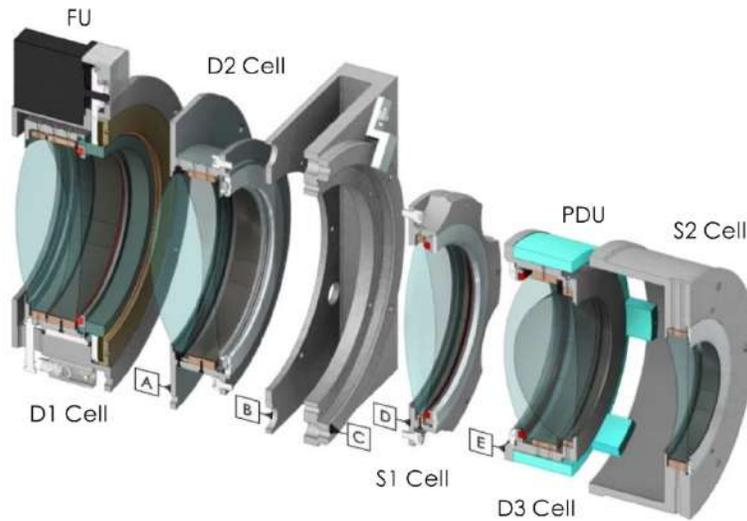


Figura 3.8: Vista explosiva del barril de OSIRIS [Farah, 2008].

Por otro lado, es importante mencionar su ubicación en el telescopio. OSIRIS fue colocado en el rotador mecánico del telescopio como se muestra en la Figura 3.9. De forma general, en esta misma imagen se muestran los componentes principales del instrumento [Farah, 2008].

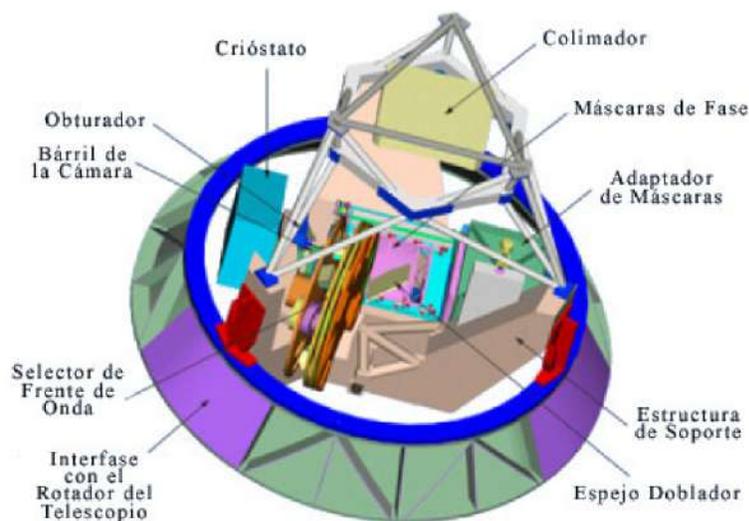


Figura 3.9: Ubicación y componentes del instrumento OSIRIS.

3.2.2. Observaciones

Anteriormente se mencionaron algunas especificaciones que el barril debió cumplir antes de llevar a cabo su manufactura e implementación. Entre ellos uno de los mayores retos que debieron de cumplir fue que por ningún motivo ninguno de sus componentes ópticas debió superar un esfuerzo mayor a 3.4 megapascuales. Los esfuerzos inducidos tanto como los cambios de temperatura hacen presente la birrefringencia.

La birrefringencia ocurre cuando el haz de luz se divide en dos haces, afectando significativamente la calidad de la imagen ya que provoca que el objeto observado tenga un aspecto similar a un fantasma. Este fue uno de los fenómenos que se pretendió evitar en ese proyecto, lo cual tiene una correlación con el compensador de desplazamiento.

Los soportes de los lentes fueron diseñados para minimizar los esfuerzos inducidos y evitar la birrefringencia por cambios de temperatura, además se diseñó el compensador de desplazamiento. El material de mayor proporción en el barril es Aluminio 6061. Ya que la rigidez de este material fue suficiente para garantizar los esfuerzos y desplazamientos generados. En la Figura 3.10 se muestra la Unidad de Enfoque en su proceso de verificación metrológica. Haciendo énfasis en mostrar el material del mismo [Farah, 2008].

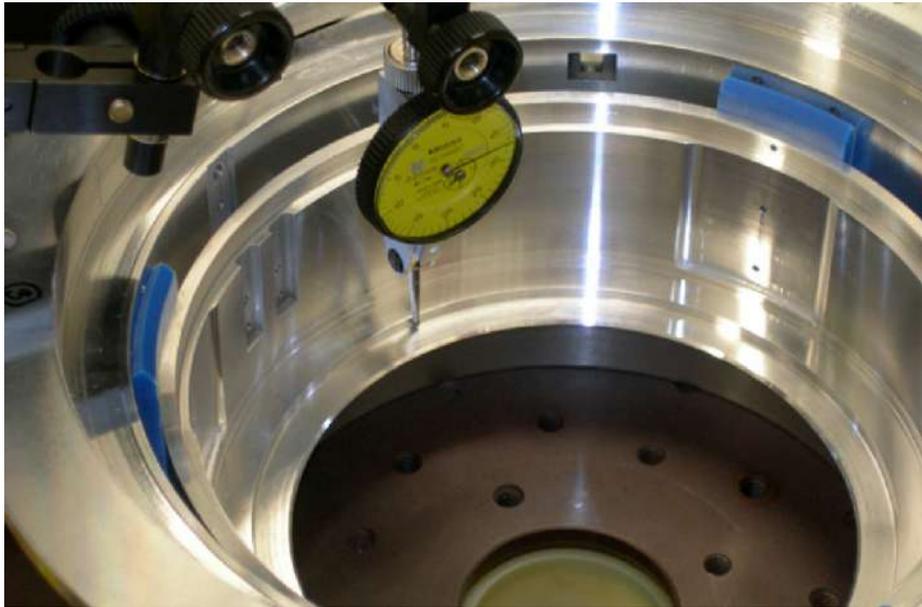


Figura 3.10: Unidad de Enfoque [Farah, 2008].

3.2.3. Uso del elemento finito

Debido a las condiciones ambientales, las características del telescopio y en función de las especificaciones y requerimientos establecidos en el diseño conceptual, el uso de los cálculos mecánicos y su validación utilizando las aproximaciones otorgadas por las herramientas del elemento finito se pudieron establecer las tolerancias de este instrumento.

Anteriormente hablamos de la función en la celda D3. Se hace principalmente énfasis en dicha celda debido a que existe una relación directa con el compensador de desplazamiento pasivo, ya que este se encuentra en esta celda. Recordemos que conforme la temperatura varía este tiene el objetivo de corregir la posición del doblete. El gradiente térmico que utilizaron en las simulaciones fue de 36°C , con ese valor se garantizó que los esfuerzos estuvieran dentro de los valores permisibles en todo

el intervalo. La simulación fue evaluada en diferentes escenarios, es decir, se utilizaron diferentes materiales los cuales fueron: Aluminio (6061), Acero (4041) y Titanio (6AI-4V). En el cual con la relación costo y manufactura se optó por el Aluminio.

En la Figura 3.11 se puede ver los resultados que obtuvieron en su simulación.

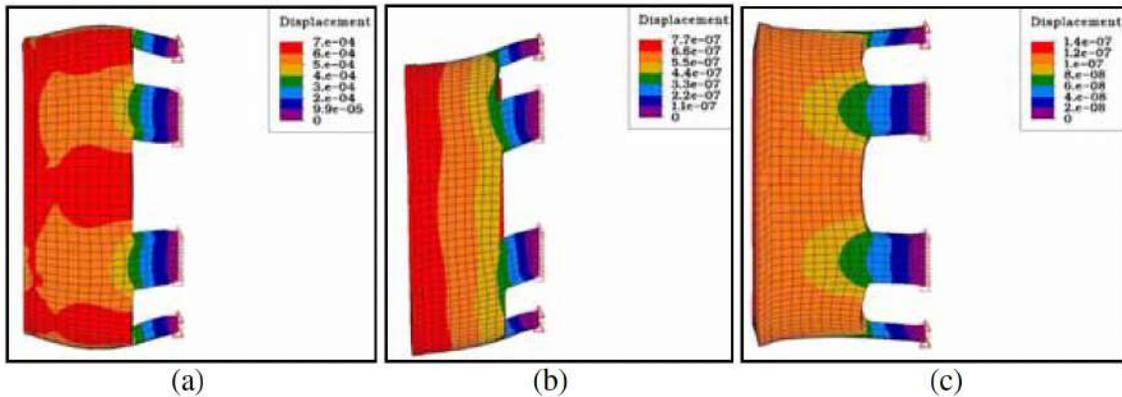


Figura 3.11: En la Figura *a*) se muestran los desplazamientos del compensador de desplazamientos pasivo en la Figura *b*) se aplica la condición del gradiente térmico de 36°C mientras que en la Figura *c*) se muestra los resultados obtenidos por el vector de fuerza de gravedad [Farah, 2008].

Los cálculos mecánicos realizados fueron corroborados con el uso del elemento finito. A partir de los resultados obtenidos en su análisis finito, se obtuvo que este movimiento se lograría con un material con un CTE de $180 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, el cual fue un polimérico. A partir del análisis de FEA se pudo concluir que el compensador de desplazamiento pasivo tiene la suficiente rigidez para soportar al D3 y su celda. Por ello obtaron por utilizar el Aluminio 6061 ya que la rigidez de ese materia fue suficiente para garantizar los esfuerzos y desplazamientos que se generaron en el modelo de elementos finito. Finalmente en la Figura 3.12 se muestra los resultados obtenidos en el barril a causa del vector de fuerza de gravedad [Farah, 2008].

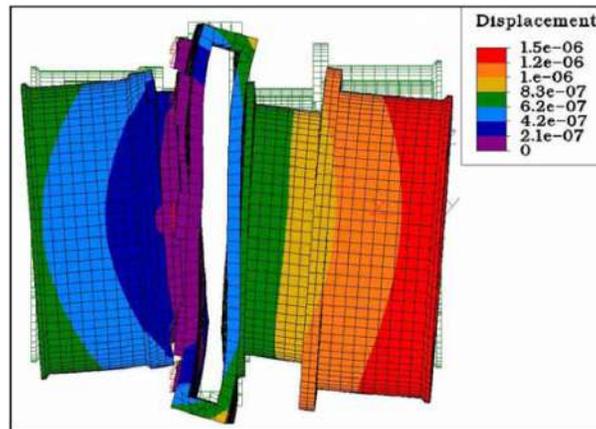


Figura 3.12: Desplazamientos debido a la flexión ocasionada por el vector de fuerza de gravedad [Farah, 2008].

Como se puede observar, utilizando el recurso del análisis de elementos finitos, podemos determinar y comprobar los resultados de los cálculos mecánicos realizados. Algo que es importante mencionar es que no solo es poner la información al software, sino saber comprender los resultados y aplicar la teoría correctamente.

4 Componentes optomecánicos analizados

Las especificaciones, requerimientos y descripción de los componentes optomecánicos con los que se realizó la implementación térmica y la evaluación de sus resultados se detallan en este capítulo. Previa a la implementación y evaluación de la expansión térmica, se realizaron diferentes pasos que se describirán a continuación, ya que el modelo diseñado y asistido por computadora (CAD) inicialmente se tuvo que preparar y adecuar antes de realizar su análisis.

4.1. Especificaciones y requerimientos

Las especificaciones y restricciones ocasionadas por desplazamiento, deformación y esfuerzos por cargas gravitatorias y térmicas fueron parámetros de suma importancia en el análisis de estos componentes. De las especificaciones mencionadas anteriormente el apartado más crítico es el de desplazamientos ocasionados por los cambios térmicos. Puesto que al ocurrir esto, nuestros modelos cambian significativamente su posición. Por ello, se tuvieron parámetros, especificaciones y requerimientos en función de las necesidades a cubrir en el proyecto de ESOPO, los cuales fueron los siguientes:

- Los desplazamientos ocasionados en un cambio de temperatura de 1°C en la cámara azul deben alcanzar los 19 micrómetros mientras que en la cámara roja deben alcanzar los 13 micrómetros.
- Los instrumentos no deben presentar esfuerzos mayores a 3.4 megapascales.
- El intervalo de temperatura de operación de los instrumentos es de -1°C a 33°C .
- El peso de los instrumentos debe ser un factor a considerarse en caso de ser necesario una optimización

4.2. Descripción de los modelos optomecánicos

Los modelos optomecánicos analizados pertenecen al proyecto del espectrógrafo ESOPO. Como se mencionó en el Capítulo 3, ESOPO cuenta con dos brazos denominados como brazo azul y brazo rojo. Estos brazos se generan a partir del filtro óptico, puesto que divide el haz de luz común en dos caminos, es decir, en dos brazos (rojo y azul). Ambos brazos cuentan con diferentes propiedades y características, es por ello que los modelos optomecánicos que nos interesó conocer su comportamiento y expansión térmica fueron los componentes *cámara roja* y *cámara azul* que se muestran en la Figura 3.3.

El análisis se realizó con los modelos originales utilizados en el proyecto de ESOPO. Adicionalmente, realizamos una optimización de ambos modelos, esto con la finalidad de comparar los resultados obtenidos y proponer alternativas para mitigar los efectos de la expansión térmica. Los modelos originales del proyecto ESOPO se describirán en este documento con los nombres *cámara azul* y *cámara roja*, así como las modificaciones efectuadas en estos modelos descritos con los nombres de *cámara azul optimizada* y *cámara roja optimizada*.

4.3. Modificaciones realizadas en los modelos

Previo a la realización de los análisis empleados a los modelos se realizaron diferentes modificaciones en cada uno de ellos. Es importante mencionar que el ensamble principal del proyecto fue diseñado y ensamblado por medio del software SolidWorks.

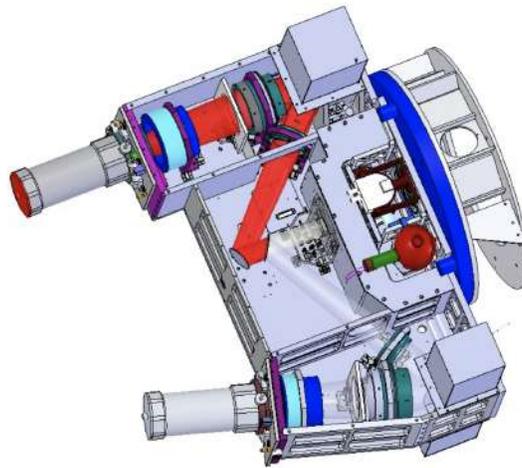


Figura 4.1: Ensamble general de ESOPO utilizando el software de SolidWorks.

Es por ello por lo que se utilizó este mismo software para adecuar los modelos. Esto debido a la practicidad de poder aislar los subensambles y de esta forma poder modificarlos, verificar interferencias, contactos entre elementos o agregar componentes al ensamble. Los procedimientos realizados a la cámara roja y la cámara azul fue exactamente el mismo. Estos pasos realizados se describen de forma general.

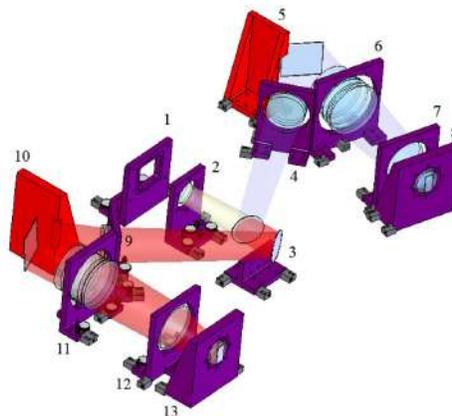


Figura 4.2: Soportes de los instrumentos optomecánicos.

A partir del ensamble general, el primer paso que se realizó fue aislar los subensables de la cámara roja y la cámara azul. En cada caso el objetivo principal fue verificar las interferencias, contactos y agregar una pieza adicional al ensamble. Como se puede ver en la Figura 4.2 todos los instrumentos optomecánicos están sujetos por diferentes interfaces, cada uno de acuerdo a las dimensiones del instrumento que tiene como objetivo sujetar, sin embargo, las interfaces 11 y 6 mostrados en la Figura 4.2 comparten las mismas características. Por ello, nos dirigiremos a este interfaz de forma general ya que fue de nuestro interés en agregarlos al ensamble de la cámara roja y cámara azul. El elemento mostrado en la Figura 4.3 fue el soporte en todos los modelos.

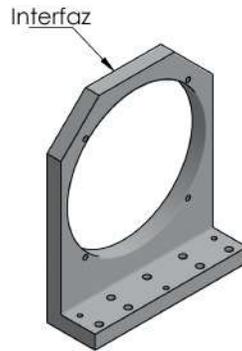


Figura 4.3: Interfaz de los modelos optomecánicos. Material utilizado AluMold F500.

Esto para obtener un mejor análisis de nuestro sistema, ya que de esta forma las condiciones de frontera empleadas se asemejan con mayor similitud a lo que podemos visualizar en la realidad. Posteriormente a ello, se verificó que los elementos que conformaban los ensambles estuvieran en contacto, al ser ensambles con muchos componentes se utilizó la herramienta de *vista de selección*, la cual realiza un corte transversal sobre la geometría que te permite visualizar de una mejor manera las interferencias que existen entre los elementos del ensamble. Es importante mencionar que debido al diseño y las restricciones que los modelos tenían inicialmente, se modificaron para poder solventar los errores por falta de contacto. Con lo anterior, nos aseguramos de que los modelos estuvieran listos para ser exportados al software de simulación multifísica.

4.3.1. Cámara roja

El ensamble de la cámara roja está compuesto por ocho elementos más la interfaz que se muestra en la Figura 4.3.

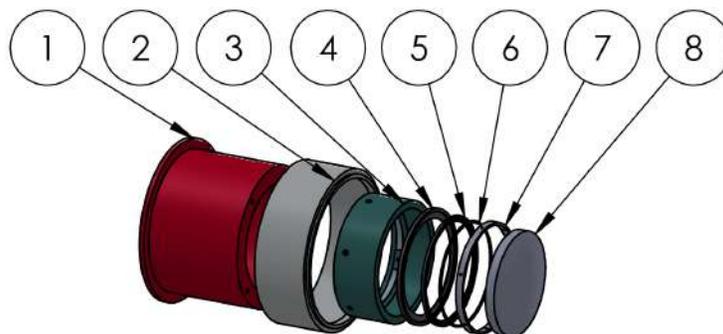


Figura 4.4: Cámara roja, vista explosionada.

Cada uno de los elementos del sistema fue de nuestro interés durante la simulación empleada a este modelo. Estos elementos del sistema se pueden visualizar en la Figura 4.4, en ella se muestra una vista explosiva de este modelo. Por otro lado, en la Tabla 4.1 se muestra el nombre de los componentes con sus respectivos materiales utilizados durante las simulaciones.

Tabla 4.1: Elementos y materiales utilizados en la cámara roja.

Número	Componente	Material empleado
1	Celda CAM-RS2	Nylamid M
2	Extensión CAM-RS2	Acero 1035
3	Soporte Radial CAM-RD2L1	AluMold F500
4	Separador 3 CAM-RS2	AluMold F500
5	Separador 2 CAM-RS2	AluMold F500
6	Oring 2-161	O-ring 2-161
7	Soporte Radial CAM-RD2L2	AluMold F500
8	Lente CAM-RS2	N-SSK5

4.3.1.1. Cámara roja optimizada

Las modificaciones realizadas a la cámara roja fueron efectuadas por medio del software de modelado mecánico SolidWorks.

