

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA



DESARROLLO DEL COMPENSADOR TERMICO PASIVO PARA
LA OPTICA DE LA CAMARA DE OSIRIS PARA EL GRAN
TELESCOPIO CANARIAS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO
P R E S E N T A
JUAN ANGEL PALENCIA MORALES

ASESOR: M.I. ALEJANDRO FARAH SIMON



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.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

A MI PADRE,
A MI MADRE
Y A MI HERMANA

Con todo mi amor.

A Alex por todo el apoyo y la confianza, por darme la oportunidad de hacer este trabajo con el que aprendí tantas cosas, por guiarme en mis primeros pasos como ingeniero. Esta tesis también es tuya.

A Magdalena por ayudarnos en todo momento y tomar este proyecto como tuyo, sin tu apoyo gran parte de este trabajo no hubiera sido posible.

A Jordi, Hernán, Manuel y Gabriel, por estar todos los días metidos en el cubo apoyándonos siempre, ustedes también participaron en esta tesis, gracias por su colaboración.

A Cristina por echarme la mano en una de las partes más áridas de este trabajo, sin tu ayuda esto me hubiera llevado mucho más tiempo.

A Beatriz Sánchez, a Pepe Franco, a las personas que participan en el proyecto OSIRIS y a todo el Instituto de Astronomía, por darnos la oportunidad de formarnos como profesionistas, desde el servicio social hasta hoy.

A la Facultad de Ingeniería y a todos los profesores que día a día comparten sus conocimientos para formar a los ingenieros del mañana, en especial al Dr. Saúl Santillán, al Dr. Jesús Dorador y al Ing. Mariano García por el tiempo que le dedicaron a esta tesis.

Al CONACYT y al Sistema Nacional de Investigadores por el apoyo económico brindado durante la realización de esta tesis.

A la familia y amigos que han estado presentes en todo momento y que son en gran parte responsables de lo que soy ahora. Gracias a todos.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Juan Angel

Palencia Morales

FECHA: 5 Julio 2004

FIRMA: JAM

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

1. HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA	17
1.1. Breve historia de la astronomía antigua	17
1.1.1. Europa Antigua	18
1.1.2. Babilonia	18
1.1.3. Egipto	19
1.1.4. China	19
1.1.5. América precolombina	19
1.1.6. Grecia	20
1.1.7. Roma	22
1.1.8. Edad Media	22
1.1.9. Renacimiento	23
1.1.9.1. Copérnico	23
1.1.9.2. Ticho Brahe	25
1.1.9.3. Kepler	25
1.1.9.4. Galileo	27
1.2. Astronomía Moderna	29
1.2.1. Newton	29
1.2.2. Universos Islas	30
1.2.3. Las distancias en el universo	31
1.2.4. Espectrografía	32
1.2.5. Siglo XX	33
1.2.6. La Teoría de la Relatividad General	34
2. TELESCOPIOS	37
2.1. Breve historia de los telescopios	37
2.1.1. Telescopios de refracción	38
2.1.1.1. Galileo y Kepler	39
2.1.1.2. Funcionamiento	41
2.1.2. Telescopios de reflexión	42
2.1.2.1. Newton y Cassegrain	43
2.1.2.2. Funcionamiento	43
2.2. Telescopios de tecnología avanzada	46
2.2.1. Monte Palomar	46
2.2.2. Keck	47
2.2.3. Hubble	49
2.3. Apoyos técnicos de la Ingeniería	54

3. EL GRAN TELESCOPIO CANARIAS (GTC)	55
3.1. El Gran Telescopio Canarias (GTC)	55
3.2. Instrumentación científica de Día Uno para el GTC	60
3.3. Descripción general del Instrumento OSIRIS	61
3.3.1. Barril de la Cámara de OSIRIS	62
3.3.1.1. Especificaciones y requerimientos	63
3.4. Descripción general del Barril de la Cámara	65
3.4.1. Efectos de la temperatura sobre la óptica de la cámara	68
3.4.2. Compensación térmica	69
3.4.2.1. Desempeño del doblete D3 como compensador térmico	70
3.5. Diseño conceptual para compensación térmica pasiva	71
4. SELECCIÓN DEL MATERIAL PARA EL COMPENSADOR TÉRMICO	75
4.1. Selección de material	75
4.1.1. Plásticos reforzados con fibra de vidrio	76
4.1.1.1. Resina o matriz polimérica	76
4.1.1.2. Refuerzo de fibra de vidrio	77
4.1.2. Materiales propuestos para el Compensador Térmico del BC	77
4.1.3. Descripción del ZYTEL HTN	78
4.1.3.1. Productos y composiciones	79
4.1.3.2. Aplicaciones más comunes	80
4.1.3.3. Procesabilidad	81
4.1.3.4. Propiedades del ZYTEL HTN	82
5. PRUEBAS MECÁNICAS PARA LA VERIFICACIÓN DEL MATERIAL SELECCIONADO	83
5.1. Pruebas mecánicas	83
5.1.1. Coeficiente de expansión térmica lineal	84
5.1.2. Ensayo de Tracción	86
5.1.2.1. Probetas para el ensayo de tracción	89
5.2. Fabricación de las probetas	90
5.2.1. Precauciones para el uso del material	90
5.2.1.1. Humedad	90
5.2.1.2. Secado	91
5.2.1.3. Contaminación	93
5.2.2. Parámetros de inyección para el equipo	94
5.2.2.1. Temperaturas del cilindro y de derretimiento	94
5.2.2.2. Temperatura del inyector	95
5.2.2.3. Temperatura del molde	95
5.2.2.4. Presión de inyección	96

5.2.2.5. Tiempo de inyección	96
5.2.2.6. Descompresión del tornillo	96
5.2.3. Inyección de las probetas	96
5.2.3.1. Inicio del proceso de inyección	98
5.2.3.2. Fin del proceso de inyección	99
5.3. Prueba de expansión térmica	100
5.4. Ensayo de tracción	105
5.4.1. Análisis de resultados	110
6. OPTIMIZACIÓN DEL COMPENSADOR TÉRMICO Y DISEÑO CONCEPTUAL DEL MOLDE DE INYECCIÓN	115
6.1. Rediseño del compensador	115
6.1.1. Especificaciones básicas para el rediseño	116
6.1.2. Propuestas de optimización del diseño	117
6.1.2.1. Resultados obtenidos de las propuestas de optimización	119
6.1.2.2. Análisis de los resultados obtenidos de la optimización	128
6.1.2.3. Verificación de la opción seleccionada	129
6.2. Diseño conceptual del molde para la inyección	131
CONCLUSIONES GENERALES	133
REFERENCIAS	135
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	137
ANEXOS	139

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de tesis hace referencia a la elaboración de uno de los componentes para controlar los efectos térmicos sobre la óptica de la Cámara del Instrumento OSIRIS para el Gran Telescopio CANARIAS (GTC), que responde a una necesidad estratégica de la Astronomía.

La principal razón por la que se construye una nueva gran instalación telescópica es para llevar a cabo programas científicos que de otra manera serían irrealizables para la comunidad a la que va a dar servicio.

En la actualidad la Astrofísica ha tenido un auge espectacular en un breve espacio de tiempo, con un incremento destacado en el número de investigadores, así como en la calidad y cantidad de sus publicaciones. De ahí la iniciativa de satisfacer las exigencias y necesidades de los astrofísicos.

El Gran Telescopio CANARIAS representa una gran oportunidad para el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (IA-UNAM), de participar en un proyecto que le dará un gran renombre a México y a las instituciones que colaboran en él, en la comunidad científica internacional, ya que la participación es en diseño y manufactura de un componente principal del instrumento OSIRIS.

Actualmente el GTC se está construyendo, en su mayor parte, a través de contratos con empresas españolas (un 63%), aunque hay un gran número de empresas extranjeras contratadas. Así mismo el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), y el IA-UNAM, firmaron el 31 de julio de 2001 unos acuerdos en virtud de los cuales estas instituciones mexicanas, financiadas por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT), aportan un 5% del presupuesto del telescopio y de otras actuaciones e inversiones preparatorias previas a su explotación. Como contrapartida obtendrán un 5% del tiempo de observación y contribuirán también con un 5%, a los gastos de operación del

GTC, contemplando además un intercambio de tiempo de observación entre el GTC y el Gran Telescopio Milimétrico (GTM) de 50 metros, que el INAOE y la Universidad de Massachussets construyen en la actualidad.

Simultáneamente, con el fin de fomentar y afianzar el intercambio científico y tecnológico entre estas instituciones y el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), se firmó un Protocolo de Cooperación Astrofísica con el INAOE y el IA-UNAM. Este acuerdo incluye programas de intercambio de científicos y tecnólogos, además de colaboración en proyectos instrumentales.

El GTC dispondrá de dos instrumentos científicos ya aprobados para entrar en operación el Día Uno: OSIRIS (cámara y espectrógrafo multiobjeto en el visible) y CanariCam (cámara y espectrógrafo, con capacidades de polarimetría y cronografía en el infrarrojo térmico). Estos dos instrumentos están siendo desarrollados por consorcios formados por varios centros de investigación. El consorcio que desarrolla OSIRIS está liderado por el IAC, con la participación del IA-UNAM y el que desarrolla CanariCam por la Universidad de Florida.

El IA-UNAM esta desarrollando el *Barril de la Cámara que contiene el sistema óptico de OSIRIS*, esta cámara consiste en un sistema óptico formado por ocho lentes, contenidos en un barril dividido en dos secciones, la primera formada por el doblete¹ D1 y la Unidad de Enfoque; y la segunda con los singletes S1 y S2 y los dobletes D2 y D3.

