



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA

“DISEÑO CONCEPTUAL Y PRESUPUESTO DE ERRORES DE LOS SOPORTES RADIALES PARA LOS LENTES DE LAS CÁMARAS DEL ESPECTRÓGRAFO ESOPO”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO
P R E S E N T A
MISAEAL ROSAS PÉREZ



Director de Tesis: M.I. Alejandro Farah Simón
México, D.F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A Dios por rodearme de gente hermosa y estar conmigo en todo momento. Por traerme hasta aquí. Tuya es la gloria y mío el privilegio.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería, por brindarme la oportunidad de conocer y aprender, de superarme y crecer como persona.

Al Instituto de Astronomía (IA-UNAM) y al Centro de Diseño y Manufactura (CDM), por permitirme involucrarme en el desarrollo de proyectos de Ingeniería y por las enseñanzas dentro de sus instalaciones.

A mis padres Joel y Susana por todo su amor y apoyo que me han dado cada día de mi vida. A mi padre por sus consejos y palabras de aliento; y a mi madre por sus cuidados, no olvidaré las tazas de café en las madrugadas. A mis hermanos Berenice, Miriam y Daniel por las alegrías, por su cariño y por estar a mi lado.

A Alejandro Farah primeramente por su amistad, por su apoyo durante este proceso y por enseñarme, no sólo Ingeniería, sino como ser una persona genuina.

A mis amigos de la Facultad que rieron y sufrieron conmigo: A Alberto y Julio; por su gran amistad. A René; hermano no tengo palabras, gracias por tu apoyo. A Esperanza, Faviola, Germán, Toño, Ian por su apoyo y las alegrías que compartieron conmigo. A Brendita por escucharme siempre. A Ares y Fer por el gran equipo que formamos, y vamos por más.

A los amigos que encontré en el CDM y el IA-UNAM. A Israel y a Luis por darme siempre una sonrisa. A Venni y Rocío por las horas de café y compartir locuras.

A Nallely por estar conmigo desde el principio hasta el fin, por tus consejos, regaños y abrazos. Por hacerme una mejor persona. *Grazie di esistere...*

Al Dr. Manuel Dorador, al Ing. Mariano García, al Dr. Adrian Espinosa y al Dr. Juan Echevarría por el tiempo que invirtieron en escucharme y revisar esta tesis.

A mis profesores que con sus enseñanzas y experiencia impactaron mi vida y que gracias ellos estoy aquí: A la Maestra Pili, M.I. Antonio Zepeda, Dr. Ubaldo Márquez, al M.I. Miguel Ángel Cruz y a los que por descuido no están en esta lista.

A la familia Rosas y a la familia Hernández.

Y cada una de las personas que me han dado el privilegio de formar parte de su vida, por mucho o poco tiempo, y que por descuido no están en la lista.

本当にありがとう
(*Honto ni arigatou*)

*"Porque con el espíritu intuyo y
con la ciencia confirmo"*
-Susana Sho-

ÍNDICE

I	OBJETIVOS Y META	7
II	RESUMEN Y ABSTRACT	8
II.1	RESUMEN	8
II.2	ABSTRACT	8
III	INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN	9
III.1	DESARROLLO ASTRONÓMICO.....	9
III.2	PROYECTO ESOPO	10
III.3	JUSTIFICACIÓN	10
IV	ANTECEDENTES	11
IV.1	ÓPTICA.....	11
IV.1.1	<i>Naturaleza de la luz</i>	11
IV.1.2	<i>Óptica geométrica</i>	13
IV.1.2.1	Principio de Huygens	13
IV.1.2.2	Reflexión y refracción.....	14
IV.1.2.3	Ley de Snell.....	15
IV.1.3	<i>Óptica electromagnética</i>	16
IV.2	LENTES.....	16
IV.2.1	<i>Tipos de lentes</i>	18
IV.2.1.1	Lentes Convergentes	18
IV.2.1.2	Lentes Divergentes.....	19
IV.2.2	<i>Aberraciones</i>	20
IV.2.2.1	Aberración cromática	20
IV.2.2.2	Aberraciones esféricas.....	21
IV.3	OPTOMECÁNICA	23
IV.4	EL ESPECTRÓGRAFO.....	24
IV.4.1	<i>El Espectrógrafo</i>	24
IV.4.2	<i>Estado del Arte</i>	25
IV.4.2.1	Instrumentos multiobjetos de fibra óptica	25
IV.4.2.2	Instrumentos multiobjetos de plato de apertura	26
IV.4.2.3	Unidad de campo integral.....	27
IV.5	BARRIL DE LA CÁMARA DE OSIRIS	27
IV.5.1	<i>Especificaciones y Restricciones</i>	28
IV.5.2	<i>Descripción del diseño</i>	28
V	MARCO DE REFERENCIA	30
V.1	LA ASTRONOMÍA CONTEMPORÁNEA EN MÉXICO	30
V.1.1	<i>Breve historia</i>	30
V.1.2	<i>OAN</i>	31
V.2	LA INSTRUMENTACIÓN ASTRONÓMICA	32
V.3	LOS TELESCOPIOS.....	33
V.3.1	<i>Historia</i>	33
V.3.2	<i>Clasificación y tipos</i>	34
V.3.2.1	Telescopio Refractor.....	34

V.3.2.2	Telescopio Reflector.....	35
V.3.2.3	Otros Tipos.....	36
V.3.2.4	Telescopios de Nueva Generación.....	37
VI	MARCO TEÓRICO.....	38
VI.1	ESFUERZOS Y DEFORMACIONES MECÁNICA.....	38
VI.1.1	<i>Esfuerzos</i>	38
VI.1.2	<i>Deformaciones</i>	39
VI.1.3	<i>Ensayo de tracción</i>	41
VI.1.4	<i>Ley de Hooke</i>	42
VI.2	ESFUERZOS Y DEFORMACIONES TÉRMICAS.....	43
VI.3	BIRREFRINGENCIA.....	44
VI.4	ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS.....	45
VI.4.1	<i>Método Numérico</i>	45
VI.4.2	<i>Breve Historia</i>	46
VI.4.3	<i>Descripción del método</i>	46
VI.4.3.1	Preprocesamiento.....	46
VI.4.3.2	Procesamiento.....	48
VI.4.3.3	Postprocesamiento.....	48
VI.4.4	<i>Relaciones necesarias</i>	49
VI.4.5	<i>Errores</i>	50
VI.5	ANÁLISIS DIMENSIONAL PI.....	51
VI.5.1	<i>Conceptos básicos</i>	51
VI.5.2	<i>Las constantes</i>	52
VI.5.3	<i>Teorema PI</i>	52
VI.6	PRESUPUESTO DE ERROR.....	53
VI.7	METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	55
VI.7.1	<i>Proceso de Diseño por CAD/CAM</i>	56
VII	ANÁLISIS DE SOPORTES RADIALES.....	59
VII.1	OPTIMIZACIÓN DE DISEÑO DE LOS SOPORTES RADIALES.....	59
VII.1.1	<i>SopORTE Radial usado en OSIRIS</i>	59
VII.1.1.1	Descripción del Soporte Radial.....	59
VII.1.1.2	Comportamiento del SR base bajo distintos casos de carga.....	60
VII.1.1.3	Comportamiento del SR base bajo variaciones en la geometría.....	64
VII.1.2	<i>Propuesta de Optimización para el Soporte Radial</i>	67
VII.1.2.1	Descripción del diseño.....	67
VII.1.2.2	Parámetros de análisis.....	69
VII.1.2.3	Análisis y Resultados.....	69
VII.1.2.4	Comparación de los Resultados.....	70
VII.1.2.5	Comportamiento σ - ϵ con la variación del vector gravedad.....	70
VIII	SOPORTES RADIALES PARA ESOPO.....	74
VIII.1	REQUERIMIENTOS.....	74
VIII.1.1	<i>Funcionales</i>	74
VIII.1.2	<i>Ambientales</i>	75
VIII.2	METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	75
VIII.3	MODELO MATEMÁTICO PARA CALCULAR SOPORTES RADIALES DE LENTES PLANO-CONVEXOS (SRLPC).....	77
VIII.3.1	<i>Consideraciones</i>	77

VIII.3.2	<i>Parámetros</i>	77
VIII.3.3	<i>Modelo Matemático</i>	78
VIII.3.3.1	Esfuerzo caso gravitatorio σ_G	79
VIII.3.3.2	Esfuerzo por caso térmico σ_T	81
VIII.3.3.3	Esfuerzo caso combinado σ_c	81
VIII.4	APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO SRLPC CON EL VIDRIO S-BAL11 ...	83
VIII.4.1	<i>Modelo FEA del Singlete AS2 de ESOPO</i>	83
VIII.4.2	<i>Resultados de FEA</i>	84
VIII.4.3	<i>Aplicación de SRLPC al Singlete AS2 de ESOPO</i>	87
VIII.4.4	<i>Comparación de Resultados</i>	89
VIII.4.5	<i>Variaciones</i>	90
VIII.4.5.1	Gradiente térmico.....	90
VIII.4.5.2	Dimensiones del SR	91
VIII.4.5.3	Dimensiones de la lente.....	93
VIII.5	INTERACCIÓN CON EL PRESUPUESTO DE ERROR.....	95
IX	CONCLUSIONES	98
APÉNDICE A	.....	101
APÉNDICE B.....	.....	104
APÉNDICE C .....	.....	106
APÉNDICE D .....	.....	107
REFERENCIAS .....	.....	109

I OBJETIVOS Y META

OBJETIVOS

Lograr el Diseño Conceptual de distintas configuraciones optomecánicas para soportar la óptica del espectrógrafo ESOP. Analizar por Elementos Finitos los esfuerzos y desplazamientos de las mismas, bajo las condiciones de frontera existentes en el Observatorio Astronómico Nacional. Evaluar la factibilidad de las configuraciones propuestas, así como hacer un estudio comparativo entre ellas. Generar la mejor configuración según las tablas de desplazamientos para el presupuesto de errores del instrumento ESOP.

METAS

Establecer un modelo matemático que permita conocer el ancho o el espesor del Soporte Radial, en función del esfuerzo y de parámetros geométricos y físicos, del vidrio y del metal involucrado. La diferencia con los análisis de Elementos Finitos debe ser inferior al 13%.

Evitar un esfuerzo menor a 3.4 [MPa] en las lentes, para evitar el fenómeno de la birrefringencia en ellas, que disminuye la calidad de las imágenes.

Diseño Conceptual de los Soportes Radiales para las lentes de los barriles de ESOP, incluyendo su validación con el presupuesto de errores del espectrógrafo ESOP.

II RESUMEN Y ABSTRACT

II.1 RESUMEN

En esta tesis se describe el diseño de los soportes radiales para la óptica de los barriles del Instrumento ESOPO que será colocado en el telescopio de 2.12 [m] del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir (OAN-SPM). Actualmente el diseño del Instrumento está en proceso en el Instituto de Astronomía de la UNAM (IA-UNAM) en sus dos sedes CU y Ensenada. La manufactura se hará en colaboración con el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE). El IA-UNAM tiene experiencia en el desarrollo de proyectos a este nivel, gracias a su participación en el proyecto OSIRIS para el GTC del Observatorio de Canarias, España¹. El diseño de los Soportes Radiales usado para este último instrumento será la base para la optimización del diseño y manufactura que se quiere desarrollar. Se presentan también resultados y simulaciones FEA de distintos casos de carga, así como de variaciones geométricas hechas al soporte radial base y la optimización propuesta.

II.2 ABSTRACT

In this thesis it is described the design of the Radial Supports for the barrel's optic of the astronomical instrument ESOPO, which will be assembled within the 2.12 [m] Telescope of the National Astronomical Observatory in San Pedro Martir, México. Currently the instrument's design is been developed by the IA-UNAM (Instituto de Astronomía de la UNAM). Its manufacture will be done in cooperation with INAOE (Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica). IA-UNAM has experience in developing projects like this, because of its participation in other projects as OSIRIS, It was developed for the Telescope GTC in Canarias, Spain. The optimization in design and manufacture that is going to be developed is based on the Radial Supports used for OSIRIS. This article shows some FEA results and simulation, from different load cases but also geometrical variations of the Radial Support, and the optimization proposed is also included in this work.

III INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

III.1 Desarrollo Astronómico



Fig. 3.1 Gracias a la observación, se pudo establecer una relación entre el movimiento de los cuerpos celestes y los fenómenos que sucedían en la tierra.

El brillo de las estrellas por la noche es algo que desde siempre ha capturado la atención del hombre. Probablemente el primer cuerpo celeste que observó detenidamente el hombre fue el sol, por ser el cuerpo mas brillante en el firmamento. Viendo como era el paso del sol, la luna y las estrellas en el cielo, se pudieron determinar las trayectorias que describían y esto pronto arrojó una utilidad, pues se estableció una relación entre los movimientos cíclicos de los cuerpos celestes con los fenómenos que sucedían en la tierra como; el día y la noche, o bien, el cambio de estaciones.

Para el hombre primitivo fue muy importante conocer estos cambios porque de ellos dependía su vida. Las migraciones estacionales de animales y

posteriormente el tiempo exacto de sembrar y recoger fueron conocimientos derivados de dichas observaciones, estableciendo un nuevo modo de vivir y logrando avances en todas las áreas de conocimiento.

No fue sino hasta el siglo XVII que se inventó un aparato que permitía una mejor observación de los astros, el telescopio, con el cual se descubrieron cosas que habían permanecido ocultas al ojo del hombre por miles de años: estrellas, galaxias y proporcionó una imagen de la luna más detallada. Redefiniendo el concepto que se tenía hasta ese momento del universo.

El desarrollo astronómico se ha ido dando siguiendo siempre una terna de pasos, el primero que pasa es la formulación de preguntas, como el saber cual es la relación que tiene la forma en cómo funciona el universo y en cómo se desarrollan los fenómenos en nuestro planeta. Al tratar de responderlas, nos encontramos con el siguiente, problemas tecnológicos, porque se necesita que se desarrollen instrumentos astronómicos más poderosos, en cuanto a resolución y calidad de imágenes, que nos permitan ver o analizar de algún modo los cuerpos celestes. El último de estos pasos es que las características con que deben cumplir los instrumentos son un reto a vencer para

los ingenieros, científicos y técnicos que están involucrados en su desarrollo y muchas veces esta necesidad ha sido el detonante para lograr avances en otra áreas, como: electrónica y mecánica entre otras, inclusive ha promovido el desarrollo de nuevas como la mecatrónica y la optomécanica.

Un ejemplo de esto son proyectos de telescopios extremadamente grandes (de 25 a 100 metros de diámetro). No se trata de meras especulaciones futuristas, están avalados por justificaciones científicas y propuestas de soluciones de ingeniería. Dado que todas las grandes superficies ópticas de estos telescopios estarían constituidas por espejos segmentados de un tamaño más razonable, los problemas prácticos de estos proyectos ya no son los relacionados con la óptica en sí misma, sino con la mecánica que debe soportarla, con los sistemas de control y el resto de infraestructuras necesarias.

III.2 Proyecto ESOPPO

ESOPPO surge como respuesta a una amplia lista de proyectos planteados² que superan los requerimientos ópticos y de funcionamiento del espectrógrafo B&Ch que es el actualmente utilizado. En el desarrollo de ESOPPO participan 2 dependencias de la UNAM, el Instituto de Astronomía sede en Ciudad Universitaria y el Instituto de Astronomía sede en Ensenada. Debido a la experiencia adquirida en proyectos de gran magnitud como son el telescopio HET de la Universidad de Texas y el Gran Telescopio de Canarias (GTC) del Instituto de Astrofísica de Canarias³.

El espectrógrafo es considerado para uso general y consta de 2 “brazos”, uno es denominado “Brazo-Azul” y el otro “Brazo-Rojo” en similitud con el intervalo de longitudes de onda donde estarán optimizados.

III.3 Justificación

La importancia de desarrollar un espectrógrafo con cobertura espectral de $[300 \text{ nm} \leq \lambda \leq 900 \text{ nm}]$ y con una resolución espectral de $[500\text{nm} < R \leq 5000\text{nm}]$ y eficiencia lumínica de $[80 \text{ \%}]$ reside primordialmente en su capacidad para ser usado en la investigación astronómica.

La comunidad astronómica nacional ha planteado proyectos que necesitan de un espectrógrafo como ESOPPO que cumple con las especificaciones dichas anteriormente para hacer observaciones de objetos estelares que van desde galaxias cercanas, hasta estrellas en nuestra galaxia. El espectrógrafo ESOPPO aumentaría la competitividad científica del telescopio de 2.12 metros del Observatorio Astronómico Nacional (OAN)⁴.



Fig. 3.2 Galaxias

IV ANTECEDENTES

IV.1 Óptica

La palabra *Óptica* proviene del griego, de la palabra para visible: “*optos*”, que reúne los significados de luz y vista⁵. Sin embargo, el significado de óptica se ha ampliado, de manera, que hoy en día se define como la ciencia y técnica de fabricación de los instrumentos que auxilian a la vista en diferentes aplicaciones, desde microscopios, pasando por lente, hasta los grandes telescopios. Es una parte de la física que estudia los fenómenos relacionados con la luz.

La óptica, al igual que las demás ciencias, ha necesitado de muchos siglos de lenta y progresiva evolución, para llegar a ser lo que es hoy en día, el cual se rige por leyes que nos permiten un conocimiento más exacto de ella⁶.



Fig 4.1 La luz del sol

IV.1.1 Naturaleza de la luz

Una explicación para la propagación de la luz y formación de imágenes se basa en el concepto de onda. En las ondas de luz, como en todas las ondas electromagnéticas, existen campos eléctricos y magnéticos, en cada punto del espacio, que fluctúan con rapidez. Estas cantidades vectoriales; por tener además de una magnitud, una dirección determinada, son perpendiculares entre sí y así mismo a la dirección de propagación de la onda. La onda luminosa más sencilla es una onda sinusoidal pura, llamada así porque una gráfica de la intensidad del campo eléctrico o magnético trazada en cualquier momento a lo largo de la dirección de propagación sería la gráfica de una función seno.

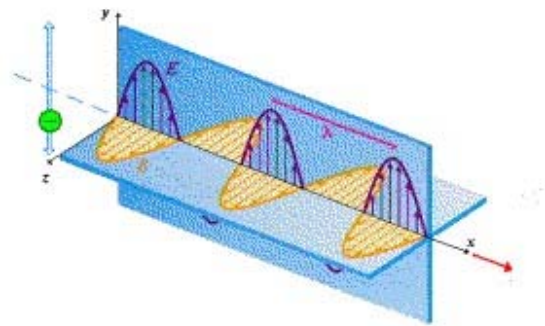


Fig. 4.2 Onda Sinusoidal

El estudio de esta onda arroja ciertos detalles importantes: El número de oscilaciones o vibraciones por segundo en un punto de la onda luminosa se conoce como frecuencia. La longitud de onda es la distancia a lo largo de la dirección de propagación entre dos puntos con la misma 'fase', es decir, puntos que ocupan posiciones equivalentes en la onda, como de un máximo de la onda sinusoidal a otro, o de un mínimo a otro⁷.

Atendiendo a su longitud de onda, la radiación electromagnética recibe diferentes nombres. Desde los energéticos rayos gamma (con una longitud de onda del orden de picómetros) hasta las ondas de radio (longitudes de onda del orden de varios kilómetros). En el espectro visible, las diferencias en longitud de onda se manifiestan como diferencias de color. El rango visible va desde 350 nanómetros (violeta) hasta 750 nanómetros (rojo). La luz blanca es una mezcla de todas las longitudes de onda visibles. No existen límites definidos entre las diferentes longitudes de onda, pero puede considerarse que la radiación ultravioleta va desde los 350 nm hasta los 10 nm. Los rayos infrarrojos, que incluyen la energía calorífica radiante, abarcan las longitudes de onda situadas aproximadamente entre 750 nm y 1 mm.

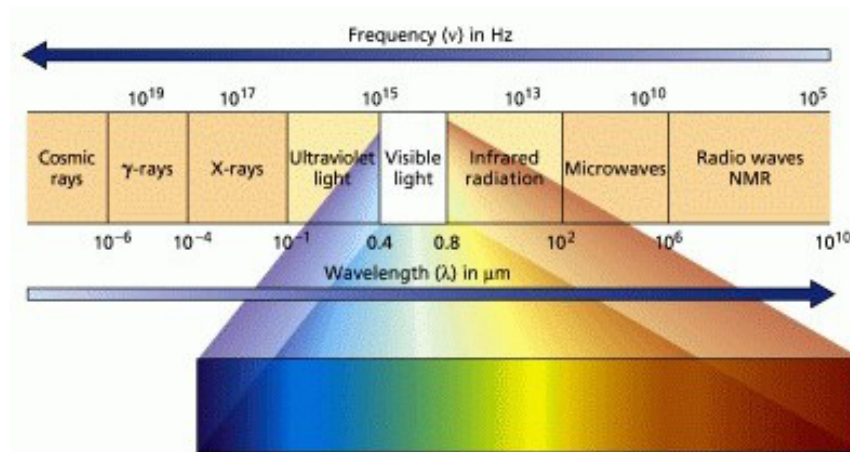


Fig. 4.3 Espectro electromagnético

El intervalo completo de longitudes de onda forma el espectro electromagnético. Todas aquellas frecuencias que quedan fuera del intervalo visible podemos detectarlos mediante instrumentos específicos.

La velocidad de una onda electromagnética es el producto de su frecuencia y su longitud de onda. En el vacío, la velocidad es la misma para todas las longitudes de onda. La velocidad de la luz en las sustancias materiales es menor que en el vacío, y varía para las distintas longitudes de onda; este efecto se denomina dispersión. El índice de refracción es la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de una longitud de onda determinada al atravesar una sustancia. El índice de refracción del aire es 1,00029 y apenas varía con la longitud de onda.

En la figura 4.4 se muestra la trayectoria de un rayo de luz que atraviesa varios medios con superficies de separación paralelas. El índice de refracción del agua es más bajo que el del vidrio.

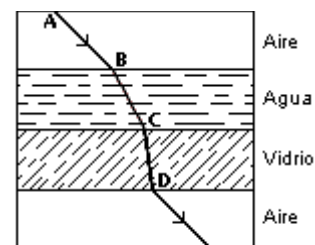


Fig. 4.4 Rayo refractado que atraviesa tres medios diferentes

Como el índice de refracción del primer y el último medio es el mismo, el rayo emerge en dirección paralela al rayo incidente AB , pero resulta desplazado⁸.

El otro concepto que se emplea para explicar las interacciones de la luz con la materia que producen un cambio en la forma de energía, es el de fotón. La energía radiante tiene una naturaleza dual, y obedece leyes que pueden explicarse a partir de una corriente de partículas o paquetes de energía, los llamados fotones, o a partir de un tren de ondas transversales, como ocurre con el efecto fotoeléctrico o la luminiscencia.

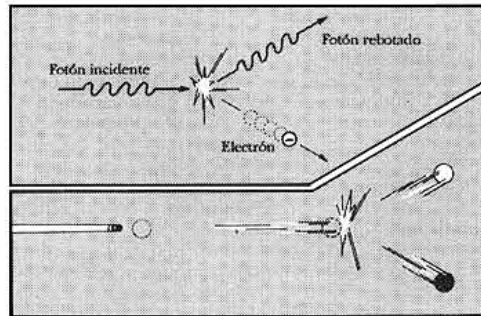


Fig. 4.5 Las trayectorias que siguen un electrón y un fotón que chocan son idénticas a las que seguirían dos bolas de billar microscópicas que tuvieran sus mismas energías. En este fenómeno, llamado efecto Compton, la luz muestra claramente su aspecto corpuscular.

IV.1.2 Óptica geométrica

La óptica geométrica usa la noción de rayo luminoso, visto en el apartado anterior; es una aproximación del comportamiento que corresponde a las ondas electromagnéticas cuando los objetos concernidos son de tamaño mucho mayor que la longitud de onda usada; ello permite despreciar los efectos derivados de la difracción, comportamiento ligado a la naturaleza ondulatoria de la luz⁹.

Se parte de las leyes fenomenológicas de Snell de la reflexión y la refracción. A partir de ellas, se hacen cálculos geométricos con los rayos luminosos para la obtención de las fórmulas que corresponden a los espejos, dioptrios y lentes o sus combinaciones, obteniendo así las leyes que describen el comportamiento de los instrumentos ópticos a que estamos acostumbrados.

IV.1.2.1 Principio de Huygens

Las leyes de reflexión y refracción de la luz suelen deducirse empleando la teoría ondulatoria de la luz introducida en el siglo XVII por el matemático, astrónomo y físico holandés Christian Huygens.

El principio de Huygens afirma que: *todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda del que proceden.*

En la figura 4.6 se indican cuatro rayos luminosos mediante flechas de color rojo y los frentes de onda mediante trazos continuos de color negro perpendiculares a los rayos. En el momento en el que el primer frente de onda alcanza la superficie de separación entre ambos medios, el punto A_1 se

convierte en foco emisor de ondas esféricas secundarias. Esta onda se propaga en los dos medios, formando las ondas reflejadas y refractadas, pero nos limitaremos a la propagación de las segundas. La semicircunferencia centrada en A_1 , trazada en color azul, muestra el frente de onda esférica una vez transcurrido un intervalo de tiempo Δt_1 durante el cual el rayo nº 4 alcanza el punto A_4 . Se deduce que:

$$\Delta t_1 = \frac{B_1 A_4}{v_1} = \frac{A_1 C_1}{v_2}$$

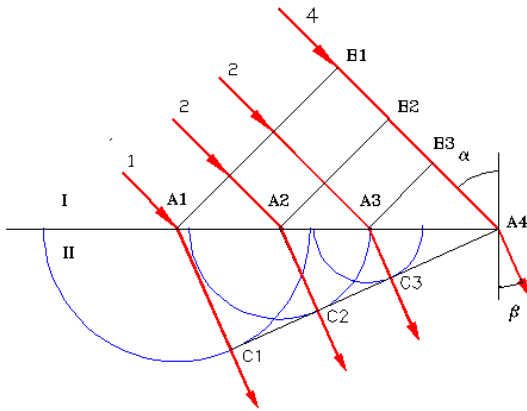


Fig. 4.6 Principio de Huygens

En el momento en el que el rayo nº 2 alcanza la superficie de separación entre los dos medios, el punto A_2 se convierte en foco emisor de ondas esféricas secundarias. La semicircunferencia centrada en A_2 es el frente de onda cuando ha transcurrido un lapso de tiempo Dt_2 , durante el cual el rayo nº 4 ha pasado desde el punto B_2 al punto A_4 . Con ello puede definirse un nuevo frente de onda que envuelve las ondas secundarias. Como la luz avanza en ángulo recto a este frente de onda, el principio de Huygens puede emplearse para deducir los cambios de dirección de la luz¹⁰.

Cuando las ondas secundarias llegan a otro medio u objeto, cada punto del límite entre los medios se convierte en una fuente de dos conjuntos de ondas. El conjunto reflejado vuelve al primer medio, y el conjunto refractado entra en el segundo medio. Es más sencillo, y a veces suficiente, representar la propagación de la luz mediante rayos en vez de ondas. El rayo es la línea de avance, o dirección de propagación, de la energía radiante y, por tanto, perpendicular al frente de onda.

IV.1.2.2 Reflexión y refracción

Si un rayo de luz que se propaga a través de un medio homogéneo incide sobre la superficie de un segundo medio homogéneo, como se dijo en el punto anterior, parte de la luz es reflejada y parte entra como rayo refractado en el segundo medio, donde puede o no ser absorbido. La cantidad de luz reflejada depende de la relación entre los índices de refracción de ambos medios. El plano de incidencia se define como el plano formado por el rayo incidente y la normal (es decir, la línea perpendicular a la superficie del medio) en el punto de incidencia (Figura 4.7). El ángulo de incidencia es el ángulo entre el rayo incidente y la normal. Los ángulos de reflexión y refracción se definen de modo análogo.

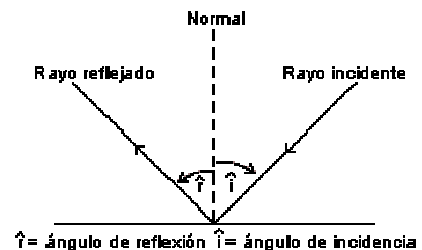


Fig. 4.7 Leyes fundamentales de la reflexión

Las leyes de la reflexión afirman que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, y que el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal en el punto de incidencia se encuentran en un mismo plano. Si la superficie del segundo medio es lisa, puede actuar como un espejo y producir una imagen reflejada. Si la superficie del segundo medio es rugosa, las normales a los distintos puntos de la superficie se encuentran en direcciones aleatorias. En ese caso, los rayos que se encuentren en el mismo plano al salir de una fuente puntual de luz tendrán un plano de incidencia, y por tanto de reflexión, aleatorio. Esto hace que se dispersen y no puedan formar una imagen.

IV.1.2.3 Ley de Snell

Esta importante ley, llamada así en honor del matemático holandés Willebrord van Roijen Snell, afirma que: *el producto del índice de refracción del primer medio y el seno del ángulo de incidencia de un rayo es igual al producto del índice de refracción del segundo medio y el seno del ángulo de refracción*¹¹

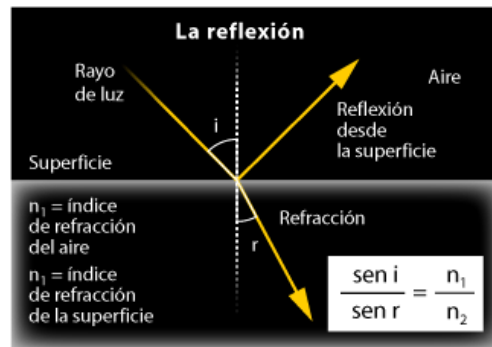


Fig. 4.8 Ley de Snell

En general, el índice de refracción de una sustancia transparente más densa es mayor que el de un material menos denso, es decir, la velocidad de la luz es menor en la sustancia de mayor densidad. Por tanto, si un rayo incide de forma oblicua sobre un medio con un índice de refracción mayor, se desviará hacia la normal, mientras que si incide sobre un medio con un índice de refracción menor, se desviará alejándose de ella. Los rayos que inciden en la dirección de la normal son reflejados y refractados en esa misma dirección.

Para un observador situado en un medio menos denso, como el aire, un objeto situado en un medio más denso parece estar más cerca de la superficie de separación de lo que está en realidad. Un ejemplo habitual es el de un objeto sumergido, observado desde encima del agua, como se muestra en la Figura 4.9. El rayo DB procedente del punto D del objeto se desvía alejándose de la normal, hacia el punto A . Por ello, el objeto parece situado en C , donde la línea ABC interseca una línea perpendicular a la superficie del agua y que pasa por D .

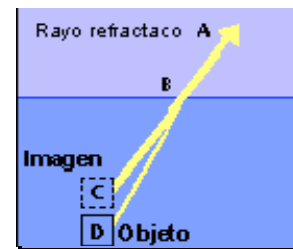


Fig 4.9 Como resultado de la refracción el objeto sumergido parece estar más cerca de la superficie del agua

IV.1.3 Óptica electromagnética

Esta considera a la luz como una onda electromagnética explicando así la reflectancia y transmitancia y fenómenos como son la polarización y anisotropía. A diferencia de otros tipos de onda se puede propagar en el vacío.

El comportamiento de la radiación electromagnética se puede considerar en lugar de como una serie ondas, como un chorro de partículas, llamadas fotones. Esta dualidad onda-corpúsculo hace que cada fotón tenga una energía proporcional a la frecuencia de la onda asociada, dada por la relación de Planck. Se puede obtener mucha información acerca de las propiedades físicas de un objeto a través del estudio de su espectro electromagnético, ya sea por la luz emitida (radiación del cuerpo negro) o absorbida por él. Esto es la espectroscopia y se usa ampliamente en astrofísica. Por ejemplo, los átomos de hidrógeno tienen una frecuencia natural de oscilación, por lo que emiten ondas de radio, las cuales tiene una longitud de onda de 21,12cm.

IV.2 Lentes

Las lentes son objetos transparentes, limitados por dos superficies esféricas o por una superficie esférica y otra plana, que se hallan sumergidas en un medio, asimismo transparente, normalmente aire. Desempeñan un papel esencial como componentes de diferentes aparatos ópticos. Con lentes se corrigen los diferentes defectos visuales, se fabrican los microscopios, las máquinas fotográficas, los proyectores y muchos otros instrumentos ópticos.

Aunque es conocido el hecho de que los antiguos griegos y romanos empleaban una clase de lente denominado “espejo ustorio” (espejo cóncavo de metal, que refleja los rayos solares reuniéndolos en su foco) para concentrar los rayos solares y hacer arder la madera seca, no se sabe a ciencia cierta en qué época de la historia se inventaron las lentes¹².

En la antigüedad clásica no se conocían las auténticas lentes de vidrio; posiblemente se fabricaron por primera vez en Europa a finales del siglo XIII. Los anteojos, primeros instrumentos ópticos, fueron inventados entre los años 1280 y 1311. El telescopio y el microscopio fueron inventados unos siglos después. En la última mitad del siglo XIX y en la primera del XX se han inventado los binóculos, las lentes de las cámaras fotográficas y las de los proyectores cinematográficos, los periscopios, los espectroscopios, etc.¹³.

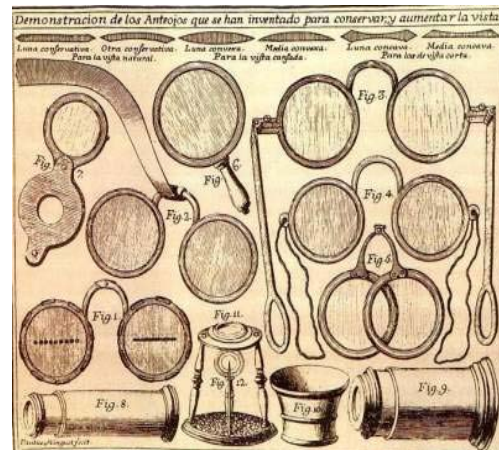


Fig. 4.10 Lentes antiguas

El eje óptico es una línea de referencia que constituye un eje de simetría, y pasa por el centro de una lente o espejo esféricos y por su centro de curvatura. Si un haz de rayos estrecho que se propaga en la dirección del eje óptico incide sobre la superficie esférica de un espejo o una lente delgada, los rayos se reflejan o refractan de forma que se cortan, o parecen cortarse, en un punto situado sobre el eje óptico. La distancia entre ese punto (llamado foco) y el espejo o lente se

denomina distancia focal. Cuando una lente es gruesa, los cálculos se realizan refiriéndolos a unos planos denominados planos principales, y no a la superficie real de la lente.

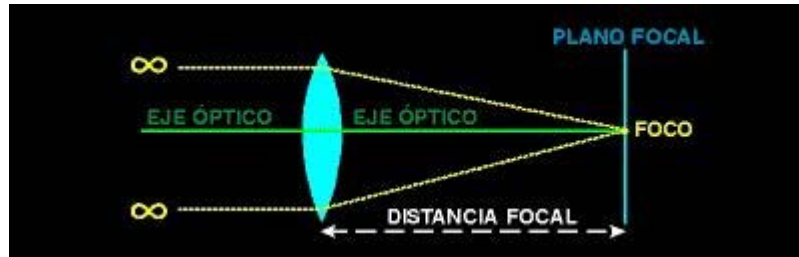


Fig. 4.11 Camino óptico

Si las dos superficies de una lente no son iguales, ésta puede tener dos distancias focales, según cuál sea la superficie sobre la que incide la luz. Cuando un objeto está situado en el foco, los rayos que salen de él serán paralelos al eje óptico después de ser reflejados o refractados. Las lentes con superficies de radios de curvatura pequeños tienen distancias focales cortas.

El foco es muy importante en el estudio de las lentes, pues se logran diferentes efectos según la posición de los objetos con respecto de él. Si la distancia del objeto es mayor que la distancia focal, una lente convergente forma una imagen real e invertida. Si el objeto está lo bastante alejado, la imagen será más pequeña que el objeto. Si la distancia del objeto es menor que la distancia focal de la lente, la imagen será virtual, mayor que el objeto y no invertida. En ese caso, el observador estará utilizando la lente como una lupa. El ángulo que forma en el ojo esta imagen virtual aumentada (es decir, su dimensión angular aparente) es mayor que el ángulo que formaría el objeto si se encontrara a la distancia normal de visión. La relación de estos dos ángulos es la potencia de aumento de la lente. Una lente con una distancia focal más corta crearía una imagen virtual que formaría un ángulo mayor, por lo que su potencia de aumento sería mayor. La potencia de aumento de un sistema óptico indica cuánto parece acercar el objeto al ojo, y es diferente del aumento lateral, que es la relación entre la altura de la imagen y la altura del objeto, pues esta según aumenta la distancia focal.

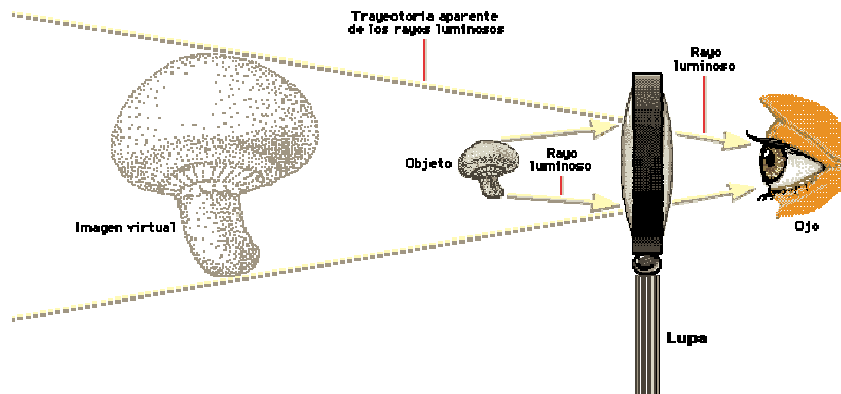


Fig. 4.12 Uso de una lente como Lupa

La cantidad de luz que puede admitir una lente aumenta con su diámetro. Como la superficie que ocupa una imagen es proporcional al cuadrado de la distancia focal de la lente, la intensidad luminosa de la superficie de la imagen es directamente proporcional al diámetro de la lente e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia focal. Por ejemplo, la imagen producida por

una lente de 3 cm de diámetro y una distancia focal de 20 cm sería cuatro veces menos luminosa que la formada por una lente del mismo diámetro con una distancia focal de 10 cm. La relación entre la distancia focal y el diámetro efectivo de una lente es su relación focal, llamada también número f . Su inversa se conoce como apertura relativa. Dos lentes con la misma apertura relativa tienen la misma luminosidad, independientemente de sus diámetros y distancias focales.