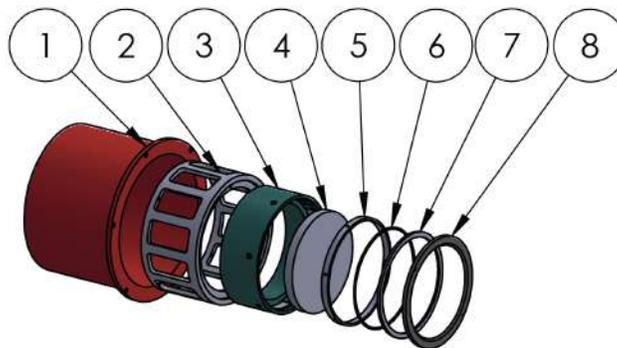


Figura 4.5: Cámara roja optimizada, vista explosionada.

Tabla 4.2: Elementos y materiales utilizados en la cámara roja optimizada.

Número	Componente	Material empleado
1	Celda CAM-RS2	Nylamid M
2	Extensión CAM-RS2	Acero 1035
3	Soporte Radial CAM-RD2L1	Acero 1035
4	Lente CAM-RS2	N-SSK5
5	Soporte Radial CAM-RD2L2	Acero 1035
6	Oring 2-161	O-ring 2-16
7	Separador 2 CAM-RS2	AluMold F500
8	Separador 3 CAM-RS2	AluMold F500

El nuevo modelo generado fue modificado en SolidWorks y obtuvo cambios en la geometría además de que fueron propuestos diferentes materiales para los elementos del ensamble. Esto con la finalidad de comparar los efectos de los desplazamientos ocasionados de la expansión térmica. En la Tabla 4.2 se describen los elementos del ensamble y los materiales utilizados, mientras que en la Figura 4.5 se puede observar la vista explosiva de este modelo. Los cambios en su geometría son visibles. El cambio en la geometría más notable ocurre en el elemento *Extensión CAM-RS2*, esto es debido a que se consideró como una alternativa para disminuir el peso de la cámara. Otro punto determinante fue la selección y propuesta de materiales. En la Tabla 4.2 se muestran los materiales utilizados para cada elemento del ensamble. Es importante mencionar que en este modelo también fue agregado el elemento interfaz mostrado en la Figura 4.3. Debido a que es el mismo elemento en todos los componentes no se incluyó en la vista de los ensambles.

4.3.2. Cámara azul

Por otro lado, el modelo de la cámara azul está compuesto por ocho elementos más la interfaz mostrada en la Figura 4.3. Al ser el mismo elemento se omitió y por ello los ocho elementos son los mostrados en la Figura 4.6. Ya que en ella se muestra la vista explosiva de este ensamble. Los elementos que la componen están descritos en la Tabla 4.3 así como los materiales empleados.

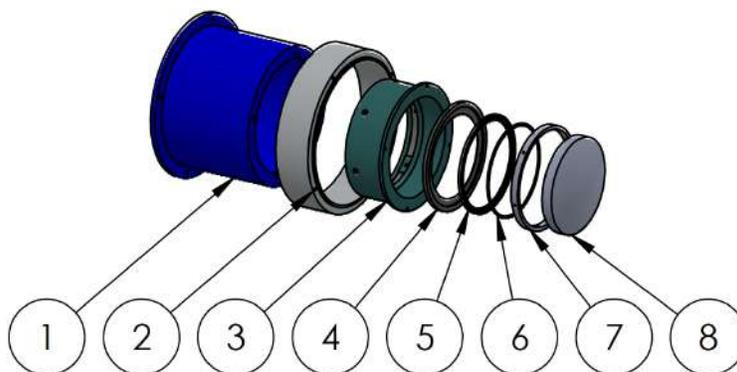


Figura 4.6: Cámara azul, vista explosionada.

Tabla 4.3: Elementos y materiales utilizados en la cámara azul.

Número	Componente	Material empleado
1	Celda CAM-AS2	Nylamid M
2	Extensión CAM-AS2	Acero 1035
3	Soporte Radial CAM-AD2L1	AluMold F500
4	Separador 3 CAM-AS2	AluMold F500
5	Separador 2 CAM-AS2	AluMold F500
6	Oring 2-351	O-ring 2-351
7	Soporte Radial CAM-AD2L2	AluMold F500
8	Lente CAM-AS2	PBL26Y

Al igual que los modelos anteriores, los ocho elementos mencionados fueron analizados durante las simulaciones efectuadas. Esto porque fue de gran importancia conocer las expansiones térmicas ocasionadas en el modelo.

4.3.2.1. Cámara azul optimizada

La cámara azul optimizada también fue modificada por medio del software SolidWorks. Los cambios más visibles realizados se pueden apreciar en su geometría. Adicionalmente se agregó un nuevo elemento con la finalidad de permitir una mayor expansión térmica. Este modelo se puede visualizar en la Figura 4.7 mientras que la nomenclatura de los elementos y los materiales seleccionados se observan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Componentes empleados y los materiales seleccionados para la cámara azul optimizada.

Número	Componente	Material empleado
1	Extensión 1 CAM-AS2	Acero 1035
2	Celda CAM-AS2	Nylamid M
3	Extensión 2 CAM-AS2	Acero 1035
4	Soporte Radial CAM-AD2L1	AluMold F500
5	Soporte Radial CAM-AD2L2	Acero 1035
6	Lente CAM-AS2	PBL26Y
7	Oring 2-351	O-ring 2-351
8	Separador 2 CAM-AS2	AluMold F500
9	Separador 3 CAM-AS2	AluMold F500

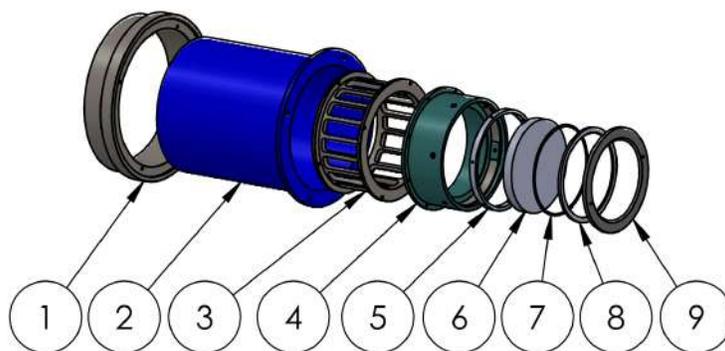


Figura 4.7: Cámara azul optimizada, vista explosionada.

4.4. Importancia de la verificación de los subensambles

Un paso determinante previo al análisis de los componentes fue la verificación de los subensambles. Con esto nos referimos a verificar que no existan interferencias o separaciones entre elementos debido a que esto genera problemas al momento de iterar y existe una alta posibilidad que la iteración no se complete o los resultados obtenidos no sean confiables. A simple vista el ojo humano no puede percatarse de que existe una separación de diez micrómetros o incluso más pequeña. Estas longitudes o diferencias por lo general se consideran despreciables, sin embargo, en las computadoras y especialmente en el software de simulación por el método de elemento finito las piezas deben estar en contacto.

5 Implementación de los análisis

El análisis de elementos finitos de los componentes optomecánicos fue realizado por medio del software ANSYS Workbench 2025 R1, esto debido a que resulta ser una herramienta muy útil para simular y analizar los efectos de la expansión térmica de los modelos. En este capítulo se describirán los análisis empleados, las condiciones de frontera, el mallado de los elementos y los resultados obtenidos.

5.1. Cámara roja

5.1.1. Modelo CAD simplificado de la cámara roja

El modelo CAD simplificado de la cámara roja, con el cual se realizó la simulación de la expansión térmica y la simulación de los efectos ocasionados por la fuerza de gravedad se muestran en la Figura 5.1.

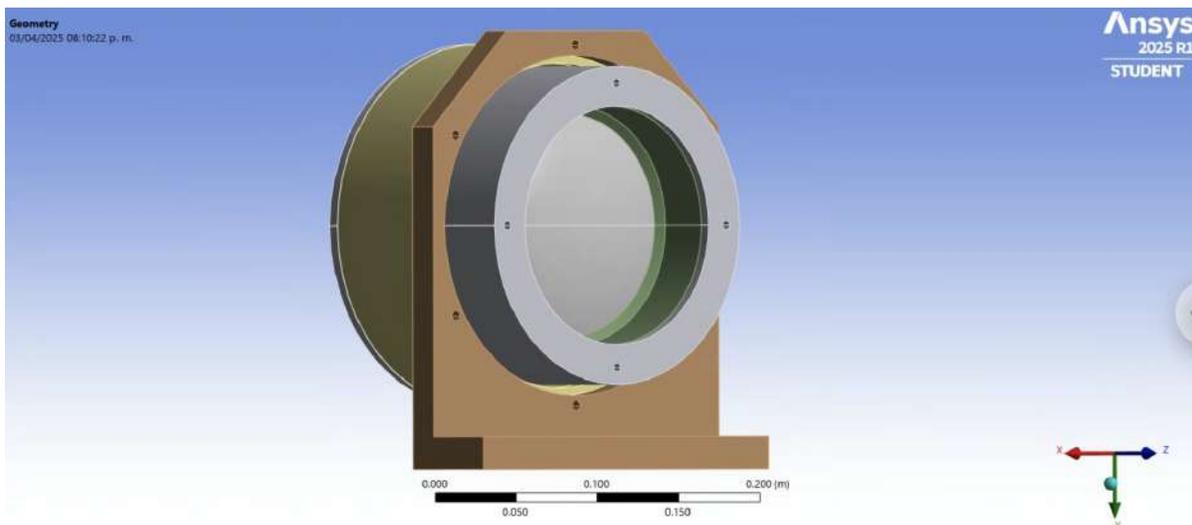


Figura 5.1: Cámara roja.

Con respecto a los cambios realizados en el software de SolidWorks, a simple vista no son perceptibles puesto que las modificaciones realizadas fueron entre la separación e interferencias que ocurría entre los elementos del ensamble. Esto nos garantizó que el modelo no tuviera ningún inconveniente en los contactos de los elementos del modelo. Por ello, este fue el modelo con el cual se realizó la exportación al software de simulación multifísica ANSYS Workbench.

5.1.2. Descripción del análisis

El software ANSYS Workbench 2025 R1 fue utilizado para simular y analizar el efecto de la expansión térmica así como los efectos ocasionados por la fuerza de gravedad de los elementos del modelo CAD simplificado. Se decidió realizar una sola simulación en la cual se implementaron las dos variables de interés, es decir, el cambio térmico y la fuerza ocasionada por la gravedad como se puede ver en la Figura 5.2. La cual muestra la interfaz del software ANSYS Workbench para la simulación realizada en el modelo de la cámara roja.



Figura 5.2: Interfaz ANSYS Workbench cámara roja

5.1.2.1. Descripción de las variables de interés

Sobre las variables de interés, para la fuerza de gravedad aplicada a la cámara roja se utilizó la magnitud por defecto que el software traía consigo, es decir, se utilizó el valor de 9.8066 m/s^2 . Para la cual se tomó como referencia el sistema de coordenadas de la cámara roja, la dirección aplicada fue en la dirección del Eje Y como se muestra en la Figura 5.3.

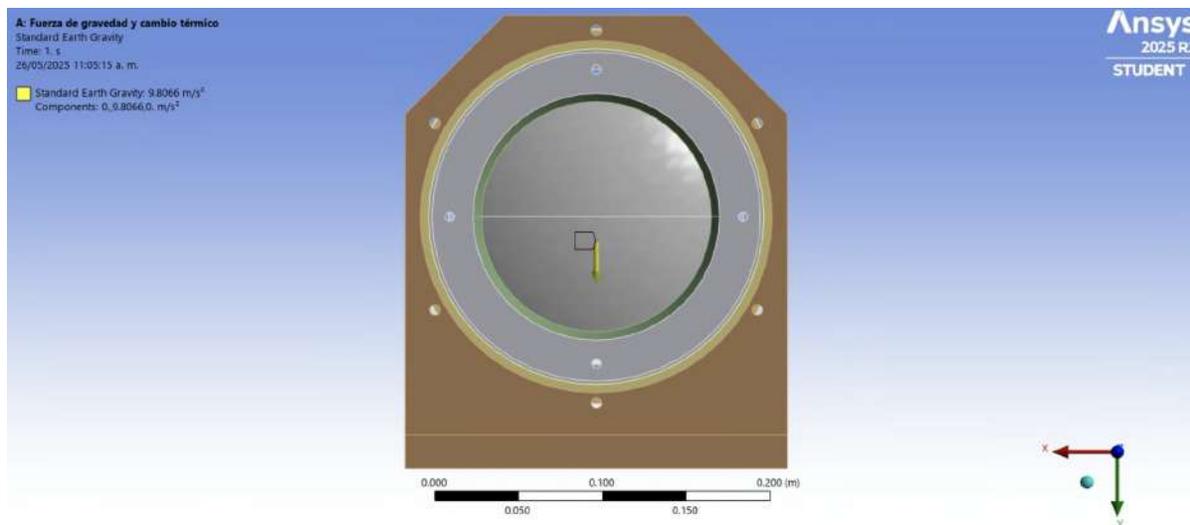


Figura 5.3: Fuerza de gravedad aplicada a la cámara roja.

Por otro lado, el cambio térmico implementado en la cámara roja fue de una diferencia de temperatura de 1°C . Se consideró que la temperatura inicial fuera igual a la temperatura ambiente

la cual se otorgó el valor de de 22°C , mientras que la temperatura final se consideró de 23°C . La implementación de la simulación térmica fue aplicada a todos los elementos que conforman el ensamble de la cámara roja como se muestra en la Figura 5.4.

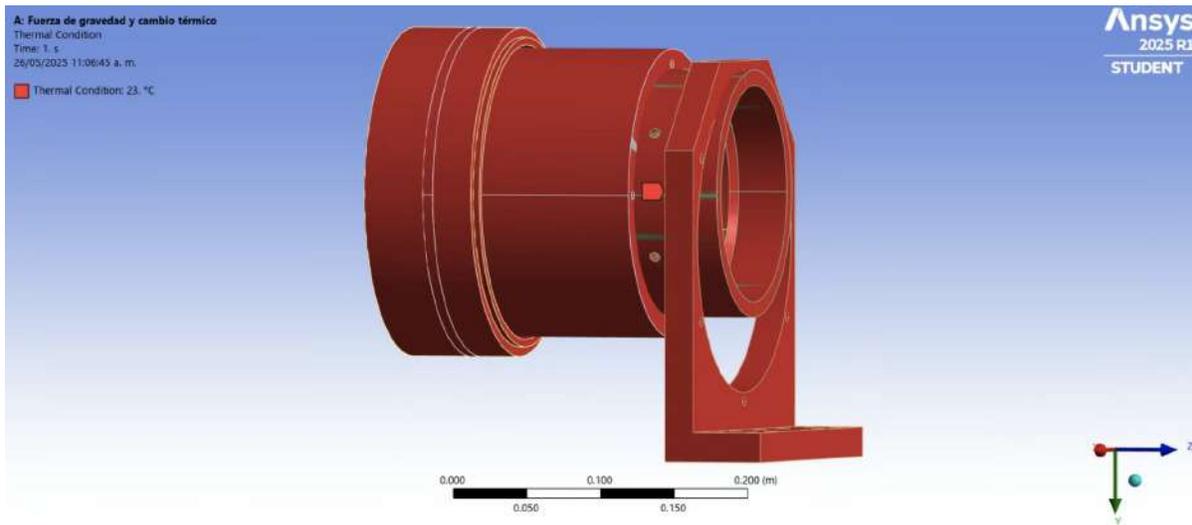


Figura 5.4: Condición térmica de 23°C aplicada a la cámara roja.

5.1.3. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera empleadas en el modelo de la cámara roja fueron con la finalidad de simular un entorno cercano a la realidad, cumpliendo los requerimientos del software para que pudiera cumplir con la iteración de la simulación. Con las condiciones de frontera se buscó que la cámara roja se mantuviera fija en todo momento pero sin afectar los desplazamientos ocasionados por la expansión térmica o la fuerza de gravedad. En la Figura 5.5 se muestra de forma ilustrativa las condiciones de frontera utilizadas en este análisis.

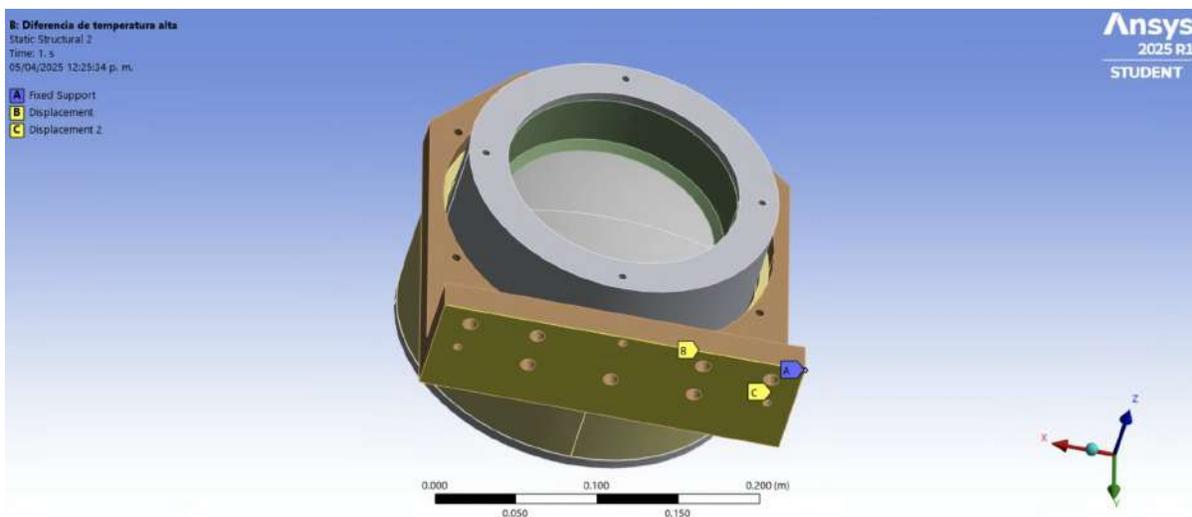


Figura 5.5: Condiciones de frontera del modelo cámara roja

Estas restricciones fueron seleccionadas para permitir los grados de libertad necesarios para la expansión, simular las condiciones reales y evitar la sobrerrestricción. Es por ello que:

- La condición de frontera A, fue un nodo fijo en la esquina superior derecha. Cuya función fue fijar el cuerpo en el espacio, permitiendo al software tener una referencia para los desplazamientos.
- Para la condición de frontera B, fue seleccionada la arista superior, en donde se restringió los movimientos en el Plano YZ por lo cual se permite la expansión térmica en X.
- Finalmente en la condición de frontera C, fue seleccionada toda la base, impidiendo movimiento en Y pero permitiendo la expansión en X y Z. Fácilmente se puede apreciar como un apoyo donde la cámara se puede expandir sin levantarse.

Es importante mencionar que cada usuario tiene una forma distinta de aplicar las condiciones de frontera al sistema, sin embargo, consideramos que son las más adecuadas para el análisis.

5.1.4. Mallado

El tamaño de mallado aplicado al modelo de la cámara roja fue de 8 milímetros. Este tamaño se consideró el más óptimo con respecto a la relación recurso computacional y resultados. El cual fue seleccionado a partir de la prueba y error donde se encontró que con este valor los resultados no variaban significativamente. La versión del software con la que trabajamos fue una versión estudiantil, por lo cual fue otro aspecto tomado en cuenta debido a que no se debió exceder el límite de nodos y elementos.

El número de nodos utilizados fue de 112139, mientras que el número de elementos utilizados fue de 60116. En la Figura 5.6 se puede visualizar el mallado utilizado en el sistema.