Uno de los problemas que se presentan en el barril es la variación de la temperatura, el efecto que tienen los cambios de temperatura sobre la óptica de la cámara es que los índices de refracción de los lentes varían, aunque esta variación es mínima, altera la calidad de la imagen que se registra. Al variar el índice de refracción de los lentes el plano donde se concentra la luz se mueve unas cuantas micras hacia adelante o hacia atrás (dependiendo de si el cambio de temperatura es positivo o negativo) del plano del detector, lo que provoca que la imagen en el detector quede fuera de foco. Si se considera que la luz que llega a ese

¹ Sistema óptico formado con dos lentes en contacto.

plano focal es la luz que se concentra de un espejo de 10 metros, el error producido por este pequeño desplazamiento es muy grande.

Para evitar este error es necesario implementar un sistema que compense el movimiento de imagen debido a la variación de los índices de refracción cuando la temperatura varía. Como no se puede hacer nada respecto a los índices de refracción de los cristales, debido a que es una propiedad del material que no se puede modificar, se tiene que variar la distancia entre los lentes para lograr corregir la posición de la imagen, para esto existen diferentes combinaciones de las separaciones entre los lentes que pueden compensar los efectos térmicos residuales, siempre y cuando sus movimientos requeridos sean físicamente posibles y estén controlados correctamente.

El doblete D3 puede mantener la escala de la placa y la calidad de la imagen mucho más allá de la temperatura nominal si se mueve aproximadamente $13 \mu m/^{\circ}C$ (alejándose de S2 cuando aumenta la temperatura y acercándose a S2 cuando disminuye). Este compensador mantiene el tamaño y movimiento de la imagen en todo el campo bajo control y es suficiente como compensador único.

Para poder utilizar el Doblete D3 como compensador térmico es necesario diseñar un sistema que lo mueva con respecto a S2 cuando la temperatura del medio varíe. Para esto se propuso un actuador pasivo de un material cuyo coeficiente de expansión térmica fuera el adecuado para lograr el movimiento deseado, ya que utilizar un motor eléctrico para lograr el desplazamiento, empleando un sistema equivalente al sistema de enfoque fino, generaría calor y turbulencias al interior del barril y se vería afectada la calidad de la imagen y además se tienen muchas limitaciones en cuanto al espacio.

Por tanto los objetivos principales de este trabajo de tesis de licenciatura son:

- Realizar las pruebas necesarias para verificar el material seleccionado para la fabricación del compensador térmico
- Determinar la geometría más adecuada para lograr el efecto de compensación antes mencionado.
- Proponer el diseño conceptual y preliminar del componente

En esta tesis se presenta el trabajo que se realizó para el desarrollo de este componente, los primeros 2 capítulos nos dan un marco de referencia para situar al problema, en el capítulo 3 se da una visión global del proyecto GTC y sus instrumentos y se presentan el objetivo y la justificación del Compensador Térmico y en los capítulos finales se explica el proceso de selección del material, las pruebas mecánicas que se hicieron al material seleccionado y finalmente el diseño y un posible método de fabricación del mismo.

En el primer capítulo se da una visión breve de la historia de la Astronomía, desde el surgimiento de la humanidad hasta nuestros días, ubicando las principales aportaciones de la astronomía antigua por épocas y por culturas y posteriormente se presentan las principales teorías o líneas de investigación que dieron pie a las teorías modernas de la formación del universo.

El segundo capítulo trata sobre el desarrollo de los telescopios, desde el primer telescopio ideado por Galileo hasta los grandes telescopios de tecnología avanzada que se utilizan para la investigación de punta y la importancia que éstos han tenido en los avances de la Astronomía. También se menciona la importante relación que hay entre la Ingeniería y la Astronomía.

En el capítulo 3 se da una visión del proyecto GTC y de los diferentes instrumentos de observación de éste, principalmente del instrumento OSIRIS en el que el IA-UNAM participa en el desarrollo del sistema óptico. Se detalla el desarrollo del Barril de la Cámara de OSIRIS llevado a cabo en su totalidad en el IA-UNAM. Y se explican los efectos térmicos sobre la óptica de la cámara de OSIRIS y la necesidad de implementar un elemento que compense estos efectos, en este capítulo se da la explicación del principio de operación y los diseños conceptuales que se plantearon. También se plantean los objetivos y justificación de este trabajo de tesis.

El capítulo 4 trata sobre la selección del material, en él se presentan todas las alternativas de materiales que se consultaron junto con sus propiedades, el proceso de selección que se llevó a cabo y la justificación del material seleccionado, así mismo se da una explicación de

las características del Zytel de DuPont, que fue el material seleccionado y que es la primera vez que se utiliza en México.

En el capítulo 5 se da una explicación del proceso de inyección, el manejo del material, los parámetros de inyección y una explicación del proceso. Se detallan las pruebas mecánicas que se hicieron para verificar las propiedades del material, la prueba del coeficiente de expansión térmica y el ensayo de tracción. Finalmente se presenta el análisis de los resultados obtenidos en dichas pruebas.

El último capítulo trata sobre el diseño conceptual que fue necesario realizar, las alternativas que se propusieron para la optimización del Compensador Térmico, junto con el análisis, por medio de elementos finitos, de desplazamiento para cada una de ellas, las especificaciones a las que estábamos sometidos y la justificación de la optimización elegida. Así como una opción alternativa por si el diseño planteado presenta deficiencias. También se da una breve descripción del diseño preliminar del componente al final de la tesis.

La oportunidad, y la confianza que se me dio, de colaborar en un proyecto internacional en el que se manejan precisiones y estándares de calidad tan elevados es un reto y una satisfacción para mí.

CAPÍTULO 1

HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA

1.1 BREVE HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA ANTIGUA^[1]

La Astronomía, considerada por muchos la profesión más antigua de la humanidad, nace prácticamente con ella misma; imaginemos a los hombres de la antigüedad maravillados ante el espectáculo que ofrecía el firmamento y los fenómenos que allí se presentaban. Inevitablemente los eventos celestes se asociaron con los fenómenos sucedidos en la Tierra. Esto dio inicio a la adoración de los astros que junto con la superstición y el poder que daba el saber "descifrar" los destinos en las estrellas dominarían las creencias humanas por muchos siglos.

Muchos años de observación sentaron las bases científicas de la Astronomía, con explicaciones muy aproximadas de la organización del universo. Sin embargo, las creencias geocentristas alimentadas por los grupos religiosos y políticos impusieron durante muchos años un sistema erróneo impidiendo además el análisis y estudio de otras teorías.

Siglos después, la evolución y difusión de las teorías científicas hacen que algunos astrónomos comiencen un minucioso estudio del espacio y de sus verdaderas relaciones con el hombre, separándose en este momento la superstición (astrología) de la ciencia (Astronomía). Esta evolución no ocurrió pacíficamente y muchos de los antiguos astrónomos fueron perseguidos y juzgados. Con la llegada del Renacimiento, con la invención de los sistemas ópticos y otros dispositivos se dio un gran salto en la investigación que ha llevado a la humanidad a explorar el origen del universo hasta la teoría del Big Bang¹.

¹ Tomado de: Astronomía Autodidacta, Astronomía colombiana. *Historia de la Astronomía*

1.1.1 Europa antigua

Antiguos pueblos que habitaron Europa tuvieron conocimientos avanzados de los movimientos de los astros, matemáticas y geometría. Realizaron grandes construcciones para la práctica de la Astronomía Observacional, determinaron los solsticios y equinoccios y pudieron predecir los eclipses. Varios de estos observatorios se han preservado hasta la actualidad siendo los más famosos los de Stonehenge en Inglaterra y Carnac en Francia.

Stonehenge ha sido uno de los más extensamente estudiados. Se construyó en varias fases entre los años 2200 y 1600 a.C. Su utilización como instrumento astronómico permitió al hombre del megalítico realizar un calendario bastante preciso y predecir eventos celestes como eclipses lunares y solares.



Figura 1.1. Ruinas de Stonehenge, en Inglaterra

1.1.2 Babilonia

Las primeras actividades astronómicas que se conocen de los babilonios datan del siglo VIII a.C. Se conoce que midieron con precisión el mes y la revolución sinódica de los planetas. La observación más antigua de un eclipse solar procede también de los babilonios y se remonta al 15 de junio del 763 a.C. Ellos calcularon la periodicidad de los eclipses, describiendo el ciclo de Saros (223 meses sinódicos ó 18 años 11.3 días), el cual aun hoy se utiliza. Construyeron un calendario lunar y dividieron el día en 24 horas. Finalmente nos legaron muchas de las descripciones y nombres de las constelaciones.

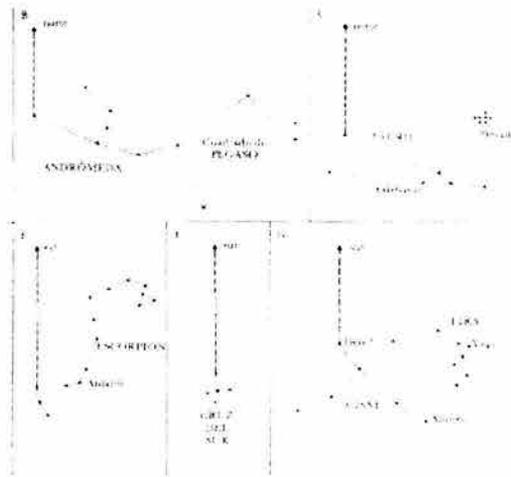


Figura 1.2. Constelaciones babilonias

1.1.3 Egipto

Los egipcios consideraban el cielo como una especie de carpa apoyada en las montañas. Utilizaron el ciclo solar para diseñar su calendario, El comienzo del año venía determinado por la salida heliacal de la estrella Sirio, hecho que coincidía con la creciente del Nilo y que se retrasaba un día cada cuatro años, por lo que para corregir esto se agregaba un día al calendario cada cuatro años. Se construyeron pirámides como la de Gizeh alineada con la estrella polar con la que les era posible determinar el inicio de las estaciones utilizando para ello la posición de la sombra de la pirámide. También utilizaron las estrellas para guiar la navegación.