IV.2.1 Tipos de lentes

De la combinación de los tres posibles tipos de superficies límites, cóncava, convexa y plana, resultan las diferentes clases de lentes. Según su geometría, las lentes pueden ser *bicóncavas*, *biconvexas*, *plano-cóncavas*, *plano convexas* y *cóncavo-convexas*.

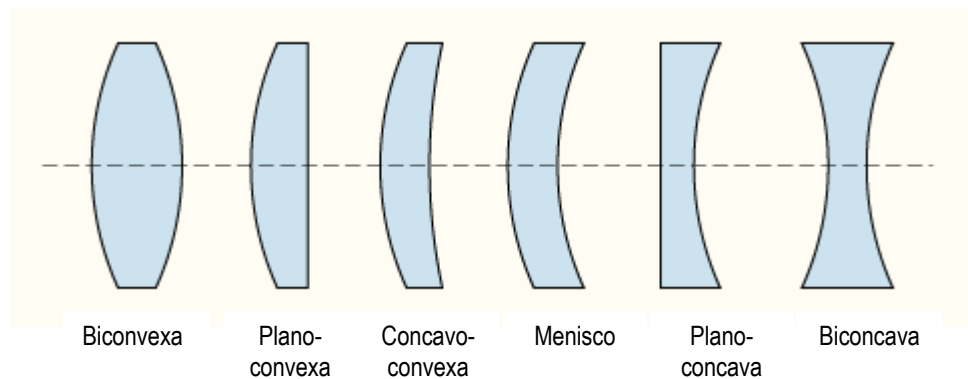


Fig 4.13 Tipos de Lentes

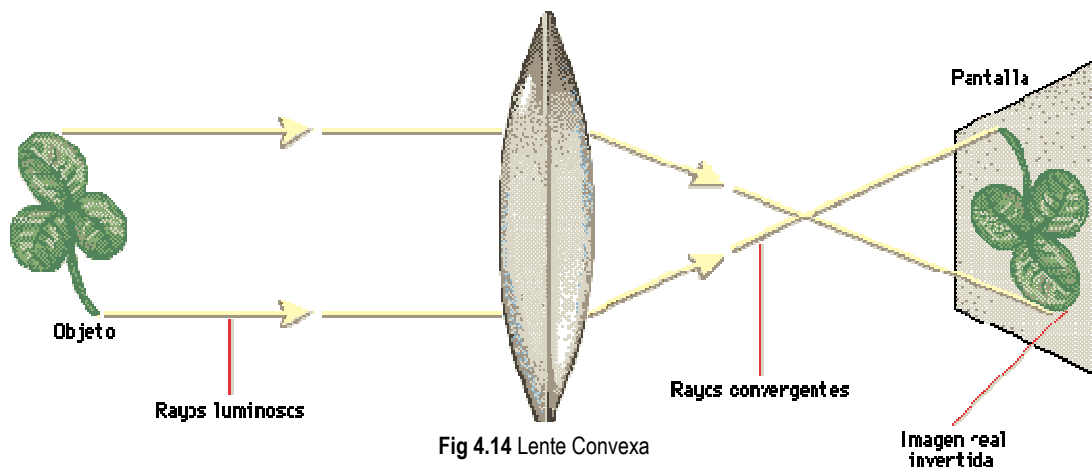
Desde el punto de vista de sus efectos sobre la marcha de los rayos es posible agrupar los diferentes tipos de lentes en dos grandes categorías: lentes convergentes y lentes divergentes.

IV.2.1.1 Lentes Convergentes

Se reconocen por ser más gruesas en el centro que en los bordes, razón por la cual también se les llama convexas. Cuando una serie de rayos paralelos pasan a través de una lente de superficies convexas, los rayos convergen todos hacia un punto denominado foco. Es fácil entender este fenómeno si se toma en cuenta el principio de refracción. Nótese que cualquier superficie curva puede considerarse constituida por infinidad de planos diminutos; de modo que al pasar la luz por el lente, sólo el rayo central incide perpendicularmente a la superficie de la lente y se transmite en línea recta, mientras que todos los otros rayos caen oblicuamente y, en consecuencia, sufren refracción.

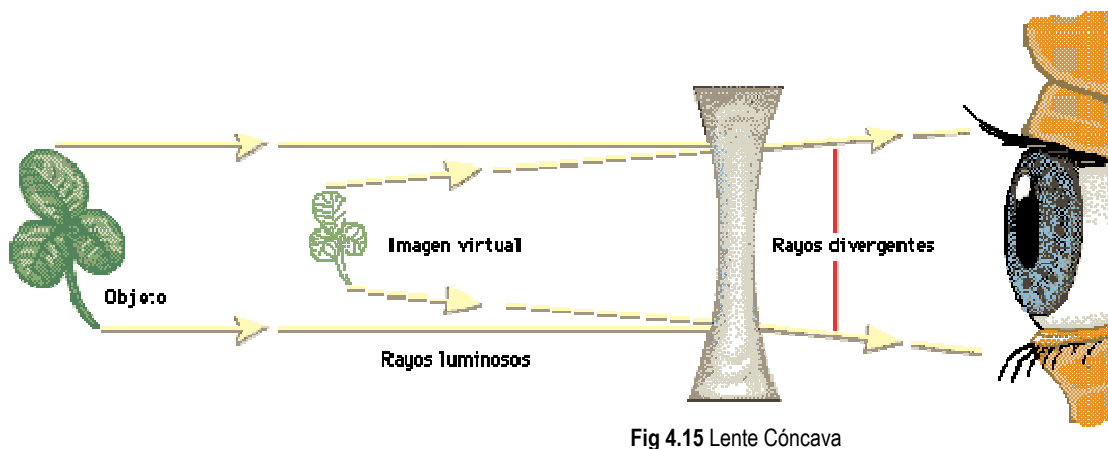
El hecho de que la oblicuidad sea más pronunciada en los extremos de la lente, hace que en esta parte los rayos sufran una mayor desviación. Debido a que la luz viaja con menor velocidad en vidrio que en el aire, la porción de ondas que atraviesa las partes más gruesas de la lente se retarda en relación con la que pasa por las partes más delgadas. En consecuencia, las ondas sufren una curvatura. El que la lente converja los rayos de luz hace que se forme una imagen del objeto en una pantalla situada al otro lado de la lente. La imagen está enfocada si la pantalla se coloca a una distancia determinada, que depende de la distancia del objeto y del foco de la lente. La lente del ojo

humano es convexa, y además puede cambiar de forma para enfocar objetos a distintas distancias. La lente se hace más gruesa al mirar objetos cercanos, y más delgada al mirar objetos lejanos.



IV.2.1.2 Lentes Divergentes

Estas son más delgadas en el centro que en los bordes, y por éste motivo se les denomina también cóncavas. Cuando la luz pasa los rayos experimentan una desviación que los aleja del rayo central. Al ser ésta lente más delgada en el centro que en los extremos, la parte central de la onda atraviesa más rápidamente el centro de la lente y se hace curva hacia delante. A diferencia de las lentes convexas, que producen imágenes reales, las cóncavas sólo producen imágenes virtuales, es decir, imágenes de las que parecen proceder los rayos de luz. En este caso es una imagen más pequeña situada delante del objeto (el trébol).



IV.2.2 Aberraciones

Uno de los principales problemas de los lentes y de los sistemas de lentes son las imágenes imperfectas, producidas en gran medida por los defectos en la configuración y forma de los lentes. La teoría simple de espejos y lentes supone que los rayos forman ángulos pequeños con el eje óptico. En este sencillo modelo, todos los rayos que parten de la fuente puntual se enfocan en un solo punto produciendo una imagen nítida. Sin embargo, es claro que esto no es siempre cierto. Cuando las aproximaciones usadas en esta teoría no se cumplen, se forman imágenes imperfectas.

Si uno desea efectuar un análisis preciso de la formación de imágenes, es necesario trazar cada rayo empelando la ley de Snell en cada superficie reflectora. Este procedimiento muestra que los rayos provenientes de un objeto puntual no se enfocan en un sólo punto. Es decir, no hay una sola imagen puntúa; en vez de eso, la imagen está difusa. Las desviaciones (imperfecciones) de las imágenes reales de una imagen ideal predicha por la teoría simple se denominan aberraciones.

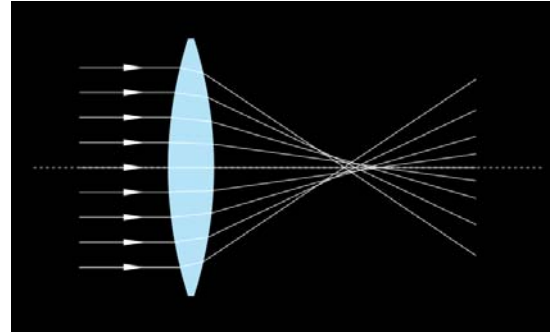


Fig 4.16 Aberración esférica

IV.2.2.1 Aberración cromática

La distancia focal de una lente depende del índice de refracción de la sustancia que la forma. Puesto que el índice de refracción de todas las sustancias ópticas varía con la longitud de onda, la distancia focal de una lente es distinta para los diferentes colores¹⁴.

En consecuencia, una lente única no forma simplemente una imagen de un objeto, sino una serie de imágenes a distancias distintas de la lente, una para cada color presente en la luz incidente. Además, como el aumento depende de la distancia focal, estas imágenes tienen tamaños diferentes. La variación de la distancia imagen con el índice de refracción se denomina aberración cromática longitudinal y la variación de tamaño de la imagen es la aberración cromática lateral.

La luz de longitud de onda más corta (azul) es curvada más que la luz de longitud de onda más larga (rojo), de forma que la luz azul llega a un foco más cercano de la lente que la luz roja. El efecto puede reducirse colocando dos lentes juntas. Los espejos no sufren aberración cromática.

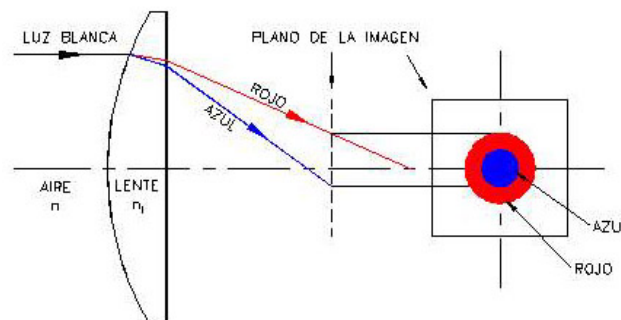


Fig 4.17 Aberración cromática. La imagen muestra la marcha de rayos que tiene lugar cuando incide luz blanca sobre una lente plana convexa

En la práctica la aberración cromática longitudinal se entiende como el efecto que se produce de los bordes coloreados alrededor de un objeto visto a través de una lente, causado porque la lente no desvía todos los colores al mismo foco.

La solución al problema no es sencilla. Es necesario aplicar las denominadas lentes acromáticas, que no son lentes individuales, sino que más bien montajes de cristales con diferentes propiedades refringentes que actúan en conjunto, desviando el haz luminoso de forma tal que en el plano de la imagen, todas las frecuencias sean convergentes en el mismo punto.

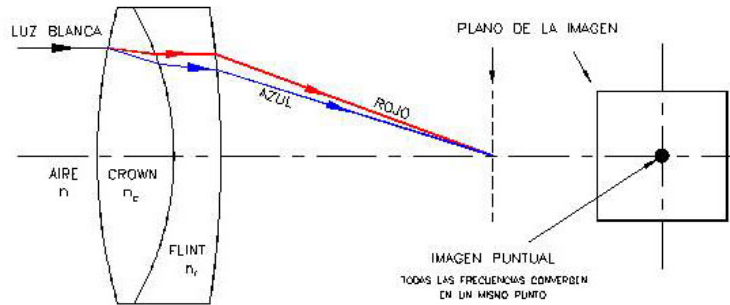


Fig. 4.18 La imagen muestra la marcha de rayos que tiene lugar cuando incide luz blanca sobre una lente acromática compuesta

Puede verse que en ambas configuraciones ópticas la luz blanca se desdobla entre los colores rojo y azul, los extremos del espectro visible. Pero en el caso de la composición acromática, las lentes componentes están construidas y dispuestas de tal manera que todas las frecuencias luminosas proyectan su imagen sobre un plano común, anulando el efecto de desdoblamiento de colores. La imagen de un punto aparece también puntual y blanca.

Las lentes acromáticas consisten generalmente de dos componentes, uno convergente con un índice de refracción reducido llamado CROWN, y otro divergente con índice de alto valor denominado FLINT.

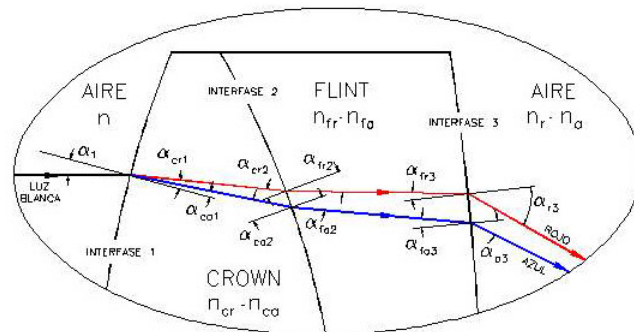


Fig. 4.19 Crown y Flint

IV.2.2.2 Aberraciones esféricas

La aberración esférica es un defecto de los espejos y las lentes en el que los rayos de luz que inciden paralelamente al eje óptico, aunque a cierta distancia de éste, son llevados a un foco diferente que los rayos próximos al mismo¹⁵.

Las aberraciones esféricas son producidas por el hecho de que los puntos focales de rayos luminosos alejados del eje óptico de un lente esférico (o espejo) son diferentes de los puntos focales de los rayos de la misma longitud de onda que pasan cerca del centro. Los rayos cercanos a la mitad del lente forman la imagen más lejos del lente que los rayos en los bordes. En consecuencia, no hay una sola longitud focal para un lente.

Las lentes pueden producir diversas formas de aberraciones:

- La aberración esférica ocurre cuando la luz que atraviesa el lente a diferentes distancias del eje óptico se enfoca en diferentes puntos.
- El astigmatismo es una aberración que ocurre para objetos no localizados sobre el eje óptico del lente.
- Aberración de coma. Esta aberración ocurre cuando la luz que pasa a través del lente del eje óptico y la luz que pasa a través del lente cerca del foco del lente, se enfocan en diferentes partes del plano focal.

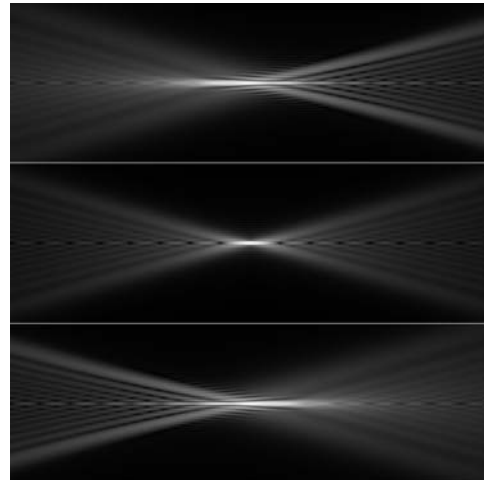


Fig. 4.20 Aberración esférica

Este efecto es proporcional a la cuarta potencia del diámetro de la lente o espejo e inversamente proporcional al cubo de la longitud focal siendo mucho más pronunciado en sistemas ópticos de corta focal, como en las lentes de un microscopio. En los telescopios ópticos antiguos se utilizaban instrumentos de larga focal para reducir el efecto de la aberración esférica.

En el caso de espejos empleados para objetos muy distantes, las aberraciones pueden eliminarse, o reducirse al mínimo utilizando una parabólica en vez de una superficie esférica. Sin embargo, las superficies parabólicas no se emplean a menudo, debido a que las que cuentan con óptica de alta calidad tiene un alto costo de fabricación.

Los rayos luminosos paralelos que inciden en una de estas superficies se enfocan en un punto común. Las superficies reflectoras parabólicas se usan en muchos telescopios astronómicos para mejorar la calidad de la imagen.

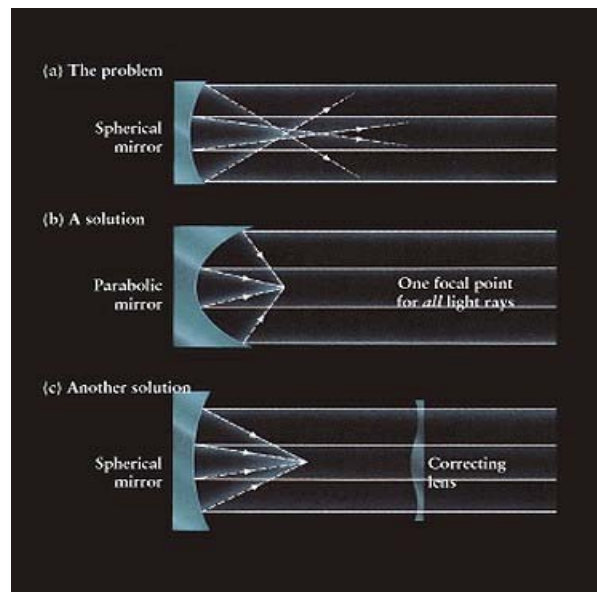


Fig. 4.21 Soluciones para la aberración esférica

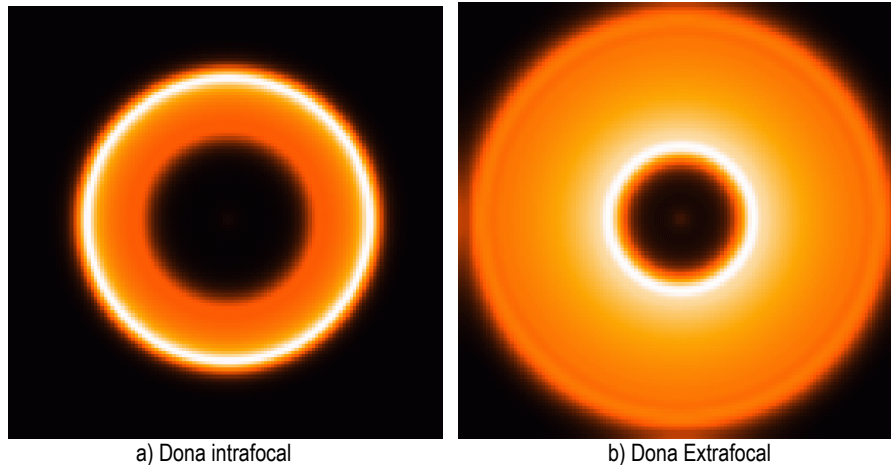


Fig. 4.22 En el caso a), se presenta una imagen desenfocada intrafocal, en esta imagen podemos ver un borde externo con mas brillo que el resto de la imagen, también, notemos que la zona de la dona esta desproporcionada, el hoyo central esta muy grande. En el caso b), la imagen es la correspondiente a una dona extrafocal, en esta podemos ver que la zona brillante esta en el borde interno.

IV.3 Optomecánica

El diseño optomecánico es una subdisciplina de la ingeniería óptica en la elementos ópticos como lentes, espejos y prismas son colocados dentro de estructuras mecánicas (celdas, contenedores y vigas) con el fin de integrar un instrumento óptico. El diseño de un instrumento óptico resulta primordialmente del esfuerzo y cooperación de un equipo de trabajo formado por diseñadores de lentes, e ingenieros ópticos y mecánicos, quienes se respaldan en otros equipos; de fabricación y ensamble, electrónica entre otras áreas, para poder construir el instrumento.

El diseño de un instrumento empieza con la definición de una necesidad para un aparato en particular y pasa por las diferentes fases de diseño: conceptual, preliminar y final, con análisis, experimentación y documentación que lo avalan. Durante el camino, el equipo debe considerar como las condiciones ambientales (como temperatura, humedad, contaminación, vibración, etc) y de operación afectaran el diseño y cual material será el mejor para cada componente.

Además los ingenieros deben de cuidar el costo de fabricación y de operación. El costo total está dado primordialmente por los requerimientos de operación porque estos determinan la complejidad del diseño, aunque también puede ser fuertemente afectado por la elección de configuraciones, materiales y tolerancias dimensionales, que permiten al instrumento cumplir con los requerimientos de operación.

Lograr opciones de detalle correctas en diseño optomecánico demanda la aplicación lógica de la intuición y experiencia a las incógnitas que aparezcan verificándolas con análisis y pruebas. El equipo debe tomar dediciones en cinco categorías básicas de diseño¹⁶: 1) materiales, el coeficiente de expansión térmico entre materiales que conectan la parte mecánica con la óptica deben tener la menor diferencia posible, para evitar rupturas o el efecto de birrefringencia; 2) diseño estructural, es muy importante porque es lo que permitirá que el instrumento tenga estabilidad y soportara la óptica de modo que no sufra daños; 3) Interfaces; 4) soportes para la óptica y 5) ensamble y alineación.

IV.4 El Espectrógrafo

IV.4.1 El Espectrógrafo

Un espectrógrafo es un instrumento que mide la intensidad de la luz, en un determinado intervalo de longitudes de onda del espectro electromagnético, registrándola en un detector como el papel fotosensible, un fotoamplificador o bien un CCD, dispositivo que será usado en ESOP.

Los diseños de un espectrógrafo pueden ser variados, pero todos cuentan con ciertos componentes en común. El proceso inicia cuando el haz de luz captado por el telescopio entra al espectrógrafo, en el punto focal de dicho haz se coloca el primer componente¹⁷: La rendija, de manera que la imagen focal se forma sobre su superficie. Las líneas que se observan en el detector no son más que imágenes de la rendija. Físicamente consiste en una delgada abertura metálica que suele tener un ancho de unas decenas de micras con el fin de seleccionar con precisión un solo objeto.

La luz que atraviesa la rendija es reflejada por el Colimador, se trata de un espejo que convierte el haz divergente en un haz paralelo. También se logra colimar el haz mediante un lente o conjunto de lentes, como un doblete acromático. Este focaliza la imagen de la rendija sobre la red de difracción. La red de difracción, es un analizador óptico muy superior a un prisma, que emplea la difracción para descomponer la luz en sus componentes básicos, es decir en sus diferentes longitudes de onda, de hecho, cada punto de la rendija corresponde a un haz colimado y cada longitud de onda sale con un ángulo ligeramente diferente.

El último paso consiste en focalizar este nuevo haz dispersado por longitudes de onda, como un arco iris, en el detector (CCD) y esto se hace a través del lente objetivo, este lente objetivo puede ser sustituido por una cámara formada por varias lentes, para aumentar la calidad de la imagen.

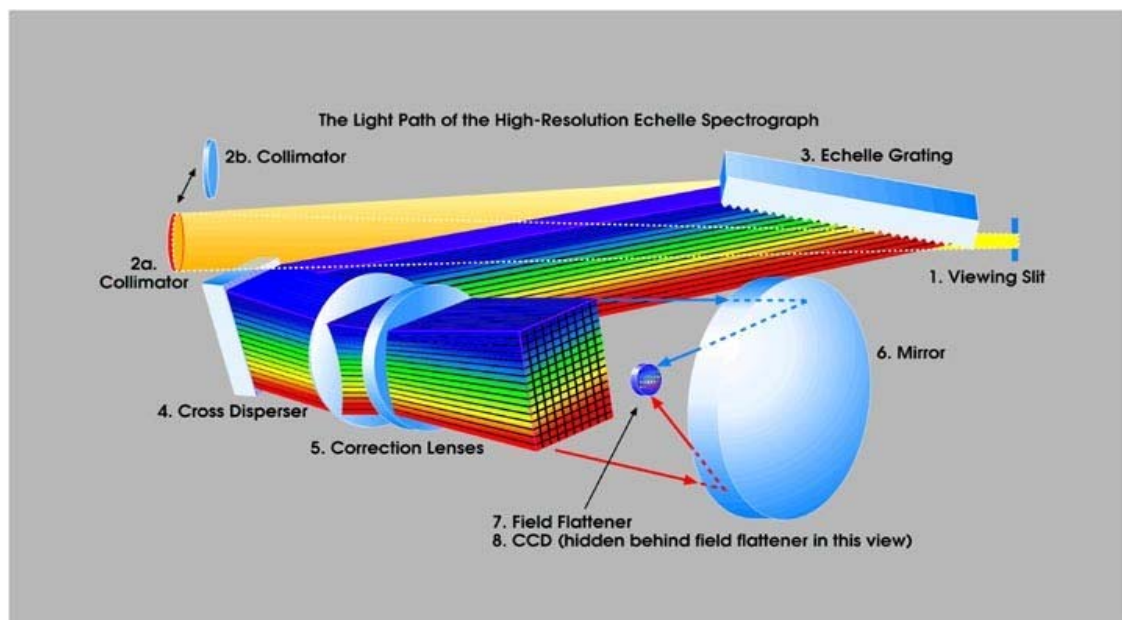


Fig. 4.23 Camino óptico de un espectrógrafo

Un CCD, de sus siglas en inglés Charge-Coupled Device¹⁸, logra captar la luz mediante una matriz de elementos fotosensibles, en cada uno de los cuales fotones provenientes de la fuente de iluminación son absorbidos y por efecto fotoeléctrico al ser estimulados por la energía luminosa, liberan electrones que producen la imagen¹⁹. La imagen en que se traduce la información capturada del CCD es un gráfico (2D). La variable independiente es la longitud de onda y la dependiente la intensidad. Con él se analiza el espectro de la estrella para obtener información como por ejemplo: las condiciones de temperatura, campos eléctricos y magnéticos, composición química, o bien, la velocidad relativa de un objeto que se encuentra a millones de kilómetros.

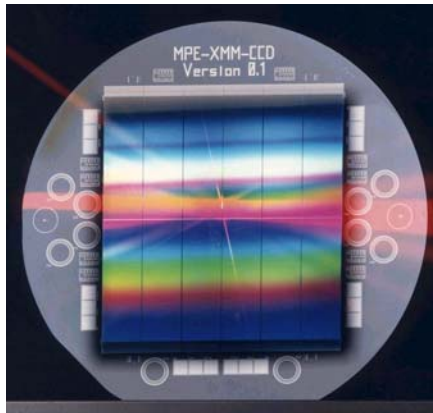


Fig. 4.24 CCD, sus diminutos fotodiodos definen el elemento básico de la imagen: el píxel.

IV.4.2 Estado del Arte

Los espectrógrafos multi-haz se encuentran entre los instrumentos más sofisticados y costosos usados hoy en día por los astrónomos, su costo sobrepasa los 5 millones de dólares para un gran telescopio, y principalmente son usados para el estudio de galaxias casi imperceptibles

IV.4.2.1 Instrumentos multiobjetos de fibra óptica

Estos dispositivos ofrecen aperturas de entrada pequeñas (2-4 segundos de arco) para cada objetivo. Las fibras deben ser reposicionadas con gran precisión para cada campo nuevo. Esto usualmente lo hacen robots mecánicos. En la mayoría de los diseños, las fibras se fijan con una abrazadera magnética en una placa plana en el plano focal. La salida de la unidad presenta la fibra en un arreglo lineal que va a la entrada del espectrógrafo.

HECTOSPEC²⁰

Es un espectrógrafo óptico multiobjeto de mediana resolución alimentado con 300 fibras ópticas. El instrumento está compuesto por un robot posicionador y un espectrógrafo montado en un banco, conectados por 25[m] de fibra óptica. Robots duales, reconfiguran las 300 fibras ópticas en solo 300 segundos. El espectrógrafo tiene una cobertura espectral de 5770Å con una resolución de 6 Å dentro de la banda que va de los 350 a

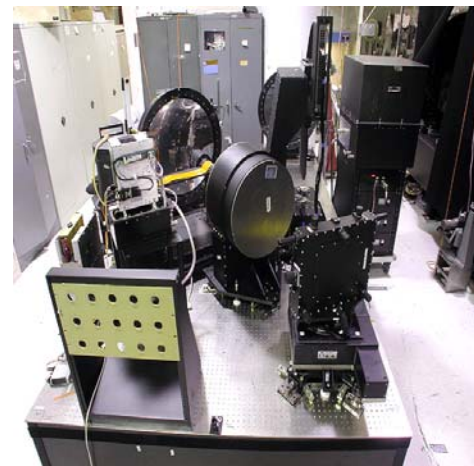


Fig. 4.24 Hectospec

1000 nm. Durante Abril del 2004 se hicieron observaciones de aproximadamente 10000 espectros de galaxias de magnitud 19 a 21, en 7 noches con un clima parcialmente claro.

VIMOS (*Visible MultiObject Spectrograph*)²¹

Es un espectrógrafo multiobjeto de campo amplio en el visible (360-1000 nm) montado en el telescopio UT3 Melipal. El instrumento consiste en 4 brazos idénticos cada uno con un campo de visión de $7' \times 8'$, y píxeles de $0.205''$, y con un gap entre cada cuadrante de $\sim 2'$. Cada brazo esta equipado con 6 grims que proveen una resolución espectral de ~ 200 -2500, con un CCD EEV 4k x 2k



Fig. 4.25 VIMOS Foto: G.Sciarretta

IV.4.2.2 Instrumentos multiobjetos de plato de apertura

Estos espectrógrafos usan aperturas pequeñas en el plano focal a la entrada del espectrógrafo, para transmitir la luz de los objetivos seleccionados. Usualmente, se usan maquinas CNC, mecánicas o de láser, para cortar las rendijas en una máscara metálica, delgada y con cierta forma. Los primeros diseños usaban placas fotográficas. Las rendijas pueden ser de cualquier forma y longitud que permita el plano focal del espectrógrafo.

El principal problema de operación es evitar que se encimen los espectros y maximizar el área que se usa del detector en un campo dado; esto requiere software especial de optimización. En principio, el diseño del plato de apertura permite un mejor paso de la luz, mejor sustracción del fondo del cielo y mejor calibración del flujo que los diseños con fibra, sin embargo, los de fibra permiten adaptar más objetivos

DEIMOS²²

El instrumento DEIMOS, diseñado para el telescopio de 10 metros Keck-II se localiza en la cima de Mauna Kea en Hawai. Es un espectrógrafo de uso general multirendija. Utiliza máscaras de rendijas para captar el espectro de muchos objetos (aprox. 80 por barril) para formar la imagen en un arreglo de CCD's. Algunas de las principales características son: amplia cobertura espectral, por arriba de los 5000 Å por exposición, alta resolución espectral (menos de 1 Å), y gran longitud de rendija en el

cielo (32'.6, suma de los dos barriles). DEIMOS opera en tres modos: Imagen directa, espectrografía de un solo objeto, y espectrografía multiobjeto.

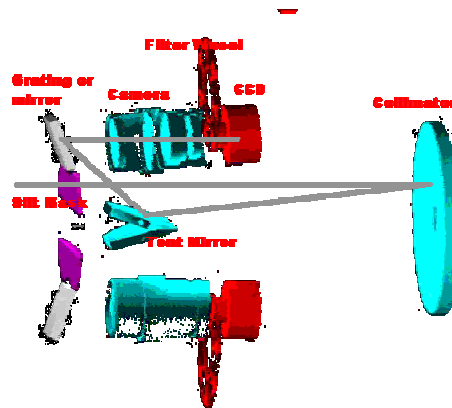


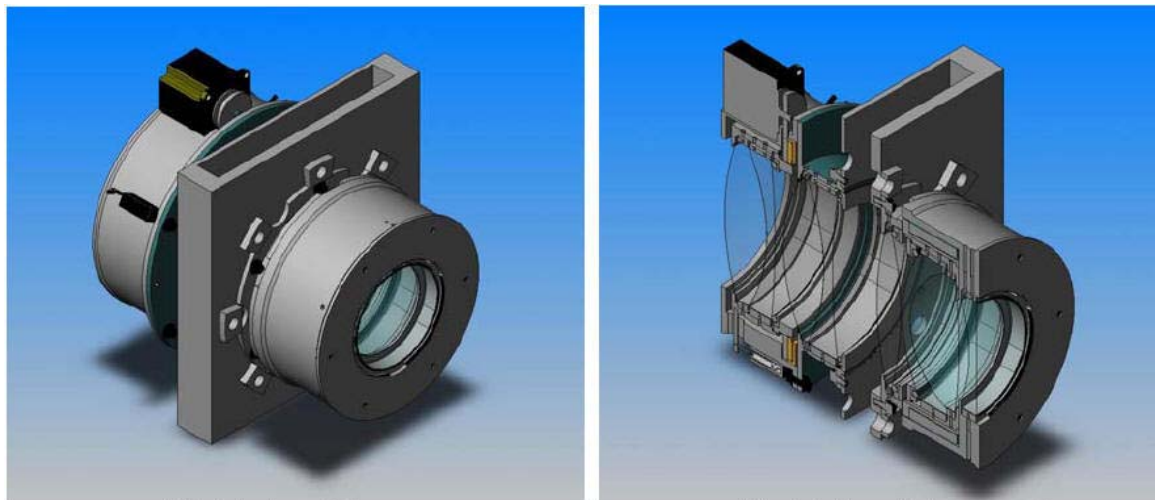
Fig. 4.26 Camino óptico DEIMOS, Drawing by Eric James

IV.4.2.3 Unidad de campo integral

Un IFU (por sus siglas en inglés, integral field unit) produce distintos espectros para muchos elementos contiguos en un campo dado. Es muy poderoso para el estudio de objetos extendidos como agrupaciones globlares o galaxias cercanas. Las posiciones y los tamaños de apertura son fijos y generalmente cubren un área cuadrada o rectangular. IFU's han sido diseñados usando fibra, arreglos de lentes y con microapertura configurable o arreglos de microespejos.

IV.5 Barril de la Cámara de Osiris

El barril de la cámara, la cual sustituye al lente objetivo del espectrógrafo del Gran Telescopio de Canarias (GTC) se denominó: OSIRIS. Es un sistema óptico para adquisición de imágenes de baja resolución, y también puede funcionar como un espectrógrafo multiobjetos, cubre el intervalo de longitudes de onda que van de 0.365 a 1.0 μm^{23} .



(a) vista isométrica

(b) vista isométrica en corte

Fig. 4.28 OSIRIS ensamblado y vista de los componentes

IV.5.1 Especificaciones y Restricciones

Sus especificaciones incluyeron restricciones de deformación y esfuerzos por cargas gravitatorias y térmicas, así como de ensamble y repetitividad. La más crítica fue que durante la operación del instrumento, bajo ninguna circunstancia, se podría tener un esfuerzo mayor a 3.4 [MPa], en ninguna componente óptica, porque se podía presentar el fenómeno de birrefringencia.

El material con mayor proporción en el Barril es Aluminio 6061. La rigidez de este material fue suficiente para garantizar que los esfuerzos y desplazamientos generados, por el peso mismo de cada componente y de las lentes, se encuentre dentro de los valores permisibles. Con un peso aproximado de 24.2 [kg].

IV.5.2 Descripción del diseño

La Unidad de la Cámara consiste en un barril dividido en dos secciones, la primera sección está formada por: el doblete D1 y la Unidad de Enfoque; y la segunda con los singletes S1 y S2 y los dobletes D2 y D3. La ventana del crióstato para el CCD contiene el singlete S3, y no forma parte del barril.

El diseño es modular para permitir su ensamble y desensamble. Está compuesto por 4 subensambles y dos interfaces. El Barril 1 incluye a D1 y la Unidad de Enfoque. El Barril 2, compuesto por D2, la interfase con el obturador, S1, D3 y S2, sirve de interfase de soporte con el resto del instrumento, según especificaciones. El ensamble de toda la cámara es por medio de tornillos con tuerca y la repetitividad de este proceso se garantiza con pernos guía de alineación.

La Unidad de Enfoque funciona a partir de un sistema de engranes helicoidales restringidos a toda traslación por medio de rodamientos. La rotación es transmitida a la celda de D1 por medio de roscas. El enfoque se logra gracias a la traslación, provocada por un motor a pasos de la celda a lo largo de una guía lineal. Para evitar los juegos entre las roscas, el sistema está precargado por medio de tres resortes. La celda no tiene rotación alguna sólo presenta traslación a lo largo de ejes guía. El ajuste del sistema está incluido en el presupuesto de error. El sistema cuenta también con un codificador lineal de posición.

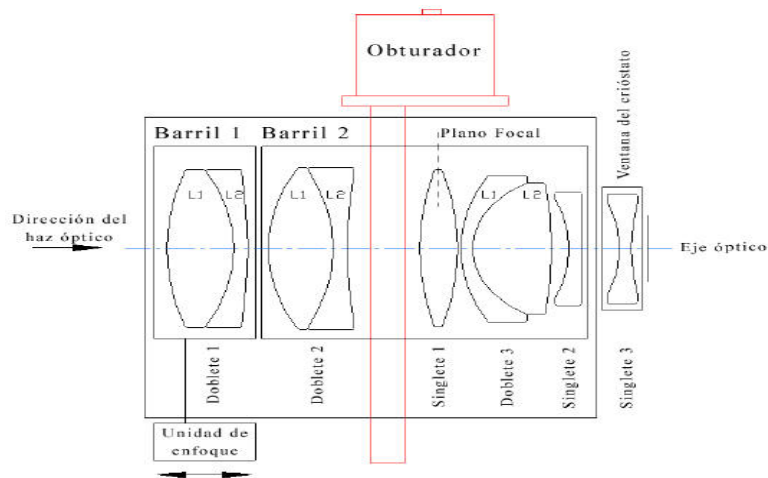


Fig. 4.29 Diagrama funcional de OSIRIS

La celda de D3 está contenida en la *UPD*, esta unidad tiene la función de corregir la posición del doblete conforme varíe la temperatura. El movimiento se logra gracias a la expansión térmica de un cilindro polimérico. La longitud del cilindro se calculó en función del *CTE* del material electo ($180 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Las propiedades de este elemento fueron verificadas en un laboratorio certificado de metrología. Del análisis *FEA* se concluyó que la *UPD* tiene la suficiente rigidez para soportar al D3 y su celda. La unión entre estos elementos en sus dos extremos es firme y estable.