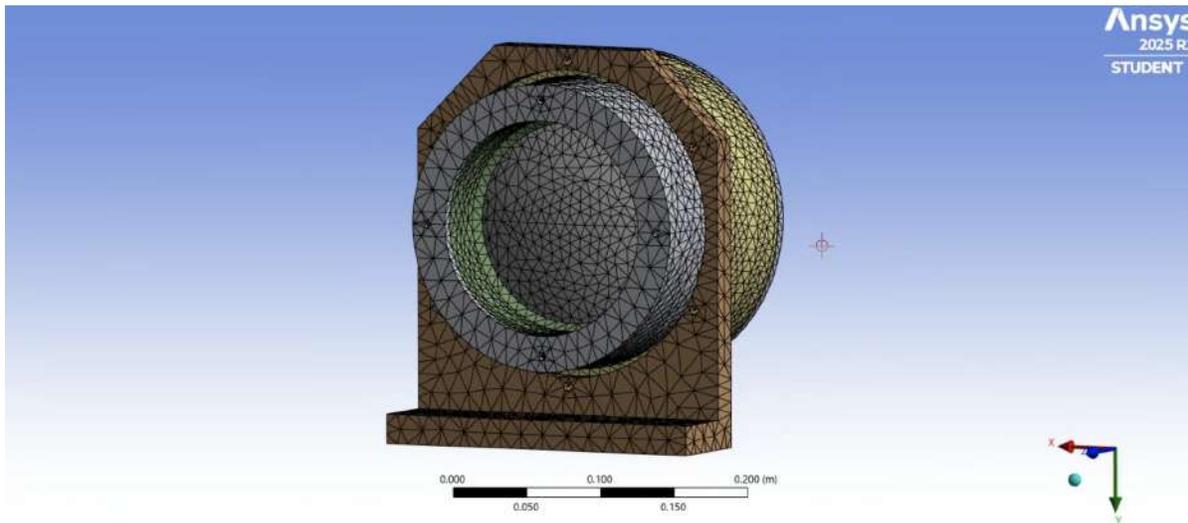


Figura 5.6: Mallado cámara roja.

Es importante mencionar que las diferentes herramientas de mallado ofrecidas por el software no fueron utilizadas debido a que se excedía el límite de nodos y elementos del sistema. Por ello se optó únicamente por utilizar el mallado automático de todos los elementos con el tamaño mencionado anteriormente.

5.2. Cámara roja optimizada

5.2.1. Modelo CAD simplificado de la cámara roja optimizada

La simulación térmica y la simulación de los efectos ocasionados por la fuerza de gravedad fueron aplicados al modelo CAD simplificado de la cámara roja optimizada que se muestran en la Figura 5.7.

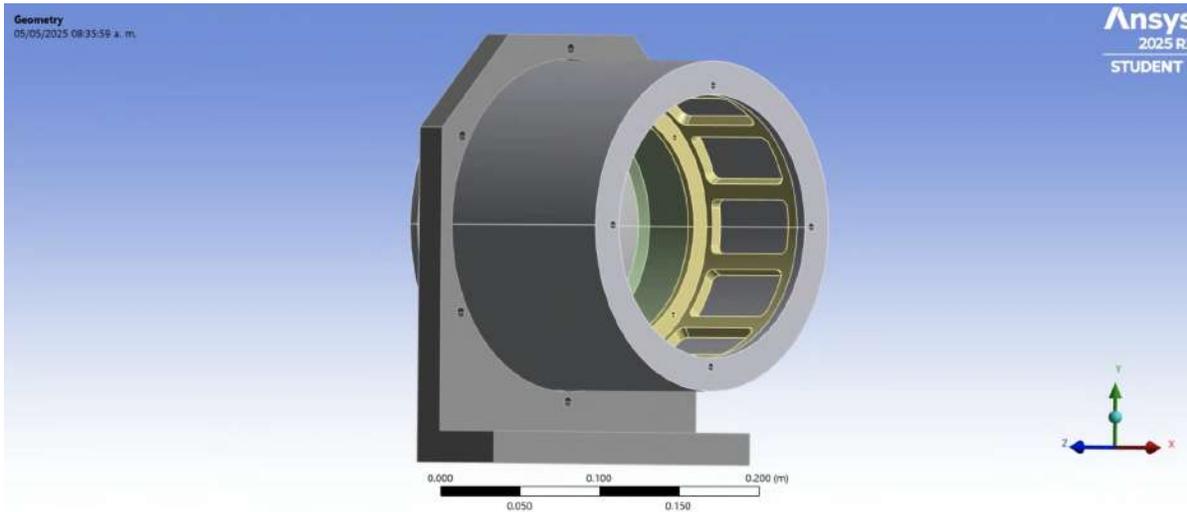


Figura 5.7: Cámara roja optimizada.

Este modelo CAD simplificado es una modificación de la cámara roja a través del software SolidWorks. Como se puede observar en la Figura 5.7 los cambios realizados en este software son perceptibles. Uno de los objetivos de la modificación del **compensador** fue la disminución del peso y lograr los requerimientos propuestos en el capítulo anterior.

5.2.2. Descripción del análisis

Al igual que en la cámara roja el software ANSYS Workbench 2025 R1 se utilizó para simular y analizar el efecto de la expansión térmica así como los efectos ocasionados por la fuerza de gravedad de los elementos del modelo CAD simplificado. En este caso, se realizaron tres diferentes análisis de los cuales nos enfocaremos únicamente en el tercer análisis realizado. Como se muestra en la Figura 5.8.



Figura 5.8: Interfaz ANSYS Workbench cámara roja optimizada.

Esto debido a que en el primer análisis la única variable de interés fue la acción de la fuerza de la gravedad, en el segundo análisis la variable de interés fue únicamente el cambio de temperatura y en el tercer análisis ambas variables estuvieron involucradas en la simulación. Por ello, describimos únicamente el tercer análisis.

5.2.2.1. Descripción de las variables de interés

El valor de la fuerza de gravedad aplicada al modelo fue la magnitud que el software traía por defecto y se utilizó como referencia el sistema de coordenadas de la cámara roja optimizada. Por ello, la dirección en la cual fue aplicada fue en la dirección del Eje Y negativo como se muestra en la Figura 5.9.

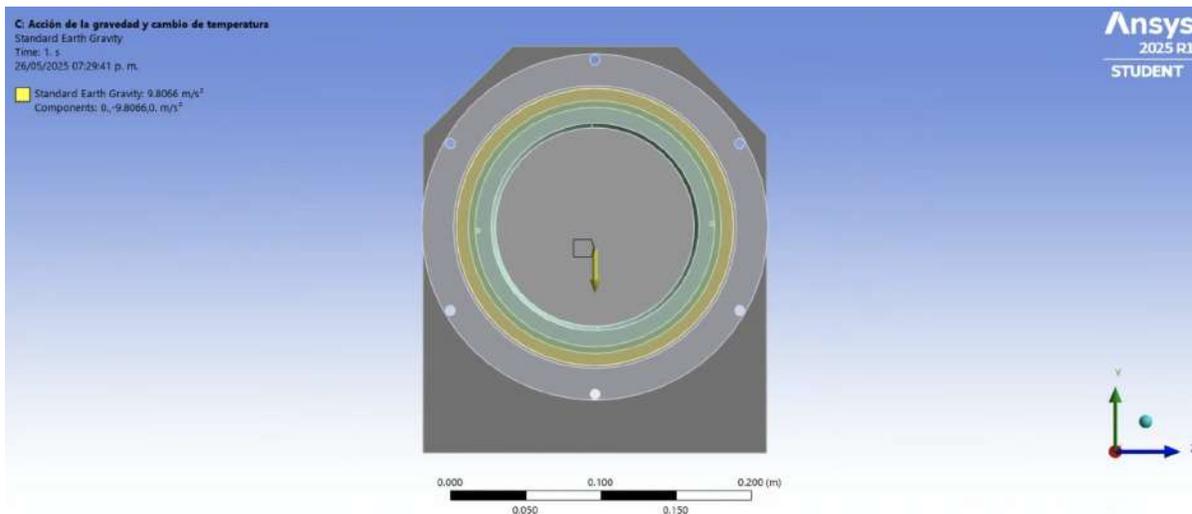


Figura 5.9: Fuerza de gravedad aplicada a la cámara roja optimizada.

El cambio térmico implementado en la cámara roja optimizada fue el mismo realizado en el modelo CAE anterior (cámara roja). Se consideró una diferencia de temperatura de 1°C y se mantuvo la misma temperatura inicial, final y ambiente del modelo anterior.

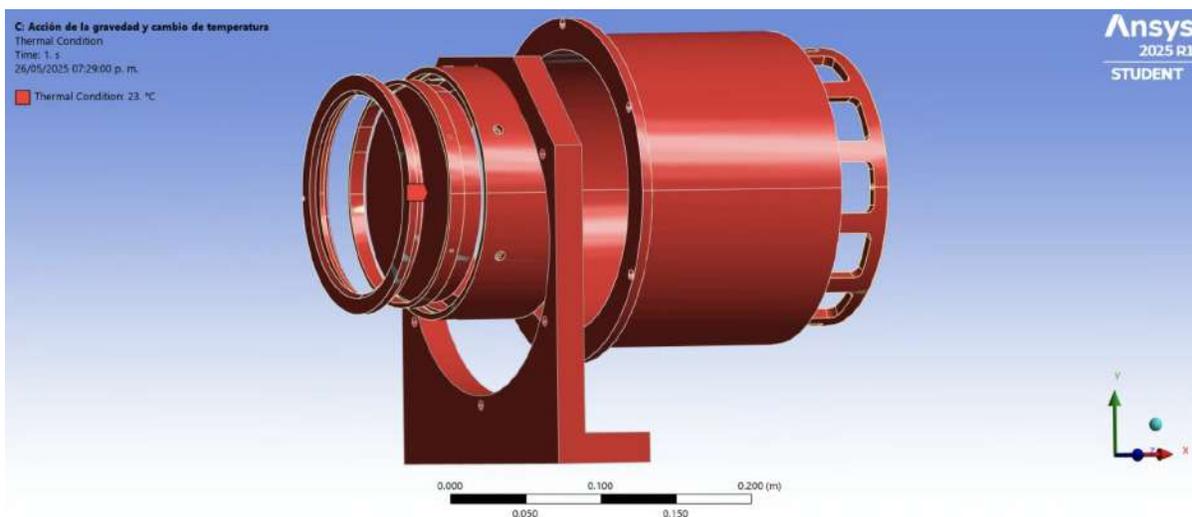


Figura 5.10: Condición térmica de 23°C aplicada a la cámara roja optimizada.

La implementación de la simulación térmica fue aplicada a todos los elementos que conforman el modelo de la cámara roja optimizada como se muestra en la Figura 5.10.

5.2.3. Condiciones de frontera

Al igual que el modelo anterior, las condiciones de frontera de este modelo fueron seleccionadas con el objetivo de simular un entorno cercano a la realidad, permitir la iteración del software y no causar desplazamientos a causa de la sobrerrestricción. Con ello, nos aseguramos que el modelo se mantuviera fijo sin afectar los desplazamientos ocasionados por la expansión térmica o la fuerza de gravedad. En la Figura 5.11 se muestra de forma ilustrativa las condiciones de frontera utilizadas en este análisis.

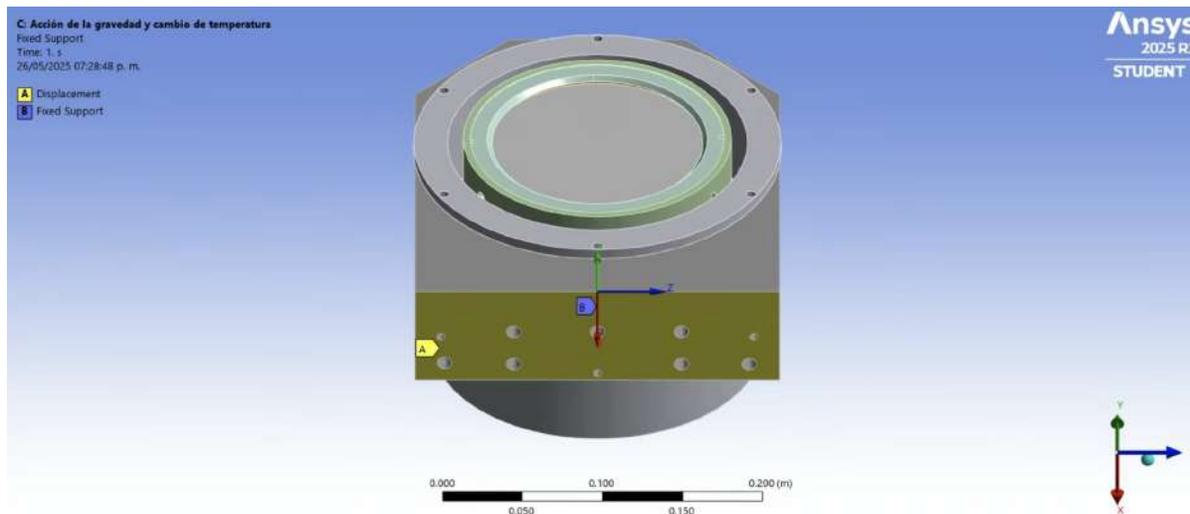


Figura 5.11: Condiciones de frontera del modelo cámara roja optimizada.

Como se muestra en la Figura 5.11 se utilizaron únicamente dos condiciones de frontera. Esto debido a la nueva configuración de la cámara, ya que con las condiciones de frontera anteriores causaba errores en el modelo por ello se optó por cambiarlas. Las cuales se describen a continuación:

- En condición de frontera A, se seleccionó toda la base, restringiendo su movimiento en el Eje Y y permitiendo movimiento en los Ejes X y Z. Ya que de esta forma el modelo se permitió la expansión.
- Para la condición de frontera B, se seleccionó un nodo fijo en el centro del modelo, es decir, en las coordenadas (0,0,0), esto para fijar el cuerpo en el espacio y de que de esta forma el software tuviera una referencia para los desplazamientos.

Para este caso, se consideró que estas condiciones de frontera fueron las adecuadas, debido a que ocasionaba menos errores en las aproximaciones otorgadas por el software.

5.2.4. Mallado

Para este modelo se utilizó el mallado automático que trae el software con un tamaño de mallado de 7 milímetros. Este tamaño fue seleccionado por medio de prueba y error, ya que se encontró como el más óptimo con relación recurso computacional y resultados obtenidos. La versión del

software con la que se realizó la simulación fue la versión estudiantil, por ello, se buscó por otro lado no exceder el límite de nodos y elementos. Por ello se obtuvo que el número de nodos utilizados fue de 125055, mientras que el número de elementos utilizados fue de 65900. En la Figura 5.12 se puede visualizar el mallado utilizado en el sistema.

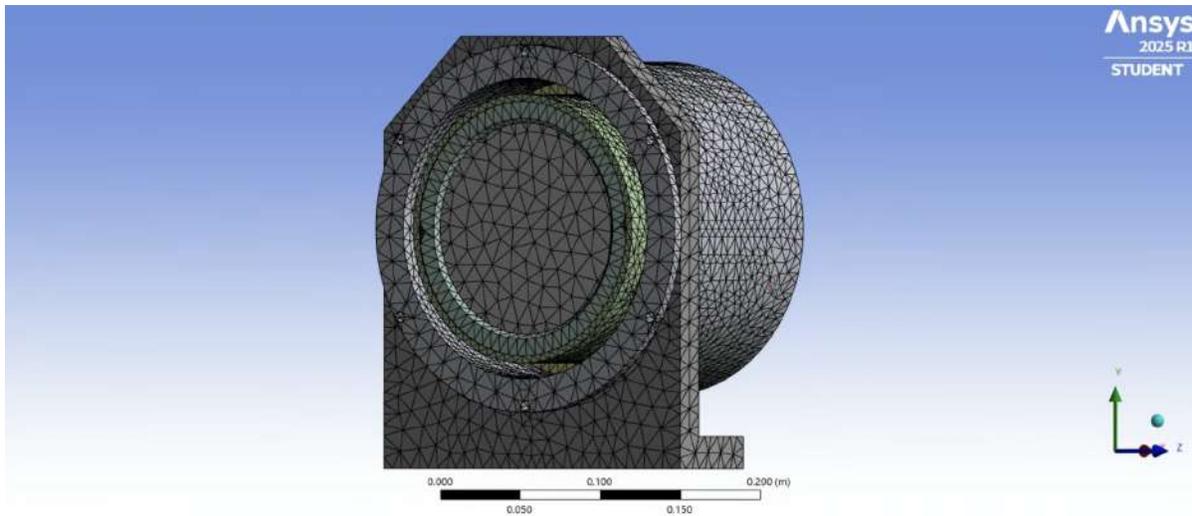


Figura 5.12: Mallado cámara roja optimizada.

5.3. Cámara azul

5.3.1. Modelo CAD simplificado de la cámara azul optimizada

El modelo simplificado de la cámara azul utilizado en la simulación de la expansión térmica y los efectos ocasionados por la fuerza de la gravedad se muestra en la Figura 5.13.

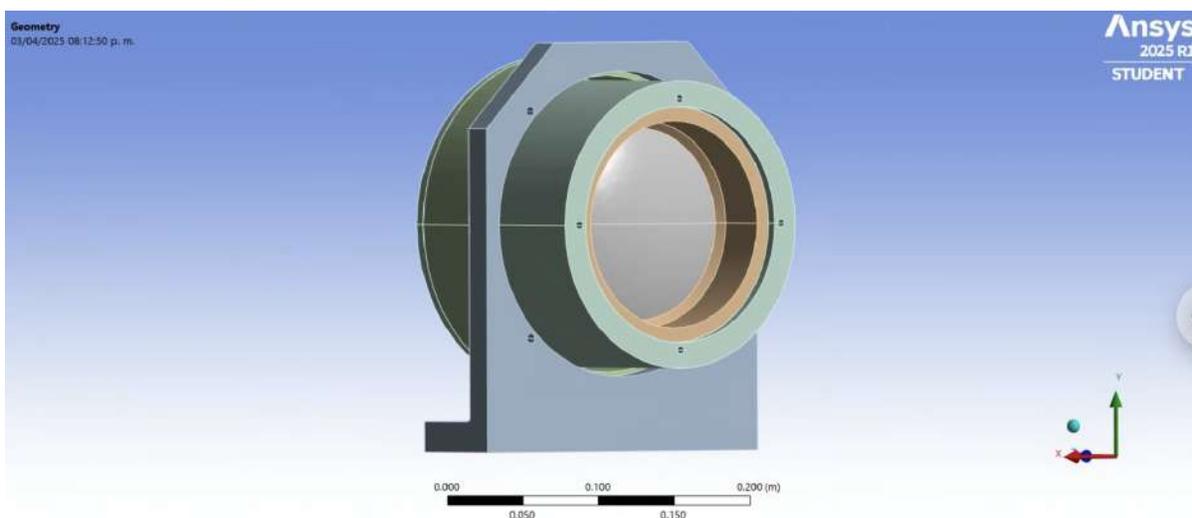


Figura 5.13: Cámara azul.

Como se mencionó, este modelo CAD fue el utilizado en el proyecto de ESOPPO, con la única

diferencia en sus modificaciones realizadas en el software SolidWorks, en las interferencias que el modelo traía.

5.3.2. Descripción del análisis

En este modelo, no hubo excepción y también fue utilizado el software ANSYS Workbench 2025 R1. Esto para analizar y simular el efecto de la expansión térmica y los efectos ocasionados por la fuerza de gravedad de los elementos del modelo CAD simplificado de la cámara azul. Como se puede observar en la Figura 5.14 se realizaron tres análisis, sin embargo, se enfocó únicamente en el tercer análisis debido a que es el que muestra todas las variables de interés.

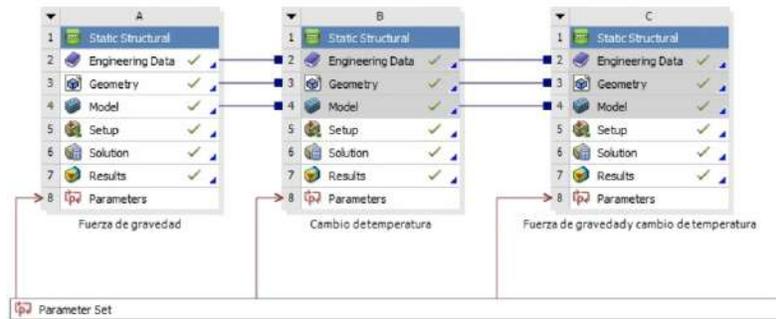


Figura 5.14: Interfaz ANSYS Workbench cámara azul.