1.1.4 China

No es mucho lo que se conoce de la astronomía china, sin embargo, se sabe que es más antigua que la astronomía occidental y por estar tan alejada de ella tuvo un desarrollo independiente. Consideraban al universo como una naranja que colgaba de la estrella polar ubicando sus 284 constelaciones en 28 segmentos o casas en que dividían el universo.

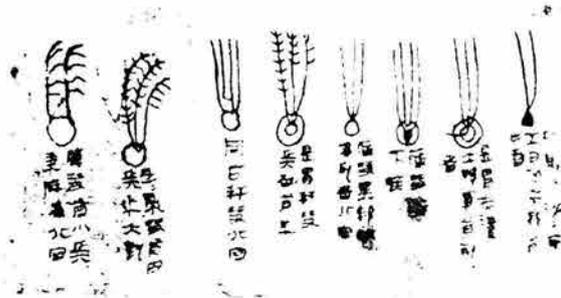


Figura 1.3. Atlas cometario chino

1.1.5 América precolombina

En América durante la época precolombina se desarrolló un estudio astronómico bastante extenso. Algunas observaciones mayas son bien conocidas, como el eclipse lunar del 15 de Febrero de 3379 a.C. Tenían su propio calendario solar y conocían la periodicidad de los eclipses. Inscribieron en monumentos de piedra fórmulas para predecir eclipses solares y la salida heliaca de Venus.



Figura 1.4. Moctezuma II viendo un cometa

Los Incas conocían la revolución sinódica de los planetas, Construyeron un calendario Lunar para las fiestas religiosas y uno solar para la agricultura. Utilizaron elementos como mojones alrededor de los pueblos para realizar astronomía observacional. Los Chibchas conocían la constelación de Orión y reconocían la relación entre la salida heliacal de Sirio con el comienzo de la temporada de lluvias.

1.1.6 Grecia

En Grecia comenzó a desarrollarse lo que ahora conocemos como astronomía occidental. En los primeros tiempos de la historia de Grecia se consideraba que la tierra era un disco en cuyo centro se hallaba el Olimpo y en torno suyo el Okeanos, el mar universal. Las observaciones astronómicas tenían como fin primordial servir como guía para los agricultores por lo que se trabajó intensamente en el diseño de un calendario que fuera útil para estas actividades.

Pitágoras, quien vivió entre los años 569 - 475 a.C. promulgó sus dictados o paradigmas los cuales fueron seguidos por Sócrates (427 - 347 a.C.) y Platón.

- Los Planetas, el Sol, la Luna y las Estrellas se mueven en orbitas circulares perfectas.
- La velocidad de los Planetas, el Sol , la Luna y las estrellas son perfectamente uniformes.
- La Tierra se encuentra en el centro exacto del movimiento de los cuerpos celestes.



Figura 1.5. Escultura de Pitágoras

Bajo estos principios Eudoxo (408 a.C. - 355 a.C) fue el primero en concebir el universo como un conjunto de 27 esferas concéntricas que rodean la tierra, la cual a su vez también era una esfera. Platón y uno de sus más adelantados discípulos, Aristóteles (384 - 322 a.C.) mantuvieron el sistema ideado por Eudoxo agregándole no menos de cincuenta y cinco esferas en cuyo centro se encontraba la Tierra inmóvil

Platón solicitó el estudio a sus discípulos del movimiento planetario, en especial el movimiento retrógrado de los planetas. Sólo uno de ellos, Aristarco de Samos, violando las normas pitagóricas propuso la existencia de un sistema Heliocéntrico. Sus cálculos indicaban que el Sol era más grande que la Tierra, y que de esta manera no era lógico que un objeto tan grande orbitara uno pequeño. Sin embargo su modelo no fue aceptado debido a que no se explicaba porque no se sentía el movimiento de la Tierra. Esto se debía a las siguientes causas:

- La Tierra no era parte de los cielos.
- Existían pocos cambios en los cielos.
- Si la Tierra se moviera existirían grandes vientos y los objetos no podrían mantenerse en su superficie.

Por esta época el centro de la vida intelectual y científica se trasladó de Atenas a Alejandría, ciudad fundada por Alejandro Magno un siglo antes y modelada según el ideal griego.

Ptolomeo (85 - 165 a.C.) compiló el saber astronómico de su época en los trece tomos del «Almagesto». Expuso un sistema en donde la Tierra, en el centro, estaba rodeada por esferas de cristal de los otros 6 astros conocidos. La tierra no ocupaba exactamente el centro de las esferas y los planetas tenían un epiciclo (sistema creado por Apolonio de Pergamo y perfeccionado por Hiparco) cuyo eje era la línea de la órbita que giraba alrededor de la tierra llamada *deferente*.



Figura 1.6. Visión Ptolemaica del universo

Como el planeta gira alrededor de su epiciclo se aproxima y se aleja de la tierra mostrando a veces un movimiento retrógrado. Este sistema permitía realizar predicciones de los movimientos planetarios, aunque tenía una precisión muy pobre. A pesar de esto fue popularizado y aceptado más que como modelo verdadero como una ficción matemática

útil. Se calcula que el universo ptolemaico solo media 80 millones de kilómetros; esto por que si fuera más grande la esfera de las estrellas fijas debía rotar demasiado rápido para cumplir un ciclo en 24 horas.

Otros logros de la Astronomía en Alejandría fueron el cálculo de la circunferencia de la tierra por Eratóstenes, y las primeras mediciones de las distancias al Sol y la Luna. Se diseñaron catálogos estelares como los de Hiparco de Nicea y el descubrimiento de la presesión de los equinoccios.

1.1.7 Roma

El Imperio Romano tanto en sus épocas paganas como cristiana dio poco o ningún impulso al estudio de las ciencias, era una sociedad práctica que respetaba la técnica, pero consideraba la ciencia de avanzada tan poco útil como la pintura y la poesía. Se cree que los cristianos fanáticos destruyeron la Biblioteca de Alejandría en donde se concentraba el saber de la humanidad hasta ese momento, la academia de Platón fue cerrada, el Serapetum de Alejandría centro del saber fue destruido y fueron asesinados muchos de los sabios que se encontraban en sus campos. Los estudiosos huyeron de Alejandría y Roma hacia Bizancio y la ciencia tuvo una nueva etapa de desarrollo en el ámbito del Islam.

1.1.8 Edad Media

Los árabes fueron quienes después de la decadencia de los estudios griegos y la entrada de occidente en una fase de oscurantismo durante los siglos X a XV, continuaron con las investigaciones en astronomía dejando un importante legado: Tradujeron el Almagesto; nombraron y catalogaron muchas estrellas con nombres que se utilizan aún en la actualidad (Aldebarán, Rigel, Deneb, etc.). Dentro de los astrónomos árabes más destacados se encuentran Al Batani (858 - 929), Al Sufi (903 - 986) y



Figura 1.7. Grabado de árabes observando el cielo

Al Farghani, una autoridad en el sistema solar, calculó que la distancia a Saturno era de 130 millones de kilómetros (la distancia es 10 veces mayor).

Durante este periodo en Europa dominaron las teorías geocentristas promulgadas por Ptolomeo y no se presentó ningún desarrollo importante de la astronomía. Solamente hasta el siglo XV se reinició el estudio de los cielos después de traducirse hacia 1150 la obra de Ptolomeo al latín. Johannes Müller (llamado Regiomontanus, 1436 - 1476) comenzó a realizar y reunir nuevas mediciones y observaciones y Nicolás de Cusa (1401 - 1464) afirmó en 1464 que la Tierra no podía hallarse en reposo y que el universo no podía concebirse como finito y comenzaron a presentarse dudas sobre la veracidad del sistema geocéntrico Ptolemaico.



Figura 1.8. Grabado del cometa Halley pasando sobre Nuremberg en el año 684

1.1.9 Renacimiento

En el siglo XV se descubre América y se amplía de gran forma la navegación, lo que empezó a requerir mejores instrumentos navales, así como mejoría en las técnicas de cartografía terrestre y estelar, lo que significó un importante estímulo para el estudio de la geografía, la astronomía y las matemáticas. Para el año de 1600 el tamaño del mundo se había duplicado.

1.1.9.1 Copérnico

Fue Nicolás Copérnico (1473 - 1543) quien dio el primer paso en el desarrollo de la nueva astronomía. Estudiando las referencias de la literatura sobre las teorías de Aristarco y evidenciando por sus propias observaciones la inexactitud del sistema geocéntrico postulado por Ptolomeo, al cual durante la Edad Media se le habían sumado un sinnúmero

de epiciclos para ajustarlo a las observaciones, comenzó a desarrollar una nueva teoría de la organización del cielo.

Copérnico estaba fuertemente influenciado por los neoplatónicos (combinando elementos del Platonismo con el Cristianismo) esto lo llevó a creer que si el Sol daba vida, luz y calor era una copia material de Dios. Adoptó entonces un sistema heliocéntrico como el de Aristarco. En 1512 dio a conocer sus trabajos recogidos en el manuscrito «Comentariolus».