La interfase entre el lente y la celda que lo contiene es el Soporte Radial. Es un arillo con muelles de amortiguación para las expansiones térmicas. Compuesto por una sola pieza, que una vez maquinada a las dimensiones deseadas no requiere de ajustes posteriores. Los lentes se fijaron con sujeciones a 90° de tipo “*Sharp Edge*”. Para cada lente se analizaron los esfuerzos generados por las precargas y las expansiones. La forma y su desempeño mecánico garantizan la calidad de imagen deseada. Se fabricaron con base a las dimensiones medidas de las lentes una vez terminadas y fueron ajustados para lograr el apriete deseado.

V MARCO DE REFERENCIA

V.1 La Astronomía Contemporánea en México

V.1.1 Breve historia

Si bien es cierto que los conocimientos astronómicos de nuestros antepasados en tiempos prehispánicos siguen asombrando en la actualidad por su exactitud, logros y avances²⁴. También lo es que, la astronomía contemporánea en México cuenta con gran renombre a nivel mundial. Siguiendo con la tradición de la importancia que han tenido los fenómenos astronómicos para los pueblos antiguos de nuestro país, los astrónomos y observatorios astronómicos se han dado a la tarea de entenderlos y estudiarlos con más detalle y con ello, han logrado poner en alto el nombre de México en esta materia



Fig. 5.1 Observatorio Maya "El Caracol" Centro arqueológico Chichén Itzá

El repunte de la astronomía mexicana se ha dado gracias al sueño, la visión y perseverancia de unos pocos. Se inició en 1942 con la inauguración del observatorio de Tonantzintla en Puebla. Luis Enrique Erro fue el impulsor de este proyecto²⁵. El observatorio contaba con un telescopio tipo Schmidt de 26-30 pulgadas. Cabe destacar que la cámara era una de las más grandes en la época.

Pero ha sido gracias al trabajo y esfuerzo de astrónomos, investigadores, estudiantes y personal que el avance se ha mantenido constante y que se ha llegado al nivel actual. Los trabajos de investigación que son desarrollados dentro de los observatorios nacionales cuentan con alto grado de complejidad y por ello es necesario contar con mejores equipos para la observación astronómica, como es el caso de ESOP.

Los diez telescopios más grandes que existen en el país se enumeran a continuación. La UNAM y el INAOE son las instituciones más importantes dentro de este ámbito y cuentan con los telescopios más grandes

Tabla V.1: Los 10 telescopios más grandes de México

<i>Observatorio</i>	<i>Tipo</i>	<i>Diámetro en cm</i>
UNAM, en San Pedro Mártir	Ritchey-Chrétien	211
INAOE, en Cananea, Sonora	Ritchey-Chrétien	211
UNAM, en San Pedro Mártir	Ritchey-Chrétien	150
UNAM, en Tonantzintla	Cassegrain	100
UNAM, en San Pedro Mártir	Ritchey-Chrétien	84
INAOE, en Tonantzintla	Schmidt	76
Universidad de Guanajuato	Ritchey-Chrétien	60
Sociedad Astronómica Mex.	Ritchey-Chrétien	60
Univ. Autónoma de Guadalajara	Ritchey-Chrétien	60
Observatorio UNAM, Casa Tlalpan	Ritchey-Chrétien	60

Fuente: <http://omega.ilce.edu.mx:3000>

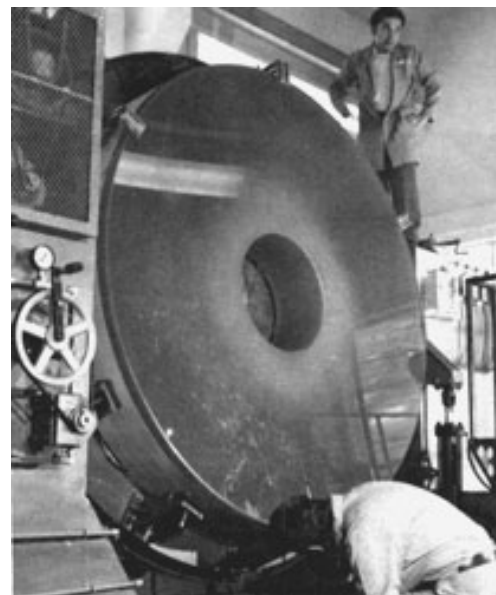


Fig. 5.2 Telescopio de 2,12 metros del OAN (Izq.) Telescopio de 2,11 Metros del INAOE (Der.)

V.1.2 OAN

El crecimiento de la ciudad de Puebla obligó a impulsar un nuevo observatorio. Esta vez se jugaron con muchas variables para escoger el lugar, ya que se debía asegurar la continuidad en la investigación por muchos años. El lugar que presentó las mejores condiciones fue la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California y fue así como se decidió construir ahí el Observatorio Astronómico Nacional (OAN). Este proyecto fue impulsado en sus inicios por Guillermo Haro, un reconocido astrónomo. Los trabajos de investigación se iniciaron en 1967 bajo condiciones muy adversas en cuanto a comodidad en el lugar y fue hasta 1970 cuando se comenzaron a construir los edificios ya

en forma. En 1979 durante los festejos de 50 años de la autonomía universitaria se inaugura el telescopio de 2.12 m en el observatorio, que es uno de los más grandes en el país²⁶.



Fig. 5.3 Vista nocturna del edificio del Telescopio de 2.12 metros del OAN

V.2 La Instrumentación Astronómica

Las mejoras de los telescopios en cuanto a desempeño y eficiencia, reclaman una tecnología cada vez más compleja y especializada. Además de los telescopios las herramientas fundamentales de la astrofísica moderna, los complejos instrumentos que se emplean para la detección de la información proveniente de los objetos celestes, las computadoras, necesarias para el procesamiento de los datos, el modelado teórico y la simulación de los procesos astrofísicos²⁷.

En instrumentación infrarroja y óptica, se tienen muchos instrumentos para grandes telescopios (8-10 metros). El instrumento típico es una cámara espectrógrafo a la que en algunos casos se le incrementan las prestaciones con opciones para polarimetría y coronografía. Algunos incorporan un módulo para óptica adaptativa.

En cuanto a la espectroscopia está causando gran expectación la posibilidad de usar las VPH (de sus siglas en inglés: *Volume Phase Holographic grating*), elemento dispersivo que incrementa la eficiencia del instrumento, pero que introduce un elemento móvil más al sistema y cuyo rendimiento aún no está al nivel requerido. Por otro lado, los espectrógrafos de rendija larga exclusivamente están siendo relegados al pasado y ya todos apuestan por el uso del campo integral (IFU, *Integral Field Unit*) basado en fibras ópticas o en espejos (*image slicing*), y/o en técnicas multiobjeto. Además, estas técnicas espectroscópicas y el incremento en dimensiones y peso de los instrumentos diseñados para los grandes telescopios, obligan a prestar gran atención a la estabilidad mecánica. La mayoría de los instrumentos anclados a las estaciones focales de los telescopios sufren flexiones estructurales provocadas por su movimiento durante la observación. La resolución de este problema por métodos convencionales, aumentando la rigidez de la estructura del instrumento, resulta insuficiente para los requerimientos actuales de calidad de tal manera que algunos grupos se han planteado el desafío de compensar las flexiones mediante dispositivos activos. Este reto ofrece grandes ventajas escondidas tras una enorme complejidad técnica.

La tecnología de los detectores ha seguido avanzando. No obstante, los sistemas de adquisición de datos para estos detectores de última generación no son fáciles de conseguir. Varios grupos que ya

tienen una tradición en estos desarrollos han adoptado la estrategia de seguir desarrollando ellos mismos sus sistemas de adquisición, lo que les permite estar en la cresta de la ola en estas tecnologías, pero a un coste alto en medios y persona.

La óptica adaptativa es una técnica que permite, mediante el uso de óptica deformable, corregir gran parte de los defectos introducidos por la atmósfera terrestre en las imágenes observadas con un telescopio. Las publicaciones científicas con los resultados de los primeros sistemas realmente de uso común (Keck, Calar Alto...) están siendo muy numerosas

Entre las nuevas tecnologías que se están usando en óptica adaptativa cabe señalar el sensor de pirámide y los *arrays* de APD (*Avalanche Photo Diodes*), más sensibles que los CCDs trabajando como contadores de fotones. Un método de óptica adaptativa en auge es el llamado *Multiconjugate Adaptive Optics* (MCAO) que consiste en la corrección de la perturbación atmosférica con espejos deformables. Mediante técnicas de tomografía se mide la turbulencia en distintas direcciones utilizando para ello varias referencias dentro del campo de visión (ya sea mediante estrellas naturales o láser). De esta manera se consigue una reconstrucción 3D y utilizando varios espejos deformables se realiza una compensación tridimensional (por capas) de la perturbación. Eliminar las perturbaciones equivale esencialmente a observar desde el espacio.

Las posibilidades que la óptica adaptativa ofrece a la astronomía son espectaculares. Las perturbaciones atmosféricas causan una pérdida en nitidez o resolución espacial. Esta pérdida se traduce, por un lado, en una disminuida capacidad para realizar estudios detallados de la morfología de los objetos. Por otro lado, influye también en la capacidad de detectar objetos débiles, dado que la imagen se dispersa en puntos de luz mayores. Ganar nitidez en las imágenes significa concentrar en un menor número de puntos sensibles del detector los pocos fotones que nos llegan de los objetos débiles o lejanos; por tanto, la probabilidad de verlos es mayor.

La mejora que introduce la óptica adaptativa se puede cuantificar utilizando la relación entre el tamaño del telescopio y el tamaño de la mejor imagen que puede obtener. El poder de detección de un telescopio aumenta con el diámetro de su espejo primario y disminuye con el tamaño de la imagen que forma de un objeto puntual (de aquí la importancia de la calidad de imagen en un telescopio). Por tanto, la diferencia con un mismo espejo de 10 metros, entre conseguir enfocar imágenes de 0.4 segundos de arco (lo posible en una noche de visibilidad excelente) y una imagen de 0.04 segundos de arco, que debe ser posible con un sistema de óptica adaptativa, equivaldría a tener un espejo primario de 100 metros. De ahí que la mayor parte de los observatorios y telescopios importantes, o bien, ya disponen de un sistema propio de óptica adaptativa o bien están trabajando en ello. La desventaja es su complejidad en cuanto a los sensores, los espejos deformables y la enorme capacidad de procesado que se necesita²⁸.

V.3 Los Telescopios

V.3.1 Historia

El hombre solo podía observar y estudiar los astros con sus ojos, que era el único instrumento que contaba, entonces solo veía puntos luminosos estáticos sobre el fondo oscuro que el cielo ofrecía, cinco de ellos que se movían respecto de los otros: los planetas, el brillante sol y la luna cambiante.

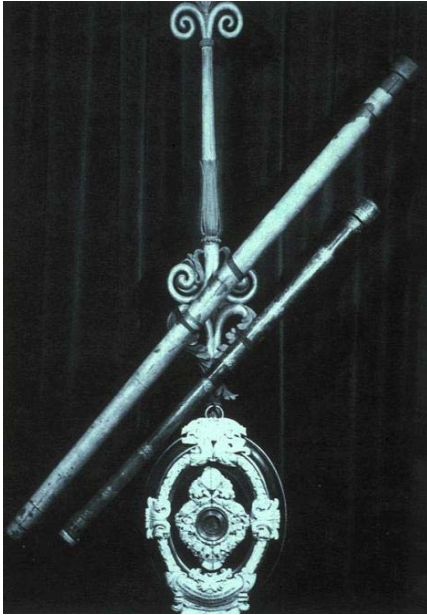


Fig. 5.4 Telescopio de Galileo

La historia le atribuye a Hans Lippershey, un inventor holandés, el descubrimiento del telescopio moderno hacia 1608²⁹, al alinear dos lentes en los extremos de un tubo, y poder observar más de cerca objetos lejanos, volviéndose una atracción en las ferias. Sin embargo, hay ciertas discrepancias sobre si es el inventor o no, pues se dice que robo la idea. Lippershey trató de patentar su invento pero debido a que hubo otros que presentaron diseños mejorados del telescopio, esto no fue posible. A pesar de todo ello y de las discusiones que esto genera, lo único que se puede asegurar es que al final, quien le sacó más provecho al invento fue Galileo Galilei, pues cuando esta curiosidad técnica llegó a sus oídos, mejoró la idea y la vendió a un monje en Venecia, se dice que por esto logró un puesto permanente con un buen sueldo en Pádua. Él siempre aceptó que la idea había sido de un holandés y él solo la mejoró, claro está que el mérito que se le da a Galileo no es el de inventor, sino el del uso que le dio del invento.

V.3.2 Clasificación y tipos

El diseño de los distintos tipos de telescopios existentes depende del tipo de radiación y la región del espectro, o intervalo de longitudes de onda, que se estudie. A pesar de las diferencias todos los telescopios persiguen el objetivo común de estudiar los objetos más débiles dentro de su capacidad. Esto exige invariablemente que se cumplan algunas condiciones como; Un fondo oscuro sobre el cual sea posible distinguir los objetos débiles, un medio transparente que no absorba la radiación que queremos observar, un medio propicio para formar imágenes con la mayor calidad posible³⁰.

Existen básicamente dos tipos de telescopios, refractores y reflectores, de los cuales podemos encontrar distintas configuraciones, según sean dispuestos los lentes y espejos secundarios, sin embargo, su tipo depende de la óptica principal. Si se trata de un lente, es un refractor y un espejo como óptica primaria nos da un reflector.

V.3.2.1 Telescopio Refractor

El telescopio de Galileo se conoce como refractor. Como ya se dijo, consiste básicamente en dos lentes alineados en los extremos de tubo. En el extremo por donde entra la luz se coloca la lente de mayor tamaño, llamado objetivo, los rayos de luz que llegan a su superficie son paralelos. Este lente los refracta y los concentra en un punto (foco). Es en este mismo punto donde se coloca el segundo lente, denominado ocular. Su función es ampliar la imagen y hacer que los rayos de luz salgan paralelos.



Fig. 5.5 Camino óptico de un telescopio refractor

Las principales ventajas, es que al ser un tubo cerrado, no entran ni el polvo, ni la humedad en la trayectoria de la luz, evitando además la circulación del aire en el interior. En adición a esto como la relación focal f/D (cociente entre la distancia focal y el diámetro del objetivo) que guarda es grande, el contraste de la imagen es alto y presenta muy buena resolución. En cuanto a las desventajas que conlleva este tipo de telescopio, tenemos la aberración cromática que puede ser corregida con una lente correctora. Además como la luz atraviesa las lentes no deben tener imperfecciones que afecten la imagen, y el pulido de las lentes debe hacerse por sus dos caras, encareciendo el telescopio.



Fig. 5.6 Telescopio Refractor Gran Ecuatorial Gautier

V.3.2.2 Telescopio Reflector

La óptica del telescopio reflector fue propuesta en 1663 por James Gregory en su libro “*Optica promota*”, sin embargo, su sistema no tuvo éxito por la dificultad de tallar los espejos que se requerían, el primario era parabólico y el secundario elipsoidal. Sir Isaac Newton fue el primero en poder construir un reflector, y consideraba que esta configuración era la única razonable para evitar la aberración cromática de las lentes. Pero fue hasta 1722 que se tuvo un reflector, digno de tal nombre, por su grado de perfección construido por John Hadley³¹, con él se pudo medir el diámetro angular de Venus. El diseño consiste en un espejo cóncavo (esférico o parabólico) en lugar de una lente como objetivo³². Este espejo recibe los rayos de luz en su superficie y los concentra en el plano focal donde se coloca un espejo secundario plano, la función de este es desviar 90° los rayos de luz hacia el ocular. Este espejo secundario obstruye la entrada de luz e introduce modificaciones al patrón de difracción y disminuye el contraste.

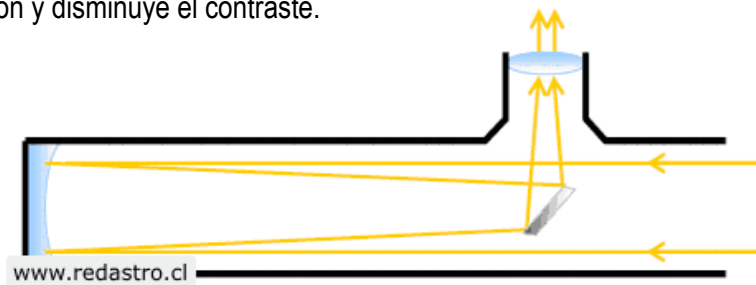


Fig. 5.7 Camino óptico de un telescopio reflector

Otra ventaja que ofrece es la ubicación del ocular en su extremo superior, una comodidad cuando el objeto a observar se encuentra próximo al cenit, además de permitir un montaje más cerca del suelo.

Dada su menor relación focal, F/D , son más luminosos y por lo tanto mejores a la hora de observar objetos difusos tales como cometas, nebulosas, cúmulos globulares y galaxias.

Entre las desventajas que presenta es la aberración esférica inherente de los espejos esféricos, que producen que los rayos centrales de la imagen salgan enfocados, no así los de la periferia. La fabricación del espejo secundario es muy difícil por ser un espejo plano. Dentro de sus ventajas encontramos que son de menor costo comparado contra un refractor con el objetivo del mismo tamaño del espejo primario, debido a que como la luz únicamente debe ser reflejada, solo se necesita tallar y pulir una sola cara. La única condición que se necesita es que sea estable a los cambios de temperatura a los que se vera sometido.



Fig. 5.8 Telescopio Reflector Cassegrain

V.3.2.3 Otros Tipos

Los radiotelescopios revolucionaron el campo de la investigación astronómica desde su aparición en los años treinta. Se trata básicamente de radioreceptores de altísima sensibilidad operando en frecuencias (o longitudes de onda) en las que la atmósfera terrestre es transparente. Los radiotelescopios estudian dos tipos de emisión: la emisión continua y líneas de emisión. La emisión continua de radio abarca un amplio intervalo espectral. Se estudia al observar un gran número de frecuencias con el mayor ancho de frecuencia posible. Las líneas de emisión se estudian en un intervalo de frecuencias muy angosto, frecuentemente de unos cuantos kilohertz. Así por ejemplo, la emisión de radio de 1420 [MHz] por el hidrógeno neutro es de fundamental importancia para la astronomía.

Las radioimágenes de mayor definición o resolución se obtienen mediante el uso de interferómetros, arreglos de radio antenas separadas por distancias de hasta miles de kilómetros. La calidad de la imagen depende de la suma de las habilidades individuales de cada antena. Actualmente en México solo existen radiotelescopios de tamaño pequeño. Sin embargo, el proyecto científico mas grande del país, El Gran Telescopio Milimétrico (denominado milimétrico al ser diseñado para tener óptima recepción de ondas de longitud de onda de alrededor de un milímetro). (GTM) consiste en la construcción de una antena de microondas de 50 metros de diámetro. Este será el primer observatorio del país dedicado a la astronomía milimétrica y el mayor de su tipo en el mundo.

Además de los telescopios ya mencionados existen otros tipos de observatorios que se desarrollan en distintas partes del mundo, como son los telescopios solares, los telescopios Cerenkov. En México existen algunos cuantos telescopios solares de pequeño tamaño, como por ejemplo el del INAOE en Tonantzintla y el de la Universidad de Sonora, en Hermosillo. Los telescopios Cerenkov estudian radiación gamma de muy alta energía (fotones de más de un millón de millones de electrón-voltios) a través de la interacción de ésta con la atmósfera terrestre. Esta interacción se traduce en un brevísimo flash de radiación visible y ultravioleta que abarca aproximadamente un grado cuadrado en el cielo. Estos instrumentos son de interés ya que representan la única forma de estudiar astrofísica de altas energías sin recurrir a costosos experimentos espaciales. En México no existen telescopios de este tipo pero existen perspectivas al respecto.

V.3.2.4 Telescopios de Nueva Generación

Hace unos años se denominaba Telescopios de Nueva Generación (Next Generation Telescopes, NGT) a los telescopios reflectores cuyos espejos primarios serían de más de seis metros de diámetro, que era el tamaño del espejo más grande que existía hasta entonces. El primer telescopio de esta generación fue el Keck I, de diez metros de diámetro, ubicado en Mauna Kea, Hawai, que empezó a funcionar a finales de 1990.

El término "Telescopios de Nueva Tecnología" se usa indistintamente con el término "Telescopios de Nueva Generación" para enfatizar los desarrollos ingenieriles que los distinguen de instrumentos más viejos³³. Sin embargo, muchos telescopios más pequeños en desarrollo, o en operación también son considerados telescopios de nueva tecnología. De hecho, algunas de las nuevas tecnologías que son cruciales para los NGT's como es el control activo térmico y la óptica adaptiva han sido adaptadas a telescopios existentes para mejorar su funcionamiento.

Existen al menos ocho proyectos de telescopios de esta generación que o bien ya están funcionando o se encuentran en la etapa de diseño y construcción. El telescopio Keck I y el primer telescopio del proyecto VLT³⁴, que consiste de cuatro telescopios, cada uno de ocho metros de diámetro, están funcionando, con tecnologías muy diferentes. En el primer caso se trata de un espejo primario formado por segmentos hexagonales. En el segundo caso se trata de un espejo monolítico muy delgado. En ambos casos se ha demostrado que efectivamente sí era posible construir telescopios de diámetro mayor a seis metros. Mas aun, aunque ahora parezca algo increíble, diversos grupos ya están estudiando la posibilidad de construir telescopios de 25, 50 o incluso de 100 metros de diámetro, a tales telescopios se les llama "Telescopios Extremadamente Grandes" y ahora es a estos proyectos a los que se les podría llamar "Telescopios de Nueva Generación".

VI MARCO TEÓRICO

VI.1 Esfuerzos y Deformaciones Mecánicas

VI.1.1 Esfuerzos

El esfuerzo lo podemos definir como el la intensidad de fuerza por unidad de área. Existen dos direcciones de aplicación para las fuerzas, la normal al área en la que se aplican y la paralela al área en que se aplican. Si la fuerza aplicada no es normal ni paralela a la superficie, siempre puede descomponerse en la suma vectorial de otras dos que siempre resultan ser una normal y la otra paralela³⁵.

Los esfuerzos con dirección normal a la sección, se denotan como σ (sigma) y representa un esfuerzo de tracción cuando apunta hacia afuera de la sección, tratando de estirar al elemento analizado. En cambio, representa un esfuerzo de compresión cuando apunta hacia la sección, tratando de aplastar al elemento analizado.

El esfuerzo con dirección paralela al área en la que se aplica se denota como τ (tau) y representa un esfuerzo de corte. Este esfuerzo, trata de cortar el elemento analizado, tal como una tijera cuando corta papel, uno de sus filos mueven el papel hacia un lado mientras el otro filo lo mueve en dirección contraria resultando en el desgarramiento del papel a lo largo de una línea.

Un cuerpo sometido a carga y que se encuentre en equilibrio dinámico o estático tiene fuerzas internas tales que equilibran a todas las fuerzas externas. Para el análisis, imaginemos un trozo pequeño de ese cuerpo, un elemento diferencial cúbico con aristas infinitesimales de tamaño: dx , dy , dz . Para cada un de las 6 caras que conforman el cubo, se considerará que actúan tres esfuerzos internos: uno normal y dos de corte. La notación utilizada es: σ_x para el esfuerzo normal aplicado en la cara normal al eje x , de igual forma se definen σ_y , σ_z . Para los esfuerzos cortantes, la notación es τ_{ab} donde el primer subíndice indica la cara normal al eje y y el segundo la dirección del eje. De esta forma se tienen: τ_{xy} τ_{xz} τ_{yx} τ_{yz} τ_{zx} τ_{zy} .

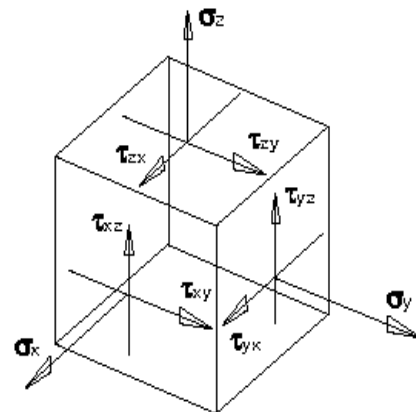


Fig. 6.1 Esfuerzos en un elemento diferencial

Al conjunto de estos esfuerzos se les representa mediante un tensor de segundo rango, por lo que bastarán nueve componentes para definirlo.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \dots\dots(6.1)$$

El tensor mostrado define el estado de esfuerzos en un punto del cuerpo. Sin embargo, al analizar el equilibrio de este elemento infinitesimal se encuentra que algunos esfuerzos cortantes deben ser iguales para que el volumen no gire ni se desplace debido a los momentos. Lo que hace al tensor simétrico, es decir $\tau_{xy} = \tau_{yx}$. Esto es muy importante porque indica que en planos perpendiculares entre si de un elemento diferencial, los esfuerzos cortantes son numéricamente iguales.

En ocasiones un sistema ordinario de ejes puede no proporcionar la información más significativa acerca del estado de esfuerzos en un punto, por lo que se requiere de una transformación de esfuerzos, es decir, analizarlos desde otro plano. En general, siempre se puede para un sistema particular de coordenadas, diagonalizar el tensor de esfuerzos, de manera que los esfuerzos cortantes quedan ausentes. Quedando el estado de esfuerzos completamente definido por las tres componentes normales, dichas componentes se conocen como los esfuerzos principales.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \dots\dots(6.2)$$

En nuestro caso esta descripción del estado de esfuerzos es importante dado que las leyes ópticas relacionan el estado de esfuerzos de un material birrefringente en cada punto, con el índice de refracción, mediante la expresión:

$$\begin{aligned} n_1 - n_2 &= C(\sigma_1 - \sigma_2) \\ n_1 - n_3 &= C(\sigma_1 - \sigma_3) \dots\dots(6.3) \\ n_2 - n_3 &= C(\sigma_2 - \sigma_3) \end{aligned}$$

Donde n_1 , n_2 y n_3 son los índices principales de refracción, C es el coeficiente óptico de esfuerzos y σ_1 , σ_2 y σ_3 como ya vimos los esfuerzos principales en cada punto.

VI.1.2 Deformaciones

Cuando un cuerpo sólido es sometido a una carga externa o a un cambio de temperatura, éste se deforma. Por ejemplo el caso de una probeta que es sometida a un ensayo de tensión mediante una fuerza creciente P, Figura 6.3, ocurrirá un cambio de longitud entre dos puntos, digamos A y B, marcados con anterioridad en la probeta. Dado que con la misma carga y una distancia mayor se observara una deformación total mayor, es necesario considerar el alargamiento por unidad de longitud de la distancia de medición. Si l_i es la longitud de medición original y l es la longitud que se

observa después de la carga, el alargamiento total será $\Delta l = l_f - l_i$. El alargamiento por unidad de longitud es:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_i} = \frac{l_f - l_i}{l_i} \dots\dots(6.4)$$

Este alargamiento por unidad de longitud se denomina deformación lineal. Es una cantidad adimensional pero se acostumbra considerar las dimensiones [mm/mm].

Debido a que en un cuerpo pueden existir deformaciones en otras dos direcciones, se ocupan los subíndices x, y y z, para indicar la dirección. Estas direcciones son perpendiculares entre si. Además en general un cuerpo se puede deformar respecto a un plano, digamos XY, lo que causa un cambio en los ángulos rectos iniciales entre las líneas de un cuerpo y este cambio de ángulo se define como deformación angular o por cortante γ

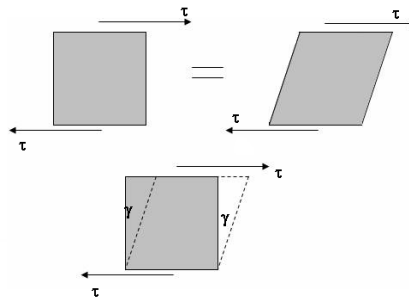


Fig. 6.2 Deformación angular

Las deformaciones lineales y angulares forman parte del tensor de deformación que guarda cierta analogía con el de esfuerzos, pero es necesario modificar las relaciones para las deformaciones a fin de tener un tensor, entidad matemática que debe obedecer a ciertas reglas de transformación³⁶. Por ello la definición de la deformación angular como cambio de ángulo no es aceptable en el tensor. La definición necesaria parte de que la deformación angular γ_{xy} se mide a partir de la dirección vertical pero también de la horizontal, por lo que, la deformación total se obtiene girando $\gamma_{xy}/2$ el elemento original como cuerpo rígido. Quedando pues como definición de las deformaciones cortantes:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} &= \frac{\gamma_{xy}}{2} = \frac{\gamma_{yx}}{2} \\ \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} &= \frac{\gamma_{yz}}{2} = \frac{\gamma_{zy}}{2} \dots\dots(6.5) \\ \varepsilon_{zx} = \varepsilon_{xz} &= \frac{\gamma_{zx}}{2} = \frac{\gamma_{xz}}{2} \end{aligned}$$

Y el tensor de deformación siguiendo analógicamente al de esfuerzos queda expresado como:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \dots\dots(6.6)$$

El tensor es simétrico, y también se puede diagonalizar, quedando solamente ε_1 , ε_2 y ε_3 y el tensor como:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix} \dots\dots(6.7)$$

VI.1.3 Ensayo de tracción

En un ensayo de tracción pueden determinarse diversas características de los materiales elásticos. El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada realizada con dicho material a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta.

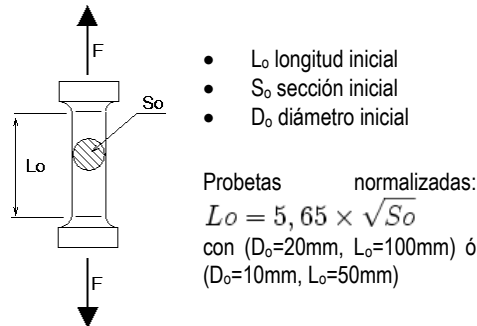


Fig. 6.3 Probeta normalizada para ensayo de tracción

En el ensayo se mide la deformación (alargamiento) de la probeta entre dos puntos fijos de la misma a medida que se incrementa la carga aplicada, y se representa gráficamente en función de la tensión (carga aplicada dividida por la sección de la probeta). En general, la curva tensión-deformación así obtenida presenta cuatro zonas diferenciadas³⁷:

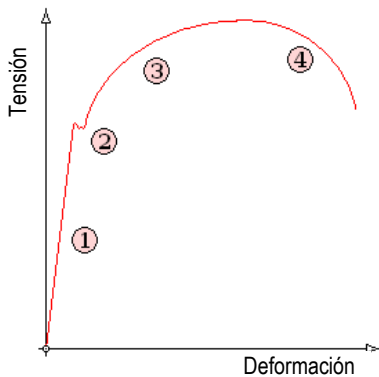


Fig. 6.4 Curva tensión-deformación

1) Deformaciones elásticas: en esta zona las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta, son de pequeña magnitud y, si se retirara la carga aplicada, la probeta recuperaría su forma inicial. El coeficiente de proporcionalidad entre la tensión y la deformación se denomina módulo de elasticidad o de Young y es característico del material, es aquí donde trabaja la Ley de Hooke. La tensión más elevada que se alcanza en esta región se denomina límite de fluencia y es el que marca la aparición de este fenómeno. Pueden existir dos zonas de deformación elástica, la primera recta y la segunda curva, siendo el límite de proporcionalidad el valor de la tensión que marca la transición entre ambas. Generalmente, este último

valor carece de interés práctico y se define entonces un límite elástico (convencional o práctico) como aquél para el que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.). Se obtiene trazando una recta paralela al tramo proporcional (recto) con una deformación inicial igual a la convencional.

2) Fluencia o cedencia: Es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean

las dislocaciones de la red cristalina impidiendo su deslizamiento, mecanismo mediante el cual el material se deforma plásticamente. Alcanzado el límite de fluencia se logra liberar las dislocaciones produciéndose la deformación bruscamente. La deformación en este caso también se distribuye uniformemente a lo largo de la probeta pero concentrándose en las zonas en las que se ha logrado liberar las dislocaciones (bandas de Luders). No todos los materiales presentan este fenómeno, en cuyo caso la transición entre la deformación elástica y plástica del material no se aprecia de forma clara.

3) Deformaciones plásticas: si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera sólo parcialmente su forma quedando deformada permanentemente. Las deformaciones en esta región son más acusadas que en la zona elástica.

4) Estricción: Llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta apreciándose una acusada reducción de la sección de la probeta, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose hasta la rotura de la probeta por esa zona. La estricción es la responsable del descenso de la curva tensión-deformación; realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura, sucede que lo que se representa es el cociente de la fuerza aplicada (creciente) entre la sección inicial y cuando se produce la estricción la sección disminuye, efecto que no se tiene en cuenta en la representación gráfica. Los materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas, rompiéndose la probeta de forma brusca. Terminado el ensayo se determina la carga de rotura, carga última o resistencia a la tracción: la máxima resistida por la probeta dividida por su sección inicial, el alargamiento en (%) y la estricción en la zona de la rotura.

VI.1.4 Ley de Hooke

Como se señaló existen 6 componentes del tensor de esfuerzos, y 6 para el tensor de deformaciones. La relación más simple entre ellas es una relación lineal, por ejemplo, $\sigma = C\varepsilon$ o, recíprocamente $\varepsilon = A\sigma$, donde C y A son constantes elásticas y A es la inversa de C. Esta relación lineal se conoce por la *Ley de Hooke*, puesto que hay varias componentes de esfuerzos y deformación al formular la *Ley General de Hooke*, se emplea el principio de superposición, que expresa que el esfuerzo y la deformación resultante en un sistema sometido a varias fuerzas es la suma algebraica de sus efectos al aplicarse individualmente.

Considerando un esfuerzo uniaxial, cuando solo el esfuerzo normal es diferente de 0, la ecuación matricial, se reduce a la siguiente expresión, donde E es una constante de proporcionalidad, que relaciona el esfuerzo normal con su deformación lineal y se llama *módulo de Young*, como ε es adimensional E conserva las unidades del esfuerzos, PA en el SI. Matemáticamente E es la pendiente de una recta en una gráfica esfuerzo-deformación.

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \dots\dots(6.8)$$

Para la ley de Hooke generalizada existen tres constantes de proporcionalidad, tres constantes elásticas, E (módulo e Young), G (módulo de rigidez) y ν (módulo de Poisson). Sin embargo, cuando se trabaja con un material isotrópico, existe una relación entre las tres constantes, de manera que para estos materiales solo existen dos constantes.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots(6.9)$$

Es importante mencionar que el módulo de rigidez G establece una relación entre los esfuerzos cortantes y deformaciones angulares, mientras que el módulo de Poisson ν es la razón de la deformación lateral entre la deformación axial, es decir, cuando se somete un cuerpo a tensión, este se estira adelgazando su sección trasversal y viceversa cuando se comprime, su sección transversal aumenta.

$$\nu = \frac{\epsilon_{lateral}}{\epsilon_{axial}} \dots\dots(6.10)$$

VI.2 Esfuerzos y Deformaciones Térmicas

La deformación en los materiales puede ser producida también por un cambio de temperatura. En el caso de materiales isotrópicos homogéneos, un cambio de temperatura de ΔT grados origina una deformación lineal uniforme en todas direcciones.

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_f} = \alpha \Delta T \dots\dots(6.11)$$

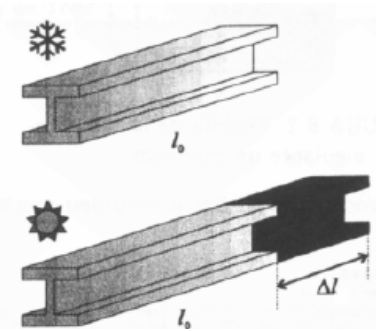


Fig. 6.5 Deformación térmica

Expresadas por una sola ecuación, las deformaciones térmicas son:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z = \alpha \delta T \dots\dots(6.11b)$$

donde α es el coeficiente de dilatación térmica lineal para un material particular, el cual se determina experimentalmente. En un intervalo moderado de cambio

de temperatura α permanece razonablemente constante. Por lo general se expresa en las unidades $[1/^\circ\text{C}]^{38}$.

En el caso de materiales isotrópicos, un cambio de temperatura no causa deformaciones angulares, es decir $\gamma_{xy} = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$. Cuando se trata de deformaciones pequeñas, la deformación térmica lineal se suma directamente a las deformaciones debidas al esfuerzo. Con base en ello una modificación de la ley de Hooke generalizada queda como:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x - \frac{\nu}{E} \sigma_y - \frac{\nu}{E} \sigma_z + \alpha \delta T \dots\dots(6.12)$$

Donde un incremento de T se considera positivo. Por lo que en esfuerzo uniaxial:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x + \alpha \delta T \dots\dots(6.12b)$$

VI.3 Birrefringencia

La birrefringencia o doble refracción es una propiedad de ciertos cuerpos, especialmente el espato de Islandia, de desdoblarse un rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí como si el material tuviera dos índices de refracción distintos³⁹.

La primera de las dos direcciones sigue las leyes normales de la refracción y se llama *rayo ordinario*; la otra tiene una velocidad y un índice de refracción variables y se llama *rayo extraordinario*. Ambas ondas están polarizadas perpendicularmente entre sí. Este fenómeno sólo puede ocurrir si la estructura del material es anisotrópica. Si el material tiene un solo eje de anisotropía, (es decir es *uniaxial*), la birrefringencia puede formalizarse asignando dos índices de refracción diferentes al material para las distintas polarizaciones.

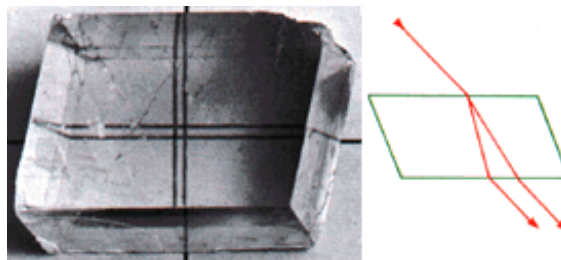


Fig. 6.6 Efecto de la birrefringencia en calcita, el efecto es notable en las dos líneas aparentes que ve el observador

La birrefringencia está cuantificada por la relación:

$$\Delta n = n_e - n_o \dots\dots(6.13)$$

donde n_o y n_e son los índices de refracción para las polarizaciones perpendicular (*rayo ordinario*) y paralela al eje de anisotropía (*rayo extraordinario*), respectivamente.