Ya que el primer y segundo análisis se contemplan por separado las variables de interés, mientras que en el tercero se muestran todas las variables de interés aplicadas.

5.3.2.1. Descripción de las variables de interés

Para la variable de fuerza de gravedad, en este modelo también fue utilizado el mismo valor que el software traía consigo con la diferencia del sistema de coordenadas.

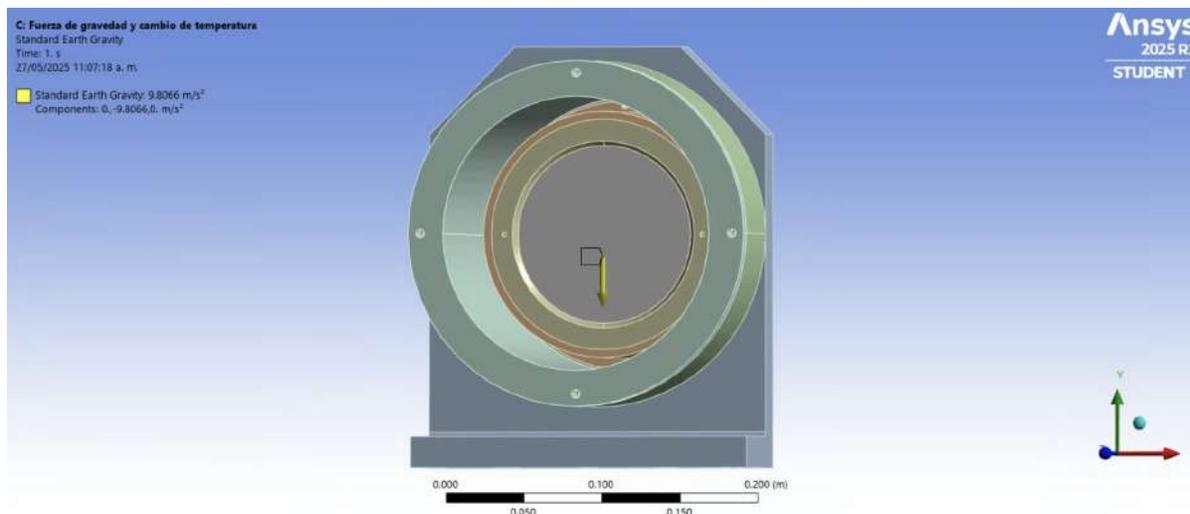


Figura 5.15: Fuerza de gravedad aplicada a la cámara roja optimizada.

Como se muestra en la Figura 5.15 el sistema de coordenadas era distinto por lo cual la dirección en la cual fue aplicada la fuerza de gravedad fue en la dirección del Eje Y negativo.

En el caso del cambio térmico implementado en la cámara azul fue una variable que se mantuvo sin cambios. Se conservó la misma diferencia de temperatura, es decir, de 1°C y se mantuvo la misma temperatura inicial, final y ambiente de los modelos anteriores. Es decir: temperatura inicial de 22°C , temperatura final de 23°C y temperatura ambiente de 22°C .

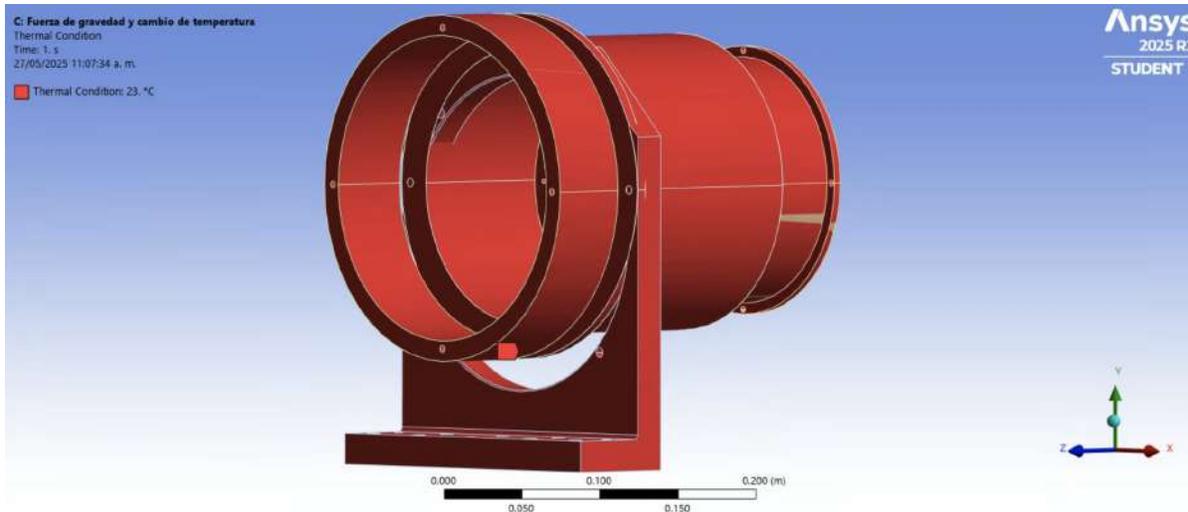


Figura 5.16: Condición térmica de 23°C aplicada a la cámara azul.

Como se muestra en la Figura 5.16 a todos los elementos que conforman el modelo de la cámara azul se les aplicó el cambio de temperatura.

5.3.3. Condiciones de frontera

Con las condiciones de frontera propuestas nos aseguramos que el modelo simulara un entorno cercano a la realidad sin causar desplazamientos a causa de la sobrerrestricción y permitir los desplazamientos causados por el cambio de temperatura. En la Figura 5.17 se muestra de forma ilustrativa las condiciones de frontera utilizadas en este análisis.

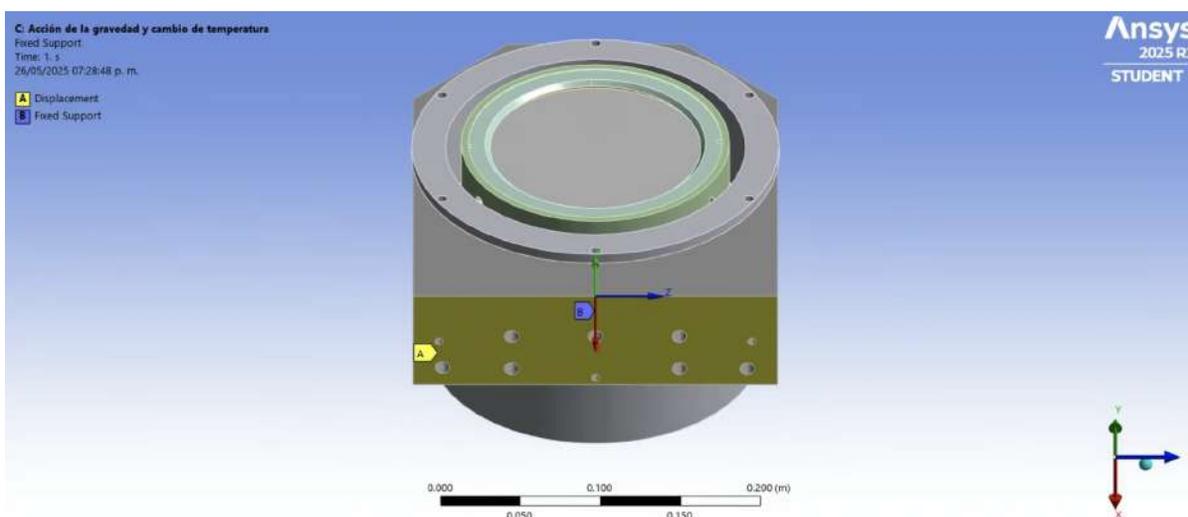


Figura 5.17: Condiciones de frontera aplicadas en la cámara azul.

Una correcta elección en las condiciones de frontera nos facilita prácticamente el ochenta por ciento que el software pueda iterar y darnos resultados adecuados. A diferencia del modelo anterior, en este modelo se retomó utilizar tres condiciones de frontera, las cuales:

- En condición de frontera A, se seleccionó un vértice de la base, permitiendo movimiento únicamente en el Eje X. Con esto permitimos su expansión térmica.
- Para la condición de frontera B, toda la base del modelo fue seleccionada con la finalidad de permitir la expansión en X y Z. Ya que al restringir el movimiento en el Eje Y nos aseguramos de que el modelo no se levante o baje.
- En la condición de frontera C, agregamos el punto de referencia del sistema, el cual fue un nodo en la base al cual no se le permitió ningún grado de libertad.

Con esto, el software pudo iterar y obtener resultados con menos errores en las aproximaciones otorgadas por el software.

5.3.4. Mallado

Para este modelo fue utilizado el mallado automático que trae el software con un tamaño de mallado de 7 milímetros. Este, fue seleccionado por medio de prueba y error. En donde se encontró que los resultados no variaban conforme se hacía más pequeño el tamaño. Por ello se consideró como el más óptimo con relación recurso computacional y resultados obtenidos. Esto fue determinado sin exceder el límite de nodos y elementos ya que la versión con la que se trabajó fue la versión estudiantil. En donde se obtuvo que el número de nodos utilizados fue de 114132, mientras que el número de elementos utilizados fue de 59994. En la Figura 5.18 se puede visualizar el mallado utilizado en el sistema.

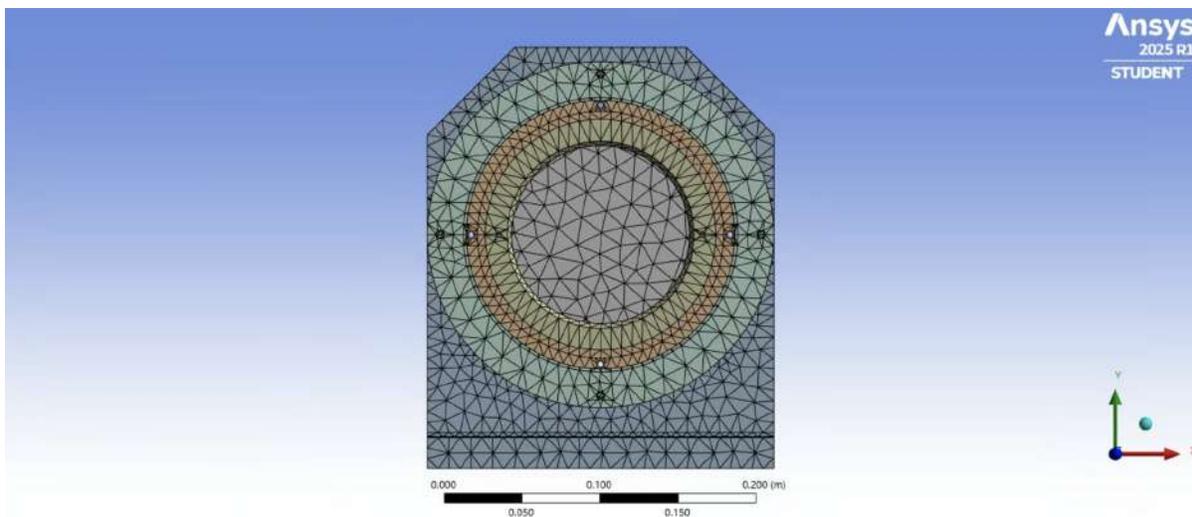


Figura 5.18: Mallado cámara azul.

Debido a las limitaciones que trae la versión estudiantil del software no se utilizaron las diferentes herramientas de mallado que el software contiene, sin embargo, se verificó en múltiples ocasiones que con el mallado propuesto fue adecuado para lo que se pretendía analizar.

5.4. Cámara azul optimizada

5.4.1. Modelo CAD simplificado de la cámara azul optimizada

En la Figura 5.7 se muestra el modelo CAD simplificado de la cámara azul optimizada al cual le fue realizada la simulación térmica y la simulación de los efectos ocasionados por la fuerza de gravedad.

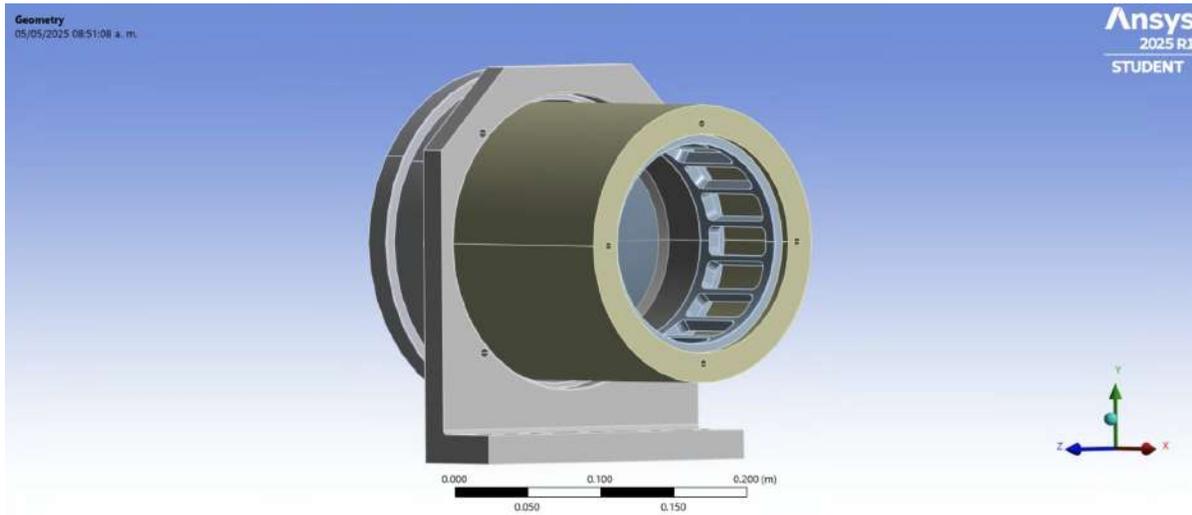


Figura 5.19: Cámara azul optimizada.

Este modelo fue una modificación de la cámara azul por medio del software SolidWorks. Como se observa, los cambios físicos son apreciable si la comparamos con la cámara azul. Al igual que la optimización realizada a la cámara roja, se buscó disminuir el peso y lograr los requerimientos propuestos en el capítulo anterior.

5.4.2. Descripción del análisis

Como se mencionó, todos los modelos fueron analizados por medio del software ANSYS Workbench 2025 R1.



Figura 5.20: Interfaz ANSYS Workbench cámara azul optimizada.

Como se puede visualizar en la Figura 5.20 hay tres análisis diferentes, sin embargo, el contenido del primer y segundo análisis se descartó por ser modelos prueba. El análisis de nuestro interés es el análisis denominado *cambio de temperatura y fuerza de gravedad* ya que muestra las variables de interés involucradas así como la correcta selección de materiales.

5.4.2.1. Descripción de las variables de interés

Para este último modelo se consideró la magnitud de la fuerza de gravedad contenida por defecto aplicada a la dirección del Eje Y como se muestra en la Figura 5.21.

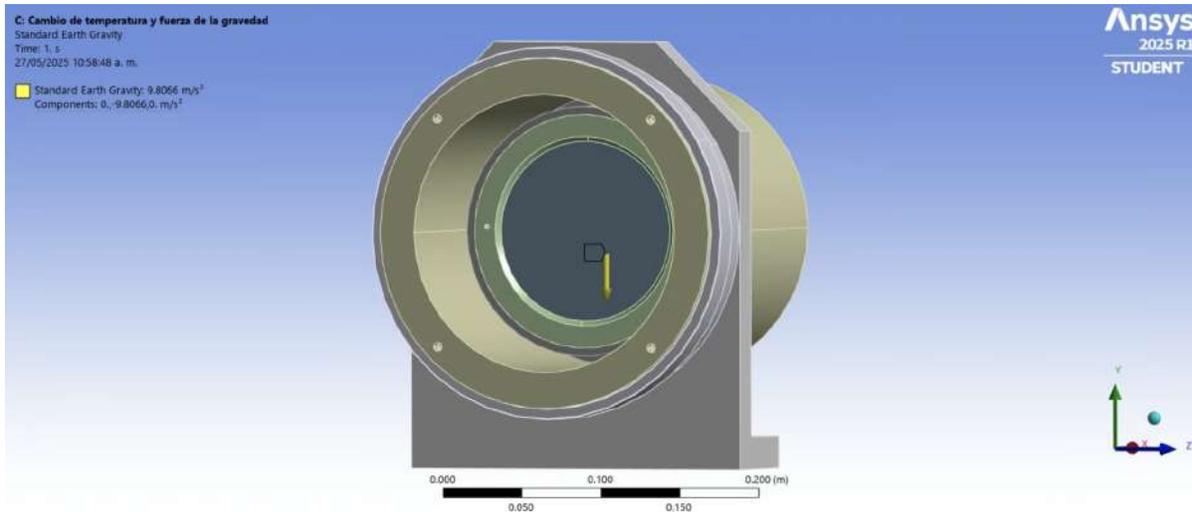


Figura 5.21: Fuerza de gravedad aplicada a la cámara azul optimizada.

Al igual que los modelos anteriores, las magnitudes de temperatura utilizadas se conservaron. Se mantuvo una diferencia de temperatura de 1°C y se conservaron las mismas temperaturas inicial, final y ambiente.

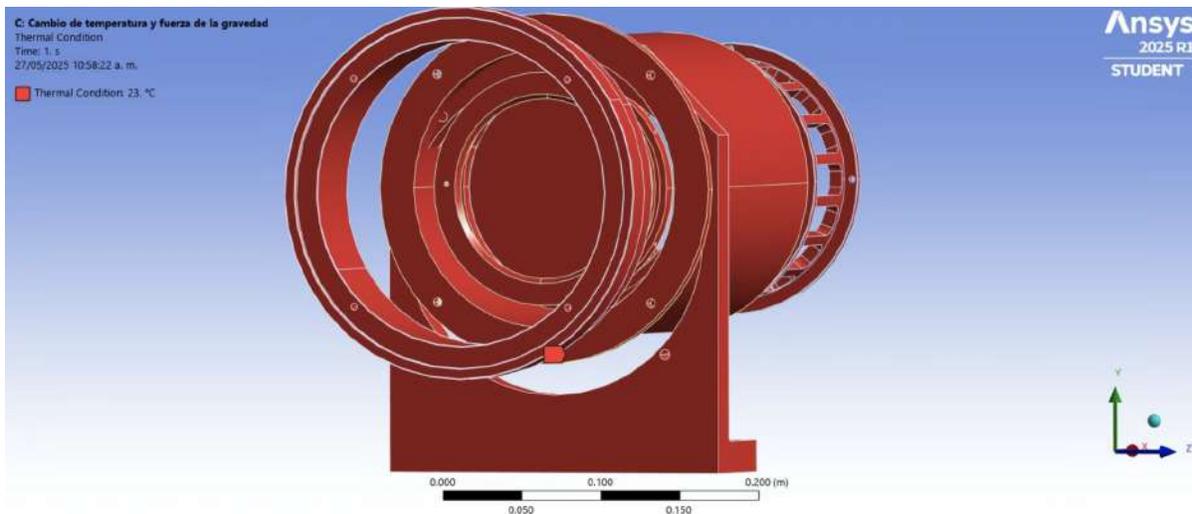


Figura 5.22: Condición térmica de 23°C aplicada a la cámara azul optimizada.

Como se muestra en la Figura 5.22 se puede visualizar que la implementación de la simulación térmica fue aplicada a todos los elementos que conforman el modelo de la cámara azul optimizada.

5.4.3. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera aplicadas al modelo se muestran en la Figura 5.23.