Mantuvo la idea Aristotélica que los planetas tenían un movimiento perfecto es decir en orbitas circulares, de esta manera aunque correctamente colocaba al Sol en el centro del sistema solar. No tenía menos errores que el postulado por Ptolomeo y también tuvo que ser sometido a la presencia de epiciclos y al desplazamiento del centro del universo en un punto alejado del Sol para poder aproximarse a las observaciones realizadas. Utilizó la Unidad astronómica para encontrar las distancias proporcionales de los objetos celestes, pero no conoció su valor numérico. El radio del sistema creado por Copérnico se estimaba en 1.5 millones de veces el radio de la tierra. Sin embargo este sistema no fue aceptado por muchos estudiosos principalmente por la ausencia de paralaje de las estrellas y su supervivencia solamente fue favorecida por la declinación del sistema Ptolemaico. Hacia 1540 se publicó el primer informe sobre las investigaciones copernicanas "Narratio prima" de G. H. Rethicus; y el mismo año en que moría Copérnico se publicó su obra principal: "De revolutionibus orbium coelestium".

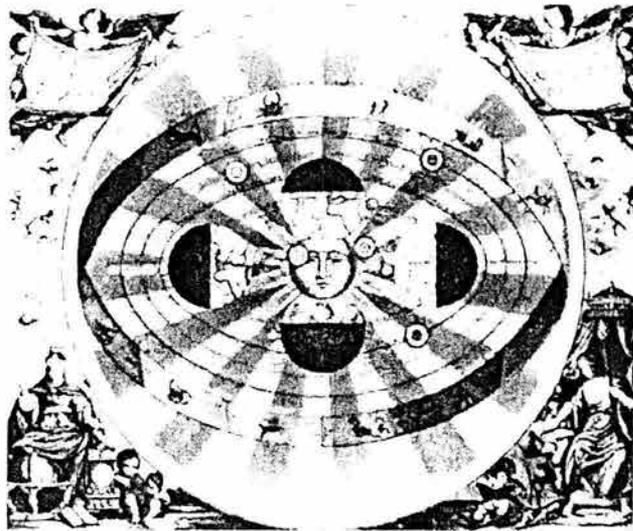


Figura 1.9. Sistema de Copernico con el sol al centro

1.1.9.2 Ticho Brahe

El observador más importante del siglo XVI fue Ticho Brahe (1546 -1601), poseía el don de la observación y el dinero para construir los equipos más avanzados y precisos de su época. Había tomado como modelo del universo el expuesto por Heroclides en donde se colocaba a todos los planetas girando alrededor del Sol y a este girando alrededor de la Tierra que se hallaba inmóvil, este modelo tenía la ventaja que no violaba las Escrituras. Calculó que si la Tierra se moviera las estrellas deberían estar 700 veces mas lejos de Saturno, que éste del Sol. Lo cual para el no era un sistema elegante como para haber sido creado por Dios. Estudió los cometas a los que colocó fuera de la órbita de la Luna y tuvo la oportunidad de observar una supernova en 1572 lo que minó las teorías Aristotélicas de un universo sin cambios, que habiendo sido apoyadas por los teólogos sobrevivían hasta ese momento.

Sus observaciones, que eran las más exactas disponibles, darían después de fallecido las herramientas para que se pudiera determinar las leyes del movimiento celeste, dadas por su ayudante y uno de los más grandes científicos de la historia: Johannes Kepler.

1.1.9.3 Kepler

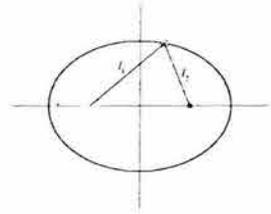
Johannes Kepler (1571 - 1630) reconocido teórico pero mal observador, trabajó durante muchos años tratando de encontrar un modelo que permitiese explicar los movimientos planetarios utilizando para tal efecto los pensamientos neoplatónicos y el sistema heliocéntrico de Copérnico. Trabajó con los sólidos perfectos de Platón para describir las órbitas de los planetas, sin embargo ninguno de ellos tenía la precisión suficiente. En busca de datos de observación más exactos, aceptó el ofrecimiento hacia el año de 1600 para trabajar como ayudante de Ticho Brahe. Sólo hasta después de la muerte de Brahe, pudo Kepler acceder a todas sus observaciones.

Con estos datos y después de probar con infinidad de formas geométricas "perfectas", intentó con variaciones del círculo: las elipses, con las cuales concordaban exactamente los

datos obtenidos durante las observaciones, echando por el piso otro de los paradigmas pitagóricos que seguían siendo considerados como ciertos después de 2000 años.

En 1609 publicó su "Astronomía Nova" en donde postulaba las órbitas elípticas de los planetas y mostró sus dos primeras leyes:

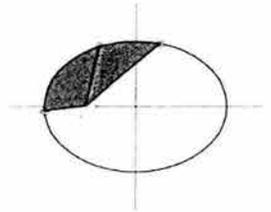
1a . Los planetas giran alrededor del Sol en órbitas elípticas, estando éste en uno de sus focos



En realidad la excentricidad de las órbitas es mínima por eso estas elipses son casi como un círculo y sólo hasta observaciones tan precisas como las de Brahe pudo él encontrar los datos para este descubrimiento.

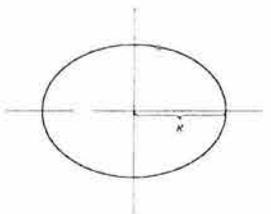
La observación de los movimientos de Marte entre las estrellas llevó a pensar a Kepler que los planetas se mueven a velocidades variables . Cuando el planeta está cerca al perihelio se mueve más rápido y cuando está cerca a su afelio se mueve más despacio, este fenómeno se describe en su segunda ley:

2a. Una línea dibujada entre el planeta y el sol barre áreas iguales en tiempos iguales.



Su tercera ley fue publicada en Harmonices Mundi años después (1619), en ella relaciona la distancia del planeta al Sol con la duración de su orbita alrededor de él

3a. El cubo de la distancia media de cada planeta al sol es proporcional al cuadrado del tiempo que tarda en completar una órbita.



1.1.9.4 Galileo

Uno de los defensores más importantes de las teorías heliocéntricas fue Galileo Galilei (1564 - 1642). En el siglo XVI la iglesia ejercía un gran poder sobre la sociedad europea, Dios existía por fuera de la esfera celestial y delegó en los ángeles el control de los movimientos planetarios. Galileo fue la primera persona en utilizar un catalejo como telescopio para realizar observaciones astronómicas en el año de 1609, entre sus observaciones más famosas están las siguientes:

- Estrellas tenues para ser vistas con el ojo desnudo
- Cráteres Lunares
- Manchas solares
- Las lunas de Júpiter, comparándolas con un mini modelo del sistema heliocéntrico
- Las fases de Venus (cuya explicación era imposible bajo un modelo Ptolemaico, pero si con un modelo similar al de Brahe)

Galileo estudió el movimiento de los objetos ordinarios en la Tierra, encontró que la visión de Aristóteles estaba equivocada y que los objetos requieren una fuerza externa para cambiar su movimiento, que tienden a permanecer en movimiento y que todos independiente de su masa tienen la misma aceleración, ideas que estuvieron a punto de desembocar en las leyes que posteriormente descubriría Newton.

Galileo puede considerarse el padre de las ciencias modernas ya que sus ideas se basaban en experimentos. Estas observaciones y sus lecturas fueron la principal arma con la que luchó para que la Iglesia Católica Romana aceptara las teorías copernicanas. En principio el Vaticano había elogiado y apoyado las observaciones de Galileo, pero al insistir en que la cosmología de Copérnico debía ser aceptada por las escrituras, hizo que la iglesia prohibiera el libro de Copérnico "*De Revolutionibus*". Al llegar Urbano VIII al estrado papal, Galileo que contaba con su favor, escribió "El Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo", en el cual ridiculizaba la posición de la iglesia a través de Simplicio el simplón.

Como respuesta el Papa prohibió el libro y Galileo fue llevado ante la inquisición en donde lo obligaron a abjurar de sus creencias y fue recluido de por vida bajo arresto domiciliario.

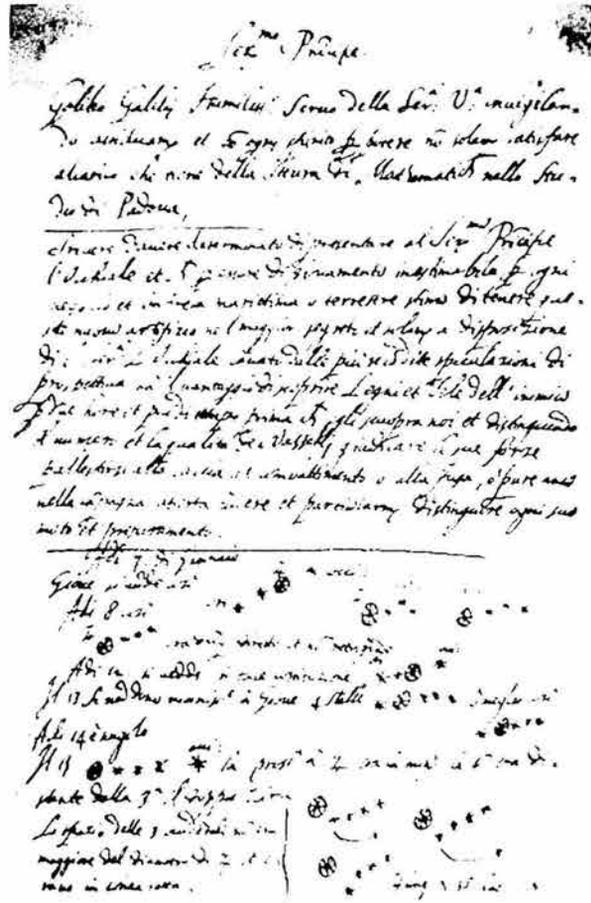


Figura 1.10. Manuscrito de Galileo que apareció en Sidereus Nuncius sobre los descubrimientos de las lunas de Júpiter

1.2 ASTRONOMÍA MODERNA [2]

El desarrollo de los sistemas ópticos, dio a la astronomía un vuelco fundamental y se comenzaron a descubrir, describir y catalogar miles de objetos celestes nunca observados. En el Siglo XVII esta gran revolución dio a conocer a grandes astrónomos que fueron construyendo la astronomía moderna y actual: Simon Marius (detectó la Nebulosa de Andrómeda en 1612), Christoph Scheiner (estudió las manchas solares 1630), Johannes Hevelius (realizó precisas observaciones de la luna y cometas desde su observatorio en Dantzing), Christian Huygens (descubrió el anillo de Saturno y su satélite Titán), Giovanni Domenico Cassini (descubridor de 4 satélites de Saturno), Olaus Römer (determinó la velocidad de la luz a partir de los eclipses de los satélites de Júpiter en 1676) y John Flamsteed (fundó el Observatorio de Greenwich en 1675 y realizó un catálogo celeste)².