Hasta el tiempo de Isaac Newton (1642-1727), la mayoría de los científicos pensaba que la luz consistía en corrientes de partículas emitidas por las fuentes luminosas. Galileo y otros intentaron medir la velocidad de la luz. Hacia 1665 se empezó a descubrir pruebas de la naturaleza ondulatoria de la luz. En 1870 James Clerk Maxwell predijo la existencia de las ondas electromagnéticas y calculó su velocidad de propagación; así, junto con el trabajo experimental de Heinrich Hertz, iniciado en 1887, demostró de manera concluyente que la luz es en efecto una onda electromagnética. Sin embargo, la naturaleza ondulatoria de la luz no es todo. Varios efectos asociados con la emisión y la absorción de luz revelan que ésta tiene un aspecto corpuscular, según el cual la energía transportada por las ondas luminosas está empaquetada en paquetes discretos conocidos como fotones o cuantos.

La fotoelasticidad es una técnica experimental para la medición de esfuerzos y deformaciones. Se basa en el uso de luz para dibujar figuras sobre piezas que están siendo sometidas a esfuerzos. Fue desarrollada a finales del siglo XX. El primer trabajo fue de E. Coker y de L. Filon en la universidad de Londres, y permitió a la fotoelasticidad convertirse rápidamente en una técnica viable para el análisis cualitativo de los esfuerzos. Se le encontró una gran aplicación en la industria, en dos

dimensiones rebasó al resto de las técnicas en confiabilidad, alcance y factibilidad. Ningún otro método tenía la misma precisión visual y cobertura de los patrones de esfuerzo. Las figuras que se dibujan son semejantes a las mostradas al realizar un análisis de elementos finitos ya que se pueden observar contornos y colores. La medición se logra al evaluar el cambio del índice de refracción de la pieza al someterse a una carga (piezas transparentes) como se vio en el punto VI.1.1 de este capítulo. En el caso de una pieza no transparente, se cubre la pieza con una resina birrefringente.



Fig. 6.7 Fotoelasticidad

El desarrollo de polariscopios digitales usando los LED y los diodos laser permitió la supervisión continua de las estructuras y la fotoelasticidad dinámica. Los progresos en el proceso de imagen permiten que la información de los esfuerzos sea extraída automáticamente de su patrón. El desarrollo de la esterolitografía, que utiliza un método llamado prototipos rápidos permite la generación de modelos tridimensionales exactos de un polímero líquido, lo cual permitió sustituir el método de vaciado tradicional. El advenimiento del procesamiento por computadora con su superior potencia de cálculo ha revolucionado el análisis de esfuerzos, haciendo que se extienda el uso de métodos numéricos. En particular, el modelado por el análisis de elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés: Finite Element Analysis) se ha convertido en la herramienta dominante, eclipsando muchas técnicas tradicionales para el análisis de los esfuerzos. A pesar del avance del FEA, la fotoelasticidad es uno de los más viejos métodos para el análisis experimental de los esfuerzos, se ha restablecido con progresos recientes y nuevos usos.

VI.4 Análisis por Elementos Finitos

VI.4.1 Método Numérico

El método de elementos finitos, es un método numérico para la solución de problemas de ingeniería hoy comúnmente empleado para los que involucran un alto grado de complejidad dada por las geometrías complejas, cargas no distribuidas y determinación de propiedades de materiales, por lo que generalmente no es posible obtener alguna solución analítica directamente de expresiones matemáticas. Entendiendo por solución analítica a aquellas expresiones matemáticas que arrojan valores para alguna determinada incógnita, la cual es válida a lo largo del cuerpo estudiado y por lo tanto, en cualquier sección del cuerpo en un número infinito de locaciones dentro del cuerpo. Estas soluciones analíticas, generalmente requieren la solución de ecuaciones diferenciales, parciales u ordinarias, las cuales, debido a las condiciones físicas y geométricas no se pueden resolver.

El método de elementos finitos, propone al problema como una serie de ecuaciones algebraicas simultáneas, en lugar de la ecuación diferencial compleja, de modo que el problema tiene que ser discretizado. La discretización consiste en dividir el cuerpo, en un número finito de elementos, para posteriormente resolver un sistema de funciones continuas⁴⁰, interconectados por medio de puntos

comunes llamados nodos, los cuales forman superficies que se comportan como volúmenes de control independientes. El conjunto de nodos configura una *malla o rejilla* de solución para el problema.

De manera que el conocimiento de lo que sucede en el interior del cuerpo, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos, por lo que depende directamente del número de elementos usados para la discretización.

VI.4.2 Breve Historia

En su forma conceptual este método lleva ya varios años, tomando en cuenta las bases del cálculo diferencial e integral propuestas por Sir Isaac Newton, pero fue hasta 1940 que se aplicó específicamente en el campo de la ingeniería estructural con los trabajos de Hrennikoff y McHenry, quienes calcularon los esfuerzos en sólidos con sección transversal continua con líneas de una dimensión para representar elementos como barras o vigas

En 1956 Turner logró la implementación de matrices de rigidez para la determinación de armaduras, elementos conformados por vigas y algún otro cuerpo bidimensional conformado por triángulos y rectángulos sometidos a esfuerzo simple. Este procedimiento fue denominado "Método directo de rigidez" y fue gracias a los avances en computación a finales de esa década que se desarrollaron ecuaciones de rigidez fundadas en el método de elemento finito para la solución matricial de estructuras.

El nombre de "Elementos Finitos" fue introducido en 1960 por Clough, que usó por primera vez elementos triangulares y rectangulares para el análisis de esfuerzos. Al año siguiente Martin extendió los alcances y aplicaciones del método de elementos finitos a problemas tridimensionales con el desarrollo de matrices de rigidez tetraédricas. Hasta ese momento los trabajos desarrollados únicamente se contemplaban deformaciones elásticas, desplazamientos cortos y concentraciones de esfuerzos bajos, con modelos bajo cargas elásticas y materiales elásticos. Galagher introdujo las deflexiones de gran magnitud, análisis térmico y materiales no lineales. A partir de los años 80 con la rápida evolución de la computación, el método había sobrepasado su objetivo inicial, abarcando una infinidad de aplicaciones y ramas de estudio.

VI.4.3 Descripción del método

El método se puede separar en tres pasos generales, en los que se prepara el modelo, se procesa y se obtienen los resultados, estos pasos se denominan preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento.

VI.4.3.1 Preprocesamiento

En el preprocesamiento se preparan los datos, como es el modelado de la geometría, el sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos., la elección del tipo de elemento, las condiciones de frontera, información de tipo de cargas y material.

Como se dijo anteriormente en el método del elemento finito, el cuerpo en estudio es representado como un ensamble de subdivisiones “elementos”. Dichos elementos se consideran interconectados en puntos específicos (nodos).

Es importante para la discretización elegir el tipo de elemento que mejor describe el comportamiento físico del cuerpo, esta elección es muy importante ya que, cada nodo experimenta un desplazamiento el cual es descrito por las funciones de forma. La selección de una interpolación apropiada normalmente se define al seleccionar el tipo de elemento, los elementos más comunes en un análisis tridimensional de esfuerzos o desplazamientos son los tetraedros o hexaedros.

Escoger el tamaño de la malla, recordemos que el número total de elementos y su variación en tamaño y tipo influyen en la aproximación del resultado. Los elementos deben ser pequeños para lograr resultados aceptables, pero suficientemente grandes para reducir los cálculos computacionales. Normalmente se requieren elementos pequeños en donde los resultados cambian rápidamente, como pueden ser cambios abruptos de geometría, por otro lado, en donde los resultados son relativamente constantes, los elementos grandes son suficientes.

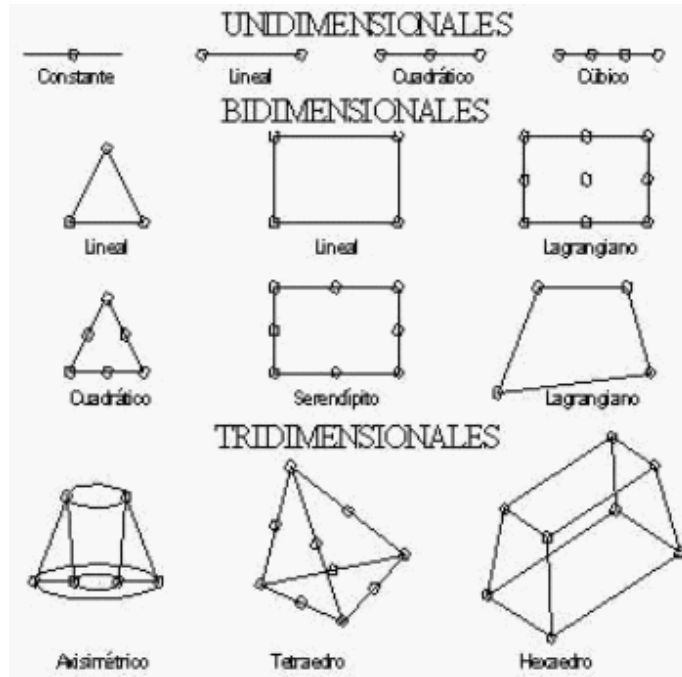


Fig. 6.9 Ejemplos de diferentes tipos de elementos finitos

Existen varias técnicas de mallado:

- **Mallado Directo:** Se crean Nodos y Elementos directamente por el usuario, sin apoyarse en entidades geométricas, tal como se hacía en los primeros tiempos del MEF. Es muy útil para modelos con pocos elementos.
- **Mallado Paramétrico 1D/2D/3D:** Se aplica sólo a entidades paramétricas (puntos, curvas, superficies y volúmenes). Aquí el usuario debe especificar exactamente el número de elementos en cada borde de la superficie, o a lo largo de una curva, etc. y ser cuidadoso para conseguir mallas compatibles.
- **Mallado Automático 1D/2D:** Se aplica a todo tipo de entidades geométricas, tanto paramétricas o no. Aquí el usuario simplemente especifica el número o tamaño medio del elemento, y el algoritmo de mallado se encarga de generar la malla de forma automática. A diferencia del mallado paramétrico, en el automático el usuario nunca sabe de antemano el número total de nodos y elementos resultantes, pero goza de gran flexibilidad y garantía de crear mallas compatibles. En el mallado automático una curva se puede mallar con elementos línea de 2-3 nodos, las superficies, regiones y poliedros con triángulos de 3-6

nodos y cuadriláteros de 4-8-9 nodos. Además una malla con triángulos se puede convertir automáticamente a cuadriláteros.

- **Mallado Automático 3D:** Se aplica sólo a entidades geométricas sólidas llamadas PART. El modelo sólido así creado puede mallarse automáticamente con tetraedros de 4-10 nodos para análisis estructural, térmico, fluidos o de electromagnetismo.
- **Mallado Adaptativo:** La reducción del error de discretización en el Método de los Elementos Finitos se consigue mediante el refinado de la malla o la utilización de elementos de orden superior.

VI.4.3.2 Procesamiento

La etapa de procesamiento implica la generación y solución de las ecuaciones de que resultan de las variables nodales. Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos. La solución del sistema complejo sigue las reglas de los problemas discretos

Dado que la variación actual de la variable de campo (como son desplazamientos, esfuerzos, temperaturas), dentro del continuo no es conocida, se asume que la variación de dicha variable dentro de un elemento finito puede ser aproximada por una simple función. Las funciones de aproximación (también llamadas modelos de interpolación o funciones de forma) son definidas en término de los valores de las variables de campo en los nodos.

Estas funciones deben dar valores suficientemente aproximados de los desplazamientos de cualquier punto del elemento, en función de los desplazamientos de los nodos, además deben de cumplir algunas propiedades, que son: Derivabilidad, integrabilidad, condición de polinomio completo.

Existen dos métodos en general de aproximación asociados a las variables nodales. Una aproximación llamada método de fuerza o flexibilidad, el cual usa las fuerzas internas como variables desconocidas, para obtener las ecuaciones gobernantes, entonces se utilizan las ecuaciones de equilibrio. Las ecuaciones adicionales que se necesitan, son encontradas introduciendo ecuaciones de compatibilidad. El resultado es un conjunto de ecuaciones algebraicas que permiten determinar las fuerzas desconocidas. El segundo método de aproximación es conocido como de desplazamientos o “de rigidez”, este asume que los desplazamientos de los nodos son la variable desconocida del problema. Se ha demostrado que para propósitos computacionales, el método de los desplazamientos (o de rigidez) es más favorable debido a que su formulación desde el punto de vista de programación es simple.

VI.4.3.3 Posprocesamiento

La etapa de posprocesamiento trata de la presentación de los resultados. En general, en esta etapa se calculan y muestran la configuración de deformaciones y la distribución de esfuerzos. Un análisis completo por este medio concluye en este paso.

VI.4.4 Relaciones necesarias

El cálculo de la solución debe ser simple desde el punto de vista computacional y satisfacer ciertas condiciones de convergencia. En general, el modelo de interpolación o función de forma, puede tener una forma polinomial o bien una serie trigonométrica.

Las relaciones deformación-desplazamiento y esfuerzo-deformación son necesarias para poder derivar las ecuaciones para cada elemento finito. En el caso de una deformación unidimensional, en la dirección x , se tiene una deformación ε_x , referida al desplazamiento u , por medio de:

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} \dots\dots(6.14)$$

para pequeñas deformaciones. Además, los esfuerzos deben de estar relacionados con las deformaciones a través de la ley de Hooke, recordemos:

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \dots\dots(6.8)$$

en donde σ_x es el esfuerzo normal en la dirección x y E es el módulo de elasticidad.

Del modelo asumido de desplazamiento, la matriz de rigidez y el vector de carga, son derivados usando las condiciones de equilibrio. Por alguno de los tres métodos más utilizados:

1. Método de equilibrio directo
2. Método de trabajo y energía
3. Métodos de los residuos ponderados (Galerkin, el más utilizado)

Este paso permite describir el comportamiento de cada elemento. Las ecuaciones obtenidas son escritas en forma matricial:

$$\{f\} = [k]\{d\} \dots\dots (6.15)$$

en donde $\{f\}$ es el vector de las fuerzas nodales, $[k]$, es la matriz de rigidez del elemento, y $\{d\}$ es el vector de los grados de libertad.

Posteriormente, se ensamblan los elementos para la obtención de la matriz de rigidez global y para la introducción de las ecuaciones de frontera. Como la estructura está compuesta de una gran cantidad de elementos finitos, las matrices de rigidez individuales de cada elemento y el vector de carga son ensamblados de una manera conveniente y las ecuaciones generales de equilibrio se formulan como:

$$\{F\} = [K]\{d\} \dots\dots (6.16)$$

en donde $\{F\}$ es el vector global de fuerzas nodales, $[K]$ es la matriz de rigidez global o de ensamble, $\{d\}$ es el vector de los grados de libertad de los nodos conocidos y desconocidos.

La matriz de rigidez K es una matriz singular porque su determinante es cero, para remover la singularidad del problema, se deben imponer las condiciones de frontera. La solución de los grados

de libertad desconocidos (o desplazamientos generalizados) es a partir de encontrar la inversa de la matriz de rigidez.

La ecuación 6.16, es un arreglo de ecuaciones algebraicas simultáneas que en forma expandida puede escribirse de la siguiente forma:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K & K_{3n} \\ \downarrow & & & & \downarrow \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & K & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \dots\dots (6.17)$$

en donde n es el número de grados de libertad (desplazamientos) desconocidos de la estructura. Con la obtención de los grados de libertad se calculan las deformaciones y los esfuerzos utilizando las ecuaciones constitutivas (6.14) y (6.8).

VI.4.5 Errores

Son diversas las fuentes de error en el análisis de problemas empleando Elemento Finito. Entre ellos podemos encontrar:

Errores de modelado: En la modelización de cargas exteriores, condiciones de contorno, propiedades de materiales.

Errores en la discretización: Errores en la aproximación de la geometría; por falta de capacidad de las funciones de forma geométricas de representar con exactitud la geometría real. Este problema se resuelve aumentando el mallado o refinando las zonas conflictivas. Errores relacionados con el tamaño del elemento y la función de forma de los corrimientos de los nodos. Como norma general se emplean elementos pequeños en las zonas de variación rápida de la solución, y elementos grandes en las zonas de variación lenta

Errores de computación: Error en la integración sobre los elementos; dado que hay que tomar un grado de polinomio de Legendre¹, hay que aceptar un cierto grado de error (asociado al grado del polinomio). Error en la resolución del sistema de ecuaciones; Por errores de truncamiento en la representación interna del ordenador de los números reales, y por errores de redondeo.

Existen 3 formas de reducir el error

- Método H: Consiste en la reducción del error actuando directamente sobre el tamaño del elemento y manteniendo constante la función de forma. Presenta dos inconvenientes, es el

¹ Las Ecuaciones Diferenciales de Legendre son ordinarias y se les encuentra frecuentemente en Física y en otros campos técnicos. En particular, aparecen cuando se resuelven Ecuaciones de Laplace (y relacionados a las Ecuaciones Diferenciales Parciales) en coordenadas esféricas. Las soluciones forman una secuencia polinomial de polinomios ortogonales llamados Polinomios de Legendre.

método más lento, desde el punto de vista de velocidad de convergencia; y se pierde el control sobre el mallado, pudiendo generarse mallas distorsionadas.

- Método P: Consiste en ir aumentando progresivamente el grado de los polinomios de interpolación (funciones de forma), manteniendo fijo el tamaño de los elementos. Tiene mayor velocidad de convergencia que el método H, pero presenta el problema de que requiere acotar el grado máximo del polinomio. Un grado muy alto podría provocar rizado en las soluciones.
- Método HP: Consiste en el uso secuencial de ambas técnicas. En primer lugar se optimiza el mallado a la geometría, y posteriormente se modifica el grado del polinomio hasta alcanzar el error deseado.

VI.5 Análisis Dimensional PI

En física las magnitudes tienen dimensiones, por ejemplo $[v]=LT^{-1}$, así las ecuaciones deben ser homogéneas dimensionalmente. Esta idea es la base para el análisis dimensional.

El concepto de dimensión fue establecido por Fourier, que dijo: *“Es necesario hacer notar que cada magnitud indeterminada o constante, tiene una dimensión que le es propia, y que los términos de una no podrían ser comparados sino tuviesen el mismo exponente de dimensiones”*

VI.5.1 Conceptos básicos

Es necesario establecer unos conceptos básicos para entender el análisis dimensional. La física solo se interesa por los observables comparables, se denomina observable a los entes que se pueden caracterizar por algún efecto observable, por ejemplo; el color, longitud, miedo, tiempo. Si se puede establecer una relación entre ellos del tipo $(A)/(B)=n$, donde n es un número cualquiera, por ejemplo la longitud de una poste se puede comparar con la de una persona y se puede decir que una es n veces la otra. Sin embargo, la hermosura o el miedo no son observables comparables.

Se entiende como magnitud el conjunto de todos los observables que son comparables entre sí. Estas son entes abstractos a las que se llega a partir de entes concretos. Existen dos tipos de magnitudes:

- 1) ***Magnitudes primarias***: Son de las que el hombre tiene un conocimiento intuitivo de ellas y por lo tanto no se definen sin la necesidad de una fórmula que las compare con otras magnitudes; longitud, tiempo, masa, etc.
- 2) ***Magnitudes secundarias***: Se definen a través de fórmulas que las ligan a otras magnitudes; densidad, aceleración, etc.

Una cantidad es cada uno de los elementos del conjunto que definen a la magnitud; la altura de un poste, la distancia de un lugar a otro, son cantidades de la magnitud longitud. La unidad de una magnitud es una cantidad $[A_0] = U_A$ definida arbitrariamente de manera que al formar razones respecto de esta cantidad queda:

$$\frac{[A_i]}{[U_A]} = A_i$$

VI.5.2 Las constantes

El hombre siempre ha tenido cierta tendencia a cuantificar, de manera que prefiere el uso de constantes para trabajar con medidas, evitando así la arbitrariedad que introducen las unidades, recordemos del punto anterior que estas son elegidas arbitrariamente, dando un carácter subjetivo a las medidas. De manera que si enunciemos la segunda ley de Newton en términos de observables quedaría:

$$(F) \propto (m)(a)$$

Pero introduciendo una constante, los símbolos F , m y a llevan asociado un número (medida) y unidad, de manera que la ley quedaría expresada como:

$$FU_F = CmU_m aU_a$$

Donde obviamente C es la constante y depende del sistema de unidades elegido, por ejemplo si:

$$\begin{array}{ll} U_F = 1kp & U_F = 1N \\ U_m = 1kg \rightarrow C = \frac{1}{9.81} & U_m = 1kg \rightarrow C = 1 \\ U_a = 1m/s^2 & U_a = 1m/s^2 \end{array}$$

Por lo que vemos que eligiendo el sistema de unidades adecuado, se ha podido eliminar la constante (por lo que se denomina constante superflua), de manera que dicho sistema se conoce como sistema coherente de unidades, aunque esto no siempre es posible.

Cuando no es posible, podemos estar en los casos de; constantes particulares, estas depende de la naturaleza de los cuerpos que intervienen en el fenómeno y, por lo tanto son ineludible, como la constante de un resorte. O bien constantes universales, que no depende de la naturaleza de los cuerpos en cuestión, es decir, cuando las ecuaciones se mantienen invariantes cuando cambia la naturaleza de los cuerpos con los que se opera.

VI.5.3 Teorema PI

El enunciado del Teorema PI establece que toda ecuación:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

que sea una ley representativa de un fenómeno física, puede expresarse como:

$$F(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) = 0$$

donde los π_i son los monomios independientes de dimensión nula o monomios π , que pueden formarse con las magnitudes físicas que intervienen en el proceso físico. El número de estos monomios es $m = n - h$, donde h es el rango de la matriz formada con los exponentes dimensionales de las magnitudes, en relación a una base dada.

En la aplicación del Teorema PI, vamos a seguir el camino contrario, construiremos los monomios independientes adimensionales que podamos formar con las variables que intervienen en el proceso y con estos monomios intentaremos construir la ecuación que rige el proceso físico, supuesto que sea desconocida esta ecuación. Los pasos a seguir en la resolución de un problema son:

- a) Considerar todas las magnitudes que intervienen en el fenómeno, incluyendo las constantes no eludibles.
- b) Establecer la matriz de coeficientes y su rango.
- c) Determinar el número de monomios independientes.
- d) Hallar estos monomios.

Ocurre a veces, que en el cálculo de monomios es muy fácil encontrar algunos de ellos, sin necesidad de calcularlos. Esto ocurre con las magnitudes adimensionales, tales como los ángulos, que forzosamente son ya monomios adimensionales. Igual para cuando en el fenómeno a estudiar aparecen 2 magnitudes de igual dimensión: Su cociente ha de ser forzosamente de dimensión nula. A estos monomios tan sencillos se les llama factores de forma y su uso simplifica mucho la resolución de problemas.

VI.6 Presupuesto de Error

El presupuesto de error (EB de sus siglas en inglés Error Budget) es una metodología para organizar proyectos multidisciplinarios, como lo es el espectrógrafo ESOPPO. Este proyecto involucra diversas áreas del conocimiento humano como: óptica, mecánica, electrónica, control, software, optomecánica y por supuesto la astronomía. El *EB* es una metodología que sigue un proceso de prueba y error, esto lo hace un proceso iterativo, que da lugar a optimizar el diseño, por la retroalimentación en cada etapa del proyecto. En la figura 6.10 se muestra el diagrama del presupuesto de error del espectrógrafo ESOPPO

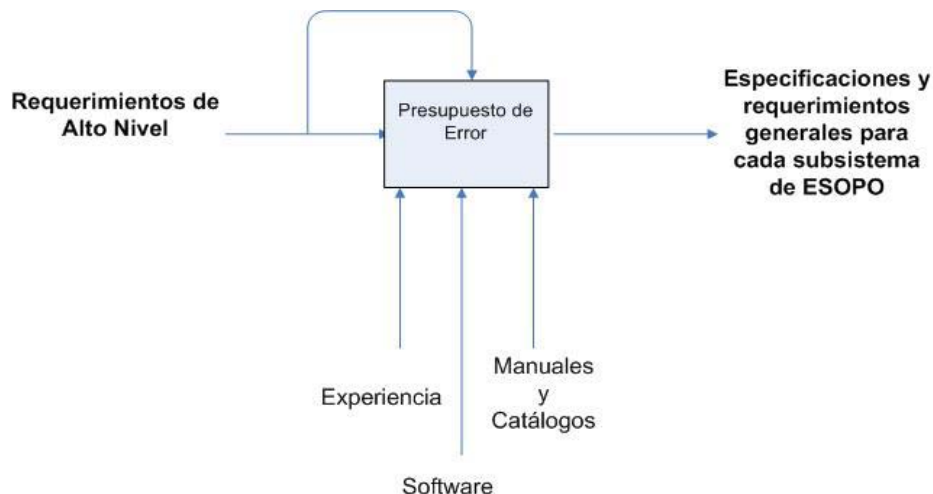


Fig. 6.10 Diagrama de presupuesto de error del proyecto ESOPPO para los requerimientos de alto nivel

Para el diseño de ESOP se busca cumplir estándares internacionales, por ello es importante que la gente involucrada en el diseño, manufactura y operación del espectrógrafo entiendan cual es su responsabilidad para alcanzar la meta y participen activamente en la optimización del mismo. El presupuesto de error consta de tres niveles que son:

- *EB de diseño*
- *EB de manufactura*
- *EB de ensamble y verificación*

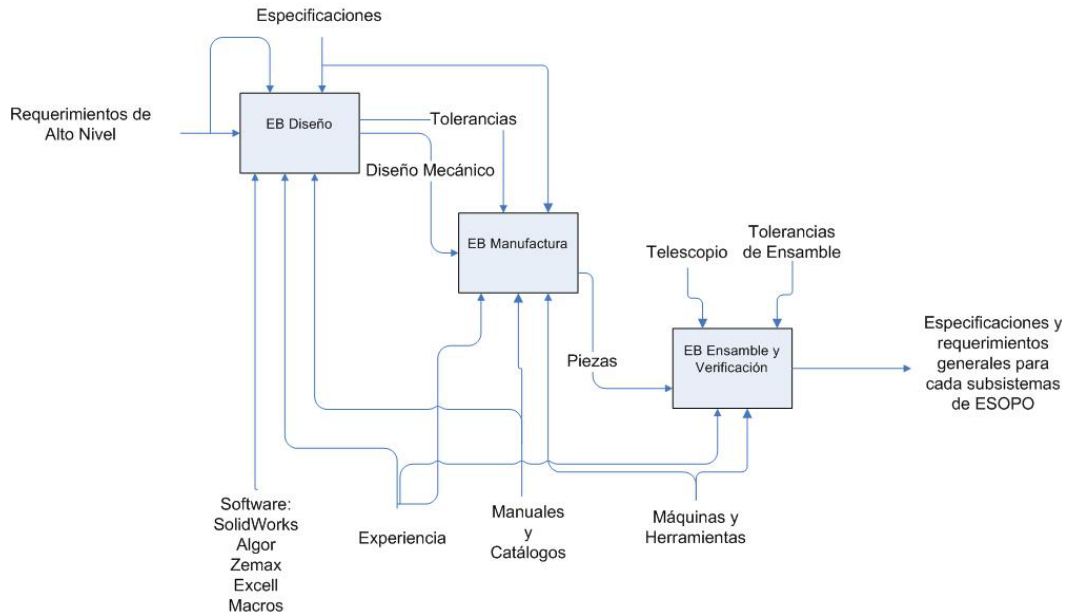


Figura 6.11 Esquema del Presupuesto de Error en ESOP para los distintos niveles se muestra claramente las restricciones y las entradas que se tiene en cada uno de los niveles.

El primer paso para realizar el presupuesto de error es identificar todas las fallas que se pueden presentar durante el proceso de diseño, manufactura, ensamble y operación del instrumento, esto involucra cuantificar tolerancias, precisión en el maquinado y hasta la forma en que se operará el telescopio. El segundo paso de esta metodología es darles un porcentaje de relevancia para el desempeño del instrumento a cada uno de los errores esto se logra usando la experiencia que tienen los investigadores y los ingenieros que interviene en el instrumento y la documentación del proyecto.

En el tercer paso se involucra un sistema de evaluación, es aquí, donde en ESOP se verifican el comportamiento y la calidad de imagen del instrumento con respecto a los requerimientos de Alto Nivel. En la Figura 6.12 se muestra el proceso de evaluación de los datos obtenidos del análisis FEA en ALGOR® y el análisis de sensibilidad ZEMAX®, comparándolos con los datos de las especificaciones y del requerimiento de alto nivel.



Fig. 6.12 Diagrama del Sistema de Evaluación.

El proceso del *EB* puede en teoría ser sencillo, pero involucra gran trabajo en equipo y sobre todo experiencia de los participantes. Una ventaja del *EB* es que se puede crear varios instrumentos ESOP0 y todos cumplirán los Requerimientos de Alto Nivel y serán un instrumento de alta confianza.

VI.7 Metodología de Diseño

La definición de Diseño varía entre las personas que a diario conviven con él, diseñadores, ingenieros e investigadores, y su experiencia en este ámbito. Pero hay términos que se repiten en todas las definiciones: necesidad, requerimientos, soluciones, especificaciones, creatividad, manufactura, economía, son algunos de ellos.

Una definición de Diseño de Ingeniería nos la da Harrisberg⁴¹

“Un acto creativo dedicado a seleccionar, combinar, convertir, restringir, modificar, manipular y conformar ideas, resultados científicos y leyes físicas en proyectos o procesos útiles”

Para Feilden⁴² el Diseño en Ingeniería es:

“Es el uso de principios científicos, información técnica e imaginación en la definición de una estructura mecánica, una máquina o un sistema que cumpla con las funciones preespecificadas con la mayor economía y eficiencia”

Existen diversos tipos de diseño y cada uno enfrenta diferentes problemas, por ejemplo tenemos Diseño industrial, gráfico, mecánico. Este último, que es el que nos ocupa, la estética del producto queda en segundo término, pues lo que busca es que el producto cumpla óptimamente con la función para la que es desarrollado⁴³. El proceso de diseño está inmerso en un proceso aún más general, el ciclo de vida de un producto. Al diseñar se deben considerar los demás aspectos que

estarán presentes en la vida del producto, tales como la manufactura, el ensamble, el almacenamiento, la distribución, la instalación, el uso, el mantenimiento, el retiro, el desensamble, la reutilización, el reciclaje y el desecho.

El proceso de diseño engloba las siguientes fases

- Reconocimiento del problema
- Definición del problema
- Diseño conceptual
- Diseño preliminar
- Diseño de detalle
- Manufactura

VI.7.1 Proceso de Diseño por CAD/CAM

Los componentes de ESOPo requieren una alta precisión y su confiabilidad, por ello se requiere usar lo último en tecnología, así como de procedimientos ordenados y bien definidos (como es el presupuesto de error) para reducir errores, fallas y costos y al final obtener un diseño óptimo. Como vimos, el proceso de diseño es iterativo y dado que se tiene que cumplir con el EB del proyecto, será necesario regresar repetidamente a las primeras etapas del diseño.

El uso de software CAD/CAM (CAD, Computer Aided Design. CAM Computer Aided Manufacture) ofrece todas esas ventajas, cuando se realizan cambios, estos se pueden hacer de manera controlada y ordenada, y se puede dar un seguimiento a lo largo de todo el proceso. El Instituto de Astronomía IA-UNAM, cuenta con estas herramientas, software CAD/CAM y maquinas CNC, para los procesos de manufactura, laboratorios especializados para la verificación y aprobación de los componentes.

Al igual que el proceso convencional de diseño, CAD es una serie de fases, por lo que existen diferentes metodologías, pero podemos hablar de los pasos principales que se repiten en todas⁴⁴. En este trabajo nos referiremos a las primeras fases Diseño Conceptual, por ser el que se esta desarrollando y al Diseño Preliminar por ser el paso siguiente.

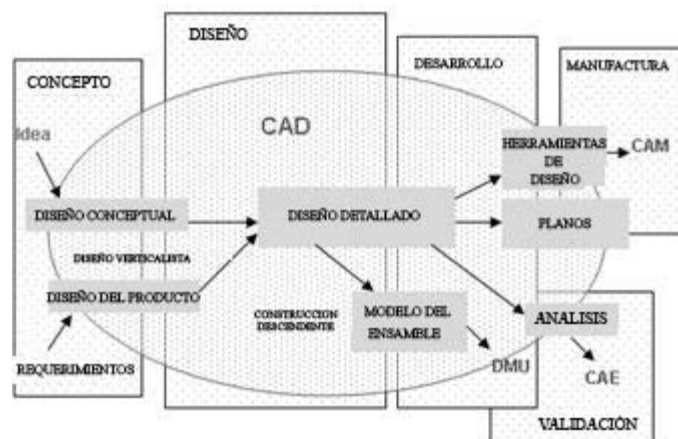


Fig. 6.13 Diagrama de diseño con CAD/CAM/CAE.

- Diseño Conceptual. Consiste en varias subfases que se tienen que llevar a cabo con mucha atención porque es el principio del proceso de Diseño
 - Generación de Ideas. Esta es la fase de conceptualización, abarca aspectos como la exploración de las diferentes posibilidades existentes para llegar a un resultado o la redefinición del problema de partida. La tormenta de ideas es un buen punto de partida
 - Evaluación de Ideas. Consiste en hacer un análisis crítico del total de las ideas generadas, y de los proyectos ya existentes, debiendo responder cada idea a una necesidad del mercado, manifiesta o latente, para ello se utilizan matrices de comparación, FEA, hojas de cálculo, QFD, etc.
- Diseño Preliminar. En esta fase se concretiza una solución al problema; se define la configuración total del sistema y se hace la selección de los componentes que integran el proyecto total del sistema y se hace la selección de los componentes que integran el proyecto, teniendo en cuenta disponibilidad, costo, limitaciones y facilidades de manufactura, etc. Y se obtienen formas específicas, materiales propuestos y se desarrollan los diferentes planos, esquemas y/o documentos generales que representan al producto como un conjunto organizado de piezas, componentes, enlaces y acoplamientos. Los requerimientos que se establezcan en esta fase del proceso serán las bases de las especificaciones finales.
 - Modelado en CAD. Una vez definidas las propiedades geométricas y dimensionales, la pieza es modelada en un programa de Diseño Asistido por Computadora (CAD). Esta etapa se realiza de forma simultánea con el proceso de diseño mecánico. Aunado a los programas de CAD se encuentran los programas CAE, los cuales utilizados adecuadamente son capaces de simular condiciones de operación y determinar con alta confiabilidad muchas de las especificaciones que se deben cumplir.
 - CAE son las siglas en inglés de Computer Aided Engineering. Se denomina así al conjunto de programas informáticos que permiten analizar y simular los diseños de ingeniería realizados con el ordenador, o creados de otro modo e introducidos en el ordenador, para valorar sus características, propiedades, viabilidad y rentabilidad. Su finalidad es optimizar su desarrollo y consecuentes costos de fabricación y reducir al máximo las pruebas para la obtención del producto deseado⁴⁵.
 - Prototipos rápidos son utilizados para fabricar artículos de plástico con características similares a los que se producirían por métodos convencionales, como moldeo por inyección y extrusión, o moldeo por soplado, de esta manera se evita el fabricar los costosos moldes para realizar un prototipo que podría cambiar su forma.

En la Figura 6.14 muestra el diagrama de bloque del proceso de diseño por CAD/CAM según lo sugerido por Shigley⁴⁶.

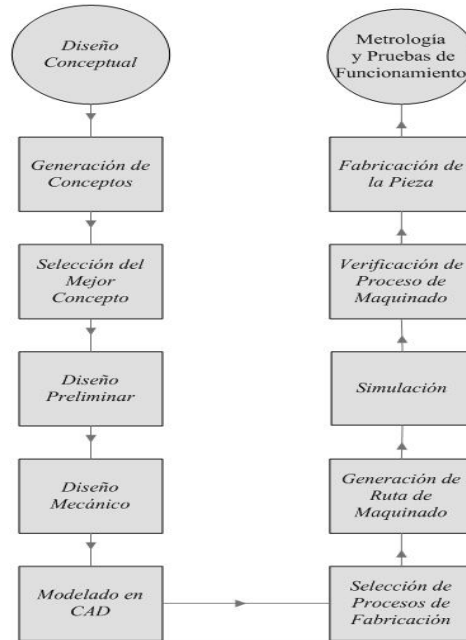


Fig. 6.14 Diagrama de bloques del proceso de diseño CAD/CAM descrito por Shigley.

VII ANÁLISIS DE SOPORTES RADIALES

VII.1 Optimización de Diseño de los Soportes Radiales

VII.1.1 Soporte Radial usado en OSIRIS

VII.1.1.1 Descripción del Soporte Radial

El diseño del Soporte Radial (SR) usado en OSIRIS, consiste en un arillo con tres zonas de contacto curvo en el exterior, que son la interfase entre el SR y la cámara Figura (7.1), en el interior se ubican tres zonas planas de contacto con la lente, igualmente distribuidas a 120° , debido a que a partir de su geometría se hicieron las modificaciones, lo llamaremos SR base.

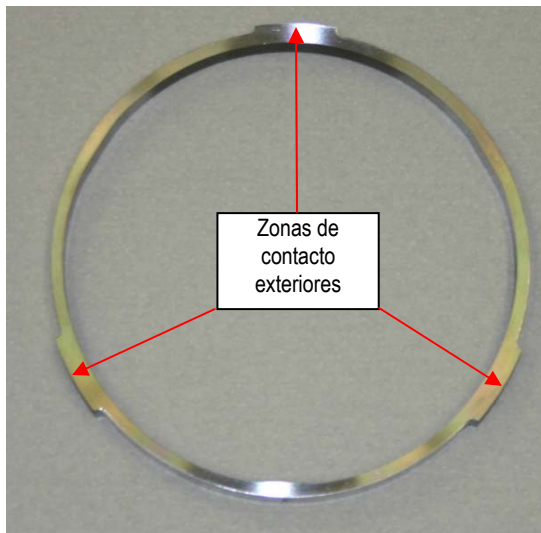


Fig. 7.1 En esta figura podemos apreciar las zonas circulares exteriores de contacto



Fig. 7.2 Las zonas de contacto interiores son planas

Las zonas de contacto exteriores funcionan como muelle durante la expansión térmica de las lentes, esto permite al sistema liberar a las lentes de posibles esfuerzos generados por compresión. Se debe evitar un esfuerzo mayor a 3.4 [MPa]^{47} en cualquier punto de la lente, porque por arriba de este valor se presenta la Birrefringencia.