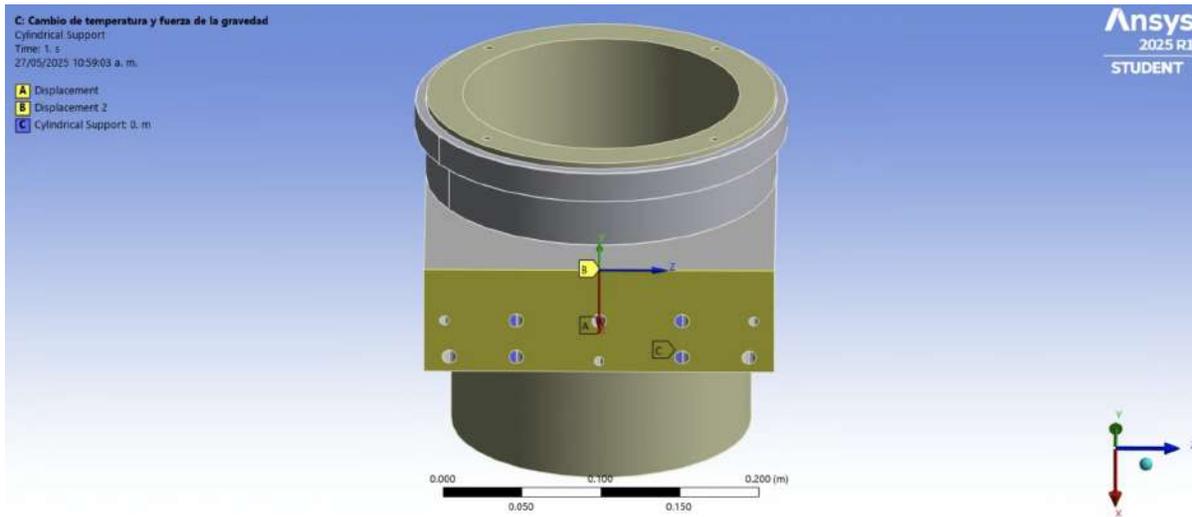


Figura 5.23: Condiciones de frontera del modelo cámara roja optimizada.

Las condiciones A y B comparten la misma finalidad que los modelos anteriores. En la condición de frontera C se buscó tomar como punto fijo y referencia los orificios en los cuales el sistema está unido por un método de unión y ensamblaje. Restringiendo todos sus grados de libertad.

5.4.4. Mallado

El mallado utilizado fue el automático con un tamaño de mallado de 7 milímetros. Seleccionado por medio de prueba y error, considerado el más óptimo con relación recurso computacional. Con esto se obtuvo un número de nodos de 127057 y un número de elemento de 64867. En la Figura 5.24 se puede visualizar el mallado utilizado en el sistema.

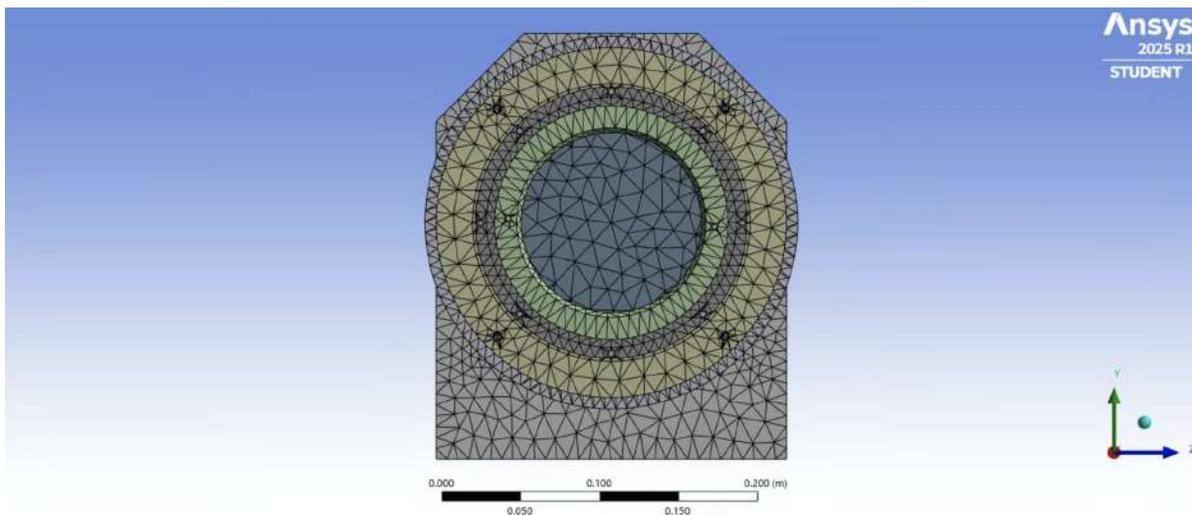


Figura 5.24: Mallado cámara azul optimizada.

6 Resultados y conclusiones

Finalmente, en este Capítulo, se mostrarán y compararán los resultados que fueron obtenidos de todos los modelos analizados. Lo anterior nos permitió analizar el efecto de la expansión térmica, evaluar su impacto y estabilidad estructural para tomar decisiones, proponer recomendaciones y concluir este documento.

6.1. Resultados

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos de los análisis empleados en ANSYS Workbench 2025 R1. Este software de simulación multifísica trae consigo diferentes categorías de resultados, sin embargo, le dimos prioridad únicamente a los resultados obtenidos de la deformación total. Inicialmente se pretendía mostrar el estrés equivalente y el estrés elástico equivalente para observar las fallas por cedencia, límite de fluencia o la deformación elástica. Debido a que todos los modelos presentaron valores similares y que en ningún modelo se presentó algún valor crítico, estos resultados fueron irrelevantes.

6.1.1. Deformación total cámara roja

Los resultados obtenidos para la simulación de la cámara roja se muestran en la Figura 6.1.

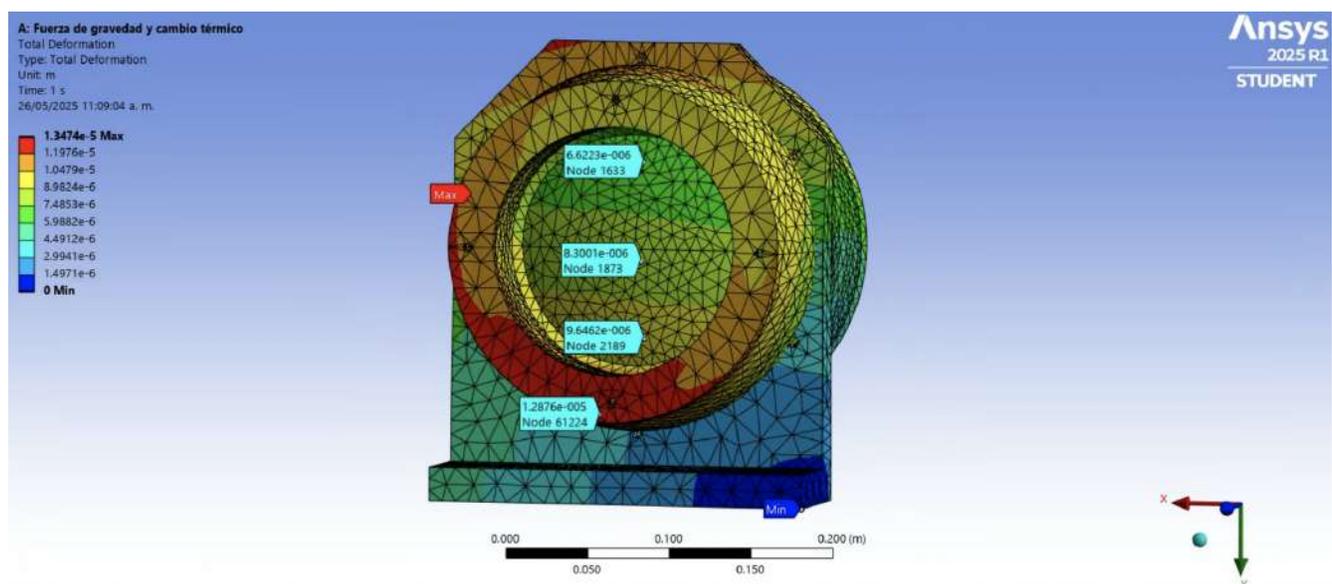


Figura 6.1: Deformación total cámara roja.

Los resultados de los nodos mostrados en la Figura 6.1 se pueden visualizar en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Resultados de los nodos mostrados en la cámara roja.

Número de nodo	Deformación
Nodo 1633	6.6223×10^{-6}
Nodo 1873	8.3001×10^{-6}
Nodo 2189	9.6462×10^{-6}
Nodo 61224	1.2876×10^{-5}

El paso utilizado para la simulación de las variables de interés fue de 1 segundo mientras que el tiempo de cómputo para que la simulación fuera completada fue de 22.969 segundos.

6.1.2. Deformación total cámara roja optimizada

Para el modelo optimizado de la cámara roja, los resultados obtenidos se pueden visualizar en la Figura 6.2.

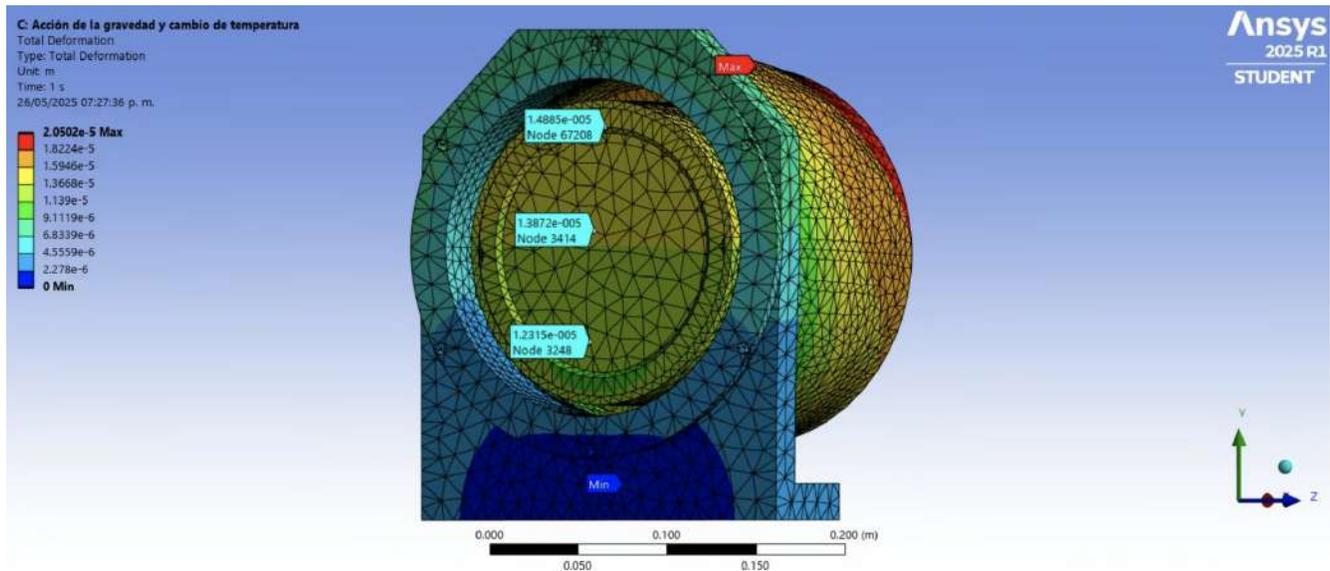


Figura 6.2: Deformación total cámara roja optimizada.

Los resultados de los nodos obtenidos y mostrados en la Figura 6.2 se pueden visualizar en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Resultados de los nodos mostrados en la cámara roja optimizada.

Número de nodo	Deformación
Nodo 67208	1.4885×10^{-5}
Nodo 3414	1.3872×10^{-5}
Nodo 3248	1.2315×10^{-5}

Con un paso de 1 segundo para la simulación aplicada con las variables de interés, los resultados fueron otorgados y completados en un tiempo computacional de 26.016 segundos.

6.1.3. Deformación total cámara azul

En la Figura 6.3 se muestran los resultados obtenidos en el modelo de la cámara azul.

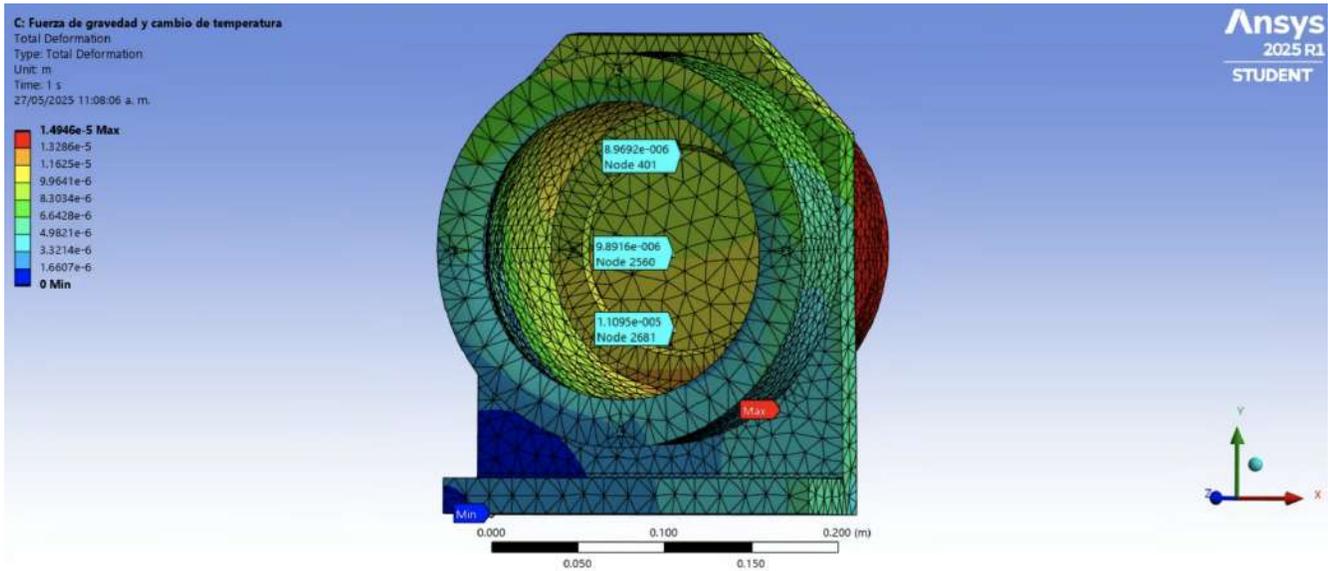


Figura 6.3: Deformación total cámara azul.

Los resultados de los nodos mostrados en la Figura 6.3 se pueden visualizar en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Resultados de los nodos mostrados en la cámara azul.

Número de nodo	Deformación
Nodo 401	8.9692×10^{-6}
Nodo 2560	9.8916×10^{-6}
Nodo 2681	1.1095×10^{-5}

Al igual que los modelos anteriores las variables de interés fueron aplicadas en un intervalo de un segundo de tiempo. Los resultados obtenidos fueron alcanzados en un tiempo computacional de 37.938 segundos.

6.1.4. Deformación total cámara azul optimizada

Los resultados obtenidos en el modelo optimizado de la cámara azul se pueden visualizar en la Figura 6.4. Adicionalmente en la Tabla 6.4 se pueden observar los resultados obtenidos y mostrados en la Figura 6.4.

Tabla 6.4: Resultados de los nodos mostrados en la cámara azul optimizada.

Número de nodo	Deformación
Nodo 126470	1.7666×10^{-5}
Nodo 126561	1.834×10^{-5}
Nodo 126358	1.9141×10^{-5}

Al igual que los modelos anteriores, se definió un único paso, realizado en un intervalo de tiempo de 0 a 1 segundo. El tiempo de cómputo para la obtención de los resultados fue de 25.562 segundos.

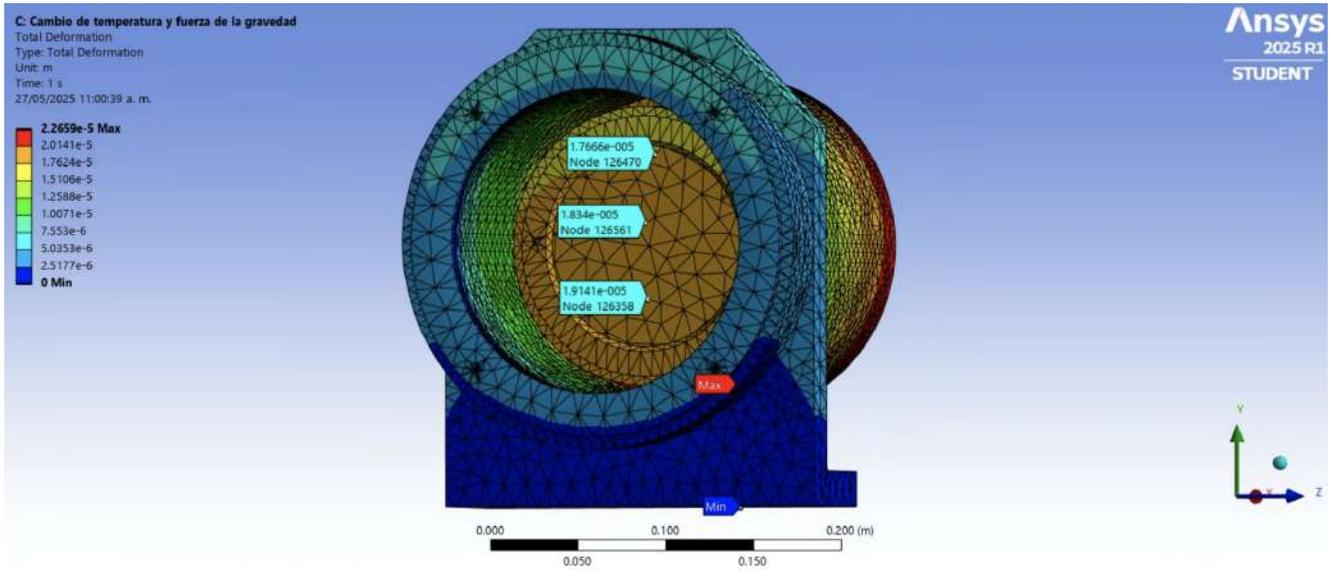


Figura 6.4: Deformación total cámara azul optimizada.

6.2. Análisis de resultados

6.2.1. Cámara roja y cámara roja optimizada

Como se mencionó en el Capítulo 4, la especificación más importante fue la deformación total, debido a que fue de nuestro interés cumplir con la especificación de desplazamiento de 13 micrómetros por grado Celsius. Este valor fue determinado teóricamente utilizando el CTE y las longitudes iniciales especificadas en el proyecto. En la Tabla 6.5 se muestran estos valores.

Tabla 6.5: Coeficientes de expansión térmica y longitudes especificadas brazo rojo.