1.2.1 Newton

Uno de los científicos más importantes de la humanidad es Isaac Newton (1643 - 1727), quien nació el año de la muerte de Galileo. Durante sus años universitarios estudió a Platón, Aristóteles y Descartes, poco después de su graduación y debido a la peste se trasladó a su casa, en donde dedujo la explicación de como la gravitación causa el movimiento de la Luna y los Planetas. Hasta mediados del siglo XVII todos los intentos de describir el cielo matemáticamente fueron empíricos o basados directamente sobre datos y observaciones.

Newton introdujo una aproximación matemática promulgando sus tres leyes del movimiento, que se aplican a los movimientos terrestres y en los cielos. Estas leyes son:

- Un cuerpo permanece en reposo o en movimiento en línea recta y a una velocidad constante a menos que una fuerza externa actúe sobre él.
- La aceleración de un objeto es proporcional a la fuerza que actúa sobre él.
- Cuando un objeto ejerce fuerza sobre otro, el segundo ejerce una fuerza de igual magnitud sobre el primero pero en dirección contraria.

² Tomado de: Astronomía Autodidacta, Astronomía colombiana. *Historia de la Astronomía II*

Postuló que la fuerza que mantiene a los planetas en órbita es la gravedad y que esta fuerza disminuye con la distancia. Se dice que Newton se inspiró en la caída de una manzana para imaginar el efecto de la gravedad, aunque esta anécdota no puede comprobarse si sirve como modelo para explicar la ley del inverso del cuadrado. La misma fuerza gravitatoria que hace caer la manzana se extiende hacia la Luna, su fuerza disminuye con el cuadrado de la distancia. Newton utilizando su primera Ley determinó que la Luna escaparía en línea recta si no fuese apartada de su camino por una fuerza (la gravedad terrestre).

La Ley de la Gravitación Universal dice que:

Dos cuerpos se atraen uno al otro con una fuerza que es directamente proporcional a la masa de cada uno e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

Newton además modificó los telescopios creando los telescopios reflectores newtonianos, que permitieron la observación más clara de objetos muy tenues. Su obra principal fue "*Philosophiae naturalis principia mathematica*", en donde expuso sus leyes que aplicadas al movimiento planetario explicaban toda la dinámica conocida del sistema solar.

1.2.2 Universos Islas

Aparte de los Planetas y las estrellas se observaban en el cielo elementos nebulosos (borrosos) dispersos entre ellas, que en su mayoría sólo podían ser vistas a través de telescopios. Uno de los primeros en escribir una teoría sobre estas nebulosas fue Immanuel Kant (1724 -1804). Después de algunas lecturas concluyó que las estrellas de la Vía Láctea estaban distribuidas en forma de disco y como sabía de la observación de otras nebulosas elípticas, pensó que estas podían estar formadas por muchas estrellas distantes.

Desde estos estudios se manejaron dos teorías al respecto de las nebulosas, la de Kant decía que las nebulosas elípticas eran cúmulos de millones de estrellas y que cada una era como un "universo isla". La otra teoría explicaba que las nebulosas eran torbellinos de gas

pertenecientes a la Vía Láctea y de cuya condensación nacían las estrellas. El enigma de estas teorías se resolvería años después.

William Herschel (1738-1822) emprendió el estudio de todos estos objetos que se llamaron del espacio profundo. Músico de profesión se aficionó a la astronomía y a la fabricación de telescopios, tarea en que fue ayudado por su hermana Caroline. Su método de observación consistía en el barrido de zonas del cielo, teniendo como ayuda una memoria prodigiosa que prácticamente le permitía tener un atlas del cielo en su mente. Su primer descubrimiento importante fue el planeta Urano en 1781, lo que le ganó el favor del Rey Jorge III quien le concedió un subsidio real para sus estudios con lo cual pudo dedicarse por completo a la Astronomía. Posteriormente descubrió Enceladus y Mimas. En 1781 recibió el catálogo de Messier y comenzó el estudio de estos objetos, muchos de los cuales eran nebulosas pero que con sus equipos pudo resolver cuales son sus estrellas componentes. Realizó un plano de la Vía Láctea y de las estrellas del hemisferio norte el cual fue completado con las del hemisferio sur por su hijo.

1.2.3 Las distancias en el universo

Llegado el siglo XVIII la tarea emprendida por los astrónomos fue la de encontrar las distancias en el universo, esto requería tanto de métodos matemáticos como de cálculos apoyados en observaciones precisas. El sistema de medición más adecuado era el de triangulación o paralaje, su técnica consiste en realizar dos observaciones del mismo objeto en lugares diferentes y a la misma hora, el objeto observado parecerá desplazarse con respecto al fondo estrellado de acuerdo a su distancia : si es cercano el desplazamiento será mayor.

Al calcular el ángulo de desplazamiento y conociendo la distancia que separa los dos puntos de observación se puede encontrar la distancia al objeto. La realización del paralaje requirió la utilización de sistemas de medida de tiempo precisas, así como de medición exacta de las distancias geográficas, esto sólo se logró cuando las necesidades,

principalmente navieras, llevaron al desarrollo de cronómetros más exactos y de la ciencia de la cartografía.

Se realizaron los paralajes de los planetas exteriores y de los interiores durante los tránsitos y posteriormente se realizaron los paralajes de las primeras estrellas, como fue 61 del Cisne por Fiedrich Bessel en el año de 1838, dando como resultado una distancia de 11 años luz y luego Alfa Centauro con una distancia de 4.3 años luz. De esta manera el tamaño del universo se extendió hasta el infinito.

1.2.4 Espectrografía

Joseph Fraunhofer, hombre de mucha inteligencia y de gran agudeza visual tenía como profesión vidriero y llegó a fabricar los espejos de telescopios más perfectos para su época. Hacia 1814 en experimentos dirigidos a corregir las aberraciones cromáticas de sus telescopios utilizó las líneas espectrales de la luz y pronto se sintió fascinado por ellas. detectó centenares de rayas verticales en el espectro del Sol e idénticas irregularidades en los espectros de la Luna y los Planetas (son iguales pues es la misma luz del sol reflejada). Cuando dirigió sus espectrógrafo a las estrellas las líneas cambiaban. Estas líneas se llaman de Fraunhofer.

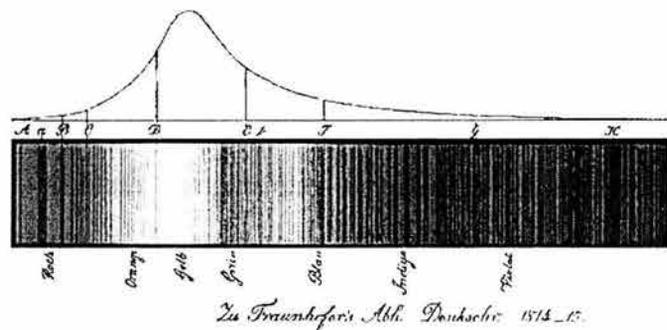


Figura 1.11. Esquema de Fraunhofer de sus líneas de absorción

Aunque Fraunhofer nunca lo supo, sus líneas son producidas por la emisión o absorción de determinadas longitudes de onda por los diferentes compuestos químicos que constituyen las estrellas, estas líneas se ven afectadas por la temperatura, el magnetismo y otras propiedades físicas y químicas de la materia, que fue lo que permitió el estudio a larga distancia de la composición y características individuales de los diferentes objetos celestes.

El nacimiento de la fotografía y la creación del análisis espectral en la segunda mitad del siglo XIX, da a luz una nueva rama de la astronomía: La Astrofísica.

1.2.5 Siglo XX

Al llegar a este siglo varias de las creencias precopernicanas habían resurgido al hablar de las galaxias. Se consideraba que el Sol se encontraba cerca del centro de la Vía Láctea que constituía el universo entero, más allá de los confines de la galaxia se consideraba que no existía nada más que un vacío infinito. El estudio bajo espectroscopia de las nebulosas elípticas a principios de siglo, demostró que no tenían características de ser nubes de gases, sino más bien características estelares, lo que señaló que al menos algunas nebulosas espirales estaban constituidas por estrellas.