La manufactura de estas zonas presenta un reto para el fabricante debido a que la geometría no se puede generar por maquinado convencional, torno o fresa, por otro lado como se nota en el detalle de la Figura (7.2) que se presenta a continuación (Figura 7.3), se puede observar que se tienen que hacer ranuras a la celda de la cámara para un buen ensamble. Dichas ranuras, fueron hechas mediante electroerosión, elevando el costo de manufactura. También hay que tomar en cuenta las tolerancias y ajustes que se necesitan, y mientras más se agreguen, la precisión del instrumento va en decremento.



Fig. 7.3 Detalle de la Figura 7.2, en ella se puede observar la ranura hecha a la celda mediante electroerosión, este es una de las características que se quiere optimizar.

VII.1.1.2 Comportamiento del SR base bajo distintos casos de carga

Para conocer el comportamiento del SR se llevaron a cabo diferentes análisis FEA, bajo distintos casos de carga, los aspectos que pueden deteriorar la calidad de imagen son principalmente la gravedad y el gradiente térmico. Por ello se analizó el SR base bajo su efecto.

Para el modelado de la lente se utilizó el ambiente gráfico que brinda SUPERDRAWIII® utilizaría del programa de Elemento Finito ALGOR®, esto para lograr un malla homogénea en la lente, la cual al estar igualmente distribuida por toda la lente, nos muestra el comportamiento radial que se espera de un elemento circular como lo es una lente, característica de la malla que no se logró ocupando la opción de automallado del programa ALGOR®, exportando el modelo directamente desde el programa de CAD, SOLIDWORKS®, debido a la forma en como ALGOR® calcula los elementos finitos.

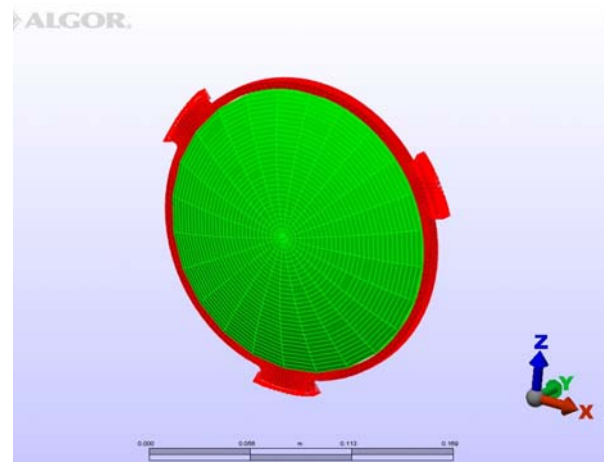


Fig. 7.4 Se muestra el SR base y el sistema referencial del mismo, además podemos apreciar la homogeneidad del mallado, debido a su creación en SUPERDRAWIII®

El SR también fue creado en SUPERDRAWIII® y gracias a la facilidad de la aplicación para unir dos piezas se logró asegurar que los nodos de contacto entre ambas piezas, en las tres zonas planas interiores de contacto, son los mismos, de manera que lo que se observa en los resultados es una muy buena aproximación al comportamiento que se desea simular.

El hecho de considerar que las piezas están pegadas idealmente, método de unión predeterminado de ALGOR®, no solo nos ayuda a transmitir los desplazamientos, deformaciones y esfuerzos completamente de una pieza a otra, sino que también simula la fuerza de fricción generada por la expansión térmica. Debido a lo anterior, el análisis se simplifica reduciendo tiempo de cómputo.

La distribución de las zonas planas de contacto con la lente (interiores del SR), recordemos es cada 120°, nos lleva a que hay direcciones críticas del vector gravedad, la primero es cuando la lente descansa sobre una de dichas zonas, y la segunda cuando descansa sobre dos de ellas. Estas direcciones están orientadas sobre el eje coordenado Z del sistema de referencia del modelo, en sentido positivo y negativo de dicho eje.

La gravedad que se aplicó fue de 9.81456 [m/s²] valor predefinido en ALGOR®. Los materiales ocupados son: Aluminio 6061-O para el SR y Fused Silica para la lente.

Tabla VII.1: Propiedades de los materiales para la caracterización del SR base (SR de OSIRIS)

Propiedad	Aluminio 6061-O	Fused Silica
Densidad [Kg/m ³]	2700	2200
Módulo de Elasticidad [GPa]	68.9	73
Módulo de Poisson	0.33	0.17
Módulo a Cortante [GPa]	26	31
CTE [1/°C]	2.36x10 ⁻⁵	0.55x10 ⁻⁶

Las restricciones se pusieron en las zonas exteriores de contacto, pues se consideró que esta interfase con la celda de la cámara es infinitamente rígida.

VII.1.1.2.1 Caso Gravitatorio

Una análisis comparativo entre las dos direcciones críticas del vector gravedad, arrojó que el caso más crítico fue la dirección negativa del eje Z, cuando la lente se apoya sobre dos de las zonas de contacto. Los desplazamientos que se obtuvieron tuvieron como valor máximo 1.4014*10⁻⁶ [m]. En ambas direcciones la distribución es la misma, los valores más altos se localizan en los nodos en los que la lente se apoya en 2 puntos.

El criterio bajo el que se analizaran los todos esfuerzos es el de Tresca², debido a que nos concentraremos en los resultados para la Lente y se trata de un material frágil.

Para los esfuerzos el valor máximo se presenta en el SR con un valor de 1.1637 [MPa] y cerca de las zonas de contacto interiores, la lente presenta sus valores más altos, 116.732 [KPa] quedando por debajo del valor permitido (3.4 [MPa]).

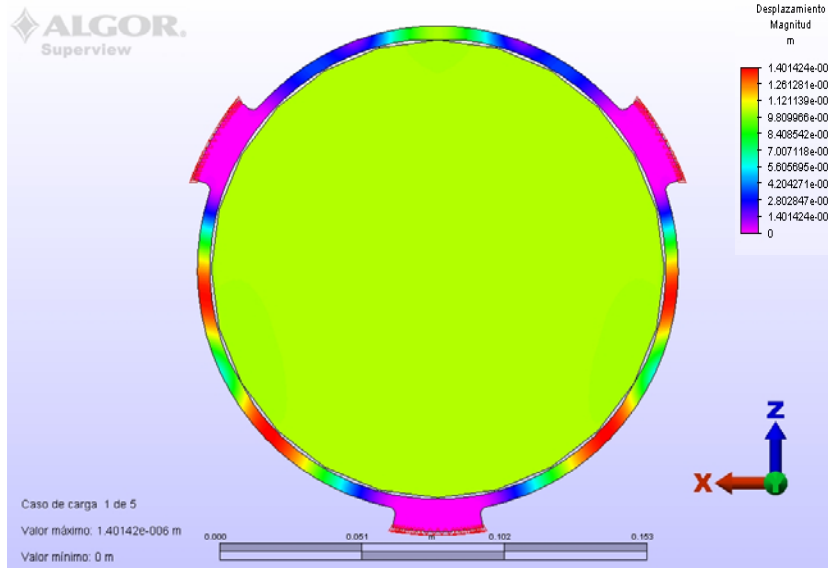


Fig. 7.5 Desplazamientos gravedad en dirección -Z

VII.1.1.2.2 Caso Térmico

Las temperaturas libres de esfuerzos que se usaron fueron; para el SR de 19 [°C] y de 3 [°C] para la lente, la temperatura del análisis fue de 19 [°C], así, el gradiente de temperatura fue de 16[°C] esto sirve para calcular la expansión térmica del sistema.

El valor máximo de desplazamientos bajo este gradiente se encuentra en la periferia de la lente, se observa la distribución concéntrica de los mismos, lograda gracias a las mejoras en el mallado de la lente. Los esfuerzos máximos, se presentan en las zonas de contacto planas interiores del SR y la lente.

<i>Desplazamiento_{MAX}</i>	<i>σ_{MAX} en SR</i>	<i>σ_{MAX} en la Lente</i>
7.1396*10 ⁻⁷ [m]	0.9106 [MPa]	221.092 [Pa]

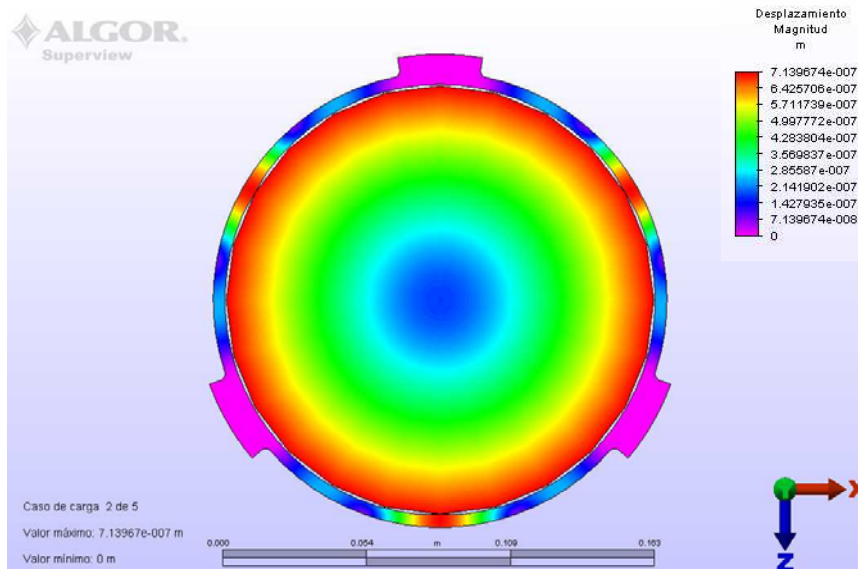


Fig. 7.6 Desplazamientos caso térmico

VII.1.1.2.3 Caso de efecto combinados (gravedad y térmico)

En estos análisis se volvieron a considerar las dos direcciones críticas del vector gravedad. Los resultados los podemos apreciar en la siguiente tabla:

Tabla VII.2.- Resultados efectos combinados para el SR base

Caso	Desplazamientos [m]	σ_{MAX} en SR	σ_{MAX} en la Lente
1 Punto de apoyo (Dirección Z)	$1.7421 \cdot 10^{-6}$	1.3254 [MPa]	132.918 [KPa]
2 Puntos de apoyo (Dirección -Z)	$1.7582 \cdot 10^{-6}$	1.5795 [MPa]	158.235 [KPa]

La diferencia de los desplazamientos máximos que se presentan, es de apenas 0.9%. De nuevo la distribución de desplazamientos y esfuerzos del caso donde se tienen 2 puntos de apoyo (gravedad en $-Z$) es más crítica para los SR. Podemos apreciar el efecto que tiene la gravedad teniendo mayor concentración de esfuerzos en la parte inferior del SR. Comprobamos que los SR funcionan como muelles en ambos casos, pues los valores más grandes se presentan en el muelle o muelles que soportan la lente en dirección de la gravedad, esto se ve reflejado en la distribución de esfuerzos, el SR se flexiona cerca del apoyo con la cámara debido a que la lente empuja el muelle en esa dirección.

Con todos los análisis anteriores concluimos que el efecto del gradiente térmico afecta más el comportamiento de la lente que el efecto de la gravedad.

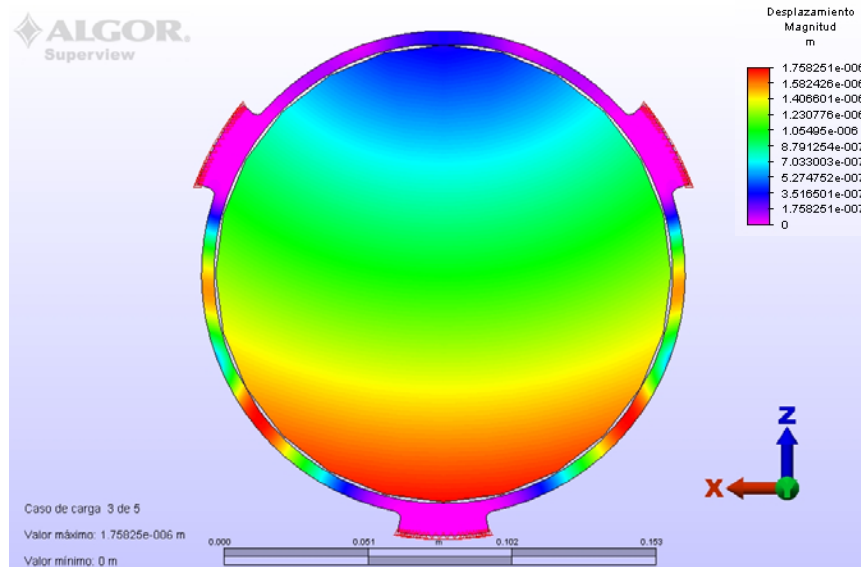


Fig. 7.7 Desplazamientos en efectos combinados y gravedad en dirección negativa del eje Z

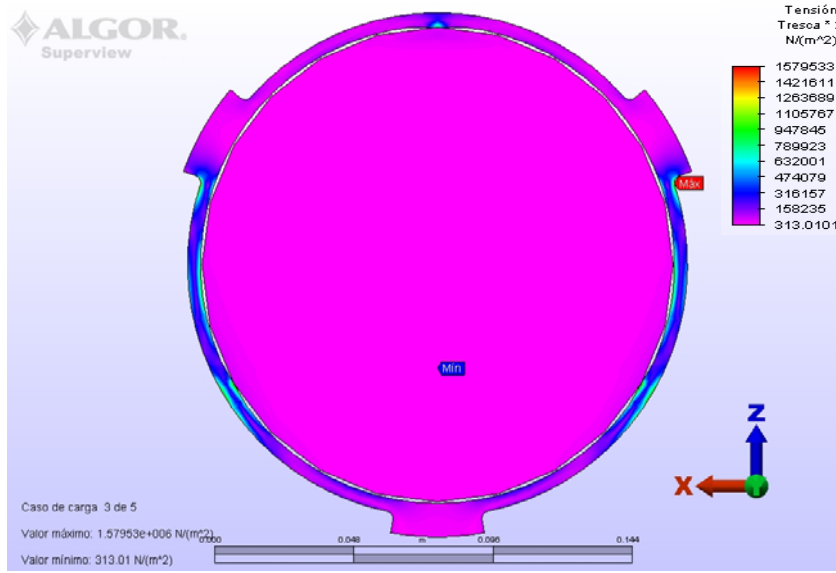


Fig. 7.8 Esfuerzos en efectos combinados, gravedad en dirección negativa del eje Z

VII.1.1.3 Comportamiento del SR base bajo variaciones en la geometría

Se le hicieron tres modificaciones geométricas al SR base, para analizar el comportamiento del sistema bajo estos cambios. Las variaciones fueron hechas a tres parámetros que fueron considerados porque impactan en el desempeño y la manufactura del SR, a continuación se describe el cambio que se realizara y el impacto que tienen.

- 1) El ancho del SR, Un aumento en este parámetro incrementa la rigidez del sistema y por lo tanto disminuye los desplazamientos bajo las cargas. El ancho fue aumentado en 5 [mm].
- 2) Zonas de contacto internas, se quiere conocer el efecto de un cambio en la geometría de estas, al pasar de una zona plana a una radial para el contacto con la lente, sustituyendo el contacto tangencial, por uno en arco de dimensiones arbitrarias, donde se tiene mayor área de contacto, pues esto impactaría positivamente en la manufactura del SR.
- 3) Aumento del brazo de palanca del muelle, esto se hará utilizando el SR modificado en la zona de contacto, creciendo la altura de la zona radial. Esto incrementaría la acción del muelle liberando a la lente de esfuerzos.

Las tres modificaciones se analizaron bajo el caso de carga con efectos combinados de gravedad y temperatura, en dirección negativa del eje Z, pues como ya vimos es la dirección más crítica. Se presentan las imágenes de los resultados para los casos más interesantes, que son la modificación 1 y la 3.

VII.1.1.3.1 Análisis de los Desplazamientos

En la tabla siguiente se muestran los Desplazamientos para todas las modificaciones. A) SR base, B) SR con ancho + 5 [mm], C) SR con zonas de contacto internas radiales, D) con mayor brazo de palanca.

Tabla VII.3: Desplazamientos máximos para todos los caso de variaciones geométricas del SR base

Caso	Modificación	Desplazamiento _{max} [μm]
A	Soporte base	1.7582
B	Soporte con ancho +5 [mm]	0.997
C	Sujetadores circulares	1.1042
D	Soporte con mayor palanca	1.0123

El caso B comprueba el efecto que se esperaba con el aumento del ancho, pues el desplazamiento máximo que sufre la lente disminuye con respecto del SR base, caso A, por lo que se ve que aumenta la rigidez del sistema, sin embargo, esto será comprobado con el comportamiento de los esfuerzos, que seguramente aumentarán.

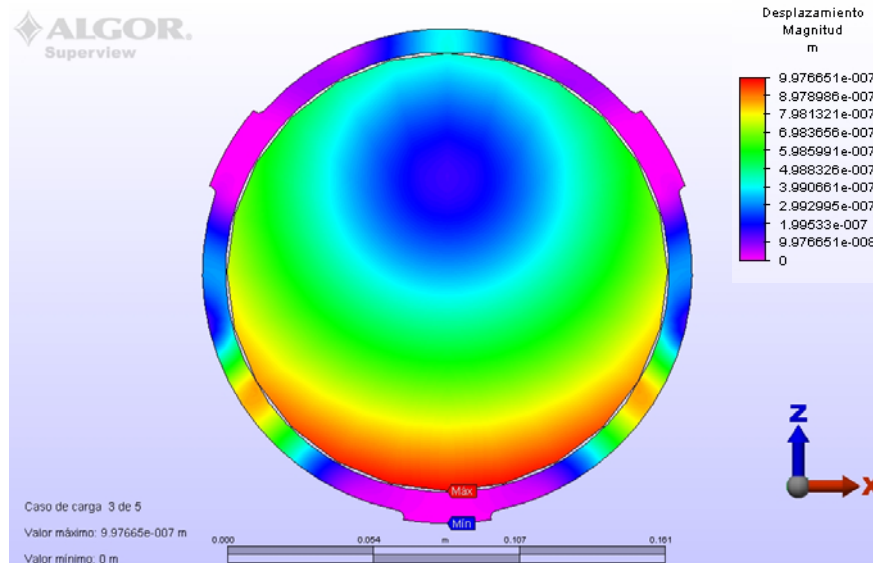


Fig. 7.9 Distribución de desplazamientos para la Modificación B) Soporte Radial con aumento espesor

En el caso C se aprecia una reducción del desplazamiento máximo. El caso D muestra una configuración un poco diferente, con mayor brazo de palanca, en cuanto a los desplazamientos el valor máximo es menor que el del SR base, de manera que se obtiene otra ventaja además de la esperada.

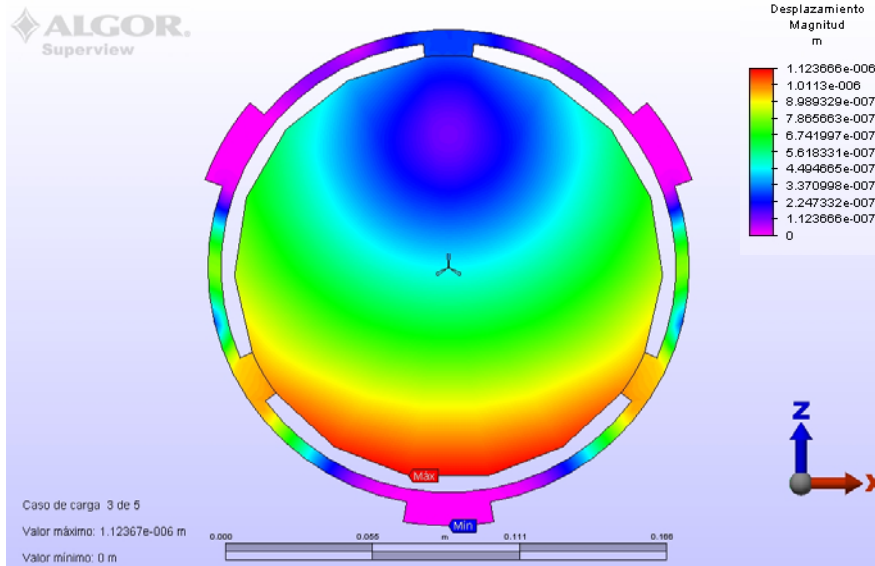


Fig. 7.10 Distribución de desplazamientos para la Modificación D) Soporte Radial con mayor brazo de palanca

VII.1.1.3.2 Análisis de los Esfuerzos

Los resultados para los esfuerzos se vaciaron en la siguiente tabla. Al igual que en los desplazamientos, A) SR base, B) SR con ancho + 5 [mm], C) SR con zonas de contacto internas radiales, D) SR con mayor brazo de palanca.

Tabla VII.4: Esfuerzos en los puntos importantes del sistema SR-Lente para las distintas variaciones geométricas.

Caso	Modificación	σ_{Lente} [Kpa]	$\sigma_{Soporte}$ [MPa]	$\sigma_{Interfase}$ [MPa]
A	Soporte base	158.235	1.5795	0.7899
B	Soporte con ancho +5 [mm]	106.724	1.0651	1.0651
C	Sujetadores circulares	610.662	3.0507	3.0507
D	Soporte con mayor palanca	358.277	1.0733	1.788

En el caso B donde el ancho fue aumentado, acorde con lo que se esperaba, el esfuerzo que soporta la lente en la interfase aumenta siendo este el valor máximo inclusive para el SR. El caso C nos muestra que el máximo se presenta en las interfaces con esto se concluye que mientras mayor sea el área de contacto, mayores son los esfuerzos a los que se ve sometido el sistema.

El último caso arroja que la lente y el SR soportan mayores esfuerzos que el SR base, esto va acorde con que la disminución de los desplazamientos está dada por la rigidez del sistema, pero esto tiene un efecto negativo en los esfuerzos que no es benéfico para nuestro problema.

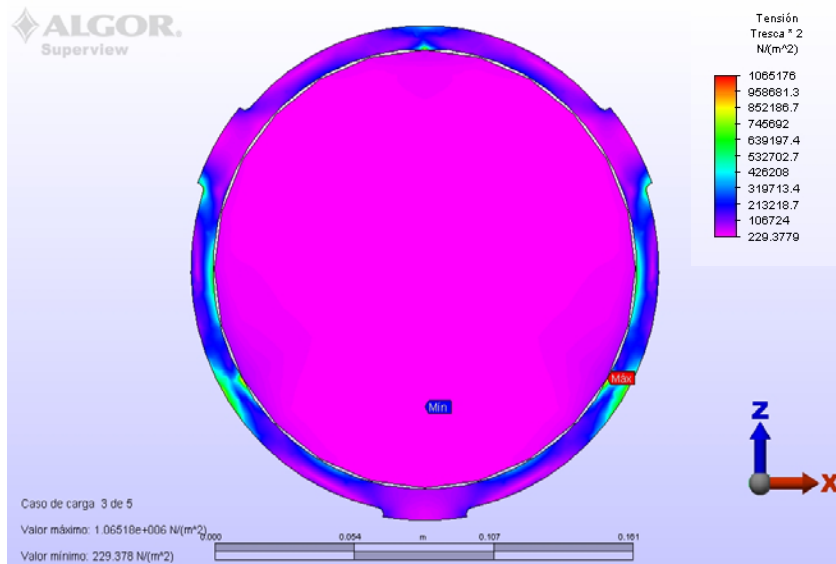


Fig. 7.11 Distribución de esfuerzos para la Modificación B) Soporte Radial con aumento espesor

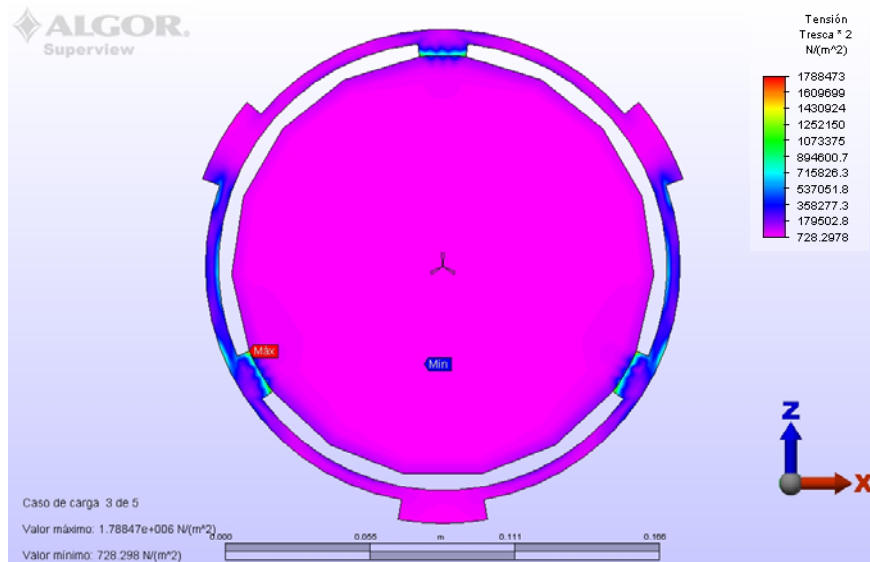


Fig. 7.12 Distribución de esfuerzos para la Modificación D) Soporte Radial con mayor brazo de palanca

VII.1.2 Propuesta de Optimización para el Soporte Radial

VII.1.2.1 Descripción del diseño

Una vez que se analizaron y compararon los resultados obtenidos, se llegó a una propuesta de optimización que consiste básicamente en quitar del Soporte Radial las zonas de contacto externas.

Lo que se propone es que formen parte de la celda de la cámara, esto simplifica la manufactura, pues se logra que la superficie externa del SR sea una circunferencia, que puede ser maquinada

mediante un torno CNC para cuidar las tolerancias. Por otro lado, su manufactura en la celda no representa mayor problema, pues el único lugar donde se debe cuidar la precisión con mayor recelo son en las zonas de contacto con el SR, que al ser circulares simplifica este proceso, en adición a esto, se eliminan las geometrías que tenían que ser maquinadas por electroerosión.

En cuanto al desempeño, se espera que ambos modelos se comporten de la misma manera bajo un mismo caso de carga, partiendo de la hipótesis de que los diagramas de cuerpo libre son iguales. Esto se comprobará comparando los resultados de análisis FEA.

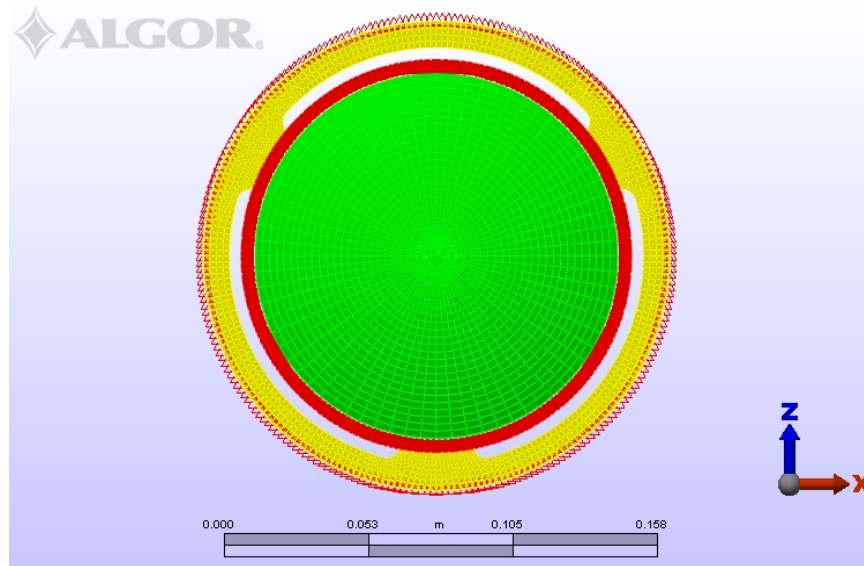


Fig. 7.13 Modelo Optimizado

Como vimos, el aspecto que más afecta el comportamiento del sistema SR-Lente, y por ende, la calidad de la imagen, es el gradiente térmico, por ello en esta primera etapa sólo se analizará el nuevo SR bajo este caso de carga.

El proceso de diseño que se planteó para la verificación de esta optimización fue:

- 1) Modelado de las tres piezas que tendrán que analizarse: La lente, el SR y la celda (se tiene que considerar pues sobre ella irán las nuevas zonas de contacto Celda-SR) en SUPERDRAW® para tener un mejor control de la creación de la malla.
- 2) Ensamble de los modelos, cuidando los nodos de contacto, de la unión SR-Lente se debe de cuidar el punto medio de la zona de contacto plana interior. Y de la unión SR-Celda, los nodos de las nuevas zonas de contacto exteriores.
- 3) FEA del ensamble, en una primera etapa con materiales que se sabe son lineales y condiciones de frontera arbitrarias, solo para comprobar el buen funcionamiento de los modelos, sin embargo, se deben considerar las mismas condiciones y materiales en ambas configuraciones para que una comparación sea viable
- 4) Validación con los materiales que realmente se van a usar.

VII.1.2.2 Parámetros de análisis

Se consideraron tres piezas: La lente, el soporte radial y la celda. Para igualar resultados, se asignaron a las piezas los mismos materiales de la librería de ALGOR®, esta selección fue aleatoria entre materiales se saben lineales, pues solo se busca comprobar el funcionamiento de los modelos y el gradiente de temperatura fue el mismo ($\Delta T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Tabla VII.5: Materiales ocupados en el análisis del SR Optimizado

<i>Pieza</i>	<i>Material</i>
Lente	Aluminio 6061- T6
SR	AISI 1005 Steel
Celda	AISI 1005 Steel

VII.1.2.3 Análisis y Resultados

El análisis para el SR usado en Osiris bajo los parámetros mencionados anteriormente arrojaron los siguientes resultados

Tabla VII.6: Resultados diseño SR Osiris

<i>Componente</i>	<i>Desplazamiento_{MAX} [m]</i>	<i>Esfuerzo_{MAX} [Pa]</i>
Lente	1.494×10^{-4}	6.015×10^7
SR	1.66×10^{-4}	4.8×10^8
Celda	1.66×10^{-5}	6.012×10^8

Para el modelo del SR Optimizado encontramos

Tabla VII.7: Resultados diseño SR Optimizado

<i>Componente</i>	<i>Desplazamiento_{MAX} [m]</i>	<i>Esfuerzo_{MAX} [Pa]</i>
Lente	1.497×10^{-4}	5.705×10^7
SR	1.664×10^{-4}	4.561×10^8
Celda	1.664×10^{-5}	5.702×10^8

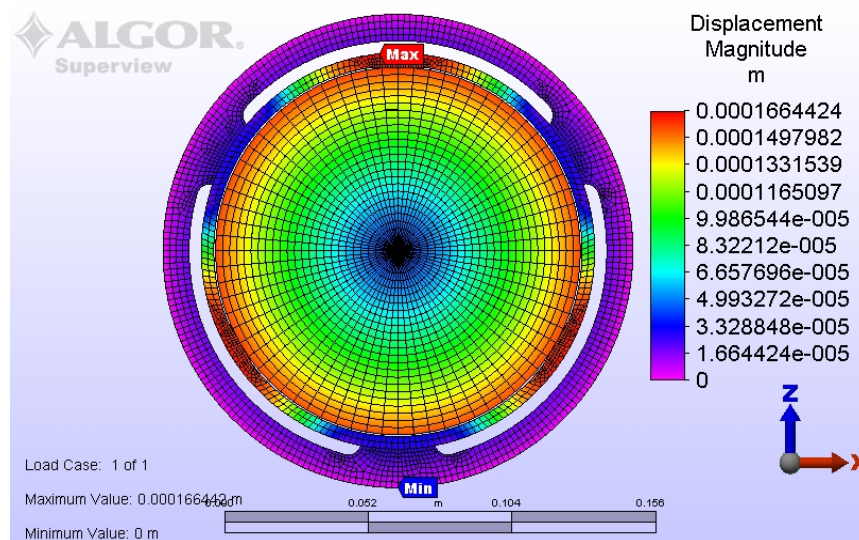


Fig. 7.14 Distribución de los desplazamientos en el SR Optimizado

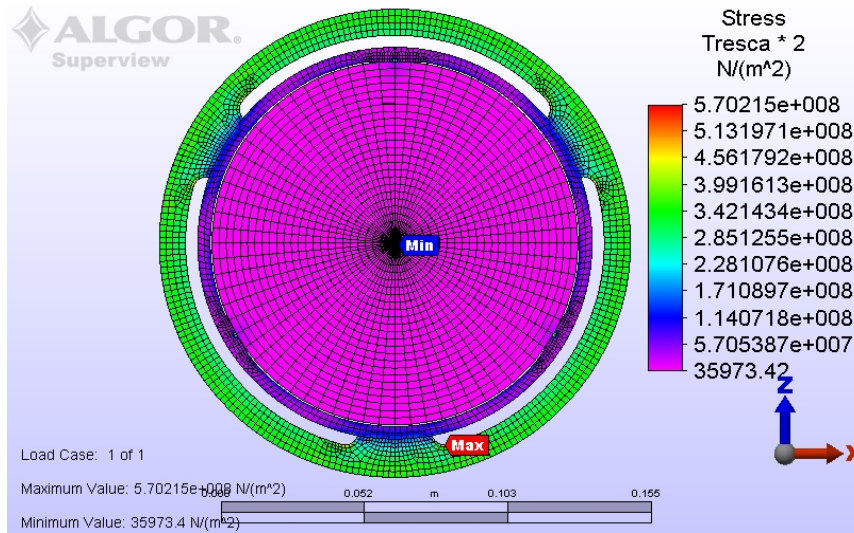


Fig. 7.15 Distribución de esfuerzos en el SR Optimizado

VII.1.2.4 Comparación de los Resultados

Como se puede ver en las Tablas VII.6 y VII.7, los resultados son muy parecidos en cuanto a magnitud para los dos soportes, podemos afirmar entonces que los dos soportes se comportan de la misma manera. De aquí se desprenden las siguientes tablas, donde se calcula el porcentaje de diferencia entre los resultados.

Tabla VII.8: %Diferencia de Desplazamientos

Componente	%dif. desplazamientos (base – optimizado)
Lente	0.201
SR	0.241
Celda	0.241

Tabla VII.9: %Diferencia de Esfuerzos

Componente	%dif. esfuerzos (base – optimizado)
Lente	5.154
SR	4.979
Celda	5.156

Podemos apreciar en las tablas comparativas que el porcentaje de diferencias es muy pequeño, es más grande para los esfuerzos, que para los desplazamientos, debido a que en el cálculo de ellos se acumulan todos los errores de cálculo.

VII.1.2.5 Comportamiento σ - ϵ con la variación del vector gravedad

La observación astronómica implica exposiciones de varias horas, se requiere de estabilidad espacial y de mantener enfocado el objeto, por lo que el telescopio tiene que ir siguiéndolo ya que la rotación natural del planeta afecta en este sentido e implica que el vector de gravedad cambia

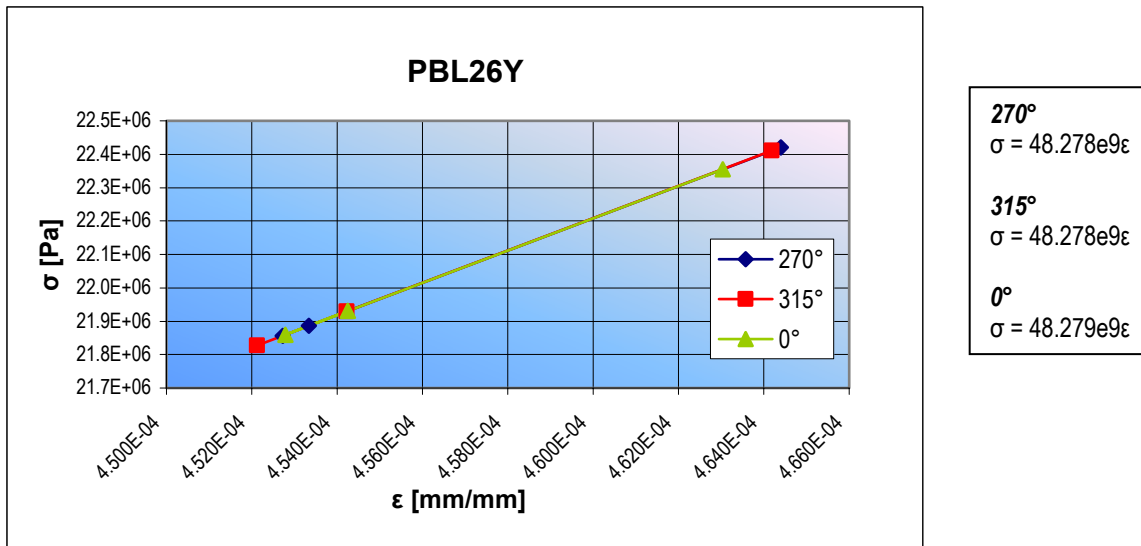
durante la exposición. Para continuar con la caracterización del SR Optimizado, se hicieron análisis probando 3 diferentes vidrios, su importancia reside en el hecho de que es la primera vez que el soporte se probó con condiciones y materiales aproximados a los que se van a utilizar en los análisis finales. Como ya vimos anteriormente, la dirección crítica es en el sentido negativo del eje Z, es decir 270[°] según el sistema de referencia. La variación de dirección del vector gravedad se hizo analizando 315[°] y 0[°]

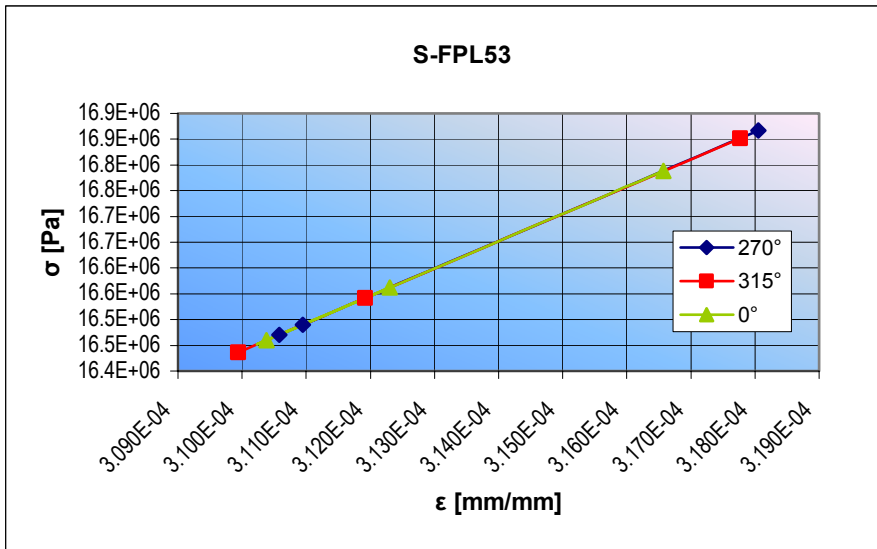
La gravedad considerada fue de 9.81456 [m/s²] (valor estándar propuesto por Algor®). El metal que se utilizó en todo los casos para el SR es Aluminio 6061. Los cristales que se consideraron, fueron elegidos de entre los vidrios que se van a usar en las lentes de ESOP0. El gradiente de temperatura fue de 46[°C]. Se espera que el comportamiento de esfuerzos-deformación sea lineal.