Diferencia de longitudes especificadas por el proyecto			
Elementos	Material	CTE [$\mu\text{m}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}$]	L[m]
Extensión CAM RS2	Nylamid M	100	0.13962044
Celda CAM RS2	Acero 1035	11	0.0872

Para obtener el valor teórico de la expansión térmica, es necesario retomar la Expresión 2.13. Como se muestra en la Tabla 6.5 obtendremos dos valores teóricos de deformación térmica. Por ello, la expresión queda de la siguiente manera:

$$\delta_{\text{Térmica Total}} = \delta_{T1} - \delta_{T2} \quad (6.1)$$

En donde se tiene que,

$$\delta_{TT} = \alpha_1 \Delta T L_1 - \alpha_2 \Delta T L_2 \quad (6.2)$$

Recordando que el cambio de temperatura fue de 1°C y sustituyendo los valores de la Tabla 6.5, tenemos

$$\delta_{T1} = (100 \times 10^{-6}[1/C])(1[C])(0.13962044[m]) \quad (6.3)$$

$$\delta_{T2} = (11 \times 10^{-6}[1/C])(1[C])(0.0872[m]) \quad (6.4)$$

En donde

$$\delta_{T1} = 13.96 \times 10^{-6}[m] \quad (6.5)$$

$$\delta_{T2} = 0.9692 \times 10^{-6}[m] \quad (6.6)$$

Por lo tanto, sustituyendo en 6.1

$$\delta_{\text{Térmica Total}} = (13.96 - 0.9692) \times 10^{-6}[m] \quad (6.7)$$

Es decir,

$$\delta_{\text{Térmica Total}} = 13.0028 \times 10^{-6}[m] \quad (6.8)$$

Como se puede ver en la Figura 6.1 para el modelo de la cámara roja se obtuvo que los desplazamientos oscilan entre 6 y 9 micrómetros por grado Celsius, es por ello, que se confirmó que este modelo no cumple con las especificaciones establecidas. Por lo cual, se optó por utilizar una optimización de este modelo y de esta forma cumplir con los requerimientos. En la optimización se consideró la disminución del material en el elemento *Extensión CAM RS2* para reducir el uso de material. Haber realizado este cambio, se puede apreciar que el tiempo de cómputo aumentó puesto que permitió utilizar un mallado más fino al disminuir material.

Los resultados obtenidos también pueden variar en función de las condiciones de frontera que se utilicen, puesto que como se observa en la Figura 6.1 la esquina inferior derecha del modelo no presenta desplazamientos, esto es ocasionado porque se utilizó un nodo fijo o empotrado. Esto es algo que mete un pequeño error en el sistema, sin embargo, fue necesario utilizarlo como una referencia para que la simulación fuera exitosa.

Por otro lado, el modelo de la cámara roja optimizada como se muestra en la Figura 6.2 cumple con los requerimientos necesarios y planteados ya que los desplazamientos ocasionados en el sistema fueron rangos entre 12 y 14 micrómetros. Una diferencia notable en los desplazamientos se puede visualizar en la base del sistema, esto ocurre de esta forma por las condiciones de frontera utilizadas. Ya que el nodo de referencia de este modelo fue diferente al modelo de la cámara roja. Se consideró utilizar el sistema de referencia en el origen del modelo para otorgarle más estabilidad al modelo, ya que con los cambios realizados al sistema, nos encontramos con la problemática de un cabeceo en el sistema, lo cual era ocasionado por las condiciones de frontera utilizadas.

6.2.2. Cámara azul y cámara azul optimizada

Como se mencionó *a priori* la deformación total fue determinante para los modelos. En el caso del brazo azul, los resultados debieron alcanzar un desplazamiento de 19 micrómetros por grado Celsius. Este valor fue calculado teóricamente por los requisitos de desplazamiento establecidos por el proyecto. Los valores utilizados fueron los CTE lineales de los elementos del ensamble y las longitudes iniciales. Estos valores son mostrados en la Tabla 6.6

Tabla 6.6: Coeficientes de expansión térmica y longitudes especificadas brazo azul.

Diferencia de longitudes especificadas por el proyecto			
Elementos	Material	CTE [$\mu\text{m}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}$]	L [m]
Celda CAM-AS2	Nylamid M	100	0.21
Extensión CAM-AS2	Acero 1035	11	0.05
Extensión 2 CAM-AS2	Acero 1035	11	0.13249997

El valor teórico de la expansión térmica fue calculado a partir de la Ecuación 2.13. Al tener tres componentes se obtuvieron tres valores de expansión térmica. Por ello, la Ecuación 2.13 fue reescrita de la siguiente forma:

$$\delta_{\text{Térmica Total}} = \delta_{T_1} - \delta_{T_2} - \delta_{T_3} \quad (6.9)$$

Por lo tanto, sustituyendo los valores de la Tabla 6.6 y recordando que la diferencia de temperaturas fue de 1°C

$$\delta_{T_1} = (100 \times 10^{-6}[1/C])(1[C])(0.21[m]) \quad (6.10)$$

$$\delta_{T_2} = (11 \times 10^{-6}[1/C])(1[C])(0.05[m]) \quad (6.11)$$

$$\delta_{T_3} = (11 \times 10^{-6}[1/C])(1[C])(0.13249997[m]) \quad (6.12)$$

Sustituyendo resultados en 6.9

$$\delta_{\text{Térmica Total}} = (21 - 0.55 - 1.457) \times 10^{-6}[m] \quad (6.13)$$

Se obtiene que,

$$\delta_{\text{Térmica Total}} = 18.99 \times 10^{-6}[m] \quad (6.14)$$

El valor obtenido fue el valor teórico para la cámara azul optimizada, ya que como se puede observar, el modelo de la cámara azul no cuenta con el elemento *Extensión 2 CAM-AS2*, sin embargo, la expansión térmica teórica para la cámara azul si despreciamos ese elemento debería oscilar entre los 20 micrómetros por grado Celsius, lo cual no lo cumple el modelo. Comparado las Figuras 6.3 y 6.4 se observa que el único modelo que cumple con esta condición es la cámara azul optimizada, ya que en este modelo los desplazamientos ocasionados oscilan entre los 17 y 19 micrómetros por grado Celsius, mientras que en la cámara azul el rango de desplazamiento ocurre entre 11 y 8.9 micrómetros por grado Celsius. En este caso se puede observar que el recurso computacional fue menor en el modelo optimizado. Esto ocurre debido a que ambos modelos comparten el mismo tamaño de mallado, sin embargo, hay reducción de material en el elemento *Extensión CAM-AS2*. Este cambio puede ser satisfactorio para modelos en los cuales se busca reducir el tiempo de cómputo. En este caso este varió por segundos, pero si el mallado fuera más finito o se utilizaran modelos con números de elementos y nodos más grandes podríamos ahorrarnos horas o incluso días para la obtención de los resultados.

Los resultados obtenidos en la base del sistema varían debido a las condiciones de frontera utilizadas. Cuando fijamos un elemento o nodo le indicamos al sistema que ese elemento o nodo será su referencia para expandirse. Este cambio se utilizó para simular una mayor estabilidad en el sistema. Las alternativas que el software nos ofrece para establecer las condiciones de frontera o restricciones del sistema es muy amplia. En este caso, se consideró que la selección fue la más adecuada puesto que los desplazamientos se distribuyen de una mejor manera reflejando una situación más realista.

6.3. Conclusiones

Los resultados obtenidos y mostrados fueron los pilares de los modelos finales propuestos para el espectrógrafo ESOP. Ya que de los modelos presentados de la cámara roja optimizada y la cámara azul optimizada, los elementos *Extensión CAM-RS2* y *Extensión CAM-AS2* consideramos que se podían mejorar para reducir los costos de manufactura.

En la Figura 6.5 se muestra el modelo final de la cámara roja y en la Tabla 6.7 los materiales utilizados en cada elemento del ensamble.

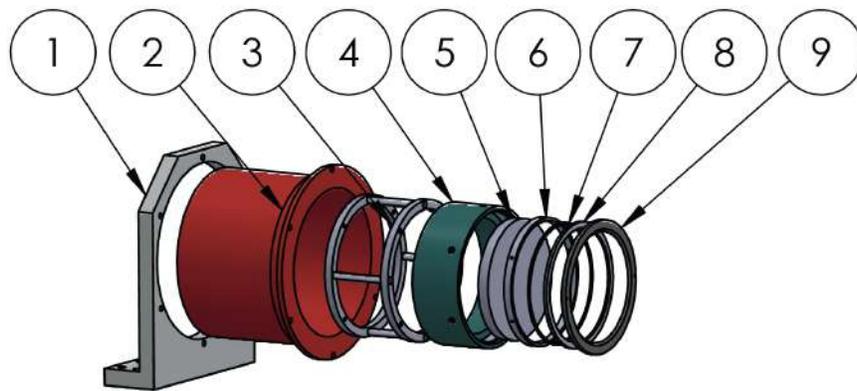


Figura 6.5: Modelo final de la cámara roja, vista explosionada.

Tabla 6.7: Elementos y materiales utilizados en el modelo final de la cámara roja.

Número	Componente	Material empleado
1	Interfaz	AluMold F500
2	Celda CAM-RS2	Nylamid M
3	Extensión CAM-RS2	AluMold F500
4	Soporte Radial CAM-RD2L1	Aceros 1035
5	Lente CAM-RS2	N-SSK5
6	Soporte Radial CAM-RD2L2	Aceros 1035
7	Oring 2-161	O-ring 2-16
8	Separador 2 CAM-RS2	AluMold F500
9	Separador 3 CAM-RS2	AluMold F500

Mientras que en la Figura 6.6 se muestra el modelo final de la cámara azul y en la Tabla 6.8 los materiales utilizados en cada elemento del ensamble.

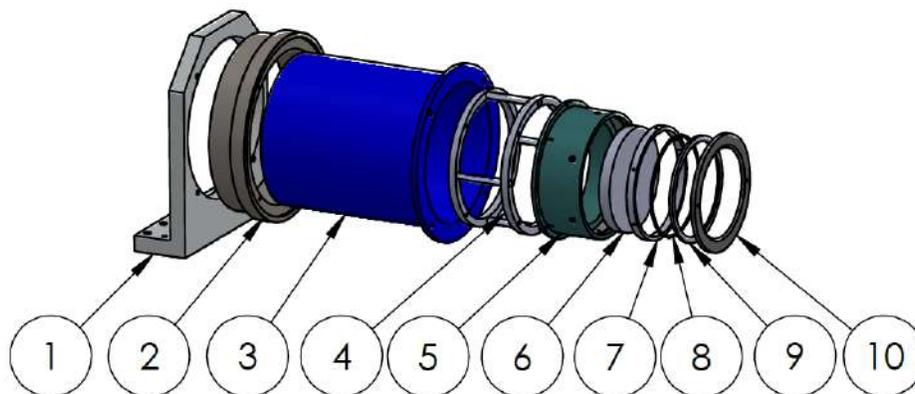


Figura 6.6: Modelo final de la cámara roja, vista explosionada.

Tabla 6.8: Elementos y materiales utilizados en el modelo final de la cámara azul.

Número	Componente	Material empleado
1	Interfaz	AluMold F500
2	Extensión 1 CAM-AS2	Acero 1035
3	Celda CAM-AS2	Nylamid M
4	Extensión 2 CAM-AS2	AluMold F500
5	Soporte Radial CAM-AD2L1	AluMold F500
6	Lente CAM-AS2	PBL26Y
7	Soporte Radial CAM-AD2L2	Acero 1035
8	Oring 2-351	O-ring 2-351
9	Separador 2 CAM-AS2	AluMold F500
10	Separador 3 CAM-AS2	AluMold F500

Como se puede visualizar, un cambio significativo fue el cambio de material en los elementos *Extensión CAM-RS2* y *Extensión CAM-AS2*, ya que anteriormente se utilizó Acero 1035. Si bien es cierto que es un material que cumple con casi todos los requerimientos del proyecto, es un material costoso. Además, los costos en la manufactura de los elementos eran muy significantes, por ello se optó por utilizar AluMold F500. En estos mismos elementos, se puede observar que se realizaron cambios en su geometría, ya que como se mencionó anteriormente la manufactura era complicada, sin embargo, en este caso la manufactura es sumamente sencilla, a diferencia de los modelos optimizados (Ver Figura 4.5 y 4.7).

Con estos cambios realizados, al aplicar la diferencia de temperatura y la acción de la fuerza de gravedad se obtuvieron los siguientes resultados:

Los resultados de los nodos del modelo final de la cámara roja mostrados en la Figura 6.7 se pueden visualizar de forma descendente en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9: Resultados de los nodos mostrados en el modelo final de la cámara roja.

Número de nodo	Deformación
Nodo 1	1.3085×10^{-4}
Nodo 2	1.3386×10^{-4}
Nodo 3	1.3984×10^{-4}

En la Figura 6.7 se muestra los resultados del modelo final de la cámara roja.

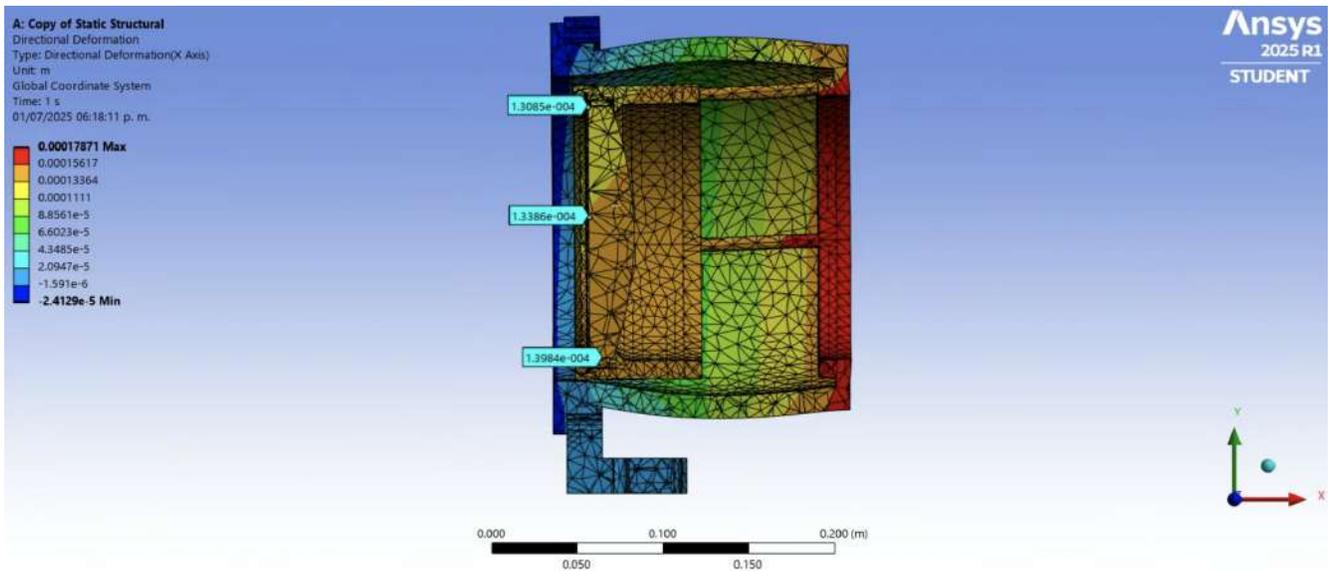


Figura 6.7: Deformación total modelo final de la cámara roja.

Mientras que en la Figura 6.8 se muestra los resultados del modelo final de la cámara azul.

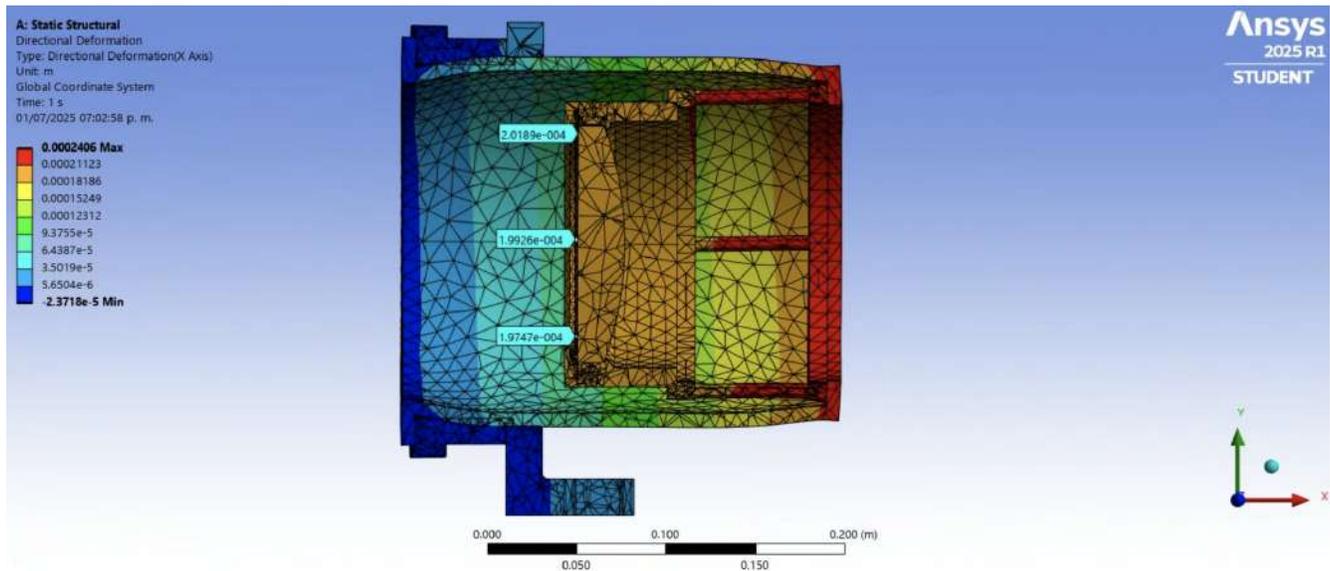


Figura 6.8: Deformación total modelo final de la cámara azul.

Los resultados de los nodos mostrados en la Figura 6.8 se pueden visualizar en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10: Resultados de los nodos mostrados en el modelo final de la cámara azul.

Número de nodo	Deformación
Nodo 1	2.0189×10^{-4}
Nodo 2	1.9926×10^{-4}
Nodo 3	1.9747×10^{-4}

De las Figuras 6.7 y 6.8 se puede apreciar que el cambio de temperatura fue de 10 grados Celsius, lo que nos indica que en un cambio de temperatura de un grado Celsius las deformaciones de la cámara azul serían de 20 micrómetros, mientras que las deformaciones de la cámara roja serían de 13 micrómetros, lo cual cumple con los requerimientos del proyecto. Esto ocurre porque durante las simulaciones se consideró el coeficiente de expansión térmica como lineal, anteriormente se utilizó para un intervalo de temperatura de 22 a 23 grados Celsius, en este caso el intervalo de temperatura fue de 3 a 13 grados Celsius. Para poder conocer el comportamiento de los ensambles en un intervalo de temperatura distinto, se debe optar por utilizar otro valor para el coeficiente de expansión térmica o incluso utilizar coeficientes no lineales. Adicionalmente, es importante mencionar que el cambio climático en los últimos años se ha manifestado a través de un aumento de temperatura en la superficie terrestre y los océanos, por ello una alternativa es el uso de algún aislante térmico que permita mantener estos rangos de temperatura.

Como se mencionó el objetivo de esta investigación fue el análisis del efecto de la expansión térmica de los componentes optomecánicos mediante simulaciones con el uso de elementos finitos, sin embargo, aunque no es el objetivo, consideramos que el alcance de este documento va más allá de eso puesto que es un recurso que puede servir para crear tecnología, recopilar información, conocer el uso de ciertos materiales o comprender la teoría detrás del uso del elemento finito y poder aplicarla a cualquier ámbito que se desee.

El uso del análisis de elemento finito como herramienta es de gran utilidad ya que nos permite conocer el comportamiento de los instrumentos analizados, optimizar los recursos materiales (evitar el sobre dimensionamiento) y a su vez nos permite disminuir costos e inversiones que podrían emplear las pruebas experimentales como se se hacía anteriormente. Lo más importante del uso de esta herramienta es comprender los resultados y aplicar la teoría correctamente, ya que implementar condiciones de fronteras erróneas ocasionaría o generaría esfuerzos y desplazamientos indebidos. De este modo podemos concluir este documento debido a que los objetivos generales y particulares establecidos en el Capítulo 1 fueron cumplidos y se solventó la problemática del espectrógrafo ESOPO ya que los modelos presentados en la Figura 6.5 y 6.6 se encuentran en proceso de manufactura. La misión del Ingeniero es aplicar su conocimiento y dar soluciones innovadoras y óptimas a problemas complejos, servir a la sociedad y actualizarse de forma permanente.