El estudio de estrellas variables por parte de Harlow Shapley (1885 – 1972) lo llevo a descubrir variables cefeidas, estas estrellas pulsan cambiando de brillo. El ciclo de variación de brillo de las cefeidas esta directamente relacionado con su brillo intrínseco, descubrimiento realizado por Henretta Swan Leavitt. Esta propiedad de las cefeidas permitió conocer su magnitud absoluta. Para calcular su distancia sólo se requiere medir su magnitud aparente y luego aplicar la fórmula según la cual el brillo disminuye con el cuadrado de la distancia. Shapley al estudiar las variables de los cúmulos globulares se dio cuenta que su distancia era mucho mayor de la que se creía y que se hallaban hacia el centro de la galaxia, al calcular su distancia al Sol, este debería estar localizado en la periferia de la Vía Láctea. De esta manera se desplazó el Sol del centro del universo conocido a una periferia de él.

Aunque varios astrónomos defendían la teoría de los Universos Islas expuesta por Kant, seguida por Herschel, no se tenían pruebas confirmatorias del hecho. Esta prueba provendría de las observaciones de Edwin Hubble que trabajaba en el observatorio de Monte Palomar tomando y revisando fotografías de grandes campos de cielo. Hubble el 19 de Febrero de 1924 escribió a Shapley: " Seguramente le interesará saber que he hallado una variable cefeida en la nebulosa de Andrómeda". de esta manera se reabatió la idea de

Shapley de una única galaxia, la nuestra, como constituyente del universo entero y reveló la presencia de otros universos isla en el espacio.

1.2.6 La Teoría de la Relatividad General

En trabajos independientes a principios del siglo XX Albert Einstein propuso su Teoría de la Relatividad General, en la que se deduce que el universo no debe ser estático sino que se encuentra en expansión, sin embargo, esto no coincidía con lo que se creía era realmente un universo estático, de esta manera Einstein introdujo en su fórmula la constante cosmológica para adecuarla a las teorías vigentes.

Vesto Slipher, miembro del observatorio Lowell, bajo las órdenes del celebre Percival Lowell, fue encargado de estudiar el movimiento circular de las nubes de gas durante la formación de estrellas, teoría que era defendida por su jefe. El encontró, aparte de la rotación de dichas nebulosas, un corrimiento al rojo persistente en sus espectros, este hallazgo se debió a que el efecto Doppler indica que las longitudes de onda emitidas por un objeto que se aleja del observador se alargan corriéndose hacia el rojo en el espectro estudiado. Sin embargo Slipher no encontró la explicación a su hallazgo. Fue nuevamente Hubble quien al medir las distancias de 25 galaxias encontró una correlación directa entre su distancia y el grado de corrimiento o en otras palabras la velocidad en que se alejan.

El hombre que unió los hallazgos de Slipher, Hubble y Einstein fue un sacerdote matemático llamado Georges Lemaitre, quien en 1927 publicó un artículo donde desarrollaba la relación del corrimiento al rojo con un universo en expansión. Posteriormente cuando su artículo se promulgó entre la comunidad científica, se comenzó a pensar, que si el universo se encuentra en expansión alguna vez todo debió estar unido en un punto de luz al cual llamó singularidad o "átomo primordial" y su expansión "Gran Ruido". Más tarde el astrónomo Fred Hoyle, quien era opuesto a esta propuesta, la llamó despectivamente "Big Bang", Así es como se conoce a la teoría más aceptada actualmente como origen del universo.

En la actualidad conocemos que vivimos en un sistema solar localizado en la periferia de la vía Láctea compuesta por miles de millones de soles, la cual es parte de un conjunto galáctico llamado grupo local, el cual a su vez se localiza en un supercúmulo de galaxias distribuidas en un universo de más de 15 mil millones de años luz, que se encuentra en expansión.

CAPÍTULO 2

TELESCOPIOS

2.1 BREVE HISTORIA DE LOS TELESCOPIOS[3]

La Astronomía es una ciencia que encuentra en la observación su principal método de estudio y por lo tanto en los telescopios su principal herramienta de trabajo. El telescopio es en esencia un instrumento capaz de obtener imágenes ampliadas de los cuerpos celestes, y existen muchos tipos de telescopios que se clasifican según su principio de operación, su tamaño y el tipo de radiaciones que son capaces de captar¹.

En una noche sin Luna con buenas condiciones climáticas y lejos de fuentes de luz artificial, es posible observar a simple vista estrellas hasta la magnitud 6, Hiparco de Samos (190–120 a.C.) fue el primero en catalogar las estrellas por su magnitud dejando como de magnitud 1 a aquellas más brillantes y de sexta magnitud a aquellas que casi escapaban de su vista. En esta escala paradójicamente entre menor (o negativo) sea el número el objeto es más brillante.

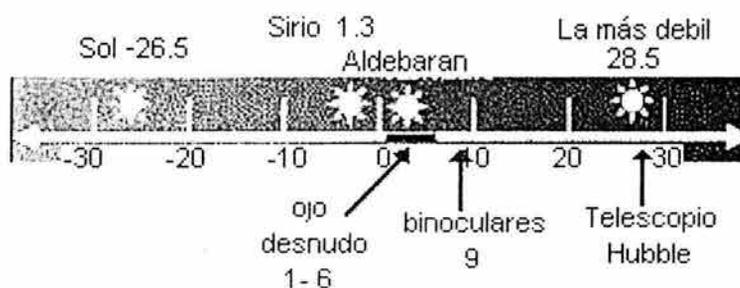


Figura 2.1. Magnitud de diferentes estrellas, y posibilidades de observación con diferentes instrumentos

En efecto, por una cuestión física ligada al tamaño de la pupila, existe un límite para la cantidad de luz que el ojo humano puede captar. Para observar objetos de luminosidad más

¹ Astronomíaonline, recursos astronómicos en internet. *Historia del telescopio*

débil, es necesario captar un flujo luminoso mayor, lo cual requiere el empleo de telescopios.

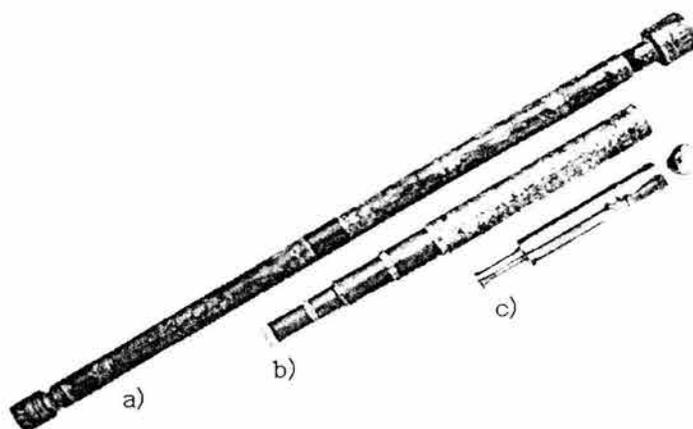


Figura 2.2. Primeros telescopios. a) Telescopio de Galileo. b) Telescopio refractor. c) Telescopio reflector

Utilizando simplemente un telescopio normal de aficionado, ya es posible observar estrellas de hasta decimosegunda magnitud. Evidentemente la cantidad de flujo luminoso que puede captarse con cualquier telescopio depende de las dimensiones de la superficie de captación del propio telescopio. Además de garantizar una sensibilidad mayor, un telescopio tiene otra ventaja: proporcionar más poder de resolución respecto al ojo humano, lo que quiere decir que no sólo permite observar objetos de luminosidad más débil, sino también recoger detalles más finos, que de otro modo escaparían a la vista del observador.

2.1.1 Telescopios de refracción

La historia del telescopio inicia a principios del siglo XVII, cuando supuestamente los hijos de un fabricante de lentes holandés llamado Hans Lippershey (1570-1619), jugando descubrieron accidentalmente que haciendo combinaciones de los lentes podían amplificar las imágenes en forma significativa. Lippershey entonces presentó su descubrimiento a la Corona Holandesa, pensando en el valor estratégico del hallazgo, en una de las demostraciones se encontraba presente un amigo de Galileo Galilei, quien a su regreso a Italia le informó de lo que había presenciado en Holanda, así que inmediatamente Galileo entendió el principio físico y comenzó a hacer sus propios experimentos, construyendo así su primer telescopio usando un tubo de órgano para sostener los lentes, realizando sus primeras observaciones con el instrumento el 6 de enero de 1610.

2.1.1.1 Galileo y Kepler

En primer lugar, Galileo concibió el proyecto, una vez tenidas noticias sobre tal instrumento, para sacar partido económico con su venta a la República Veneciana, obteniendo, de hecho, la confirmación de por vida en la cátedra paduana, con doble salario. En segundo lugar, Galileo, para defenderse de quien minimizaba el mérito de su descubrimiento por saber ya de antemano de su existencia, argumentaba que es más difícil llegar a la resolución de un problema planteado que encontrar tal solución por puro azar, como le ocurriera al holandés que había previamente construido el aparato. En *il Saggiatore*, Galileo explica el razonamiento preciso por el que descubrió cómo debía hacerse el telescopio. Pero se trata de un razonamiento *a posteriori* y tan manipulado que difícilmente puede encubrir la realidad de que Galileo, probablemente, llegó al telescopio más bien gracias a la experimentación y a su habilidad manual. De hecho, una de las características más importantes del trabajo de Galileo es su deseo por experimentar, que además de la construcción de telescopios de gran perfección, lo llevó a su utilización astronómica.

El telescopio de Galileo consistió en un par de lentes, la primera una lente objetivo convexa de 3 cm. de diámetro, la cual refracta la luz y la concentra en una segunda lente cóncava más pequeña llamada ocular la cual se encuentra cerca del ojo del observador.

Los primeros descubrimientos que hizo con el telescopio, se encuentran expuestos en el *Sidereus Nuncios (Mensajero Sideral)*, obra escrita en latín y publicada en Venecia en 1610 y que envió, entre otros, a Kepler. Este se tomó bastante interés por ella y le contestó en otra obra breve, *Disertatio cum Nuncio Sidereo*, en la que, junto a muchos elogios, no faltan también críticas ácidas a algunos de los razonamientos de Galileo.