Tabla VII.10: Propiedades de los materiales para análisis con variación del vector de gravedad

<i>Material</i>	<i>E</i> [MPa]	<i>G</i> [MPa]	<i>ρ</i> [Kg/m ³]	<i>ν</i>	<i>α</i> [1/°C]
PBL26Y	58.9	24.2	3.1	0.22	8.9x10 ⁻⁶
S-FPL53	69.1	26.5	3.62	0.303	14.5x10 ⁻⁶
SILICA	72	31	2.2	0.17	0.5x10 ⁻⁶
AL6061	68.9	26	2.7	0.33	2.36x10 ⁻⁵

A continuación se presentan las gráficas que se obtuvieron del comportamiento esfuerzo deformación σ - ϵ para las diferentes direcciones del análisis, para los tres nodos centrales de contacto. En ellas podemos ver su comportamiento lineal, a la derecha de cada una se presenta la ecuación de la línea de tendencia, la ordenada al origen se desprecia, porque la diferencia en el orden de magnitud era de 6 y hasta 7 cifras en algunos casos.

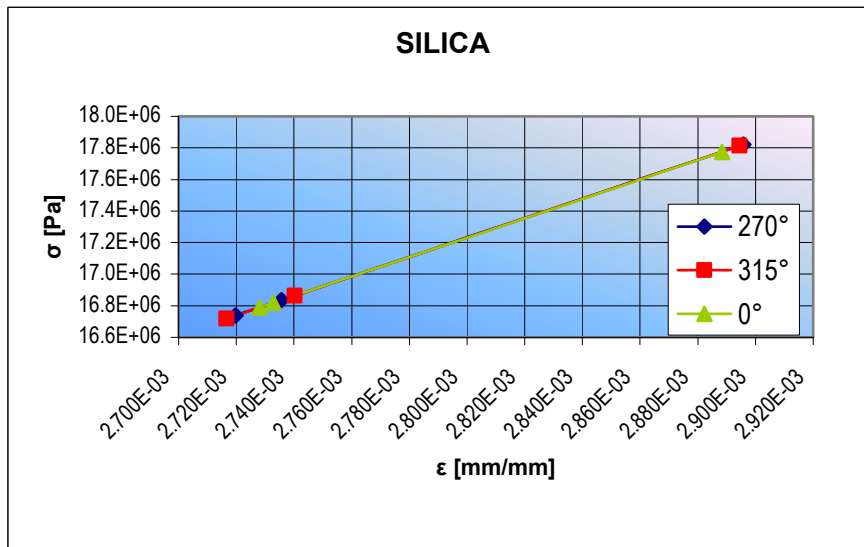




270°
 $\sigma = 53.031e9\varepsilon$

315°
 $\sigma = 53.041e9\varepsilon$

0°
 $\sigma = 53.037e9\varepsilon$



270°
 $\sigma = 6.154e9\varepsilon$

315°
 $\sigma = 6.154 e9\varepsilon$

0°
 $\sigma = 61.536 e9\varepsilon$

Como se pode observar el sistema SR-Lente se comporta en casi la misma proporción para cualquier dirección de la gravedad para cada material, cabe destacar que cuando se obtuvieron las ecuaciones de las líneas de tendencia, estas presentaban un parámetro $R^2=1$, así que, su adecuación a una recta es excelente.

Este comportamiento representa en si una ventaja para nuestros objetivos, ya que la relación que se va a buscar en nuestro modelo matemático se sabe es lineal, para cada nodo sabemos que se cumple la ecuación (6.8):

$$\sigma = E\varepsilon$$

Con las gráficas podemos afirmar que la misma relación se cumple para el conjunto de nodos, por lo que podemos generalizar la ecuación anterior. La variable E (módulo de Young), representada por la pendiente de la línea de tendencia que se obtuvo experimentalmente con los análisis por Elemento

Finito, que se utilice será una combinación de las propiedades mecánicas de los materiales de los componentes SR y Lente y no es el del vidrio ni el de el metal propiamente.

Los análisis por elementos finitos se consideran la parte experimental de este trabajo, si bien los análisis no son experimentos propiamente dichos, su naturaleza y repetitividad nos permite ocuparlos como tales. Además de que sustituyen al proceso de hacer pruebas con lentes reales, siendo este el atractivo principal de este trabajo, pues se combinan una técnica moderna; el Elemento Finito con una técnica milenaria; como lo es el método científico, pues se observó el fenómeno, se propuso una hipótesis y se buscó comprobarla.

VIII SOPORTES RADIALES PARA ESOPO

VIII.1 *Requerimientos*

El objetivo de esta sección es concentrar la información de los requerimientos y especificaciones del instrumento astronómico ESOPO. Cada uno de los requerimientos y especificaciones son fundamentados en los objetivos científicos que se pretenden estudiar con ESOPO y son el resultado de un proceso iterativo de consenso, a través de una serie de consultas y discusiones con diversos usuarios del Observatorio Astronómico Nacional y con la formación del Comité Asesor Científico, que permitió definir las características del espectrógrafo, y éstas se resumen generando una lista de Requerimientos de Alto Nivel (RAN) para ESOPO.

Se hizo un esfuerzo intenso y consumidor de tiempo, en aras de definir con la mayor precisión posible, el uso astronómico del instrumento y las características que se le demandan. Se parte de la convicción de que es un esfuerzo que se verá compensado por la calidad del instrumento, junto con el minucioso cuidado en las otras etapas del proyecto: diseño, manufactura, ensamble, pruebas y un aprovechamiento de la etapa de integración y pruebas en el telescopio que permitan validar astronómicamente el espectrógrafo finalmente construido.

VIII.1.1 *Funcionales*

El instrumento ESOPO es un espectrógrafo óptico, que debe optimizarse para el rango espectral de 350-900 *nm*, de baja-intermedia dispersión de rendija larga (no necesariamente de campo integral). El espectrógrafo debe acoplarse al foco $f/7.5$ del telescopio de 2.1 m de diámetro de SPM con guiador. Deberá tener la capacidad de observar todo el intervalo espectral a una resolución $R \sim 2000$ ó mayor. Debe haber una resolución limitada por cielo, donde el ruido por píxel debido a fotones del cielo sea mayor al ruido del detector (ruido por lectura y señal oscura). La repetitividad y estabilidad deben ser tales que: durante una exposición de 0.5 Hrs. la resolución no debe degradarse más de un 2.5% y que al cambiar y volver a una configuración, la resolución se mantendrá dentro de un 5% (meta 3%).

La eficiencia mínima que debe alcanzar ESOPO, a distintas longitudes de onda, sin telescopio e incluyendo el detector se resumen en la tabla siguiente, junto con la meta que debe buscar la óptica básica de ESOPO (sin telescopio, detector, rejilla ni dicróico):

<i>Longitud de onda (Å)</i>	<i>Eficiencia mínima [%]</i>	<i>Comentario</i>
3500	15	Eficiencia final neta del instrumento (sin telescopio) incluyendo toda la óptica básica, rejilla, dicroico y detector
4500	35	
5500	36	
7500	40	
9000	15	
3500 a 9000	80	Meta, no requerimiento, excluyendo telescopio, rejilla, dicroico y CCD

VIII.1.2 Ambientales

Los valores de diseño estipulan una presión atmosférica de 562 [mmHG], temperatura de 3 [°C] y variaciones térmicas por hora de 0.4 [°C], así como una humedad relativa del 47%, para todos los sistemas, de ella se desprenden dos intervalos, el de operación y el de supervivencia, este último es que arroja los valores más extremos.

<i>Intervalo</i>	<i>Presión [mmHg]</i>	<i>Temperatura [°C]</i>	<i>ΔTemperatura por hora [°C]</i>	<i>Humedad rel. [%]</i>
Mínimo de operación	545 a 570	-10 a 16	1.3	5 a 90
Mínimo de supervivencia	500 a 1100	-16 a 34	10	4 a 100

VIII.2 Metodología de diseño

La metodología de diseño parte con la propuesta de optimización para el SR, como vimos en el capítulo anterior, el SR optimizado iguala en buena forma los resultados de los SR usados en OSIRIS, que sabemos son confiables. Se decidió analizar un singlete del brazo azul, esto debido a que se consideró el caso con menos complicaciones porque trabajaremos con solo una lente, esta lente es plano-convexa (Fig. 4.13). Por ello se propone el siguiente proceso de diseño:

- Realizar diferentes pruebas con el SR optimizado, cambiando los materiales del vidrio utilizado, características geométricas del SR y dimensiones de la lente. Vaciar los resultados de desplazamientos, deformaciones y esfuerzos de los nodos centrales de las zonas de contacto.
- Establecer las variables y constantes que afectan el SR cuando es sometido a carga.
- Usar las relaciones que ya se conocen, buscando el ancho del SR en función de su espesor y de las demás parámetros
- Proponer el modelo matemático que describa el fenómeno. El modelo será comprobado con los resultados de los análisis ya hechos.
- Modelar el SR con las condiciones geométricas y mecánicas que arroje el modelo matemático.
- Efectuar iteraciones con el presupuesto de errores de los barriles para ESOPPO.

Diagrama de flujo para obtener datos para análisis del comportamiento σ - ϵ del SR

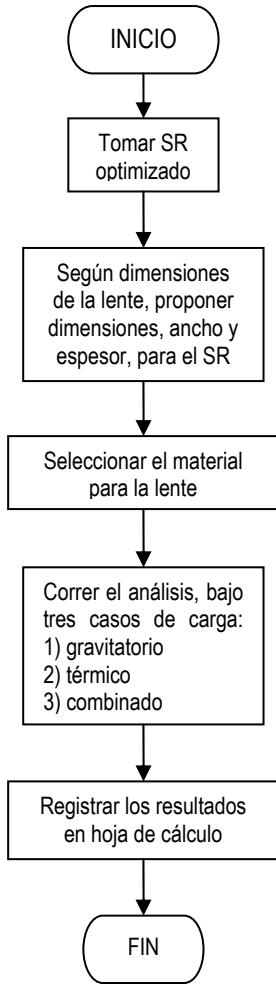
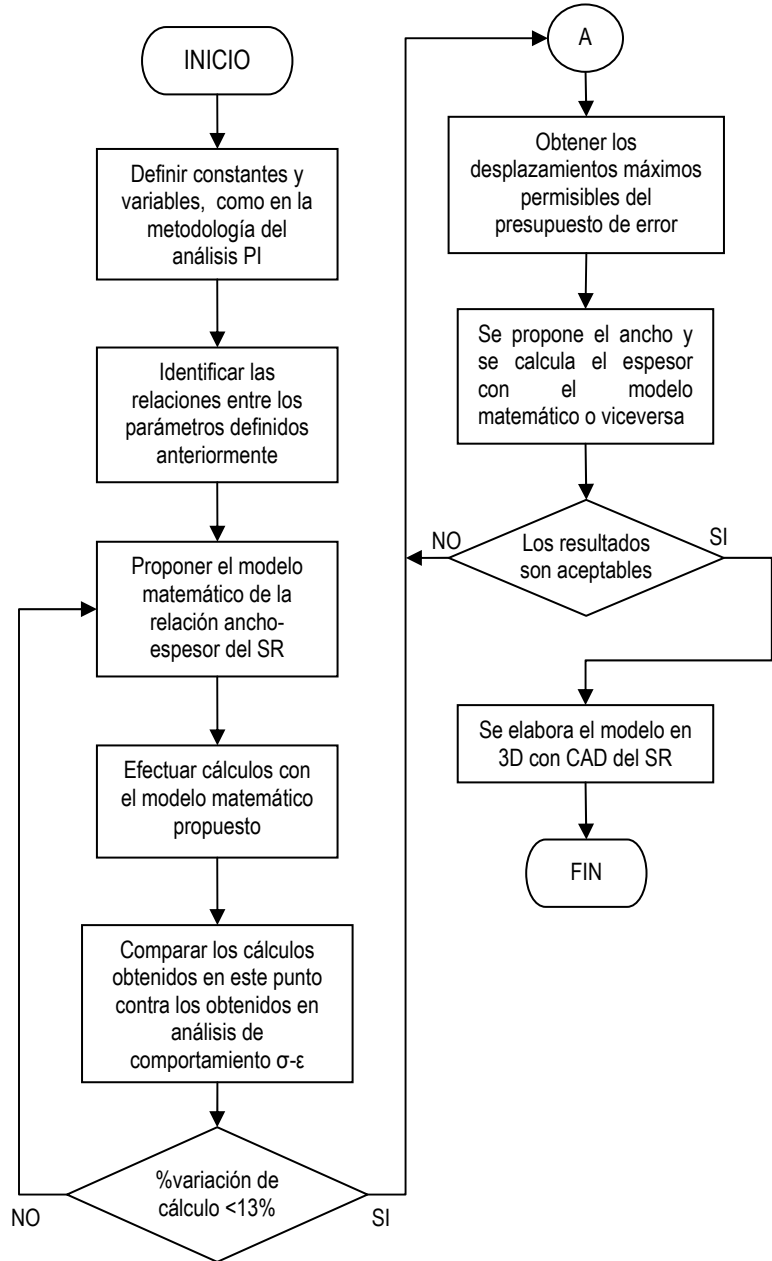


Diagrama de flujo para el diseño del S R



VIII.3 *Modelo Matemático para calcular Soportes Radiales de Lentes Plano-Convexos (SRLPC)*

VIII.3.1 *Consideraciones*

El modelo matemático SRLPC debe considerar los esfuerzos mecánicos y térmicos, la relación a la que se debe aproximar es a la (6.8), pero en vista que los son los nodos de contacto, las propiedades no son solo las del vidrio sino una combinación de las del vidrio y del metal.

Para nuestro sistema, el contacto Lente-SR ocurre a una altura y_c que es igual al radio de la lente, los diámetros que se manejarán están entre 7 y 20 [cm], las tres zonas planas de contacto comprimen localmente la óptica introduciendo esfuerzos internos, por lo que, los esfuerzos generados no deben exceder los límites permitidos para los materiales involucrados. Existen dos condiciones para los esfuerzos impuestas para los vidrios que hay que respetar, de supervivencia y de operación⁴⁸.

- Condiciones de supervivencia
 - El esfuerzo de compresión máximo tolerable es de 345 [MPa]
 - El esfuerzo de tensión máximo tolerable es de 6.9 [MPa]
- Condiciones de operación
 - El esfuerzo tolerable para minimizar el efecto de la birrefringencia es de 3.4 [MPa]

Las deformaciones máximas tolerables en las superficies dependen de su posición en el sistema y los requerimientos de funcionalidad. Debe funcionar para el intervalo de temperatura de -10 a 25[°C].

VIII.3.2 *Parámetros*

En semejanza con el primer paso del análisis PI, considerando los análisis hechos y los resultados que se obtuvieron, se pudieron determinar estos parámetros. Pueden ser divididos en tres grupos; características de materiales, físicos, y geométricos. A continuación se enlistan los parámetros y su descripción dimensional necesaria para realizar el análisis.

Tabla VIII.5 Características de los Materiales

Parámetro	Dimensión	Símbolo
Módulo de elasticidad <i>vidrio</i>	[Kg M ⁻¹ S ⁻²]	E _v
Módulo a cortante <i>vidrio</i>	[Kg M ⁻¹ S ⁻²]	G _v
Módulo de Poisson <i>vidrio</i>	[1]	ν _v
Coefficiente de dilatación térmico <i>vidrio</i>	[°C ⁻¹]	α _v
Densidad <i>vidrio</i>	[Kg M ⁻³]	ρ _v
Módulo de elasticidad <i>metal</i>	[Kg M ⁻¹ S ⁻²]	E _m
Módulo a cortante <i>metal</i>	[Kg M ⁻¹ S ⁻²]	G _m
Módulo de Poisson <i>metal</i>	[1]	ν _m
Coefficiente de dilatación térmico <i>metal</i>	[°C ⁻¹]	α _m
Densidad <i>metal</i>	[Kg M ⁻³]	ρ _m

Tabla VIII.6 Características Físicas

Parámetro	Dimensión	Símbolo
Gradiente térmico	[°C]	ΔT
Gravedad	[M S ⁻²]	g
Desplazamiento	[M]	ΔU
Deformación	[1]	ϵ
Esfuerzo	[Kg M ⁻¹ S ⁻²]	σ

Tabla VIII.7 Características Geométricas

Parámetro	Dimensión	Símbolo
Espesor del SR	[M]	e
Ancho del SR	[M]	b
Espesor menor Lente	[M]	a
Radio Lente	[M]	y_c
Espesor mayor Lente	[M]	e_s

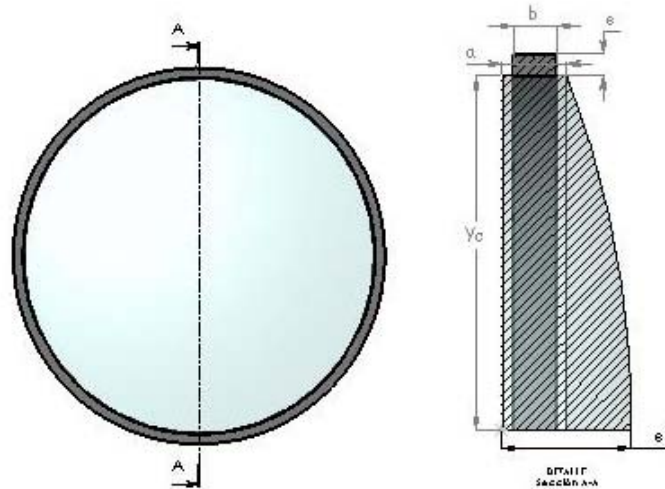


Fig. 8.1 Diagrama de variables geométricas

VIII.3.3 Modelo Matemático

Como se dijo anteriormente, el objetivo de este modelo, es relacionar los tres grupos de parámetros: características de materiales, físicos, y geométricos. La importancia de cada uno de ellos reside, en la manera que afecta el comportamiento del sistema SR-Lente. Las características de los materiales cambian según la Lente que se esté analizando, además de que son la base para encontrar las constantes en nuestro modelo. Los parámetros físicos establecen las condiciones de frontera, cabe destacar que algunas de ellas son las mismas para todos los análisis tales como el gradiente térmico y los desplazamientos, los cuales vienen dados por el presupuesto de error. Y por últimos los geométricos cambian de la misma manera en como cambia la Lente de estudio, pues los diámetros son diferentes en cada caso, de manera que si se quiere un modelo general, este debe de ser tomado en cuenta, por otro lado, los esfuerzos y desplazamientos dependen de las características del SR, por ello su ancho y espesor son importantes.

Se consideraron los dos fenómenos que ya se han estudiado como generadores de esfuerzos en las lentes; el caso gravitatorio y el térmico. Se partió de la hipótesis que el esfuerzo total o combinado resulta de los efectos que provocan los casos gravitatorio y térmico juntos.

$$\sigma_C = F(\sigma_G, \sigma_T) \dots \dots (7.1)$$

Además de estos parámetros, se necesitan de constantes, unas se utilizan para combinar las propiedades de ambos materiales, pues como estamos analizando la zona de contacto, no podemos solo considerar las propiedades de uno u otro material, sino como ya se dijo en el punto VIII.4.1, es una combinación de ambos. Otras sirven para ajustar las ecuaciones, pues se encontró que los valores que se obtenían generaban un error mayor a 13% con respecto a los análisis por Elemento Finito y que agregando estas constantes, que dependen de los parámetros geométricos y de las propiedades de los materiales, se logra reducir el error considerablemente.

Se impusieron las condiciones de frontera a los modelos del sistema Celda-SR-Lente con los que se comprobó la linealidad del sistema, apartado VII.1.2.5, pero aún más importante en este punto, se dibujaron modelos en los que se cambió la relación ancho-espesor del SR.

Los resultados en cuanto a desplazamientos, deformaciones y esfuerzos según el criterio de Tresca del análisis se vaciaron en hojas de cálculo, Excel® y ahí se hicieron los cálculo de constantes y porcentajes de diferencia de los resultados del análisis y de las ecuaciones propuestas.

VIII.3.3.1 Esfuerzo caso gravitatorio σ_G

La gravedad hace que el vértice de la Lente se desplace respecto de su posición original, dependiendo de su dirección. El presupuesto de errores de la óptica, establece el límite máximo permisible. Este esfuerzo es puramente mecánico, por lo que, la forma en cómo se calcula parte de la ecuación (6.8)

$$\sigma = E\varepsilon$$

Ahora bien, la primera variable en la que fijaremos la atención es ε , la deformación unitaria, como se determinó en el marco teórico, su valor esta dado por los desplazamientos entre la longitud inicial, en nuestro caso, como los nodos que nos interesan son los nodos de contacto pertenecientes a la lente, ε_G queda como:

$$\varepsilon_G = \frac{\Delta U_G}{y_c} \dots \dots (7.2)$$

Recordando que y_c es el radio de la Lente y ΔU_G es el desplazamiento del nodo. Esta relación necesita de un factor de ajuste, k_1 , que viene dado por el material de la lente, ya que se descubrió que un valor de k_1 , funciona para las distintas relaciones de ancho y espesor si se trabaja con el mismo material, pero no sucede así cuando se cambia el material, algunos valores para distintos materiales se muestran en la tabla VIII.8. Estos valores se obtuvieron tras 8 iteraciones en los resultados FEA, es decir, con 8 resultados FEA con diferentes características geométricas, se calculó su valor y se fue perfeccionando hasta que se encontró el valor que dio mejores resultados en todos los casos. Esta es una de nuestras constantes exFErimentales. Las llamamos

exFerimentales, pues se encontraron a partir de todos los análisis por Elementos Finitos, que no son experimentos como tales, pero que dada su naturaleza y la repetitividad que presentan, nos permiten su obtención (véase Apéndice C).

Tabla VIII.8 k_1 para diferentes materiales

Material	$k_1[1]$
S Ball-11	0.3435
N Lak8	0.25
PBL26Y	0.4555

Por lo que la deformación causada por la gravedad se calcula como:

$$\varepsilon_G = \frac{k_1 \Delta U_G}{y_c} \dots\dots(7.3)$$

La segunda variable E es el módulo de Young para el material en cuestión, de aquí nace nuestra segunda constante, de la referencia 46(Yoder), el autor propone una constante que combina las propiedades mecánicas de 2 materiales que están en contacto y con ella calcula los esfuerzos en las lentes. Esta constante se adopto pues cumple tanto funcionalmente como dimensionalmente con nuestros propósitos, y se mantuvo el nombre k_2 .

$$k_2 = \frac{(1 - \nu_V^2)}{E_V} + \frac{(1 - \nu_M^2)}{E_M} \dots\dots(7.4)$$

Análisis Dimensional

$$[Pa^{-1}] = \frac{[1]}{[Pa]} + \frac{[1]}{[Pa]}$$

Donde E_V , E_M son los módulos de Young para el vidrio y el metal respectivamente y ν_V , ν_M los módulos de Poisson vidrio y metal respectivamente. Dimensionalmente tenemos que esta constante arroja $[Pa^{-1}]$ en su cálculo, por lo que debe de dividir a la deformación en nuestro modelo.

$$\sigma_G = \frac{\varepsilon_G}{k_2} \dots\dots(7.5)$$

Una vez que se probó esta primera ecuación con los datos obtenidos con FEA, se vio que el porcentaje de diferencia era muy grande. Por otro lado el esfuerzo que soporta la Lente depende también del espesor del SR, ya que a mayor espesor, la rigidez del sistema aumenta. Por ello se buscó adaptar una segunda constante, que dependiera del espesor y el radio de la lente, llamada k_3 .

$$k_3 = \sqrt{\frac{y_c}{5.284e}} \dots\dots(7.6)$$

Análisis Dimensional

$$[1] = \sqrt{\frac{[m]}{[m]}}$$

Donde e es el espesor del SR. Esta relación se obtuvo después de 8 iteraciones entre las distintas hojas de cálculo que se tenían. Después de adaptar la nueva constante el esfuerzo por gravedad queda como:

$$\sigma_G = \frac{k_3 \varepsilon_G}{k_2} \dots\dots(7.7)$$

VIII.3.3.2 Esfuerzo por caso térmico σ_T

El esfuerzo térmico está relacionado con el coeficiente de expansión térmica, α , de los materiales y con el gradiente térmico bajo el que sea sometido el sistema. El gradiente que se uso fue de $35[^\circ\text{C}]$ de $-10[^\circ\text{C}]$ a $25[^\circ\text{C}]$. Se encontró en todos los casos es que este esfuerzo esta en proporción con el esfuerzo combinado, los valores con los que se trabajaron son los que entrego el análisis FEA en el caso de carga combinado, la proporción que se cumple en todos los casos es:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_C}{0.998} \dots\dots(7.8)$$

Como se puede apreciar de esta ecuación, el σ_T es el que más influye en nuestro sistema. Es mayor aún que el esfuerzo combinado y de hecho sacrificando un poco el porcentaje de error, podemos decir que son iguales, los esfuerzos por efecto gravitatorio son del orden de 1×10^4 [Pa] y los térmicos del orden 1×10^6 [Pa].

Por otro lado, la deformación térmica mantiene la misma relación con la deformación total que los esfuerzos, no así los desplazamientos.

$$\varepsilon_T = \frac{\varepsilon_C}{0.998} \dots\dots(7.9)$$

VIII.3.3.3 Esfuerzo caso combinado σ_C

Este esfuerzo combina el efecto de la gravedad y del gradiente térmico bajo el que es sometido el sistema Celda-SR-lente. Los desplazamientos máximos permisibles, están dados por el presupuesto de error del instrumento.

Sabemos que los desplazamientos se dan por un cambio de posición de los nodos, este cambio de posición es generado por la expansión térmica y la gravedad, así que tenemos que para nuestros nodos de interés, la longitud inicial, l_i , será el radio de la Lente y_c y la longitud final, l_f , un porcentaje de la longitud inicial. Ahora bien este valor es muy importante porque es la base para poder obtener los esfuerzos que se generen. Por ejemplo, si la longitud inicial es $y_c = 0.06599$ [m] y el desplazamiento máximo permisible fuera de 10 [μm], resulta que:

$$\begin{aligned} l_f &= l_i + \Delta U \\ l_f &= 0.06599 + 0.000001 \\ l_f &= 0.065991 = 1.00015l_i \end{aligned}$$

Conociendo este cambio de longitud, se calculan el desplazamiento de los nodos y con este dato podemos calcular la deformación combinada ϵ como en la ecuación (6.4) que aplicada a nuestro método queda como:

$$\epsilon_c = \frac{l_f - l_i}{l_i} = \frac{\Delta U_c}{y_c} \dots\dots(6.4b)$$

En similitud con el caso gravitatorio, las deformaciones están asociadas con el espesor, pero no puede ser la misma constante k_1 , pues que esta no considera el gradiente de temperatura. La constante k_5 se propuso con esta finalidad, con ella podemos calcular la parte de los esfuerzos causado por cuestiones geométricas.

$$k_5 = (v_M / v_v) \cdot \left(\frac{e_s (e_s - e)}{r^2 \cdot y_c} \right)^{-1/2}$$

Análisis Dimensional(7.10)

$$[1] = ([1]/[1]) \cdot \left(\frac{m^2}{m^2} \right)^{-1/2}$$

Donde e_s es el espesor mayor de la lente, que pasa por el vértice. La variable e es el espesor del SR, el factor r es otra constante exFExperimental, que se encontró con 8 iteraciones para cada vidrio.

Ahora tenemos que calcular la parte de los esfuerzos causada por el gradiente térmico, para ello nos referimos a la literatura, referencia 46 (Yoder), que presenta una constante que une la propiedades térmicas de dos materiales, al adoptarla se deja el nombre que tiene y esta viene a completar nuestra numeración, k_4 .

$$k_4 = \frac{\alpha_M - \alpha_V}{\frac{1}{E_V} + \frac{y_c}{E_M b}}$$

Análisis Dimensional(7.11)

$$\frac{[Pa]}{[^\circ C]} = \frac{1/^\circ C}{\frac{1}{[Pa]} + \frac{[m]}{[Pa \cdot m]}}$$

Aquí debemos hacer una pausa e indicar que el funcionamiento correcto de la parte térmica de nuestro modelo esta limitada para los materiales que presenten un α , que quede dentro del intervalo de 1×10^{-6} a 1×10^{-5} [$1/^\circ C$], esta restricción se encontró con los análisis FEA hechos. De manera que σ_c , es una combinación lineal de los esfuerzos gravitatorio y térmico, así tenemos la expresión siguiente

$$\sigma_c = \frac{k_5 \epsilon_c}{k_2} + k_4 \Delta T \dots\dots(7.12)$$

Por otro lado, σ_c , es una variable que se va a proponer, sabemos que debe ser menor a 3.4 [MPa] para no generar birrefringencia, sin embargo, con los análisis se noto que el esfuerzo que se genera

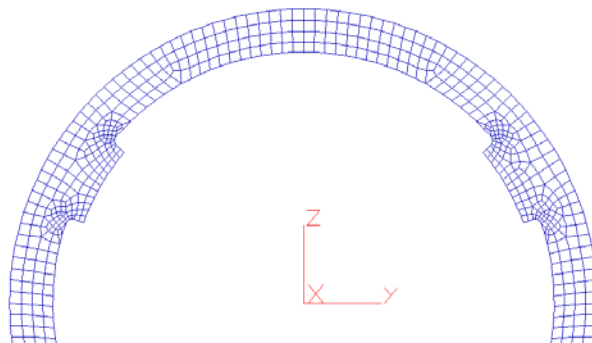
en las tres zonas de contacto, disminuye radialmente, de manera que cerca del centro el esfuerzo es menor que en la periferia donde están los nodos que nos ocupan. Por ello el esfuerzo en la periferia puede ser mayor a dicho valor, pero cuidando que este debajo de las condiciones de supervivencia para la compresión y que su en disminución radial no rebase los 3.4 [MPa] cerca del centro.

De nuestras ecuaciones podemos obtener, proponiendo el espesor, desplazamiento del efecto combinado y esfuerzo máximo permisible en la periferia, todas las demás variables, no solo el ancho necesario para nuestro soporte radial, que es la que más interesa, sino podremos conocer los efectos de la gravedad y el gradiente por separado.

VIII.4 Aplicación del Modelo Matemático SRLPC con el vidrio S-Bal11

VIII.4.1 Modelo FEA del Singlete AS2 de ESOP0

El modelado de este singlete se hizo partiendo del modelo en 3D de SolidWorks®, en este programa de CAD, se dibujó la lente con las medidas que la óptica del instrumento establece (anexo), el SR y la celda, fueron dibujadas a partir de la lente. El ensamble de las piezas permitió comprobar las zonas de contacto en las interfaces. Se exportaron al ambiente de SUPERDRAWIII® los archivos con extensión (.DXF), que plasman la silueta del sólido en 2 dimensiones, a partir de estas siluetas se generaron de nuevo los sólidos, permitiendo manipular la calidad de mallado de la pieza en cuestión.



Aprovechando la facilidad de juntar dos piezas en este ambiente se hizo de nuevo el ensamble, pero esta vez el sólido ya no estaba formada por las tres piezas, sino por lo elementos finitos con una buena distribución de los mismos. Una vez terminado, se exporta a Fempro®, utilería de ALGOR® donde se realizan los análisis.

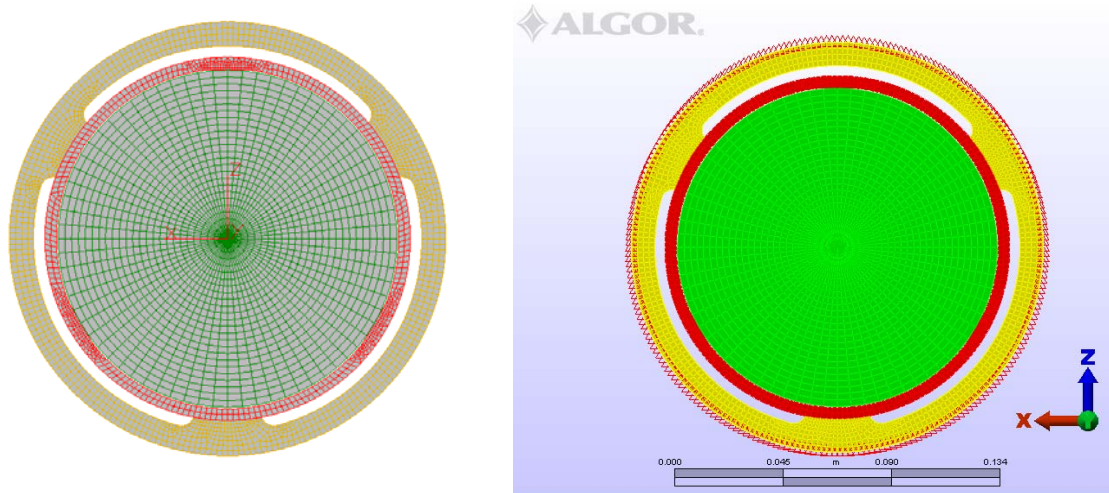


Fig. 8.3 Izquierda Modelo en SUPERDRAWIII®. Derecha el mismo modelo importado a Fempro®

Para las condiciones bajo las que se sometieron al sistema, se tomaron en cuenta las que establecen los requerimientos; para la gravedad $9.81456 \text{ [m/s}^2\text{]}$ y el gradiente térmico de 35°C . Los materiales fueron, para el vidrio S-BALL11 y para el SR y la celda se usó Aluminio 6061. Y se sometió el sistema a tres casos de carga: gravitatorio, térmico y combinado.