A Tablas de propiedades de los materiales

Constellium Alumold® 500 Forged Aluminum

Categories: [Metal](#); [Nonferrous Metal](#); [Aluminum Alloy](#); [5000 Series Aluminum Alloy](#)

Material Notes: Forged thick blocks in Alumold® 500 have been developed to provide high and consistent strength across the thickness, good dimensional stability and excellent machinability, in order to respond to the high requirements of the applications in plastics transformation. Typical applications include compression or injection moulds for plastics.

Information provided by manufacturer

Key Words: IS 5505

Vendors: No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.82 g/cc	0.102 lb/in ³	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell 	150	150	long-transverse direction
	@Thickness 450 - 700 mm	@Thickness 17.7 - 27.6 in	
	160	160	long-transverse direction
Tensile Strength 	@Thickness 400 - 450 mm	@Thickness 15.7 - 17.7 in	
	165	165	long-transverse direction
	@Thickness 300 - 400 mm	@Thickness 11.8 - 15.7 in	
Tensile Strength, Yield 	>= 410 MPa	>= 59500 psi	long-transverse direction
	@Thickness 450 - 700 mm	@Thickness 17.7 - 27.6 in	
	>= 430 MPa	>= 62400 psi	long-transverse direction
	@Thickness 400 - 450 mm	@Thickness 15.7 - 17.7 in	
	>= 450 MPa	>= 65300 psi	long-transverse direction
	@Thickness 300 - 400 mm	@Thickness 11.8 - 15.7 in	
	450 MPa	65300 psi	long-transverse direction
	@Thickness 400 - 450 mm	@Thickness 15.7 - 17.7 in	
	480 MPa	69600 psi	long-transverse direction
	@Thickness 450 - 700 mm	@Thickness 17.7 - 27.6 in	
	520 MPa	75400 psi	long-transverse direction
	@Thickness 300 - 400 mm	@Thickness 11.8 - 15.7 in	
>= 340 MPa	>= 49300 psi	long-transverse direction	
@Strain 0.2 %, Thickness 450 - 700 mm	@Strain 0.2 %, Thickness 17.7 - 27.6 in		
>= 350 MPa	>= 50800 psi	long-transverse direction	
@Strain 0.2 %, Thickness 400 - 450 mm	@Strain 0.2 %, Thickness 15.7 - 17.7 in		
>= 370 MPa	>= 53700 psi	long-transverse direction	
@Strain 0.2 %, Thickness 300 - 400 mm	@Strain 0.2 %, Thickness 11.8 - 15.7 in		
420 MPa	60900 psi	long-transverse direction	
@Strain 0.2 %, Thickness 450 - 700 mm	@Strain 0.2 %, Thickness 17.7 - 27.6 in		
460 MPa	66700 psi	long-transverse direction	
@Strain 0.2 %, Thickness 300 - 400 mm	@Strain 0.2 %, Thickness 11.8 - 15.7 in		
460 MPa	66700 psi	long-transverse direction	
@Strain 0.2 %, Thickness 400 - 450 mm	@Strain 0.2 %, Thickness 15.7 - 17.7 in		
>= 3.0 %	>= 3.0 %	long-transverse direction	
@Thickness 300 - 400 mm	@Thickness 11.8 - 15.7 in		
>= 3.0 %	>= 3.0 %	long-transverse direction	
@Thickness 400 - 450 mm	@Thickness 15.7 - 17.7 in		
>= 3.0 %	>= 3.0 %	long-transverse direction	
@Thickness 450 - 700 mm	@Thickness 17.7 - 27.6 in		
7.0 %	7.0 %	long-transverse direction	
@Thickness 400 - 450 mm	@Thickness 15.7 - 17.7 in		
7.0 %	7.0 %	long-transverse direction	
@Thickness 450 - 700 mm	@Thickness 17.7 - 27.6 in		
8.0 %	8.0 %	long-transverse direction	

	@Thickness 300 - 400 mm	@Thickness 11.8 - 15.7 in	
Modulus of Elasticity	73.0 GPa	10600 ksi	compression
Tensile Modulus	72.0 GPa	10400 ksi	
Poissons Ratio	0.33	0.33	

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	23.7 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$	13.2 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^{\circ}\text{F}$	
	@Temperature 20.0 - 100 $^{\circ}\text{C}$	@Temperature 68.0 - 212 $^{\circ}\text{F}$	
Specific Heat Capacity	0.857 J/g- $^{\circ}\text{C}$	0.205 BTU/lb- $^{\circ}\text{F}$	
Thermal Conductivity	153 W/m-K	1060 BTU-in/hr-ft $^2\cdot^{\circ}\text{F}$	

Descriptive Properties

Thermal Diffusivity	63 mm 2 /s
---------------------	---------------

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

N-SSK5 658509.371

$n_d = 1.65844$
 $n_e = 1.66152$

$v_d = 50.88$
 $v_e = 50.59$

$n_F - n_C = 0.012940$
 $n_{F'} - n_{C'} = 0.013075$

Refractive Indices

	λ [nm]	
$n_{2325.4}$	2325.4	1.62581
$n_{1970.1}$	1970.1	1.63128
$n_{1529.6}$	1529.6	1.63720
$n_{1060.0}$	1060.0	1.64371
n_i	1014.0	1.64450
n_s	852.1	1.64785
n_r	706.5	1.65237
n_c	656.3	1.65455
$n_{c'}$	643.8	1.65517
$n_{632.8}$	632.8	1.65574
n_D	589.3	1.65833
n_d	587.6	1.65844
n_e	546.1	1.66152
n_F	486.1	1.66749
$n_{F'}$	480.0	1.66824
n_g	435.8	1.67471
n_h	404.7	1.68079
n_i	365.0	1.69139
$n_{334.1}$	334.1	
$n_{312.6}$	312.6	
$n_{296.7}$	296.7	
$n_{280.4}$	280.4	
$n_{248.3}$	248.3	

Constants of Dispersion Formula

B_1	1.592226590
B_2	0.103520774
B_3	1.051740160
C_1	0.009202846
C_2	0.0423530072
C_3	106.92737400

Constants of Formula for dn/dT

D_0	7.29E-07
D_1	1.17E-08
D_2	-1.50E-11
E_0	6.08E-07
E_1	7.66E-10
λ_{TK} [μm]	0.189

Temperature Coefficients of the Refractive Index

[°C]	$\Delta n_{rel}/\Delta T$ [$10^{-6}/K$]			$\Delta n_{abs}/\Delta T$ [$10^{-6}/K$]		
	1060.0	e	g	1060.0	e	g
-40/-20	2.2	3.0	3.9	0.0	0.8	1.6
+20/+40	2.2	3.2	4.2	0.8	1.8	2.7
+60/+80	2.4	3.5	4.5	1.2	2.3	3.4

Internal Transmittance τ_i

λ [nm]	τ_i [10mm]	τ_i [25mm]
2500	0.730	0.450
2325	0.850	0.660
1970	0.963	0.910
1530	0.992	0.980
1060	0.996	0.990
700	0.997	0.993
660	0.997	0.992
620	0.997	0.992
580	0.997	0.993
546	0.996	0.990
500	0.993	0.982
460	0.987	0.968
436	0.982	0.956
420	0.976	0.940
405	0.963	0.910
400	0.959	0.900
390	0.940	0.860
380	0.900	0.760
370	0.800	0.580
365	0.730	0.450
350	0.340	0.060
334	0.020	
320		
310		
300		
290		
280		
270		
260		
250		

Color Code

λ_{80} / λ_5 38/34

Remarks

Relative Partial Dispersion P

$P_{s,t}$	0.2592
$P_{C,s}$	0.5181
$P_{d,C}$	0.3003
$P_{e,d}$	0.2380
$P_{g,F}$	0.5575
$P_{i,h}$	0.8192

Relative Partial Dispersion P'

$P'_{s,t}$	0.2566
$P'_{C,s}$	0.5598
$P'_{d,C'}$	0.2502
$P'_{e,d}$	0.2355
$P'_{g,F'}$	0.4944
$P'_{i,h}$	0.8108

Deviation of Rel. Partial Disp.

ΔP from the normal line

$\Delta P_{C,t}$	-0.0090
$\Delta P_{C,s}$	-0.0034
$\Delta P_{F,e}$	0.0001
$\Delta P_{g,F}$	-0.0007
$\Delta P_{i,g}$	-0.0081

Chemical Properties

CR	2
FR	3
SR	52.2
AR	2.2
PR	3.2

Other Properties

$\alpha_{-30/+70^\circ C}$ [$10^{-6}/K$]	6.8
$\alpha_{+20/+300^\circ C}$ [$10^{-6}/K$]	8.0
T_g [°C]	645
T_{10}^{13} [°C]	637
$T_{10}^{7.6}$ [°C]	751
c_p [J/(g·K)]	0.574
λ [W/(m·K)]	
ρ [g/cm ³]	3.71
E [10^3 N/mm ²]	88
μ	0.278
K [10^{-6} mm ² /N]	1.90
$HK_{0.1/20}$	590
HG	5

NYLAMID M – MECÁNICO – COLOR NATURAL HUESO

Es el polímero más utilizado en la industria pues entre sus cualidades están: Gran resistencia al desgaste, Buenas propiedades mecánicas y eléctricas, Balance ideal de resistencia y tenacidad, Normatividad higiénica, autolubricidad y resistencia térmica.



Este material esta aprobado por la norma NMX-E-202-1993-SCFI para el contacto con alimentos Su resistencia térmica es de 93°C.

APLICACIONES TÍPICAS:

- Cojinetes
- Engranés
- Aislantes eléctricos
- Ruedas
- Moldes
- Rodillos
- Poleas
- Sellos para válvulas
- Catarinas
- Raspadores
- Guías de desgaste
- Tolvas
- Piezas de impacto
- Aislantes térmicos
- Prototipos

TABLA DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL NYLAMID M

Propiedades	Norma ASTM	Unidades	Valores	Unidades	Valores
Gravedad específica 23° C	D792	-	1.04	-	-
Resistencia a la tensión 23°C	D638	Psi	12,000	Kg/cm ²	844
Elongación a la ruptura a 23°C	D638	%	20	-	-
Resistencia a la flexión a 23°C	D790	Psi	16,000	Kg/cm ²	1,125
Modulo de elasticidad a la flexión 23°C	D790	Psi	500,000	Kg/cm ²	35,155
Resistencia a la compresión 10% de deformación 23°C	D695	Psi	15,000	Kg/cm ²	1,055
Modulo de elasticidad a la compresión 23°C	D695	Psi	400,000	Kg/cm ²	28,124
Dureza escala Shore D, 23°C	D2240	-	D85	-	-
Impacto Izod (con muesca) 23°C	D256	ft. Lb(in)	0.4	cm.kg/cm	2.18
Coefficiente de fricción dinámico (en seco vs acero)	PTM55007	-	0.2	-	-



TABLA DE PROPIEDADES TÉRMICAS DE NYLAMID M

Propiedades	Norma ASTM	Unidades	Valores	Unidades	Valores
Coefficiente de expansión térmica lineal (de -40°C a 149°C)	E 831 (TMA)	In./in./°F	3.5 x 10 ⁻⁵	m/(m.K)	90x10 ⁻⁶
Temperatura de deflexión al calor (264 psi)	D648	°F	200	°C	93.3
Punto de fusión	D3418	°F	420	°C	215.5
Temperatura de servicio continuo en Aire (Máx.)	-	°F	200	°C	93.3
Conductividad térmica	F433	BTU in/hr	1.7	W/(K.m)	0.29

PROPIEDADES ELÉCTRICAS DEL NYLAMID M

Propiedades	Norma ASTM	Unidades	Valores
Resistencia dieléctrica, corto tiempo	D149	Volts/mil	500
Resistividad volumétrica	D257	Ohm-cm	>10 ¹³
Constante dieléctrica 10 ⁶	D150	-	3.7

RESISTENCIA QUÍMICA DEL NYLAMID M

Propiedades	Norma ASTM	Unidades	Valores
Absorción de agua en 24 horas	D570 (3)	% por peso	0.3
Absorción de agua hasta saturación	D570 (3)	% por peso	0.7
Ácidos suaves 23°C	-	-	S. Limitado
Ácidos fuertes 23°C	-	-	S. Inaceptable
Alcalinos suaves 23°C	-	-	S. Limitado
Alcalinos fuertes 23°C	-	-	S. Inaceptable
Hidrocarburos Aromáticos 23°C	-	-	S. Aceptable
Hidrocarburos Alifáticos 23°C	-	-	S. Aceptable
Cetonas Esteres 23°C	-	-	S. Aceptable
Éteres 23°C	-	-	S. Aceptable
Solventes colorados 23°C	-	-	S. Limitado
Alcoholes 23°C	-	-	S. Limitado
Soluciones salinas inorgánicas 23°C	-	-	S. Aceptable
Rayos del sol en continuo 23°C	-	-	S. Limitado

Parker Series 2-XXX O-Ring Sizes (Continued)

1 Parker Size No. (Size Only) (a)	2 Size Only AS 568A Uniform Dash No.	3 Nominal Size (Inches) (Ref. Only)			4 Standard O-Ring Size (Units are in Inches) Actual (b) Per AS 568A				5 (Ref. Only) Basic Volume Cu. In.	6 Metric O-Ring Size (Units are in Millimetres) Actual (b) Per AS 568A				7 Parker Size No. (Size Only) (a)
		I.D.	O.D.	W.	I.D.	Tolerance ±	W	±		I.D.	Tolerance ±	W	±	
2-132	-132	1-3/4	1-15/16	3/32	1.737	.015	.103	.003	.0482	44,12	0,38	2,62	0,08	2-132
2-133	-133	1-13/16	2	3/32	1.799	.015	.103	.003	.0498	45,69	0,38	2,62	0,08	2-133
2-134	-134	1-7/8	2-1/16	3/32	1.862	.015	.103	.003	.0514	47,29	0,38	2,62	0,08	2-134
2-135	-135	1-15/16	2-1/8	3/32	1.925	.017	.103	.003	.0531	48,90	0,43	2,62	0,08	2-135
2-136	-136	2	2-3/16	3/32	1.987	.017	.103	.003	.0547	50,47	0,43	2,62	0,08	2-136
2-137	-137	2-1/16	2-1/4	3/32	2.050	.017	.103	.003	.0564	52,07	0,43	2,62	0,08	2-137
2-138	-138	2-1/8	2-5/16	3/32	2.112	.017	.103	.003	.0580	53,64	0,43	2,62	0,08	2-138
2-139	-139	2-3/16	2-3/8	3/32	2.175	.017	.103	.003	.0596	55,25	0,43	2,62	0,08	2-139
2-140	-140	2-1/4	2-7/16	3/32	2.237	.017	.103	.003	.0612	56,82	0,43	2,62	0,08	2-140
2-141	-141	2-5/16	2-1/2	3/32	2.300	.020	.103	.003	.0629	58,42	0,51	2,62	0,08	2-141
2-142	-142	2-3/8	2-9/16	3/32	2.362	.020	.103	.003	.0645	59,99	0,51	2,62	0,08	2-142
2-143	-143	2-7/16	2-5/8	3/32	2.425	.020	.103	.003	.0662	61,60	0,51	2,62	0,08	2-143
2-144	-144	2-1/2	2-11/16	3/32	2.487	.020	.103	.003	.0678	63,17	0,51	2,62	0,08	2-144
2-145	-145	2-9/16	2-3/4	3/32	2.550	.020	.103	.003	.0694	64,77	0,51	2,62	0,08	2-145
2-146	-146	2-5/8	2-13/16	3/32	2.612	.020	.103	.003	.0711	66,34	0,51	2,62	0,08	2-146
2-147	-147	2-11/16	2-7/8	3/32	2.675	.022	.103	.003	.0727	67,95	0,56	2,62	0,08	2-147
2-148	-148	2-3/4	2-15/16	3/32	2.737	.022	.103	.003	.0743	69,52	0,56	2,62	0,08	2-148
2-149	-149	2-13/16	3	3/32	2.800	.022	.103	.003	.0760	71,12	0,56	2,62	0,08	2-149
2-150	-150	2-7/8	3-1/16	3/32	2.862	.022	.103	.003	.0776	72,69	0,56	2,62	0,08	2-150
2-151	-151	3	3-3/16	3/32	2.987	.024	.103	.003	.0809	75,87	0,61	2,62	0,08	2-151
2-152	-152	3-1/4	3-7/16	3/32	3.237	.024	.103	.003	.0874	82,22	0,61	2,62	0,08	2-152
2-153	-153	3-1/2	3-11/16	3/32	3.487	.024	.103	.003	.0940	88,57	0,61	2,62	0,08	2-153
2-154	-154	3-3/4	3-15/16	3/32	3.737	.028	.103	.003	.1005	94,92	0,71	2,62	0,08	2-154
2-155	-155	4	4-3/16	3/32	3.987	.028	.103	.003	.1071	101,27	0,71	2,62	0,08	2-155
2-156	-156	4-1/4	4-7/16	3/32	4.237	.030	.103	.003	.1136	107,62	0,76	2,62	0,08	2-156
2-157	-157	4-1/2	4-11/16	3/32	4.487	.030	.103	.003	.1202	113,97	0,76	2,62	0,08	2-157
2-158	-158	4-3/4	4-15/16	3/32	4.737	.030	.103	.003	.1267	120,32	0,76	2,62	0,08	2-158
2-159	-159	5	5-3/16	3/32	4.987	.035	.103	.003	.1332	126,67	0,89	2,62	0,08	2-159
2-160	-160	5-1/4	5-7/16	3/32	5.237	.035	.103	.003	.1398	133,02	0,89	2,62	0,08	2-160
2-161	-161	5-1/2	5-11/16	3/32	5.487	.035	.103	.003	.1463	139,37	0,89	2,62	0,08	2-161
2-162	-162	5-3/4	5-15/16	3/32	5.737	.035	.103	.003	.1529	145,72	0,89	2,62	0,08	2-162
2-163	-163	6	6-3/16	3/32	5.987	.035	.103	.003	.1594	152,07	0,89	2,62	0,08	2-163
2-164	-164	6-1/4	6-7/16	3/32	6.237	.040	.103	.003	.1660	158,42	1,02	2,62	0,08	2-164
2-165	-165	6-1/2	6-11/16	3/32	6.487	.040	.103	.003	.1725	164,77	1,02	2,62	0,08	2-165
2-166	-166	6-3/4	6-15/16	3/32	6.737	.040	.103	.003	.1790	171,12	1,02	2,62	0,08	2-166
2-167	-167	7	7-3/16	3/32	6.987	.040	.103	.003	.1856	177,47	1,02	2,62	0,08	2-167
2-168	-168	7-1/4	7-7/16	3/32	7.237	.045	.103	.003	.1921	183,82	1,14	2,62	0,08	2-168
2-169	-169	7-1/2	7-11/16	3/32	7.487	.045	.103	.003	.1987	190,17	1,14	2,62	0,08	2-169
2-170	-170	7-3/4	7-15/16	3/32	7.737	.045	.103	.003	.2052	196,52	1,14	2,62	0,08	2-170
2-171	-171	8	8-3/16	3/32	7.987	.045	.103	.003	.2118	202,87	1,14	2,62	0,08	2-171

(a) The rubber compound must be added when ordering by the 2-size number (i.e., N0674-70 2-007).

.103 Area = .008332

(b) This chart provides dimensions for standard (AN) shrinkage materials ONLY. These correspond to AS568A dimensions.

(sq. in.)

O-rings manufactured out of compounds with different shrinkage rates (other than AN) will produce slightly different dimensions and tolerances. For more information on shrinkage rates, see the Appendix.

(c) When ordering O-rings to a Military, AMS or NAS material Specification, see Section VIII, Specifications, for more information.