En el *Sidereus Nuncius*, Galileo describe el telescopio y explica sus primeras observaciones:

- Descubrió en la Luna montañas similares a las de la Tierra, pero mucho más altas.

- Observó las estrellas de la constelación de Orión y de las Pléyades, descubriendo la existencia de muchas de ellas no visibles a ojo desnudo y encontró que la Vía Láctea era en realidad un agregado de estrellas individuales. De especial interés es la observación que hace Galileo de que el tamaño de las estrellas, cuando se observan con el telescopio, no aumenta tanto como en el caso de los planetas o de los demás cuerpos. Según ya se ha dicho, las *cabelleras* y *fulgores* usando términos de Galileo, que presentan las estrellas cuando se observan a simple vista se deben a la difracción producida en la pupila. Este efecto es menor cuando se utiliza un telescopio, que tiene una abertura (la del objetivo) mucho mayor. Galileo da una explicación un tanto artificiosa del fenómeno en unos términos en que parece estar muy seguro de la misma, ganándose por ella la recriminación de Kepler que, aunque no había llegado a la explicación correcta, daba una bastante más razonable.
- El *Sidereus Nuncius* se concluye con el descubrimiento de los satélites de Júpiter y la descripción detallada de sus posiciones y brillos entre los días 7 de Enero y 2 de Marzo de 1610.
- Más adelante, Galileo descubrió las fases de Venus y la variación de su tamaño aparente y los anillos de Saturno.
- Estudió las manchas solares, que contribuyeron a refutar la idea de la imperturbabilidad de los cuerpos celestes, así como le permitieron determinar la posición del Ecuador solar y calcular su período de rotación, desmintiendo las deducciones teóricas que al respecto había hecho Kepler.

Posteriormente Kepler presentó una variante al telescopio de Galileo, en el cual sustituye la lente del ocular por una lente convexa, lo que invertía la imagen observada pero ampliaba el campo de visión del telescopio. Sin embargo esto trajo como consecuencia un aumento considerable en la aberración cromática, problema que resultaba mínimo en el telescopio de Galileo.

Al pasar la luz por el objetivo, ésta debe salir en un frente de ondas esférico, pues sólo de esta manera podrá concentrarse toda la luz en un mismo punto. Sin embargo, al pasar la luz por el lente, esta se descompone y el ángulo de refracción depende de la longitud de onda, por lo que la luz se concentra en diferentes puntos del eje focal para cada fase del espectro.

A mediados del siglo XVII Christian Huygens trató de corregir este problema alargando la distancia focal de los objetivos, con lo cual obtuvo además un incremento proporcional de la imagen. Con esta nueva mejora pudo observar por primera vez los anillos de Saturno, aunque en realidad parecía ser uno solo, hasta que Gian Cassini (1625-1712) descubrió la separación que lleva su nombre.

2.1.1.2 Funcionamiento

En el caso de los telescopios refractores el objetivo lo constituye una lente convergente cuya función es recoger la luz y concentrarla en un punto preciso de su eje de simetría, llamado foco. Por este motivo, el eje de simetría de la lente se llama también eje focal. Uno de los parámetros característicos de un telescopio está representado por la distancia entre el foco y el objetivo, llamada distancia focal. El valor de la distancia focal varía según la forma de la lente que se utiliza para el objetivo (esférica, parabólica, etc.). Además del objetivo, los telescopios refractores emplean otro sistema de lentes, de dimensiones menores, que sirven para ampliar la imagen. Estas lentes están colocadas en puntos distintos del eje focal, según el esquema óptico del telescopio. La relación entre la distancia focal del telescopio y la distancia entre el foco y las lentes auxiliares determina la ampliación de la imagen. En el diseño de Galileo, por ejemplo, se emplea un lente divergente colocado entre el objetivo y el foco. En el diseño llamado kepleriano, en cambio, la ampliación de la imagen se obtiene mediante una lente convergente colocada más allá del foco del telescopio. Sin embargo, los telescopios refractores presentan algunos problemas.

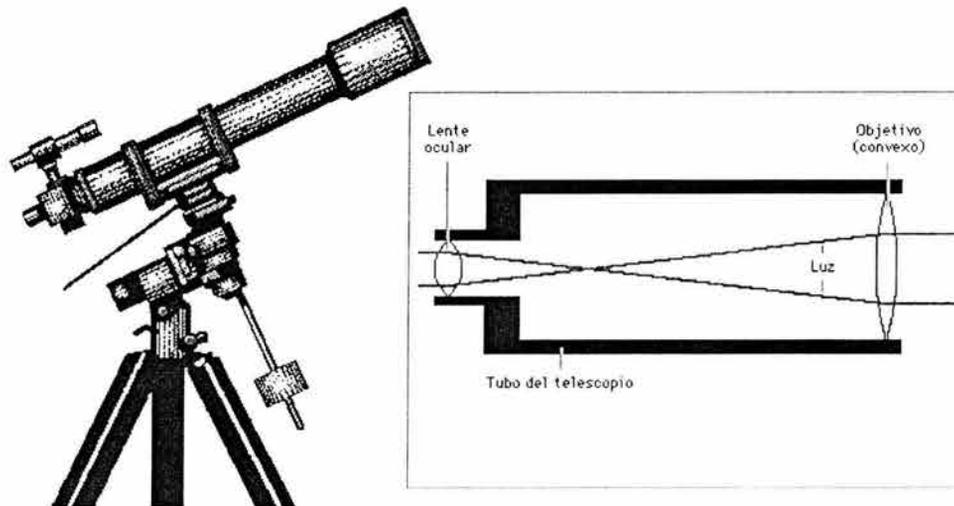


Figura 2.3. Telescopio astronómico refractor

El más importante es la aberración cromática. Este problema puede compensarse parcialmente utilizando las lentes adecuadas para modificar el ángulo de refracción, o bien atenuarlo con el empleo de telescopios de distancia focal mayor.

Por este motivo, los primeros telescopios refractores eran muy largos. Además algunas limitaciones técnicas impiden utilizar lentes de grandes dimensiones. En efecto, las lentes están sostenidas por la estructura del telescopio, lo que se consigue colocando fijaciones alrededor del borde. Si estas fijaciones fuesen de dimensiones demasiado grandes, las lentes tenderían a curvarse por efecto de su propio peso y la deformación del objetivo produciría una distorsión de la imagen. Por este motivo, los telescopios refractores tienen un tamaño moderado.

2.1.2 Telescopios de reflexión

Por otra parte están los telescopios reflectores, la mayor parte de los telescopios profesionales pertenecen a esta clasificación. En este tipo de telescopio, el colector de luz no es una lente, sino un espejo de forma parabólica. Por tanto, se elimina el problema de la aberración cromática, ya que la reflexión de la luz es independiente de su longitud de onda. Por otra parte, las estructuras de sostén pueden aplicarse también detrás del espejo, lo que permite la construcción de telescopios mayores.

2.1.2.1 Newton y Cassegrain

Un poco más tarde Isaac Newton (1623-1727) perfecciona notablemente el telescopio ideado por su compatriota James Gregory en 1663, construyendo en 1668 su telescopio de espejo (reflector), para ofrecer a la Astronomía un instrumento libre de la aberración cromática, que Newton estimaba inevitablemente unida a los telescopios refractores. El telescopio de Newton despertó un enorme interés: el rey expresó deseos de verlo y la Royal Society, que conserva hoy como inestimable reliquia el segundo modelo de ese telescopio, lo elige miembro de la misma en 1672, año en que presenta a la institución su primera memoria: *A new theory about light and colours*, que más tarde aparecerá en los *Philosophical Transactions*.

Estando Newton convencido de la imposibilidad de evitar la aberración cromática con el uso de lentes, decide sustituirlos por espejos. Newton colocó un espejo cóncavo en la base del telescopio y otro plano en el tubo, a 45° , al que envía la luz y el cual refleja la imagen hacia un ocular colocado a un lado. El telescopio de Newton generaba imágenes nueve veces más grandes que un refractor cuatro veces más largo.

Simultáneamente a Newton, Guillaume Cassegrain (1765) en Francia presenta un telescopio similar, el cual posee un espejo primario similar al de Newton, que refleja la luz hacia un espejo secundario convexo que se encuentra de frente y opuesto al primario, enviando y concentrando la luz en un orificio en el centro del espejo primario. Sin embargo este modelo no funcionó sino hasta que Bernard Schmidt agregó a finales del siglo XIX una lente que logró corregir la aberración propia de este telescopio, conocido hoy en día como Cassegrain-Schmidt.

2.1.2.2 Funcionamiento

En los modelos más sencillos, la luz es captada por el espejo y enviada hacia un punto común llamado foco principal. En la mayoría de los casos, sin embargo, se prefiere utilizar también espejos auxiliares de menores dimensiones para llevar la luz recogida por el espejo

principal hacia un foco secundario. Por esto, según la posición de los espejos secundarios, y su forma, a lo largo del recorrido de la luz, es posible obtener diversas configuraciones. En los reflectores de tipo newtoniano, se coloca un espejo plano de pequeñas dimensiones a lo largo del eje focal para desviar la luz recogida por el espejo principal hacia el foco secundario, colocado en el exterior del cuerpo del telescopio. La posición del espejo secundario se elige de modo que no modifique la distancia focal. Esta configuración es una de las más habituales en los pequeños telescopios que se utilizan preferentemente para la observación directa, pero es desaconsejable en el caso de telescopios profesionales de mayores dimensiones, en los cuales la instrumentación en el foco del telescopio alteraría el equilibrio de toda la estructura. La configuración óptica más habitual en los telescopios profesionales es, por tanto, la de tipo Cassegrain o también llamada catadióptica.