VIII.4.2 Resultados de FEA

Los resultados que nos interesan de los análisis son los desplazamientos, deformaciones y esfuerzos, los tres nodos centrales de contacto de la Lente y del SR, ya que el método de unión predeterminado de ALGOR® es el de pegamento ideal y este fue el que se ocupó, dichos nodos presentarán los valores más altos de esfuerzos, ya que no solo responderán a la carga radial, sino también a una perpendicular debido a la expansión térmica, que simula la fricción. El nodo 43290 es el nodo que se encuentra en la zona de contacto superior y los otros dos; 10544 y 10545, se encuentran en las zonas de contacto inferiores, a continuación se presentan los resultados para los tres casos de carga

Tabla VIII.9: Resultados caso gravitatorio

Nodo	$\Delta U \text{ [}\mu\text{m]}$	$\epsilon \text{ [mm/mm]}$	$\sigma \text{ [kPa]}$
10544	0.335	1.79E-06	118.7
10545	0.335	1.79E-06	118.7
43290	0.347	1.16E-06	77.0

Tabla VIII.10: Resultados caso térmico

Nodo	$\Delta U \text{ [}\mu\text{m]}$	$\epsilon \text{ [mm/mm]}$	$\sigma \text{ [MPa]}$
10544	16.86	.249E-03	16.47
10545	16.80	.249E-03	16.48
43290	17.17	.249E-03	16.50

Tabla VIII.11: Resultados caso combinado

Nodo	$\Delta U \text{ [}\mu\text{m]}$	$\epsilon \text{ [mm/mm]}$	$\sigma \text{ [MPa]}$
10544	17.02	.248E-03	16.44
10545	16.96	.248E-03	16.45
43290	16.83	.250E-03	16.56

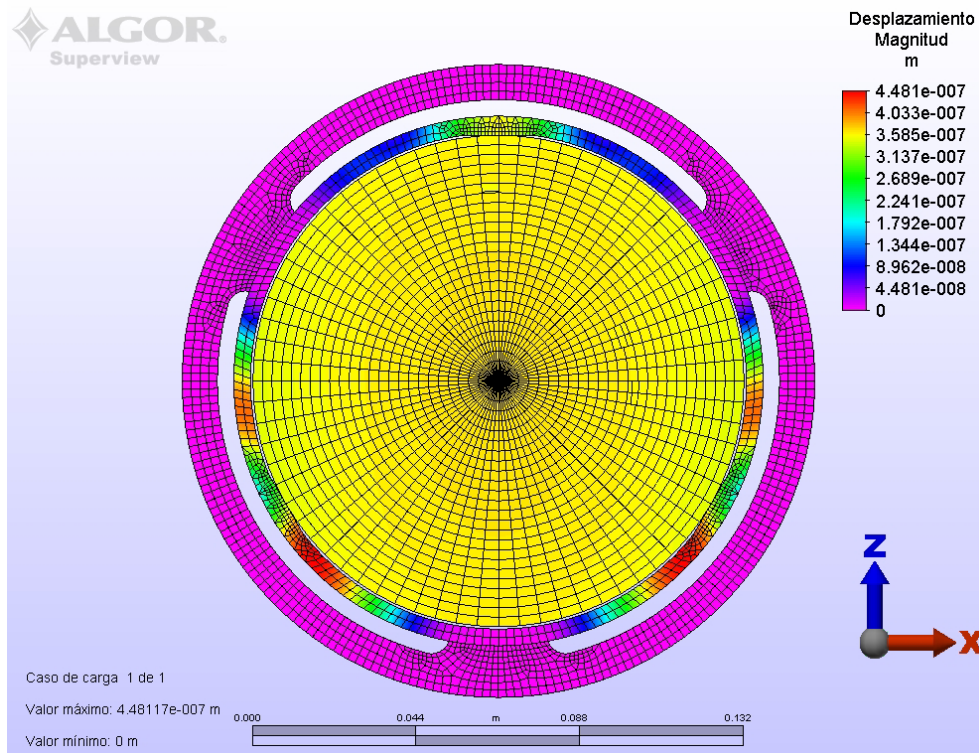


Fig. 8.4 Distribución de desplazamientos caso gravitatorio

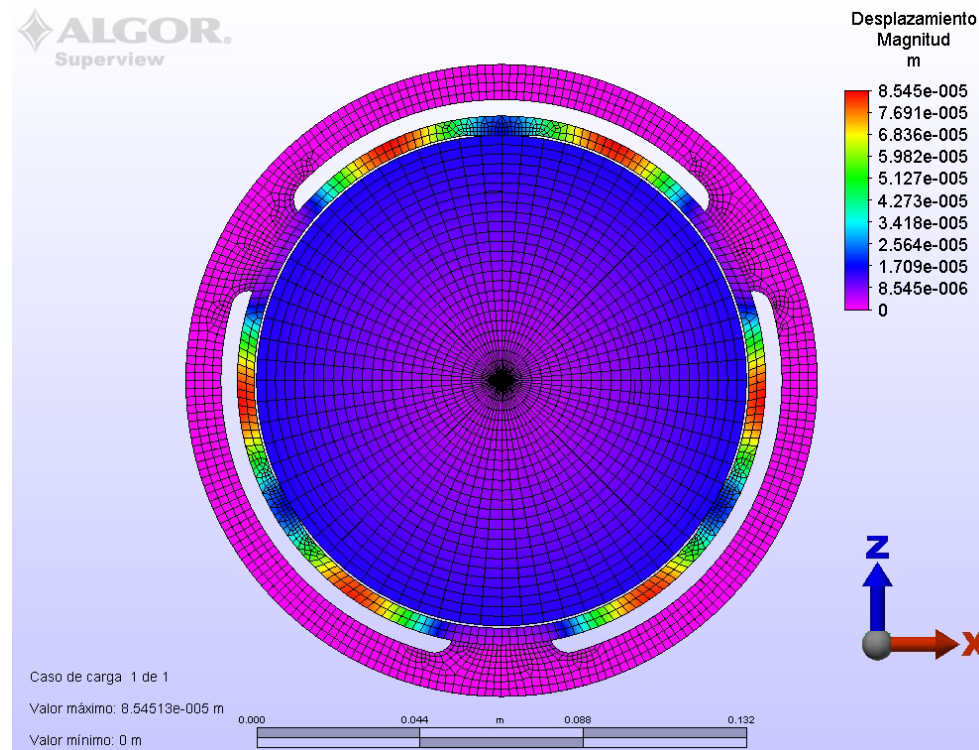


Fig. 8.5 Distribución de desplazamientos caso térmico

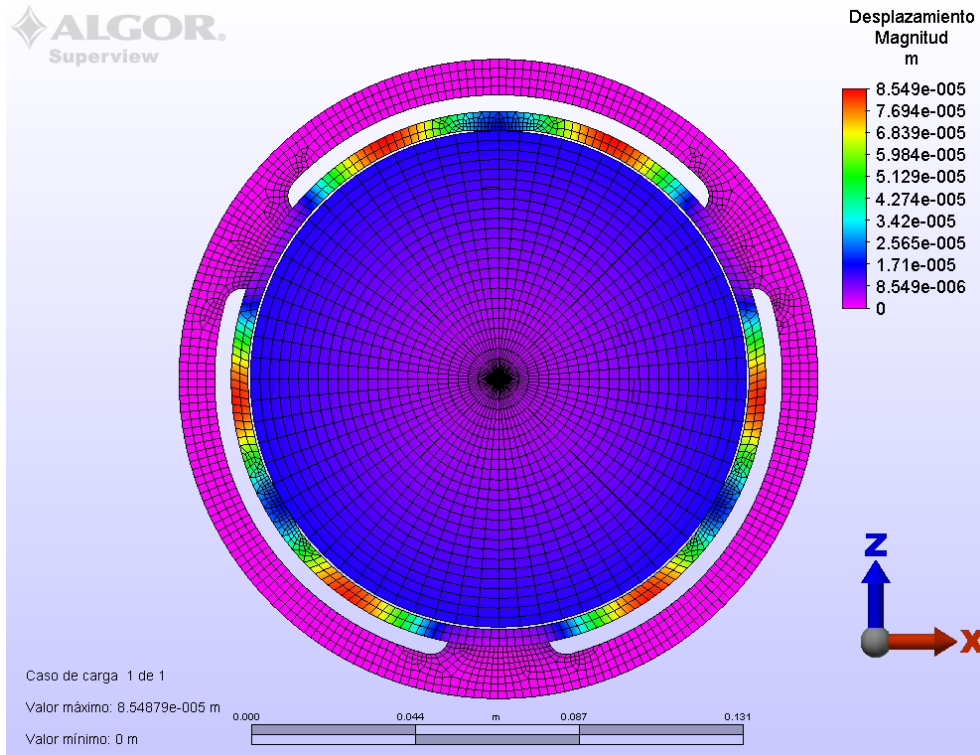


Fig. 8.6 Distribución de desplazamientos caso combinado

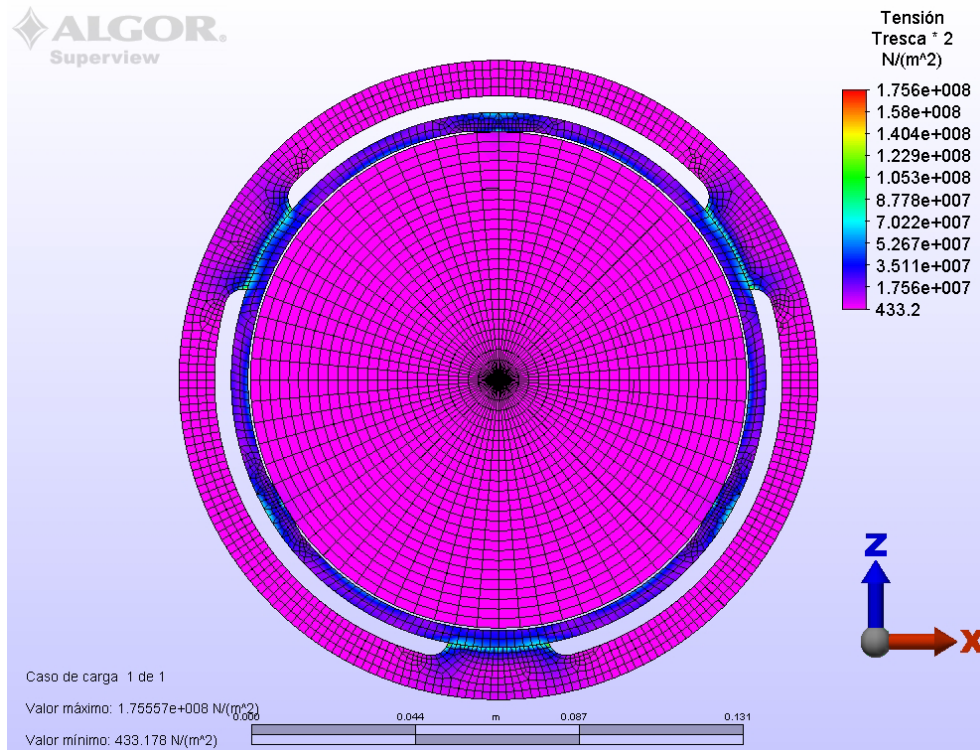


Fig. 8.7 Distribución de esfuerzos caso combinado

VIII.4.3 Aplicación de SRLPC al Singlete AS2 de ESOPPO

El primer paso para la aplicación del método es conocer las propiedades de los materiales, las medidas geométricas de la Lente y del SR

Tabla VIII.12: Propiedades de los Materiales

MATERIAL	E	G	ρ	ν	α
	[GPa]	[GPa]	[Kg/m ³]	[1]	[1/°C]
S-BAL11	81.9	33.1	3020	0.237	6.60E-06
AL6061	68.9	26	2700	0.33	2.36E-05

Para la lente: $y_c = 0.06599$ [m]
 $e_s = 0.02599$ [m]

Para el SR: $b = 0.012879$ [m]
 $e = 0.0045$ [m]

Ahora hay que calcular las constantes exFErimenales desde k_1 hasta k_5 , en este caso, k_1 , depende del material y su valor de la Tabla VIII.8 es 0.3435 para este vidrio

Para k_2 tenemos:

$$k_2 = \frac{(1-\nu_V^2)}{E_V} + \frac{(1-\nu_M^2)}{E_M}$$

$$k_2 = \frac{(1-0.237^2)}{(81.9 \cdot 10^9)} + \frac{(1-0.33^2)}{(68.9 \cdot 10^9)}$$

$$k_2 = (2.45 \cdot 10^{-11}) [Pa^{-1}]$$

k_3 se calcula como:

$$k_3 = \sqrt{\frac{y_c}{5.284 \cdot e}}$$

$$k_3 = \sqrt{\frac{0.06599}{5.284 \cdot 0.0045}} = 1.66591 [1]$$

k_4 queda:

$$k_4 = \frac{\alpha_M - \alpha_V}{\frac{1}{E_V} + \frac{y_c}{E_M b}}$$

$$k_4 = \frac{(2.36 \cdot 10^{-5}) - (6.6 \cdot 10^{-6})}{\frac{1}{(81.9 \cdot 10^9)} + \frac{0.06599}{(68.9 \cdot 10^9) \cdot 0.012879}}$$

$$k_4 = 196358.331 [Pa/°C]$$

Y por último k_5 :

$$k_5 = (\nu_M / \nu_v) \cdot \left(\frac{e_s(e_s - e)}{r^2 \cdot y_c} \right)^{-1/2}$$

$$k_5 = (0.33 / 0.237) \cdot \left(\frac{0.02599(0.02599 - 0.0045)}{0.05439^2 \cdot 0.06599} \right)^{-1/2} = 0.82313 \text{ [1]}$$

Una vez que ya conocemos el valor de nuestras constantes podemos obtener los valores de las deformaciones, y esfuerzos para los tres casos de carga. En esta ocasión utilizaremos los desplazamientos que se obtuvieron en el nodo 10544 en los análisis de elementos finitos, para validar el modelo, y calcularemos los esfuerzos en términos de las demás variables, recordemos que el porcentaje de diferencia no debe sobrepasar el 13%. Posteriormente se presentarán los resultados para los tres nodos

1. Caso Gravitatorio:

De la ecuación (7.3)

$$\varepsilon_G = \frac{k_1 \Delta U_G}{y_c} = \frac{(0.3435 \text{ [1]}) (0.335 \cdot 10^{-6} \text{ [m]})}{0.06599 \text{ [m]}} = 1.74 \cdot 10^{-6} \text{ [1]}$$

De la ecuación (7.7)

$$\sigma_G = \frac{k_3 \varepsilon_G}{k_2} = \frac{(1.66591 \text{ [1]}) \cdot (1.74 \cdot 10^{-6} \text{ [1]})}{(2.45 \cdot 10^{-11} \text{ [Pa}^{-1}\text{]})} = 11.87 \cdot 10^4 \text{ [Pa]}$$

2. Caso Térmico:

Como se mencionó en el punto VIII.4.3.2, los valores con los que trabajaremos en las ecuaciones (7.9) y (7.10) son los resultados del análisis FEA para el caso combinado, que son para la deformación $\varepsilon = 0.248 \times 10^{-3} \text{ [1]}$ y $\sigma = 16.45 \times 10^6 \text{ [Pa]}$

De la ecuación (7.8)

$$\sigma_T = \frac{\sigma_c}{0.998} = \frac{(16.45 \cdot 10^6 \text{ [Pa]})}{0.998} = 16.48 \cdot 10^6 \text{ [Pa]}$$

De la ecuación (7.9)

$$\varepsilon_T = \frac{\varepsilon_c}{0.998} = \frac{(0.248 \cdot 10^{-3} \text{ [1]})}{0.998} = 0.249 \cdot 10^{-3} \text{ [1]}$$

3. Caso Combinado:

De la ecuación (6.4)

$$\varepsilon_C = \frac{\Delta U_C}{y_c} = \frac{(16.96 \cdot 10^{-6} \text{ [m]})}{0.06599 \text{ [m]}} = 0.257 \cdot 10^{-3} \text{ [1]}$$

De la ecuación (7.12)

$$\sigma_C = \frac{k_5 \varepsilon_C}{k_2} + k_4 \Delta T$$

$$\sigma_C = \frac{(0.82313 \text{ [1]}) (0.257 \cdot 10^{-3} \text{ [1]})}{(2.45 \cdot 10^{-11} \text{ [Pa}^{-1}\text{]})} + \left(196358.331 \left[\frac{\text{Pa}}{^\circ\text{C}} \right] \right) (35 \text{ [}^\circ\text{C]})$$

$$\sigma_C = 15.52 \cdot 10^6 \text{ [Pa]}$$

VIII.4.4 Comparación de Resultados

De los resultados obtenidos por ambos métodos, se originan las tablas siguientes, donde podemos apreciar el porcentaje de diferencia, en cuanto a los cálculos de los 3 nodos de interés, para los diferentes casos de carga. El subíndice “f” se refiere al resultado del modelo matemático y el subíndice “a” al del análisis de Elemento Finito

- **Caso Gravitatorio**

Tabla VIII.13: Comparación de los resultados para el caso gravitatorio

Nodo	Número	Δu_a	ϵ_f	ϵ_a	%d	σ_f	σ_a	%d
		[μm]	[mm/mm]	[mm/mm]	[%]	[kPa]	[kPa]	[%]
1	10544	0.335	1.74E-06	1.79E-06	2.79	118.7	11.87	0.00
2	10545	0.335	1.74E-06	1.79E-06	2.86	118.6	11.87	0.06
3	43290	0.347	1.80E-06	1.16E-06	55.14	122.9	7.70	59.61

De aquí podemos apreciar que el modelo matemático es muy sensible en cuanto a los cambios de desplazamientos. Dos de los tres nodos con valores más altos de deformaciones y esfuerzos presentan un muy buen comportamiento, lo que hace que estos resultados sean aceptables. Esto se presenta debido a que en dichos nodos, los efectos se suman, mientras que en el nodo restante, que de hecho es el superior, los efectos se contrarrestan, mostrando un comportamiento fuera de lo esperado.

- **Caso Térmico**

Tabla VIII.14: Comparación de los resultados para el caso térmico

Nodo	Número	Δu_a	ϵ_f	ϵ_a	%d	σ_f	σ_a	%d
		[μm]	[mm/mm]	[mm/mm]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]
1	10544	16.86	.249E-03	.249E-03	0.09	16.48	16.47	0.09
2	10545	16.80	.249E-03	.249E-03	0.01	16.48	16.48	0.01
3	43290	17.17	.251E-03	.249E-03	0.55	16.59	16.50	0.55

En este caso, podemos apreciar el efecto de las ecuaciones (7.9) y (7.10), los porcentajes de diferencia se mantienen constantes para deformaciones y esfuerzos. De hacerse los cálculos se observa que los valores son ligeramente más grandes que los del caso combinado.

- **Caso Combinado**

Tabla VIII.15: Comparación de los resultados para el caso combinado

Nodo	Número	Δu_a	ϵ_f	ϵ_a	%d	σ_f	σ_a	%d
		[μm]	[mm/mm]	[mm/mm]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]
1	10544	17.02	.258E-03	.248E-03	3.85	15.55	16.44	5.42
2	10545	16.96	.257E-03	.248E-03	3.45	15.52	16.45	5.64
3	43290	16.83	.255E-03	.250E-03	2.01	15.46	16.56	6.63

Este es el caso más interesante para nuestros propósitos. Respecto de las deformaciones las diferencias son menores que los esfuerzos, esto se debe a que como se menciono anteriormente, elementos finitos calcula primero los desplazamientos, en seguida deformaciones y al final esfuerzos, repercutiendo todos los errores de cálculo y aproximación en estos últimos. Pero como se vera en el apartado siguiente el modelo matemático tiende a reducir los errores en los esfuerzos y no en las deformaciones. Siendo este un caso especial.

VIII.4.5 Variaciones

En los siguientes casos se presenta solo el esfuerzo combinado por ser el de mayor interés, las condiciones bajo las cuales se hicieron los análisis y cálculos se describen en cada uno de los puntos siguientes.

VIII.4.5.1 Gradiente térmico

Esta variación se basa en un cambio del gradiente térmico, de 35 [°C] a 30 [°C], desde -10[°C] hasta 20[°C], con el fin de comprobar los valores que arroja el segundo sumando de la ecuación (7.13)

- Resultados de FEA

Tabla VIII.16: Resultados caso combinado, gradiente 30[°C]

Nodo	Número	Δu [μm]	ϵ [mm/mm]	σ [MPa]
1	10544	14.61	.213E-03	14.09
2	10545	14.56	.213E-03	14.10
3	43290	14.38	.214E-03	14.20

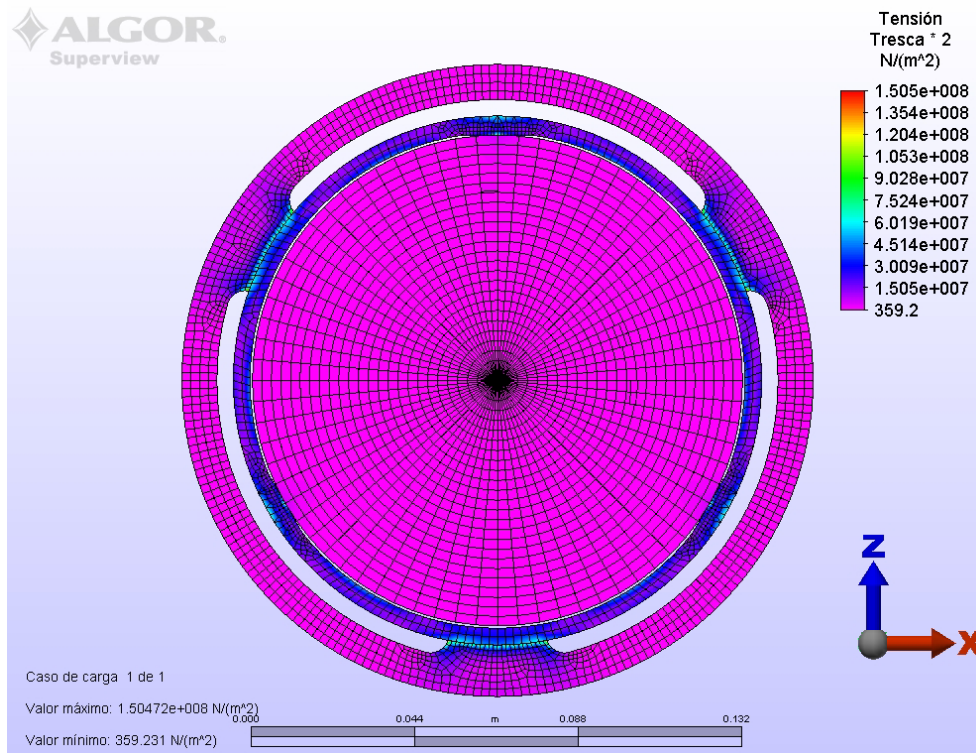


Fig. 8.8 Distribución de esfuerzos para caso combinado con $\Delta T = 30$ [°C]

- *Modelo Matemático SRLPC*

Las constantes k_2 , k_4 y k_5 no sufren modificación alguna, quedando igual que en el punto VIII.5.3, por otro lado como es de esperarse los desplazamientos son menores, de ser 16.96[μm] pasan a ser 14.61[μm], para el nodo 10544, con este valor se calcula la deformación y consecuentemente el esfuerzo.

De la ecuación (6.4)

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta U_c}{y_c} = \frac{(14.61 \cdot 10^{-6} [m])}{0.06599 [m]} = 0.221 \cdot 10^{-3} [1]$$

De la ecuación (7.12)

$$\sigma_c = \frac{k_5 \varepsilon_c}{k_2} + k_4 \Delta T$$

$$\sigma_c = \frac{(0.82313 [1])(0.221 \cdot 10^{-3} [1])}{(2.45 \cdot 10^{-11} [Pa])} + \left(196358.331 \left[\frac{Pa}{^\circ C}\right]\right)(30 [^\circ C])$$

$$\sigma_c = 13.34 \cdot 10^6 [Pa]$$

- *Comparación de resultados*

De nuevo el subíndice “f” se refiere al resultado del modelo matemático y el subíndice “a” al análisis de Elemento Finito. En la tabla se muestran los resultados para los nodos restantes con el modelo.

Tabla VIII.17: Comparación de los resultados para el caso combinado con gradiente de 30[$^\circ\text{C}$]

Nodo	Número	Δu_a	ε_f	ε_a	%d	σ_f	σ_a	%d
		[μm]	[mm/mm]	[mm/mm]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]
1	10544	14.61	.221E-03	.213E-03	4.05	13.34	14.09	5.30
2	10545	14.56	.221E-03	.213E-03	3.64	13.32	14.10	5.53
3	43290	14.38	.218E-03	.214E-03	1.61	13.22	14.20	6.86

Como podemos notar, las diferencias obtenidas son casi iguales a las del punto VIII.5.3, por lo que concluimos que la elección de k_4 en nuestra ecuación (7.13) para calcular el esfuerzo térmico fue acertada, ya que se adecua muy bien a esta primera variación. Cabe destacar que a todas las variaciones de dimensiones del SR y de la Lente, se les realizó esta prueba y en los resultados obtenidos, se observa el mismo comportamiento, de que los porcentajes de diferencia se mantienen en el mismo intervalo en el análisis con gradiente de 35 [$^\circ\text{C}$] y 30 [$^\circ\text{C}$].

VIII.4.5.2 Dimensiones del SR

En capítulos anteriores se ha hablado del impacto de este parámetro al sistema. Los desplazamientos y esfuerzos son directamente proporcionales al espesor del SR, y el ancho afecta por aumentar o disminuir la longitud de las zonas de contacto. Por ello se consideró hacer este cambio, la geometría de la lente no cambia, mientras que el ancho y espesor del SR si lo hacen.

El ancho, b , del SR quedo en 0.008 [m] y el espesor, e , en 0.00491 [m], para lograr estas medidas, se dibujaron de nuevo las tres piezas, como se dijo, la lente no cambió en geometría, solo se cambió la medida de los elementos finitos que al fin la conformaron, para ajustar el ancho del SR, este ajuste hace que el número de los nodos centrales cambie.

- *Resultados de FEA*

Tabla VIII.18: Resultados caso combinado con cambio de dimensiones del SR

Nodo	Número	Δu [μm]	ε [mm/mm]	σ [MPa]
1	14303	17.09	.214E-03	14.20
2	14304	17.09	.214E-03	14.19
3	56966	16.51	.216E-03	14.28

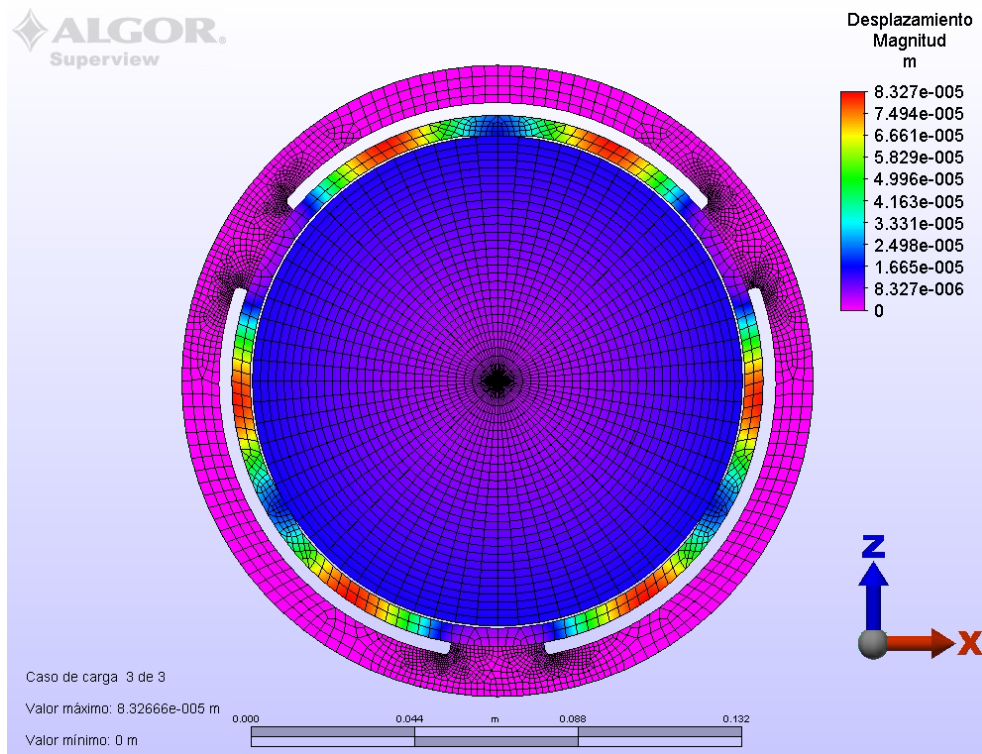


Fig. 8.9 Distribución de desplazamientos para caso combinado con cambio en dimensiones de SR

Modelo Matemático SRLPC

En esta ocasión las constantes k_4 y k_5 si cambian, de manera que hay que calcularlas nuevamente

k_4 queda:

$$k_4 = \frac{\alpha_M - \alpha_V}{\frac{1}{E_V} + \frac{y_c}{E_M b}}$$

$$k_4 = \frac{(2.36 \cdot 10^{-5}) - (6.6 \cdot 10^{-6})}{\frac{1}{(81.9 \cdot 10^9)} + \frac{0.06599}{(68.9 \cdot 10^9) \cdot 0.008}} = 128855.604 \text{ [Pa/}^\circ\text{C]}$$

Y por último k_5 :

$$k_5 = (v_M / v_v) \cdot \left(\frac{e_s(e_s - e)}{r^2 \cdot y_c} \right)^{-1/2}$$

$$k_5 = (0.33 / 0.237) \cdot \left(\frac{0.02599(0.02599 - 0.00491)}{0.05439^2 \cdot 0.06599} \right)^{-1/2} = 0.83112 \text{ [1]}$$

Con estas constantes y un desplazamiento de 17.09 [μm], calcularemos las deformaciones y los esfuerzos

De la ecuación (6.4)

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta U_c}{y_c} = \frac{(17.09 \cdot 10^{-6} \text{ [m]})}{0.06599 \text{ [m]}} = 0.259 \cdot 10^{-3} \text{ [1]}$$

De la ecuación (7.12)

$$\sigma_c = \frac{k_5 \varepsilon_c}{k_2} + k_4 \Delta T$$

$$\sigma_c = \frac{(0.83112 \text{ [1]}) (0.259 \cdot 10^{-3} \text{ [1]})}{(2.45 \cdot 10^{-11} \text{ [Pa]})} + \left(128855.604 \left[\frac{\text{Pa}}{^\circ\text{C}} \right] \right) (35 \text{ [}^\circ\text{C]})$$

$$\sigma_c = 13.31 \cdot 10^6 \text{ [Pa]}$$

- *Comparación de resultados*

Para llenar la tabla es necesario calcular el esfuerzo y deformación de los nodos faltantes, los subíndices “f” y “a” ya son conocidos, en ella podemos apreciar lo que se comentó en la variación del gradiente térmico, en cuanto a que el modelo matemático SRLPC, ajusta los valores de esfuerzos más que los de las deformaciones, porcentajes de diferencia del 20% en deformaciones y 6% en esfuerzos refleja este comportamiento

Tabla VIII.19: Comparación de los resultados para el caso combinado con cambio de dimensiones del SR

Nodo	Número	Δu_a	ε_f	ε_a	%d	σ_f	σ_a	%d
		[μm]	[mm/mm]	[mm/mm]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]
1	14303	17.09	.259E-03	.214E-03	20.76	13.31	14.20	6.25
2	14304	17.09	.259E-03	.214E-03	20.81	13.31	14.19	6.22
3	56966	16.51	.250E-03	.216E-03	16.05	13.01	14.28	8.85

VIII.4.5.3 Dimensiones de la lente

Este es el último parámetro que se puede variar, bajo el cual el modelo SRLPC funciona, los radios de las lentes son diferentes para todos los vidrios de ESOPO, por ello es necesario que el modelo funcione correctamente.

El radio de la lente se cambió de $y_c = 0.06599 \text{ [m]}$ que media originalmente a $y_c = 0.085 \text{ [m]}$ y el espesor mayor de la Lente, e_s a 0.028 [m] . El SR que se usó para este lente tiene de ancho, $b = 0.01$

[m] y de espesor, $e = 0.0055$ [m]. De nuevo la numeración de los nodos cambia por que se dibujó el modelo nuevamente.

- Resultados de FEA

Tabla VIII.20: Resultados caso combinado con cambio de dimensiones de la Lente

Nodo	Número	Δu [μm]	ε [mm/mm]	σ [MPa]
1	10925	22.32	0.220E-03	14.54
2	10926	22.32	0.220E-03	14.54
3	58714	21.58	0.221E-03	14.63

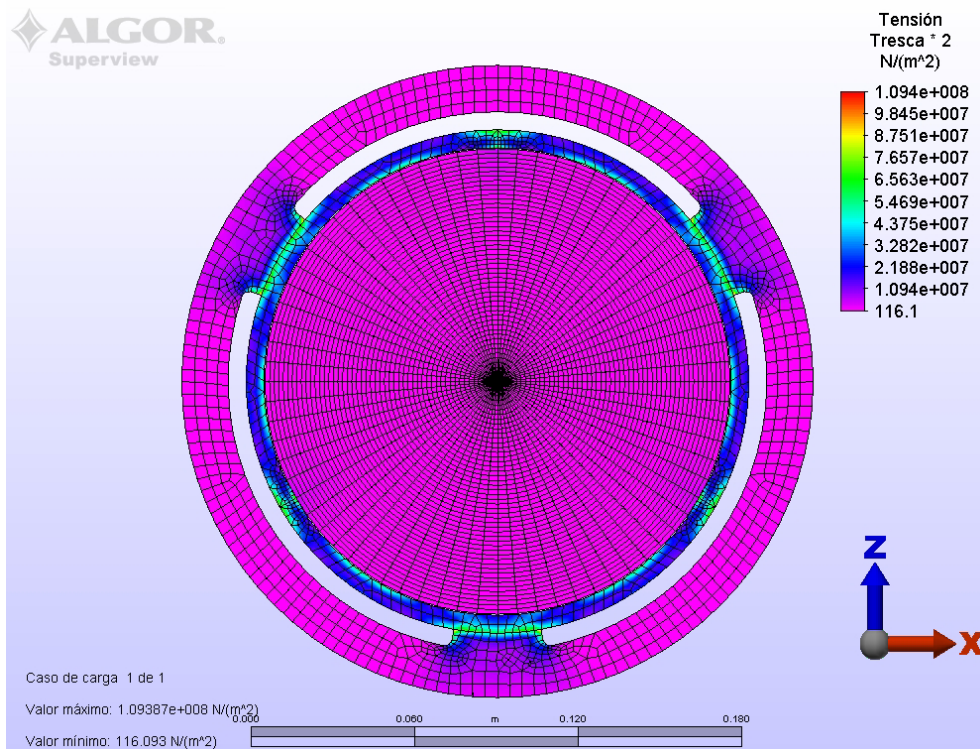


Fig. 8.10 Distribución de esfuerzos para caso combinado con cambio en dimensiones de la Lente. Se muestra el modelo desplazado

- Modelo Matemático SRLPC

Nuevamente las constantes k_4 y k_5 sufren cambios;

k_4 queda:

$$k_4 = \frac{\alpha_M - \alpha_V}{\frac{1}{E_V} + \frac{y_c}{E_M b}}$$

$$k_4 = \frac{(2.36 \cdot 10^{-5}) - (6.6 \cdot 10^{-6})}{\frac{1}{(81.9 \cdot 10^9)} + \frac{0.085}{(68.9 \cdot 10^9) \cdot 0.01}} = 125389.805 \text{ [Pa/}^\circ\text{C]}$$

Y para k_5 :

$$k_5 = r \cdot (\nu_M / \nu_v) \cdot \left(\frac{e_s(e_s - e)}{y_c} \right)^{-1/2}$$

$$k_5 = 0.05439 \cdot (0.33 / 0.237) \cdot \left(\frac{0.028(0.028 - 0.0055)}{0.085} \right)^{-1/2} = 0.90006 [1]$$

Con un desplazamiento de 22.32 [μm], tenemos que;

De la ecuación (6.4)

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta U_c}{y_c} = \frac{(22.32 \cdot 10^{-6} [m])}{0.085 [m]} = 0.263 \cdot 10^{-3} [1]$$

De la ecuación (7.12)

$$\sigma_c = \frac{k_5 \varepsilon_c}{k_2} + k_4 \Delta T$$

$$\sigma_c = \frac{(0.90006 [1])(0.263 \cdot 10^{-3} [1])}{(2.45 \cdot 10^{-11} [Pa])} + \left(125389.805 \left[\frac{Pa}{^\circ C} \right] \right) (35 [^\circ C])$$

$$\sigma_c = 14.05 \cdot 10^6 [Pa]$$

- *Comparación de resultados*

Tabla VIII.21: Comparación de los resultados para el caso combinado con cambio de dimensiones de la lente

Nodo	Número	Δu_a	ε_f	ε_a	%d	σ_f	σ_a	%d
		[μm]	[mm/mm]	[mm/mm]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]
1	10925	22.32	0.263E-03	0.220E-03	19.53	14.05	14.54	3.38
2	10926	22.32	0.263E-03	0.220E-03	19.53	14.05	14.54	3.39
3	58714	21.58	0.254E-03	0.221E-03	14.90	13.73	14.63	6.14

La tendencia a reducir el porcentaje de diferencia de los esfuerzos por parte del modelo se nota en esta comparación una vez más.

VIII.5 Interacción con el Presupuesto de Error

El presupuesto de error, indica los valores máximos permisibles de desplazamientos de cada una de las Lentes. Como ya mencionamos antes, este desplazamiento disminuye la calidad de imagen, pues el camino óptico se ve afectado y cada pixel del CCD no captara la cantidad de luz que fue calculada.

Las relaciones empleadas en el modelo matemático SRLPC permiten su implementación en una hoja de cálculo, con el fin de que el usuario, sólo capture las propiedades del vidrio empleado en el la Lente en cuestión y las condiciones de frontera que se deseen, y pueda calcular las características geométricas del SR, recordemos que se calcula el ancho en función del espesor, o el

espesor en términos del ancho. A continuación se muestra un ejemplo de la captura y cálculo de las variables, para el la Lente AS2. $y_c = 0.06599$ [m], $e = 0.02599$ [m] y $a = 0.014311$ [m]. Este lente será fabricado en el vidrio PBL26Y⁴⁹ cuyas propiedades se muestran a continuación

MATERIAL	E	G	ρ	ν	CET
	[GPa]	[GPa]	[kg/m ³]	[1]	[1/°C]
PBL26Y	58.9	24.2	3100	0.22	8.90E-06

Ocuparemos un desplazamiento de 10 [μm], un esfuerzo de 10 [MPa] y un gradiente térmico de 35[°C] como condiciones de frontera. Es más fácil proponer el ancho del SR b , que el espesor e , debido a que se recomienda que el ancho de SR sea no menor al 90%¹¹ del espesor menor de la Lente a , porque cuanto menor sea la relación, el SR se irá convirtiendo en un concentrador de esfuerzos y ese cálculo no es el objetivo del modelo. El 90% del ancho de la lente es:

$$b = 0.9a = 0.9(0.014311[m]) = 0.012879[m]$$

Por ello propondremos $b = 0.013$ [m].

Propiedades metal		Propiedades vidrio	
E_m [Gpa]	68.9	E_v [Gpa]	58.9
G_m [Gpa]	26	G_v [Gpa]	24.2
ρ_m [Kg/m3]	2700	ρ_v [Kg/m3]	3100
ν_m [1]	0.33	ν_v [1]	0.22
α_m [1/°C]	23.60E-06	α_v [1/°C]	08.90E-06
		k_1	0.4555
		$r@k5$	0.04128
Propiedades Lente		Propiedades SR	
y_c [m]	0.065990	b [m]	0.013
$e >$ [m]	0.025990	e [m]	0.011863
a [m]	0.014311		
Constantes exFERimentales		Condiciones de frontera	
k_2 [Pa-1]	29.09E-12	ΔU [m]	10.00E-06
k_4 [1]	162158.3162	σ [Mpa]	10.00E+06
k_3 [1]	1.026021592	ϵ [1]	01.52E-04
k_5 [1]	0.830128204	ΔT [1/°C]	35
		propuesto	
		resultado	

En la hoja de cálculo primero se definen las propiedades del vidrio, las del metal no será necesario cambiarlas en ningún momento; recordemos que el metal es el mismo en todos los casos Aluminio 6061-0, las propiedades de la Lente, condiciones de frontera y el dato más importante es el valor de b .

El primer cálculo en obtenerse es el de las constantes exFERimentales, k_2 y k_4 , porque la primera sólo depende de las propiedades y la segunda depende b . k_3 y k_5 , son calculadas al final una vez que se obtenga el valor de e .

El valor e que arroja el modelo matemático es de 0.011863 [m], poco más de un centímetro, este valor es

factible de manufacturar, gracias a las tolerancias que ofrece el maquinado en CNC, en caso de que se considere que queda fuera del espacio que puede albergar la celda, es posible buscar un valor menor de e , ya que se cuenta con la contraparte de la hoja de cálculo, donde se puede proponer e y calcular b .

En este punto lo que se debe de hacer es considerar disminuir el valor que arrojó el primer cálculo para e . Cuidando que b no sea en ningún caso mayor que a , ya que en realidad la máxima relación

¹¹ Este valor se propone a partir de los análisis FEA realizados para este trabajo. Pues se vio que en los casos que fue menor, el porcentaje de diferencia entre los valores de FEA y el Modelo aumentaba drásticamente y quedaban fuera del 13%.

es cuando $b = a$, porque lo que mide b al fin de cuentas es el ancho de contacto entre la Lente y el SR. A continuación se muestra el cálculo de ajuste para reducir e .