Table 9-1: Parker Series 2-XXX O-Ring Sizes

Parker Series 2-XXX O-Ring Sizes (Continued)

1 Parker Size No. (Size Only) (a)	2 Size Only AS 568A Uniform Dash No.	3 Nominal Size (Inches) (Ref. Only)			4 Standard O-Ring Size (Units are in Inches) Actual (b) Per AS 568A				5 (Ref. Only) Basic Volume Cu. In.	6 Metric O-Ring Size (Units are in Millimetres) Actual (b) Per AS 568A				7 Parker Size No. (Size Only) (a)
		I.D.	O.D.	W.	I.D.	Tolerance ±	W	±		I.D.	Tolerance ±	W	±	
2-338	-338	3-1/8	3-1/2	3/16	3.100	.024	.210	.005	.3602	78,74	0,61	5,33	0,13	2-338
2-339	-339	3-1/4	3-5/8	3/16	3.225	.024	.210	.005	.3738	81,92	0,61	5,33	0,13	2-339
2-340	-340	3-3/8	3-3/4	3/16	3.350	.024	.210	.005	.3874	85,09	0,61	5,33	0,13	2-340
2-341	-341	3-1/2	3-7/8	3/16	3.475	.024	.210	.005	.4010	88,27	0,61	5,33	0,13	2-341
2-342	-342	3-5/8	4	3/16	3.600	.028	.210	.005	.4146	91,44	0,71	5,33	0,13	2-342
2-343	-343	3-3/4	4-1/8	3/16	3.725	.028	.210	.005	.4282	94,62	0,71	5,33	0,13	2-343
2-344	-344	3-7/8	4-1/4	3/16	3.850	.028	.210	.005	.4418	97,79	0,71	5,33	0,13	2-344
2-345	-345	4	4-3/8	3/16	3.975	.028	.210	.005	.4554	100,97	0,71	5,33	0,13	2-345
2-346	-346	4-1/8	4-1/2	3/16	4.100	.028	.210	.005	.4690	104,14	0,71	5,33	0,13	2-346
2-347	-347	4-1/4	4-5/8	3/16	4.225	.030	.210	.005	.4826	107,32	0,76	5,33	0,13	2-347
2-348	-348	4-3/8	4-3/4	3/16	4.350	.030	.210	.005	.4962	110,49	0,76	5,33	0,13	2-348
2-349	-349	4-1/2	4-7/8	3/16	4.475	.030	.210	.005	.5098	113,67	0,76	5,33	0,13	2-349
2-350	-350	4-5/8	5	3/16	4.600	.030	.210	.005	.5234	116,84	0,76	5,33	0,13	2-350
2-351	-351	4-3/4	5-1/8	3/16	4.725	.030	.210	.005	.5370	120,02	0,76	5,33	0,13	2-351
2-352	-352	4-7/8	5-1/4	3/16	4.850	.030	.210	.005	.5506	123,19	0,76	5,33	0,13	2-352
2-353	-353	5	5-3/8	3/16	4.975	.037	.210	.005	.5642	126,37	0,94	5,33	0,13	2-353
2-354	-354	5-1/8	5-1/2	3/16	5.100	.037	.210	.005	.5778	129,54	0,94	5,33	0,13	2-354
2-355	-355	5-1/4	5-5/8	3/16	5.225	.037	.210	.005	.5914	132,72	0,94	5,33	0,13	2-355
2-356	-356	5-3/8	5-3/4	3/16	5.350	.037	.210	.005	.6050	135,89	0,94	5,33	0,13	2-356
2-357	-357	5-1/2	5-7/8	3/16	5.475	.037	.210	.005	.6186	139,07	0,94	5,33	0,13	2-357
2-358	-358	5-5/8	6	3/16	5.600	.037	.210	.005	.6322	142,24	0,94	5,33	0,13	2-358
2-359	-359	5-3/4	6-1/8	3/16	5.725	.037	.210	.005	.6458	145,42	0,94	5,33	0,13	2-359
2-360	-360	5-7/8	6-1/4	3/16	5.850	.037	.210	.005	.6594	148,59	0,94	5,33	0,13	2-360
2-361	-361	6	6-3/8	3/16	5.975	.037	.210	.005	.6730	151,77	0,94	5,33	0,13	2-361
2-362	-362	6-1/4	6-5/8	3/16	6.225	.040	.210	.005	.7002	158,12	1,02	5,33	0,13	2-362
2-363	-363	6-1/2	6-7/8	3/16	6.475	.040	.210	.005	.7274	164,47	1,02	5,33	0,13	2-363
2-364	-364	6-3/4	7-1/8	3/16	6.725	.040	.210	.005	.7546	170,82	1,02	5,33	0,13	2-364
2-365	-365	7	7-3/8	3/16	6.975	.040	.210	.005	.7818	177,17	1,02	5,33	0,13	2-365
2-366	-366	7-1/4	7-5/8	3/16	7.225	.045	.210	.005	.8090	183,52	1,14	5,33	0,13	2-366
2-367	-367	7-1/2	7-7/8	3/16	7.475	.045	.210	.005	.8362	189,87	1,14	5,33	0,13	2-367
2-368	-368	7-3/4	8-1/8	3/16	7.725	.045	.210	.005	.8634	196,22	1,14	5,33	0,13	2-368
2-369	-369	8	8-3/8	3/16	7.975	.045	.210	.005	.8906	202,57	1,14	5,33	0,13	2-369
2-370	-370	8-1/4	8-5/8	3/16	8.225	.050	.210	.005	.9178	208,92	1,27	5,33	0,13	2-370
2-371	-371	8-1/2	8-7/8	3/16	8.475	.050	.210	.005	.9450	215,27	1,27	5,33	0,13	2-371
2-372	-372	8-3/4	9-1/8	3/16	8.725	.050	.210	.005	.9722	221,62	1,27	5,33	0,13	2-372
2-373	-373	9	9-3/8	3/16	8.975	.050	.210	.005	.9994	227,97	1,27	5,33	0,13	2-373
2-374	-374	9-1/4	9-5/8	3/16	9.225	.055	.210	.005	1.0266	234,32	1,40	5,33	0,13	2-374
2-375	-375	9-1/2	9-7/8	3/16	9.475	.055	.210	.005	1.0538	240,67	1,40	5,33	0,13	2-375
2-376	-376	9-3/4	10-1/8	3/16	9.725	.055	.210	.005	1.0810	247,02	1,40	5,33	0,13	2-376
2-377	-377	10	10-3/8	3/16	9.975	.055	.210	.005	1.1083	253,37	1,40	5,33	0,13	2-377

(a) The rubber compound must be added when ordering by the 2-size number (i.e., N0674-70 2-007).

.210 Area = .034636

(b) This chart provides dimensions for standard (AN) shrinkage materials ONLY. These correspond to AS568A dimensions.

(sq. in.)

O-rings manufactured out of compounds with different shrinkage rates (other than AN) will produce slightly different dimensions and tolerances. For more information on shrinkage rates, see the Appendix.

(c) When ordering O-rings to a Military, AMS or NAS material Specification, see Section VIII, Specifications, for more information.

Table 9-1: Parker Series 2-XXX O-Ring Sizes

Refractive Index	n_d	1,56732 1,567322	Abbe Number	ν_d	42,86	Dispersion	n_F-n_C	0,013238
Refractive Index	n_e	1,570466	Abbe Number	ν_e	42,58	Dispersion	n_F-n_C'	0,013399

Refractive Indices		
$\lambda(\mu m)$		
n_{2325}	2.32542	1,53658
n_{1970}	1.97009	1,54138
n_{1530}	1.52958	1,54668
n_{1129}	1.12864	1,55170
n_t	1.01398	1,55348
n_s	0.85211	1,55673
$n_{A'}$	0.76819	1,55904
n_r	0.70652	1,56120
n_C	0.65627	1,56339
$n_{C'}$	0.64385	1,56401
n_{He-Ne}	0.6328	1,56459
n_D	0.58929	1,56721
n_d	0.58756	1,56732
n_e	0.54607	1,57047
n_F	0.48613	1,57663
$n_{F'}$	0.47999	1,57741
n_{He-Cd}	0.44157	1,58317
n_g	0.435835	1,58418
n_h	0.404656	1,59065
n_i	0.365015	1,60217
n_{334}	0.334148	1,61543
N_{326}	0.326106	1,61986

Constants of Dispersion Formula	
A ₁	1,29471773E+00
A ₂	1,08880981E-01
A ₃	2,20322964E-01
B ₁	9,86579479E-03
B ₂	4,77568828E-02
B ₃	2,88509863E+01

Chemical Properties	
Water Resistance (Powder) Group RW(P)	1
Acid Resistance (Powder) Group RA(P)	1
Weathering Resistance (Surface) Group	1
Acid Resistance (Surface) Group SR	1.0
Phosphate Resistance PR	2,0

Mechanical Properties	
Young's Modulus E (10 ⁹ N/m ²)	589
Rigidity Modulus G (10 ⁹ N/m ²)	242
Poisson's Ratio σ	0,220
Knoop Hardness Hk [Class]	420 4
Abrasion Aa	140
Photoelastic Constant β (nm/cm/10 ⁹ Pa)	

Temperature Coefficients of Refractive Index									
Range of (°C)	dn/dT relative (10 ⁻⁶ /°C)								
	t	C'	He-Ne	D	e	F'	g	i	
-40~-20	0,9	1,5	1,5	1,7	2,0	2,5	3,0	4,9	
-20~0	1,0	1,6	1,7	1,8	2,1	2,6	3,2	5,1	
0~20	1,1	1,7	1,8	2,0	2,2	2,8	3,4	5,4	
20~40	1,2	1,9	1,9	2,1	2,4	3,0	3,6	5,7	
40~60	1,3	2,0	2,0	2,2	2,5	3,1	3,8	5,9	
60~80	1,4	2,1	2,1	2,4	2,6	3,3	4,0	6,2	

Partial Dispersions	
n_C-n_t	0,009910
$n_C-n_{A'}$	0,004353
n_d-n_C	0,003931
n_e-n_C	0,007075
n_g-n_d	0,016861
n_g-n_F	0,007554
n_h-n_g	0,006471
n_i-n_g	0,017986
$n_C'-n_t$	0,010529
n_e-n_C'	0,006456
n_F-n_e	0,006943
n_i-n_F	0,024760

Relative Partial Dispersion	
$\theta_{C,t}$	0,7486
$\theta_{C,A'}$	0,3288
$\theta_{d,C}$	0,2969
$\theta_{e,C}$	0,5344
$\theta_{g,d}$	1,2737
$\theta_{g,F}$	0,5706
$\theta_{h,g}$	0,4888
$\theta_{i,g}$	1,3587
$\theta'_{C,t}$	0,7858
$\theta'_{e,C'}$	0,4818
$\theta'_{F,e}$	0,5182
$\theta'_{i,F}$	1,8479

Deviation of Relative Dispersions	
$\Delta \theta_{C,t}$	0,0008
$\Delta \theta_{C,A'}$	0,0010
$\Delta \theta_{g,d}$	-0,0020
$\Delta \theta_{g,F}$	-0,0015
$\Delta \theta_{i,g}$	-0,0074

Thermal Properties	
Strain Point SiP (°C)	380
Annealing Point AP (°C)	418
Transformation Temperature Tg (°C)	432
Yield Point At (°C)	471
Softening Point SP (°C)	591
Expansion Coefficients (-30~+70°C)	89
α (10 ⁻⁷ /°C) (+100~+300°C)	100
Thermal Conductivity k (W/m·K)	0,912

Coloring			
λ_{80}	335	λ_5	310
λ_{70}			

Internal Transmittance			
$\lambda_{0,80}$	329	$\lambda_{0,05}$	310

CCI		
B	G	R
0,00	0,01	0,01

Internal Transmittance		
λ (nm)	τ 10mm	T 25mm
240		
250		
260		
270		
280		
290		
300		
310	0,04	
320	0,47	0,15
330	0,84	0,65
340	0,957	0,89
350	0,985	0,963
360	0,994	0,986
365	0,996	0,989
370	0,997	0,992
380	0,998	0,995
390	0,998	0,996
400	0,998	0,996
420	0,999	0,997
440	0,999	0,997
460	0,999	0,998
480	0,999	0,998
500	0,999	0,998
550	0,999	0,998
600	0,999	0,998
650	0,999	0,998
700	0,999	0,999
800	0,999	0,999
900	0,999	0,997
1000	0,998	0,994
1200	0,997	0,993
1400	0,996	0,990
1600	0,994	0,984
1800	0,979	0,948
2000	0,950	0,87
2200	0,89	0,76
2400	0,85	0,67

Other Properties	
Bubble Quality Group B	
Density d	3,10
Remarks	

AISI 1035 Steel, hot rolled, 19-32 mm (0.75-1.25 in) round

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Carbon Steel](#); [AISI 1000 Series Steel](#); [Medium Carbon Steel](#)

Material Notes: Applications include levers, bolts, studs, nuts, and similar parts which are headed, upset, or extruded. Applications for wires include nails requiring high shank rigidity or strength and quench-hardened nails.

Key Words: UNS G10350, AMS 5080, AMS 5082, ASTM A29, ASTM A108, ASTM A510, ASTM A519, carbon steels, ASTM A544, ASTM A545, ASTM A546, ASTM A576, ASTM A682, FED QQ-S-635 (C1035), B.S. 080 A 37, B.S. 080 M 36, FED QQ-S-700 (C1035), SAE J403, SAE J412, SAE J414, DIN 1.0501, AFNOR CC 35 (France), UNI C 35, SS14 1550 (Sweden), B.S. 060 A 35, B.S. 080 A 32, B.S. 080 A 35

Vendors: No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.87 g/cc	0.284 lb/in ³	Typical for steels.
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	143	143	
Hardness, Knoop	163	163	Converted from Brinell
Hardness, Rockwell B	78	78	Converted from Brinell
Hardness, Vickers	149	149	Converted from Brinell
Tensile Strength, Ultimate	495 MPa	71800 psi	
Tensile Strength, Yield	270 MPa	39200 psi	
Elongation at Break	18 %	18 %	in 50 mm
Reduction of Area	40 %	40 %	
Modulus of Elasticity	196 GPa	28400 ksi	
Bulk Modulus	156 GPa	22600 ksi	Estimated from elastic modulus
Poissons Ratio	0.29	0.29	Typical for steel
Shear Modulus	76.0 GPa	11000 ksi	Estimated from elastic modulus

Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity <input type="checkbox"/>	0.0000163 ohm-cm @Temperature 0.000 °C	0.0000163 ohm-cm @Temperature 32.0 °F	annealed specimen
	0.0000217 ohm-cm @Temperature 100 °C	0.0000217 ohm-cm @Temperature 212 °F	annealed specimen

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear <input type="checkbox"/>	11.0 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C	6.11 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 212 °F	
	11.9 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 200 °C	6.61 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 392 °F	
	12.6 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 300 °C	7.00 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 572 °F	
	13.3 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 400 °C	7.39 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 752 °F	
	13.9 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 500 °C	7.72 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 932 °F	
	14.4 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 600 °C	8.00 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 1110 °F	
	14.8 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 700 °C	8.22 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 1290 °F	
Specific Heat Capacity	0.486 J/g-°C @Temperature >=100 °C	0.116 BTU/lb-°F @Temperature >=212 °F	annealed
Thermal Conductivity <input type="checkbox"/>	43.6 W/m-K @Temperature 100 °C	303 BTU-in/hr-ft ² -°F @Temperature 212 °F	Estimated
	50.7 W/m-K @Temperature 0.000 °C	352 BTU-in/hr-ft ² -°F @Temperature 32.0 °F	Estimated

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.31 - 0.38 %	0.31 - 0.38 %	
Iron, Fe	98.63 - 99.09 %	98.63 - 99.09 %	As remainder
Manganese, Mn	0.60 - 0.90 %	0.60 - 0.90 %	
Phosphorus, P	<= 0.040 %	<= 0.040 %	

Sulfur, S

<= 0.050 %

<= 0.050 %

[References](#) for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

Bibliografía

- [Askeland et al., 2012] Askeland, D. et al. (2012). *Ciencia e ingeniería de materiales*. CENGAGE Learning.
- [Barojas, 2013] Barojas, E. (2013). *Manufactura, integración, metrología y aceptación de las celdas optomecánicas de la cámara del espectrógrafo ESOPPO para el telescopio de 2.1 metros del observatorio astronómico nacional*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [Bhavikatti, 2005] Bhavikatti, S. S. (2005). *Finite Element Analysis*. New Age International Publishers.
- [Camelo and Rodríguez, 2008] Camelo, F. and Rodríguez, S. (2008). *Una revisión histórica del concepto de calor: algunas implicaciones para su aprendizaje*. Tecné, Episteme y Didaxis: TED, (23).
- [Deméneghi, 2000] Deméneghi, A. (2000). *Método del elemento finito. Análisis lineal*. Facultad de Ingeniería.
- [Echevarria et al., 2008] Echevarria, J. et al. (2008). *The spectrograph ESOPPO: scientific goals, high-level requirements, and introduction to the design*. Proceedings of the SPIE, PAPER NO. 7014-254.
- [Farah, 2008] Farah, A. (2008). *Diseño y fabricación optomecánicos en la instrumentación astronómica; osiris*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [Farah et al., 2008] Farah, A., Gonzalez, J., et al. (2008). *Thermal gradients analysis for ESOPPO spectrograph*. SPIE Conference. Paper 7014-255.
- [Hawking, 2011] Hawking, S. (2011). *Historia del tiempo del big bang a los agujeros negros*. Alianza.
- [Hibbeler, 2011] Hibbeler, R. (2011). *Mecánica de materiales*. PEARSON.
- [Incropera and Witt, 1999] Incropera, F. and Witt, P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson.
- [Kitchin, 2003] Kitchin, C. (2003). *Astrophysical Techniques*. Institute of Physics Publishing.
- [Kreith et al., 2012] Kreith, F., Manglik, R., et al. (2012). *Principios de transferencia de calor*. CENGAGE Learning.

- [Martínez, 2021] Martínez, A. and, M. O. (2021). *Nicolás Copérnico, un revolucionario de su época*. Héroes de la Ciencia.
- [Martínez and Marlon, 2022] Martínez, R. and Marlon, D. (2022). *La historia de la ciencia en sellos postales: una biografía filatélico-didáctica de Isaac Newton*. Eco Matemático.
- [Ortiz, 2013] Ortiz, A. Ruiz, O. e. a. (2013). *Modelado de procesos de manufactura*. Facultad de Ingeniería.
- [Picos et al., 2022] Picos, L., Cuador, J., et al. (2022). *Historia del concepto calor*. Edvcatio physicorvm.
- [Sandage, 1989] Sandage, A. (1989). *Edwin Hubble 1889-1953*. Journal of the Royal Astronomical Society of Canada.
- [Sierra et al., 2008] Sierra, G., González, Farah, A., et al. (2008). *Structure of the spectrograph ESOPO*. Proc. SIPIE, 7014-194.
- [Stewart, 2012] Stewart, J. (2012). *Calculus: Early Transcendentals*. Brooks/Cole, Cengage Learning.
- [Tagüeña, 2023] Tagüeña, J. (9 de enero 2023). Revoluciones de las órbitas celestes. *La unión de morelos*.
- [Ten and Monros, 1984] Ten, A. and Monros, M. (1984). *Historia y enseñanza de la astronomía. Los primitivos instrumentos y su utilización pedagógica*. Historia de las ciencias y enseñanza.
- [Torres, 2006] Torres, C. (2006). *Algunas notas sobre la obra de Kepler*. Biblioteca Universitaria.
- [Yoder and Vukobratovich, 2015] Yoder, P. and Vukobratovich, D. (2015). *Opto-Mechanical Systems Desing*. CRC Press.
- [Zienkiewicz, 2013] Zienkiewicz, O. C. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis ands Fundamentals*. Elsevier.
- [Zuñiga, 2023] Zuñiga, D. (2023). *Modelado tridimensional y análisis térmico por elementos finitos del nanosatélite Ixaya*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [Çengel and Ghajar, 2015] Çengel, Y. and Ghajar, A. (2015). *Heat and mass transfer. Fundamentals applications*. Mc Graw Hill.