Propiedades metal		Propiedades vidrio	
E_m [Gpa]	68.9	E_v [Gpa]	58.9
G_m [Gpa]	26	G_v [Gpa]	24.2
ρ_m [Kg/m3]	2700	ρ_v [Kg/m3]	3100
ν_m [1]	0.33	ν_v [1]	0.22
α_m [1/°C]	23.60E-06	α_v [1/°C]	08.90E-06
		$k1$	0.4555
		$r@k5$	0.04128
Propiedades Lente		Propiedades SR	
γ_c [m]	0.065990	b [m]	0.014257
$e>$ [m]	0.025990	e [m]	0.0085
a [m]	0.014311		
Constantes exFERimentales		Condiciones de frontera	
$k2$ [Pa-1]	29.09E-12	ΔU [m]	10.00E-06
$k3$ [1]	1.21213	σ [Mpa]	10.00E+06
$k4$ [1]	174671.4534	ϵ [1]	01.52E-04
$k5$ [1]	0.74606	ΔT [1/°C]	35
		propuesto	
		resultado	

Un valor de e que también funciona con las condiciones dadas es 0.0085 [m]. Como dijimos el valor de b se ve afectado, pero se ve claramente que no sobrepasa el valor de a .

Con este procedimiento es posible calcular el SR óptimo que hará que el sistema cumpla con las restricciones establecidas. La principal ventaja es que ya no se tiene que llevar a cabo el análisis FEA de cada configuración, lo cual nos ahorra tiempo persona y tiempo máquina, con una buena precisión, menor a 13% de diferencia con FEA, que puede ser absorbida por el factor de seguridad del diseño.

IX CONCLUSIONES

Como resultado de este trabajo, se diseñaron los Soportes Radiales para la óptica de los barriles del espectrógrafo ESOPPO, basándose en el diseño existente del instrumento OSIRIS. La mejora se hizo en cuanto manufactura debido a que al eliminar las zonas de contacto exteriores del SR se logró eliminar geometrías complejas y con tolerancias cerradas, para las cuales fue necesario en su momento utilizar maquinado especial encareciendo el producto. Esa modificación permite generar el SR ya sea con torneado, si se decide partir de una barra sólida o con fresado si de una placa plana se trata. Tales procesos de maquinado ofrecen muy buena precisión si se controlan por CNC.

En adición a lo anterior, esa simplificación hace que el SR no se vera sometido a posibles flexiones ocasionadas por la fuerza aplicada en el maquinado, evitando así que se generen geometrías en forma de óvalos del SR, y que no sean funcionales. Aproximando la geometría más a un círculo perfecto, que si cumplirá con los contactos tangenciales y no generará esfuerzos en la Lente innecesarios, o bien que cambien la distribución que conocimos gracias a los análisis FEA realizados.

La caracterización del SR tanto de OSIRIS como el de ESOPPO, permitió comparar los resultados, arrojando como resultado que el diagrama de cuerpo libre de ambas configuraciones es el mismo y sobre todo en los nodos de contacto entre la Lente y el SR que son los que más interesan para este trabajo. Además de conocer como se conjugaban las distintas variables y el efecto que tenían sobre el sistema.

La metodología del análisis PI no fue seguida paso a paso y sólo nos sirvió para el paso de abstracción del fenómeno para determinar las variables que deberían de ser consideradas en el modelo. Y es que, el análisis PI ayuda a establecer relaciones cualitativamente y no cuantitativamente, es decir, con el análisis podemos conocer el tipo de relaciones entre las variables de un fenómeno, pero no cual es la relación y al final hay que buscar la constante de proporcionalidad necesaria. Y por otro lado, ya se conocían algunas de las relaciones como la ecuación 6.8 que relaciona el esfuerzo con la deformación. Por ello no se consideró necesario.

Con el modelo matemático SRLPC se realizaron las mismas pruebas ya con 7 vidrios de los que se ocuparan en ESOPPO, tres quedan fuera por su valor de α porque no cumplen con la restricción que se puso para el coeficiente de expansión térmica α que debe de estar en el intervalo 1×10^{-6} a 1×10^{-5} [$1/^\circ\text{C}$], pero gracias a su inclusión en el estudio permitió tal restricción, algunos de los vidrios como el *S-FPL53* o el *N-PK52A* quedan por encima de este intervalo y la SILICA, queda por debajo.

Con los 4 vidrios restantes las pruebas resultaron exitosas, adecuándose el modelo mejor a unos que otros por las propiedades mecánicas. El modelo SRLPC cumple en el 95% de los casos satisfactoriamente $\%dif < 13$. Recordemos que el modelo está hecho para minimizar el porcentaje de diferencia en los esfuerzos más que en las deformaciones, por ser los primeros los que más interesan. Se aprendió que la elección del mallado es muy importante, ya que si no se tiene una buena malla el análisis FEA presenta problemas de divergencia debido a que se llega a violar algunos principios como el de D’Alambert.

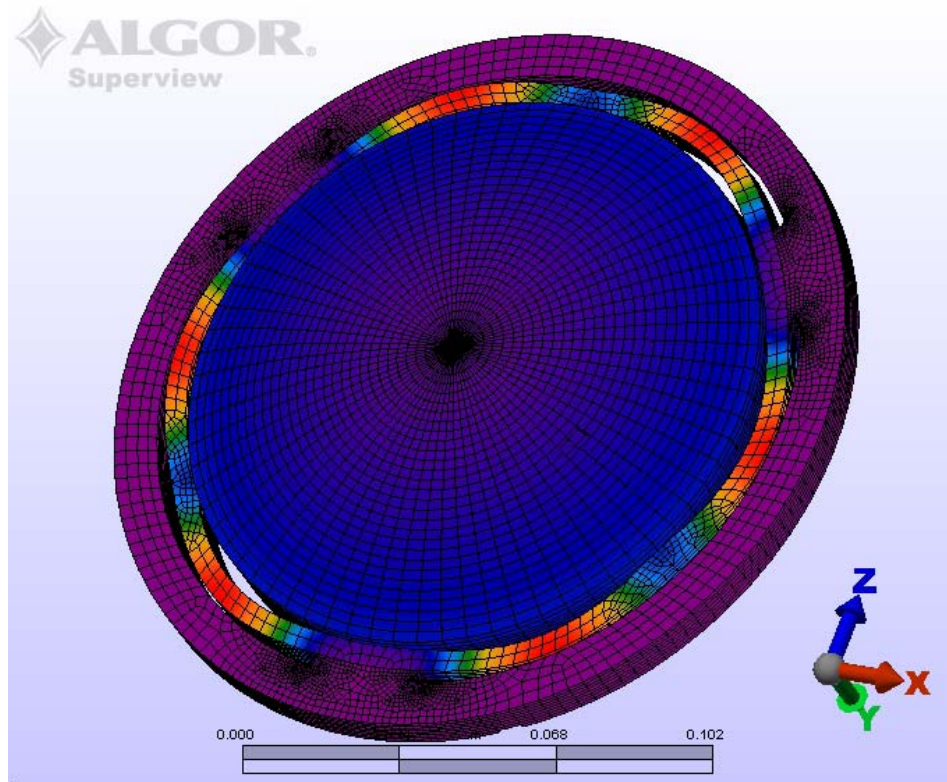
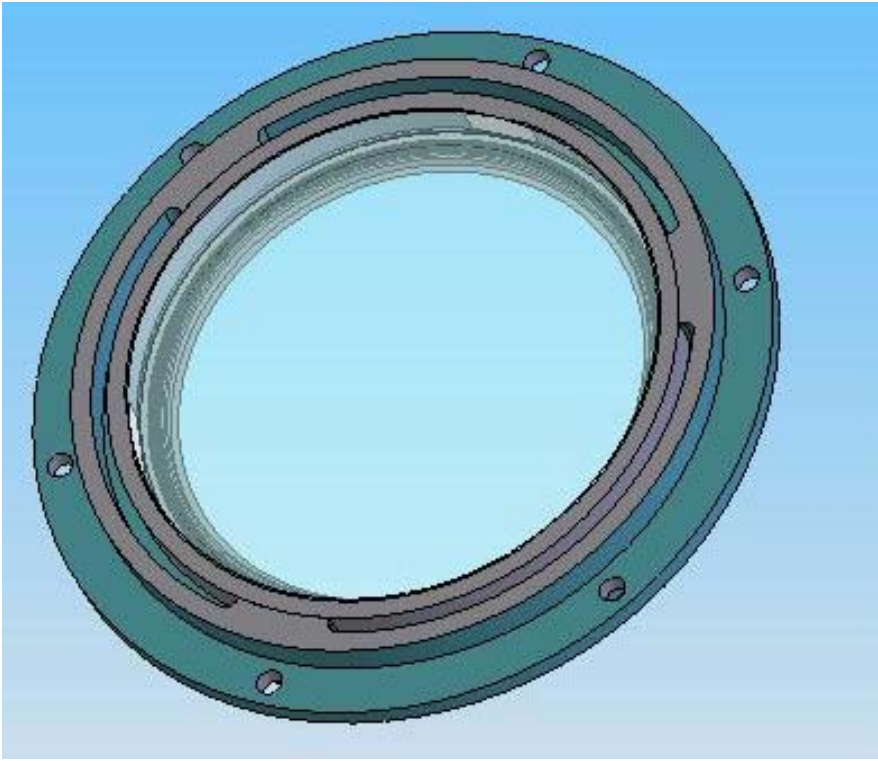
Para tener más pruebas para analizar, a cada prueba de SR y radio de lente, se le aplicó también el cambio en el gradiente térmico y el comportamiento es el conocido, el porcentaje de diferencia queda en el mismo intervalo no importando si es gradiente es de 35 o 30 [°C]. Por lo cual, podemos decir que la adopción de k_4 para la parte correspondiente del esfuerzo térmico fue acertada.

La constante k_2 también funciona correctamente en nuestro modelo, pues se comporta excelentemente para los cambios del vidrio de la lente, con cada cambio de material exceptuando los que ya comentamos que no se tomarían en cuenta; *S-FPL53*, *N-PK52A*, *SILICA*. El modelo funciona exitosamente, con las constantes k_1 , k_3 y k_5 si se trata de un lente plano convexo.

El factor r , es un factor que proviene de la geometría de la lente, por ello se cree que se tienen distintos valores para una geometría diferente de la lente. Tras una prueba se encontró que cambiando el valor de “ $r@k_5$ ” de 0.05439 a 0.035, los resultados para el caso combinado del modelo fueron satisfactorios para una lente cóncava-convexa, inclusive cambiando el gradiente térmico. La formulación de este factor queda como trabajo a futuro, pues debido a las limitaciones en experiencia y conocimiento de óptica no se encontró relación alguna.

Se han pensado en otros dos ajustes que pueden hacerse para los cálculos de b y e en el modelo SRLPC. El primero de ellos consiste en sacrificar el valor dado para σ , como vimos en capítulos anteriores, el modelo matemático se adecuó a los nodos de contacto que se encuentran en la periferia de la Lente y el valor del esfuerzo que se soporta disminuye radialmente, por ello podemos aumentar o disminuir dicho valor. En este caso, el valor mínimo para σ tiene que ser superior al resultado del producto $k_4\Delta T$, que dicta el esfuerzo por el gradiente térmico, por supuesto que no puede ser igual, porque entonces no se estaría tomando en cuenta el efecto de la gravedad y e , no tendría un valor real.

El segundo es en cuanto a los desplazamientos, ya que el desplazamiento de los nodos en esas posiciones está dado por el radio de la Lente y α del material. El presupuesto de error está indicado para el vértice de la lente que es el punto control y por tanto no necesariamente sufrirá el desplazamiento que se usa en el modelo matemático, claro está que, usar el ΔU permitido por el presupuesto nos asegura que dicho nodo control cumpla tal restricción. Pero el análisis de la proporción que se pueden aumentar o disminuir los esfuerzos y/o desplazamientos quedó fuera del alcance de este trabajo.



APÉNDICE A

Requerimientos y Especificaciones de Alto Nivel para el espectrógrafo ESOPO (*ESOPO-CI-A-REAN1*)

1. OBJETIVO

El objetivo de este documento es concentrar la información de los requerimientos y especificaciones de alto nivel instrumento astronómico ESOPO.

2. OBJETIVOS CIENTÍFICOS

Cada uno de los requerimientos y especificaciones de alto nivel contenidos en este documento son fundamentados en los objetivos científicos que se pretenden estudiar con ESOPO (véase ESOPO-CI-A-OCEAN1).

3. REQUERIMIENTOS Y ESPECIFICACIONES DE ALTO NIVEL

En esta sección se describen los requerimientos y especificaciones de alto nivel para el instrumento científico ESOPO. Son el resultado de un proceso iterativo de consenso, motivado por los objetivos científicos (ESOPO-CI-A-OCEAN), cuya historia se resume en documentos anteriores (GG001-03, GG001-05).

3.1 Rango espectral

El instrumento ESOPO es un espectrógrafo óptico, que debe optimizarse para el rango espectral de 350-900 *nm*, de baja-intermedia dispersión de rendija larga (no necesariamente de campo integral).

3.2 Distancia focal

El espectrógrafo debe acoplarse al foco $f/7.5$ del telescopio de 2.1 m de diámetro de SPM con guiador.

3.3 Eficiencia del sistema

La eficiencia mínima que debe alcanzar ESOPO, a distintas longitudes de onda, sin telescopio e incluyendo el detector se resumen en la tabla siguiente, junto con la meta que debe buscar la óptica básica de ESOPO (sin telescopio, detector, rejilla ni dicroico):

Longitud de onda (Å)	Eficiencia Mínima (%)	Comentario
3500	15	Eficiencia final neta del instrumento (sin telescopio) incluyendo toda la óptica básica, rejilla, dicróico y detector
4500	35	
5500	36	
7500	40	
9000	15	
3500 a 9000	80	Meta, no requerimiento, excluyendo telescopio, rejilla, dicróico y CCD

3.4 Resolución

- ESOPO deberá tener la capacidad de observar todo el intervalo espectral a una resolución $R \sim 2000$ ó mayor.

- Debe haber una resolución limitada por cielo, donde el ruido por píxel debido a fotones del cielo sea mayor al ruido del detector (ruido por lectura y señal oscura).

3.5 Modos de operación

Los modos de operación de los brazos de ESOPO deberán poder operar: cualquier brazo (sin dicróico) y ambos simultáneamente.

3.6 Máxima resolución espectral real

Debe ser posible alcanzar una resolución real de $R \sim 5000$ (FWHM) con una rendija nominal de $0.8 \mu\text{m}$ vía rejillas de densidad no mayor a $1200 \text{ } \mu\text{m}^{-1}$ y dimensiones máximas de $154 \times 206 \text{ mm}$. La resolución real no debe variar más de 10% a lo largo de la rendija (meta 5%).

3.7 Muestreo de resolución espectral

La resolución espectral deberá ser muestreada con más de 2 píxeles (máximo 4 píxeles) por elemento de resolución FWHM (para una rendija nominal de $0.8''$ de ancho).

3.8 Diámetro de la Pupila

El diámetro de la pupila debe estar limitado por el tamaño de las rejillas comerciales.

3.9 Rejillas

- Las rejillas deben ser comerciales y deben ser intercambiables.
- Se debe poder usar al menos 2 rejillas sin necesidad de abrir el instrumento.

3.10 Campo (largo de rendija)

- La rendija larga debe tener un campo mínimo de $8'$ con una meta de $10'$.
- Debe ser posible ver el campo, y centrar el objeto en rendija antes y durante la exposición.

3.11 Escala y muestro espacial

La escala sobre el detector, a lo largo de la rendija, debe ser al menos de $0.5''/\text{píxel}$ (meta, ya que el muestreo espectroscópico tiene prioridad al espacial).

3.12 Ruido de detector

La lectura de datos en el detector debe tener un ruido de lectura no mayor a $8 e^-$. El tipo de detector a utilizar es lineal del tipo hasta S/N 250. Pozo lineal $> 62,500 e^-$.

3.13 Ancho de rendija

Ancho de rendija: el mínimo debe ser menor igual al límite de difracción del espectrógrafo, el máximo no menos de 9" (meta >10").

3.14 Cambios de configuración

- El tiempo muerto entre cambios de configuración de las lámparas de calibración debe ser menor o igual a 1 minuto.
- El resto de los componentes, tales como rejillas, rendijas, entre otros, deben poder ser cambiados en tiempos menores o del orden de 3 a 5 minutos.

3.15 Repetitividad y estabilidad

La repetitividad y estabilidad deben ser tales que:

- a) durante una exposición de 0.5 Hrs. la resolución no debe degradarse más de un 2.5%
- b) al cambiar y volver a una configuración, la resolución se mantendrá dentro de un 5% (meta 3%)
- c) calibraciones **relativas** al principio y final de la noche (en resolución y dispersión espectrales, escala espacial y respuesta a lo largo de la rendija y de longitud de onda), deben de ser aplicables a los datos de esa noche (en su forma relativa, no así absoluta o punto cero) con una confiabilidad mejor al 10% (meta de 5%) dados los cambios por temperatura (+/-6°C), flexiones u otras derivas

3.16 Requerimientos ambientales de diseño, operación y supervivencia

Optimización a T=3°C y P=562 mmHg (temperatura y presión atmosférica)

Mínimo rango de operación: -10°C a 16°C T y 545 a 570 mmHg en P

Mínimo rango de supervivencia: T de -16°C a 34°C , P de 500 a 1100 mmHg

APÉNDICE B

Tablas de Propiedades de los Materiales Empleados

En este anexo, se muestran ejemplos de las tablas de propiedades proporcionadas por los distribuidores de materiales. En ellas podemos encontrar las propiedades necesarias para la aplicación del modelo SRLPC. Como ejemplo de los vidrios se muestra el S-Bal11, las tablas de los otros vidrios se encuentran en la documentación de ESOPO de "Diseño Óptico" *ESOPO-OP-A-DO1*

Aluminum 6061-O

Categories: [Metal](#); [Nonferrous Metal](#); [Aluminum Alloy](#); [6000 Series Aluminum Alloy](#)

Material Notes: Aluminum composition calculated as remainder. Information provided by Alcoa and the references. General 6061 characteristics and uses: Excellent joining characteristics, good acceptance of applied coatings. Combines relatively high strength, good workability, and high resistance to corrosion; widely available. The T8 and T9 tempers offer better chipping characteristics over the T6 temper.

Uses: Aircraft fittings, camera lens mounts, couplings, marines fittings and hardware, electrical fittings and connectors, decorative or misc. hardware, hinge pins, magneto parts, brake pistons, hydraulic pistons, appliance fittings, valves and valve parts.

Data points with the AA note have been provided by the Aluminum Association, Inc. and are NOT FOR DESIGN.

Composition Notes:
Aluminum content reported is calculated as remainder.
Composition information provided by the Aluminum Association and is not for design.

Key Words: al6061, UNS A96061; ISO AlMg1SiCu; Aluminium 6061-O, AD-33 (Russia); AA6061-O

Vendors: [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.70 g/cc	0.0975 lb/in ³	AA; Typical
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	30.0	30.0	AA; Typical; 500 g load; 10 mm ball
Ultimate Tensile Strength	124 MPa	18.0 ksi	AA; Typical
Tensile Yield Strength	55.2 MPa	8.00 ksi	AA; Typical
Elongation at Break	25.0 %	25.0 %	AA; Typical; 1/16 in. (1.6 mm) Thickness
	30.0 %	30.0 %	AA; Typical; 1/2 in. (12.7 mm) Diameter
Modulus of Elasticity	68.9 GPa	10000 ksi	AA; Typical; Average of tension and compression. Compression modulus is about 2% greater than tensile modulus.
Ultimate Bearing Strength	228 MPa	33100 psi	Edge distance/pin diameter = 2.0
Bearing Yield Strength	103 MPa	14900 psi	Edge distance/pin diameter = 2.0
Poissons Ratio	0.330	0.330	Estimated from trends in similar Al alloys.
Fatigue Strength	62.1 MPa	9000 psi	completely reversed stress; RR Moore machine/specimen
	@# of Cycles 5.00e+8	@# of Cycles 5.00e+8	
Machinability	30.0 %	30.0 %	0-100 Scale of Aluminum Alloys
Shear Modulus	26.0 GPa	3770 ksi	Estimated from similar Al alloys.
Shear Strength	82.7 MPa	12000 psi	AA; Typical
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.00000366 ohm-cm	0.00000366 ohm-cm	AA; Typical at 68°F
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 68°F	23.6 µm/m-°C	13.1 µin/in-°F	AA; Typical; Average over 68-212°F range.
CTE, linear 250°C	25.2 µm/m-°C	14.0 µin/in-°F	Estimated from trends in similar Al alloys. 20-300°C.
Specific Heat Capacity	0.896 J/g-°C	0.214 BTU/lb-°F	
Thermal Conductivity	180 W/m-K	1250 BTU-in/hr-R ² -°F	AA; Typical at 77°F
Melting Point	582 - 651.7 °C	1080 - 1205 °F	AA; Typical range based on typical composition for wrought products 1/4 inch thickness or greater; Eutectic melting can be completely eliminated by homogenization.
Solidus	582 °C	1080 °F	AA; Typical
Liquidus	651.7 °C	1205 °F	AA; Typical
Processing Properties	Metric	English	Comments
Solution Temperature	529 °C	985 °F	
Aging Temperature	160 °C	320 °F	Rolled or drawn products; hold at temperature for 18 hr
	177 °C	350 °F	Extrusions or forgings; hold at temperature for 8 hr

Material Components Properties	Metric	English	Comments
Aluminum, Al	95.8 - 98.6 %	95.8 - 98.6 %	
Chromium, Cr	0.0400 - 0.350 %	0.0400 - 0.350 %	
Copper, Cu	0.150 - 0.400 %	0.150 - 0.400 %	
Iron, Fe	<= 0.700 %	<= 0.700 %	
Magnesium, Mg	0.800 - 1.20 %	0.800 - 1.20 %	
Manganese, Mn	<= 0.150 %	<= 0.150 %	
Other, each	<= 0.0500 %	<= 0.0500 %	
Other, total	<= 0.150 %	<= 0.150 %	
Silicon, Si	0.400 - 0.800 %	0.400 - 0.800 %	
Titanium, Ti	<= 0.150 %	<= 0.150 %	
Zinc, Zn	<= 0.250 %	<= 0.250 %	

S-BAL11

573578
575575

Refractive Index n_d	1.57250	Abbe Number ν_d	57.8	Dispersion $n_F - n_C$	0.00991
	1.572501		57.74		0.009915
Refractive Index n_e	1.574864	Abbe Number ν_e	57.47	Dispersion $n_{F'} - n_{C'}$	0.010002

Refractive Indices		
λ (μm)	n_o	n_e
2325	2.32542	1.54394
1970	1.97009	1.54922
1530	1.52958	1.55486
1120	1.12964	1.55978
n_t	1.01399	1.56139
n_s	0.85211	1.56417
n_A	0.76819	1.56605
n_r	0.70652	1.56778
n_C	0.65627	1.56949
$n_{C'}$	0.64385	1.56997
n_{He-Ne}	0.6328	1.57042
n_D	0.58929	1.57241
n_d	0.58756	1.57250
n_e	0.54607	1.57486
n_F	0.48613	1.57940
$n_{F'}$	0.47999	1.57997
n_{He-Cd}	0.44157	1.58410
n_g	0.435835	1.58481
n_h	0.404656	1.58932
n_i	0.365015	1.59701

Partial Dispersions	
$n_C - n_i$	0.008103
$n_C - n_{A'}$	0.003436
$n_d - n_C$	0.003012
$n_e - n_C$	0.005375
$n_g - n_d$	0.012313
$n_h - n_g$	0.005410
$n_i - n_g$	0.004502
$n_{i'} - n_g$	0.012197
$n_{C'} - n_i$	0.008582
$n_e - n_{C'}$	0.004896
$n_{F'} - n_e$	0.005106
$n_i - n_{F'}$	0.017041

Relative Partial Dispersions	
$\theta_{C,i}$	0.8172
$\theta_{C,A'}$	0.3465
$\theta_{d,C}$	0.3038
$\theta_{e,C}$	0.5421
$\theta_{g,d}$	1.2419
$\theta_{g,F}$	0.5456
$\theta_{h,g}$	0.4541
$\theta_{i,g}$	1.2302
$\theta_{i',i}$	0.8580
$\theta_{e,C'}$	0.4895
$\theta_{F',e}$	0.5105
$\theta_{i',F'}$	1.7038

Deviation of Relative Partial Dispersions $\Delta \theta$ from "Normal"	
$\Delta \theta_{C,i}$	-0.0004
$\Delta \theta_{C,A'}$	0.0006
$\Delta \theta_{g,d}$	-0.0029
$\Delta \theta_{g,F}$	-0.0024
$\Delta \theta_{i,g}$	-0.0113

Constants of Dispersion Formula	
A_1	$8.21314256 \cdot 10^{-1}$
A_2	$6.12586479 \cdot 10^{-1}$
A_3	1.24859637
B_1	$3.51436131 \cdot 10^{-3}$
B_2	$1.79762375 \cdot 10^{-2}$
B_3	$1.33456670 \cdot 10^2$

Other Properties	
Bubble Quality Group B	
Specific Gravity d	3.02
Remarks	

Thermal Properties	
Strain Point StP (°C)	498
Annealing Point AP (°C)	534
Transition Temperature Tg (°C)	548
Yield Point At (°C)	593
Softening Point SP (°C)	670
Expansion Coefficients α (-30~+70°C)	66
α (10~+300°C)	80
Thermal Conductivity k (W/m·K)	0.974

Coloring	
$\lambda_{50} / \lambda_{5}$	35/32

Mechanical Properties	
Young's Modulus E (10 ⁹ N/m ²)	819
Rigidity Modulus G (10 ⁹ N/m ²)	331
Poisson's Ratio ν	0.237
Knoop Hardness HK	590[6]
Abrasion Aa	109
Photoelastic Constant (nm/cm/10 ⁹ Pa)	2.42

Internal Transmittance	
λ (nm)	τ 10mm
280	
290	
300	
310	
320	0.01
330	0.24
340	0.61
350	0.84
360	0.932
370	0.967
380	0.982
390	0.989
400	0.993
420	0.995
440	0.996
460	0.997
480	0.998
500	0.998
550	0.999
600	0.999
650	0.998
700	0.999
800	0.999
900	0.999
1000	0.998
1200	0.998
1400	0.989
1600	0.995
1800	0.988
2000	0.979
2200	0.929
2400	0.89

Chemical Properties	
Water Resistance (Powder) Group RW(P)	1
Acid Resistance (Powder) Group RA(P)	1
Weathering Resistance (Surf) Group W(S)	2~3
Acid Resistance (Surf) Group SR	2.0
Phosphate Resistance PR	1.0

Temperature Coefficients of Refractive Index							
Range of Temperature (°C)	t	C'	He-Ne	D	e	F'	g
-40 ~ -20	3.0	3.4	3.5	3.6	3.7	4.0	4.3
-20 ~ 0	3.1	3.5	3.5	3.7	3.8	4.1	4.4
0 ~ 20	3.2	3.6	3.6	3.7	3.9	4.2	4.6
20 ~ 40	3.2	3.6	3.7	3.8	4.0	4.3	4.7
40 ~ 60	3.3	3.7	3.7	3.9	4.0	4.4	4.8
60 ~ 80	3.3	3.8	3.8	3.9	4.1	4.5	4.9

APÉNDICE C

Valores de Constantes exFErimentales para Diferentes Vidrios

En este apéndice se presentan los valores para los 4 vidrios que cumplen con la restricción del coeficiente de expansión térmica, α .

k_1 que se ocupa en la obtención del esfuerzo debido a la gravedad, se obtuvo tras 8 iteraciones en los resultados FEA, es decir, con 8 resultados FEA con diferentes características geométricas, se cálculo su valor y se fue perfeccionando hasta que se encontró el valor que dio mejores resultados en todos los casos.

k_2 se presenta, pues se mantiene constante para cada virio, pues depende solo de las propiedades de los materiales. Y se vio que se comporta adecuadamente en el cálculo del esfuerzo gravitatorio y combinado

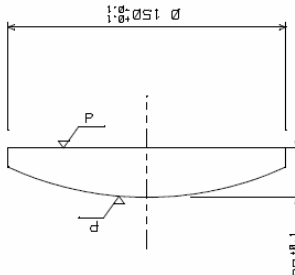
$r@k_5$ es el factor r que se ocupa en k_5 , esta constante exFErimental se obtuvo tras 8 iteraciones para cada vidrio, de la misma manera que k_1 , cada iteración corresponde a un análisis FEA con distintas características geométricas y en este caso, gradiente térmico, pues se ocupa en el cálculo del esfuerzo combinado.

Material	Constante experimental	Constante exFErimental	
	k2	k1	r@k5
	[Pa⁻¹]	[1]	[m^{1/2}]
K10	2.7762E-11	-----	0.05216
N-LAK8	2.0903E-11	0.25	0.07079
PBL26Y	2.9089E-11	0.4555	0.04128
S-BAL11	2.4457E-11	0.3435	0.05439

APÉNDICE D

Planos ejemplo de una lente y de un soporte radial

A continuación se muestra el plano técnico de un lente tal cual fue presentado por el grupo de óptica de ESOP

<p>VALUES @ T=20 C (REPORT TESTING T) IRREGULARITIES: PTV @ 546.07 NM INTERFEROGRAMS REQUIRED REPORT SCRATCH&DIG MAPS THICKNESS MEASURE ERROR < 0.015 DIAMETER MEASURE ERROR <= 0.010 GROUND EDGE: 0.010 RMS CYLINDRICITY <= 0.010 RMS REPORT ALL MEASURE TECHNIQUES & ERRORS DIMENSIONS IN MILLIMETERS</p> 	<p>LEFT SURFACE</p> <p>R 177.62±0.1 CX SZERNISAC . SEE ATTACHMENT ϕ_s 140±0.05 CHAMFER: 0.5 - 1.0 ϕ 3/ - (2.00) 4/ - 5/ - MIL 60/20 (GOAL 40/20) 6/ -</p> <p>R : REPORT SURF/TP BEST FIT-SPHERE MEASURE ERROR < 0.006</p>	<p>MATERIAL</p> <p>GLASS: S-FPL53-MELTD $n_d = 1.438730 \pm 0.0005$ $v_d = 94.92 \pm 0.02$ 0/ 6 1/ 10X0.25 2/ 4;2</p>	<p>RIGHT SURFACE</p> <p>R PLAND SZERNISAC . SEE ATTACHMENT ϕ_s 140±0.05 CHAMFER: 0.5 - 1.0 ϕ 3/ - (0.5) 4/ 1' 5/ - MIL 60/20 (GOAL 40/20) 6/ -</p>
<p>ISO ELEMENT DRAWING INDICATIONS ACCORDING TO ISO 10110</p>			
<p>DATE DEC 7 2006 PROJECT/TITLE ESOP OPTICAL SPECTROGRAPH</p>	<p>DRAWN F. J. COBOS</p>	<p>APPROV D. CHAPA / R. FARAH</p>	<p>INSTITUTO DE ASTRONOMIA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO OPTICAL TECHNICAL DIVISION CONFIGURATION 10 OF 12 OPTICAL DESIGN VERSION: OCTOBER 2006</p>
<p>PART/OPTIONS</p>		<p>REVISION J. JESUS GONZALEZ</p>	
<p>ROLL 2 : RED CAMERA 1ST DOUBLET 2ND LENS</p>			

REFERENCIAS

-
- ¹ *Optical System for Imaging and low-Intermediate-Resolution Integrated Spectroscopy OSIRIS*, 2007
<http://www.iac.es/proyect/OSIRIS/>
- ² ESOPO-CI-A-REAN1, *Requerimientos de alto nivel*, ESOPO 2005.
- ³ *Gran Telescopio de Canarias GTC*,
http://www.gtc.iac.es/home_e.html
- ⁴ ESOPO-CI-A-OC1, *Objetivos Científicos*, ESOPO 2005.
- ⁵ *Real Academia Española*, Diccionario, 2006,
<http://www.rae.es>.
- ⁶ Centro Óptico Regina, *Historia de la óptica*, 2002,
<http://www.coregina.com.ar/historia.htm>.
- ⁷ Enciclopedia Microsoft® Encarta® Online, *Óptica*, 2007,
<http://mx.encarta.msn.com>.
- ⁸ Cristina Speltini, et al., *Teoría de óptica geométrica*, Física 1, UBA, 1997
<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Hangar/743os8/teorade.htm>
- ⁹ Wikipedia, *Óptica Geométrica*, 2007,
http://es.wikipedia.org/wiki/óptica_geométrica.
- ¹⁰ Centro Nacional de Información y Comunicación Educativa, *Principio de Huygens*, 2007,
<http://enebro.pntic.mec.es/~fmag0006/Prism105.htm>.
- ¹¹ Cristina Speltini, et al., *Teoría de óptica geométrica*, Física 1, UBA 1997
<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Hangar/743os8/teorade.htm>
- ¹² Wikipedia, *Espejo Ustorio*, 2007,
http://es.wikipedia.org/wiki/Espejo_ustorio.
- ¹³ *Lentes*, 2006,
<http://www.monografias.com>.
- ¹⁴ Cristian A. Giuppone, Rodolfo D. Manuale y Marcelo J. Tesari, *Aberración cromática*, 2000,
http://sigma.8m.com/AP_optica.htm.

-
- ¹⁵ Wikipedia, *spherical aberration*, 2007,
http://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_aberration.
- ¹⁶ Yoder Paul R, *The development of practical optical systems requires careful optomechanical design*, 2004,
<http://oemagazine.com/fromTheMagazine/feb04/tutorial.html>.
- ¹⁷ Gutiérrez Leonel, Luna Esteaban, *Telescopio e instrumentación para la observación astronómica*, revista UNAM núm. 4, art. 23, 10 mayo de 2004,
<http://www.revista.unam.mx/vol.5/num4/art23/art23-3c.htm>.
- ¹⁸ Wikipedia, *CCD*, 2007,
<http://es.wikipedia.org/wiki/CCD>
- ¹⁹ Char Farid, *Cámaras CCD*, 2006,
http://www.astrosurf.com/farid/07/7_ced.html
- ²⁰ Fabricant Daniel, *Construction of the Hectospec: 300 optical fiber-fed spectrograph for the converted MMT*, 1999,
<http://www.cfa.harvard.edu/mmti/hectospec.html>
- ²¹ *Visible MultiObject Spectrograph VIMOS*, 2007,
<http://www.eso.org/instruments/vimos/>
- ²² *Deep Imaging Multi-Object Spectrograph DEIMOS*, 2002,
<http://www2.keck.hawaii.edu/inst/deimos/>
- ²³ Farah Alejandro, *Diseño Optomecánico del Barril de la Cámara de Osiris*,
<http://www.astrocu.unam.mx/~farah/principal/ArticuloSOMI.pdf>
- ²⁴ Álvarez Manuel, López Eduardo, *Los último 10 años del OAN*, 2004,
http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/04/html/sec_16.html
- ²⁵ Pismis Paris, *Nacimiento de la Astrofísica en México*, 2004
http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/04/html/sec_14.html
- ²⁶ Carrasco Licea Esperanza, *La astronomía en la sociedad contemporánea*, 1995,
<http://www.inaoep.mx/~rincon/astronomia.html>
- ²⁷ Gutiérrez Leonel, Luna Esteaban, *Telescopio e instrumentación para la observación astronómica*, revista UNAM núm. 4, art. 23, 10 mayo de 2004,
<http://www.revista.unam.mx/vol.5/num4/art23/art23.htm#>
- ²⁸ Martín Díaz Carlos, *Instrumentación Astronómica para el siglo XXI*, 2000,
<http://www.iac.es/gabinete/iacnoticias/1-2000/instru1.html>
- ²⁹ C. F. Kurtz, *Telescopios*, 2007,
<http://www.surastronomico.com/telescopios1.html>
- ³⁰ Carrasco Licea Esperanza, *Telescopios*, 1995,
<http://www.inaoep.mx/~rincon/telescopios.html>
- ³¹ Malacara Daniel, Malacara Juan Manuel, *Como funciona el telescopio*, 2006,

-
- http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/057/htm/sec_7.htm
- ³² Soldevilla Josep A., *¿Refractor o Reflector?*, 2006
http://www.astrogea.org/soldevilla/refractor_o_reflector.htm
- ³³ Carrasco Licea Esperanza , Carramiñana Alonso Alberto, *Los telescopios de nueva generación*, Diario Síntesis, 1999,
http://www.inaoep.mx/~rincon/xl_telescopes.html
- ³⁴ Gutiérrez Leonel, Luna Esteaban, *Telescopios gigantes y de nueva tecnología*, revista UNAM núm. 4, art. 23, 10 mayo de 2004,
<http://www.revista.unam.mx/vol.5/num4/art23/art23-1d.htm>
- ³⁵ Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ingeniería Mecánica y Metalúrgica, *Análisis del esfuerzo mecánico*, 1999
<http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/circulo/index.html>
- ³⁶ Popov, E. P., *Mecánica de Sólidos*, 2000, México, Pearson Educación.
- ³⁷ Wikipedia, *Ensayo de Tracción*, 2007,
http://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_de_tracción
- ³⁸ *Transmisión de Calor y Dilatación Térmica*,
http://www.ugr.es/~fisicat/Departamento/Apuntes/T_Termologia.pdf
- ³⁹ Wikipedia, *Birrefringencia*, 2007,
<http://es.wikipedia.org/wiki/Birrefringencia>
- ⁴⁰ Chandrupatla Tirupathi R., Belegundu Ashok D., *Introducción al estudio del Elemento Finito en Ingeniería*, Segunda Edición, 1999, México, Pearson.
- ⁴¹ García, E., García, M. J., 2003, *Introducción al proyecto de Ingeniería*, Buenos Aires
- ⁴² Feilden, G. B. R., 1963, *Engineering design (The Feliden's Report)*, (her Majesty's Stationery Office, London)
- ⁴³ Altemir Grasa José M^a, *Diseño Mecánico y Técnicas de Representación, Capítulo 1: Diseño Mecánico*, Universidad de Zaragoza, España, 2006
<http://www.cps.unizar.es/~altemir/descargas/Dise%F1o%20Mecanico/Cap%EDTulo%201.pdf>
- ⁴⁴ Shigley, Robert E. *El Proyecto en la ingeniería mecánica*, 1965, España, Ediciones del Castillo.
- ⁴⁵ Wikipedia, *CAE*, 2006
<http://es.wikipedia.org/wiki/CAE>
- ⁴⁶ Shigley, Robert E. *El Proyecto en la ingeniería mecánica*, 1965, España, Ediciones del Castillo.
- ⁴⁷ Yoder, Paul R., *Mounting Lense in Optical Instruments*, SPIE Optical Engineering Press, 1995.
- ⁴⁸ Yoder, Paul R., *Mounting Lense in Optical Instruments*, SPIE Optical Engineering Press, 1995.
- ⁴⁹ ESOPO-OP-A-DO1, *Diseño Óptico*, ESOPO 2007.