En este caso, la luz recogida por el espejo principal se refleja hacia un secundario convergente de forma hiperbólica, colocado siempre a lo largo del eje focal y de ahí se refleja nuevamente, a través de una hendidura del espejo principal, hacia el foco secundario. Las ventajas de esta configuración son muchas. En primer lugar, es posible conseguir una distancia focal mayor, incluso empleando un tubo de dimensiones relativamente pequeñas. Además, los instrumentos científicos pueden estar dispuestos a lo largo del eje focal, lo cual garantiza un mayor equilibrio de toda la estructura.

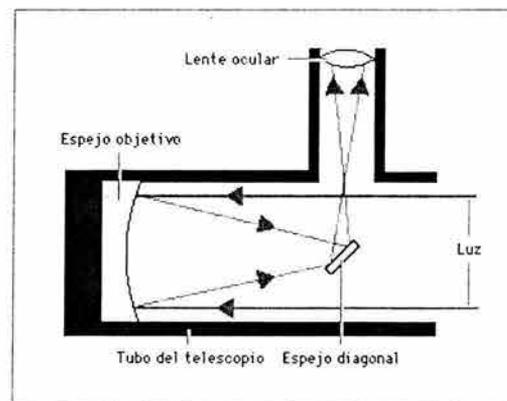
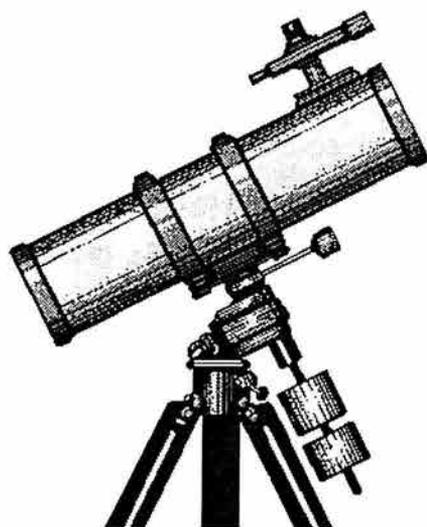


Figura 2.4. Telescopio reflector newtoniano

Al igual que en la configuración newtoniana, también en los reflectores de tipo Coudé el foco es exterior al telescopio. El sistema prevé, además del espejo principal, otro secundario hiperbólico y dos espejos planos paralelos inclinados 45° respecto al eje focal. Aunque la configuración Coudé es conceptualmente más complicada que las anteriores, la posición del foco, relativamente distante del telescopio, presenta la ventaja de poder desplazar separadamente los instrumentos científicos. Finalmente, la configuración Nasmyth es muy parecida a la Coudé, con la diferencia de que hay un único espejo plano dispuesto a lo largo del eje focal.

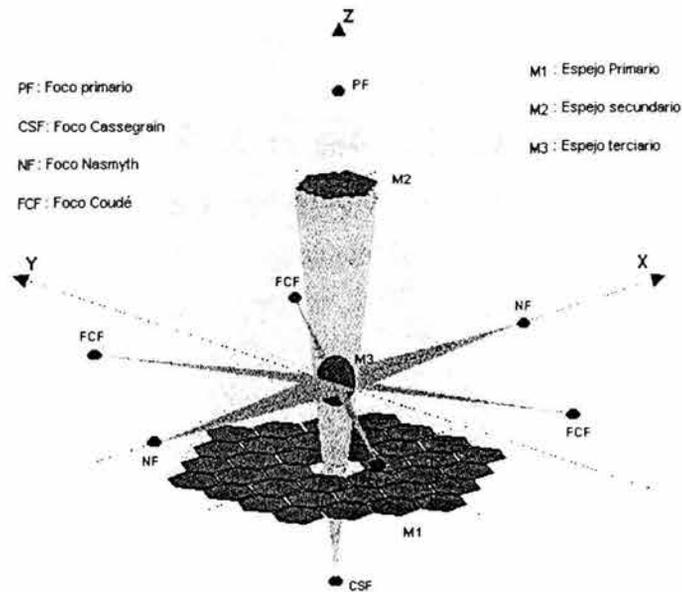


Figura 2.5. Diferentes focos de un telescopio reflector.

2.2 TELESCOPIOS DE TECNOLOGÍA AVANZADA

Una de las principales limitaciones de los telescopios reflectores estaba en la complicación de fabricar los espejos, ya que en ese entonces se trataba de superficies metálicas pulidas. Esto encontró una solución cuando el físico francés Jean Foucault (1819 – 1868) encontró un proceso químico para aluminizar superficies de vidrio, las cuales resultan mucho más fáciles de manipular que las metálicas, lo que cooperó para el resurgimiento de los telescopios reflectores. A partir de esto comenzaron a construirse en forma simultánea tanto telescopios reflectores como refractores, lo que inició una competencia entre ambos tipos, fabricándose instrumentos cada vez más grandes hasta que en 1897 entró en funcionamiento el telescopio refractor Yerkes en Chicago, el cual se convirtió en el refractor más grande con un diámetro de 40 pulgadas. A partir de entonces los proyectos de grandes telescopios han sido principalmente catadiópticos.

2.2.1 Monte Palomar

Durante el siglo XX se desarrollaron numerosos proyectos cada vez más ambiciosos, empezando con el telescopio de Monte Wilson de 2.54 m de diámetro, construido por George Ellery Hale, el cual fue terminado en 1917 y con el que Edwin Hubble desarrolló su teoría de la expansión del universo.

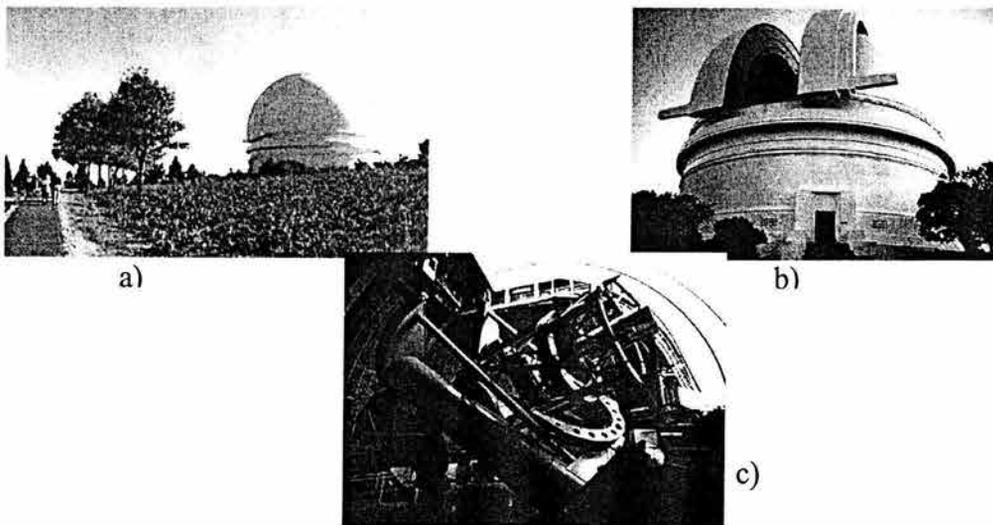


Figura 2.6. a) Observatorio de Monte palomar. b) Edificio principal donde se encuentra el telescopio Hale de 5 metros. c) Vista interior del telescopio Hale

El 2 de Diciembre de 1934 empezó la fundición del disco de vidrio Pyrex para el gran telescopio Hale en el observatorio de Monte Palomar. Para disminuir el peso, se hizo su parte posterior de forma alveolada, pudiendo reducir su peso a la mitad sin perjuicio de su resistencia. El molde requirió tres años de trabajo y fue proyectado por el Dr. A. Grader. Se prepararon 38 toneladas de vidrio a pesar de que sólo se necesitaban 20. El calentamiento previo duró 10 días hasta conseguir una temperatura de unos 1500° C. La operación de llenar el crisol duró tres semanas. La colada duró 10 horas y después se dejó bajar lentamente la temperatura hasta los 650°. Esta temperatura se mantuvo durante dos meses, haciéndola luego descender diariamente una pequeña fracción hasta que alcanzó la temperatura ambiente. La fundición se llevó a cabo en Corning Glass Works, de Nueva York.

El tallado, pulido, figurado e instalación fue hecho por el Instituto Tecnológico de California. La media luna, parte superior del eje polar se desliza en un baño de aceite a presión. El foco primario está situado en la parte superior del telescopio y puede accederse a él por medio de un ascensor.

Con este telescopio de 5 m. de diámetro y con la Cámara Schmidt de 122 cm. de este observatorio, se tomaron por primera vez fotografías en color verdadero de galaxias y objetos de la Vía Láctea.

2.2.2 Keck

El telescopio óptico más grande construido hasta la fecha es el telescopio Keck de 10 metros de diámetro. Dicho telescopio depende de la Universidad de California y está ubicado en Mauna Kea, Hawaii, debido a que este lugar se caracteriza por tener condiciones de observación excepcionales. Debe su nombre al Sr. W.M. Keck que en 1985 donó 70 millones de dólares a la construcción del telescopio. El telescopio Keck funcionó por varios años



Figura 2.7. Observatorio de Mauna Kea en Hawai

obteniendo unos resultados excelentes que en combinación con observaciones del telescopio espacial han mostrado que desarrollando nueva tecnología es posible alcanzar nuevos límites en la profundidad de las observaciones astronómicas.

El proyecto Keck fue tan exitoso que unos años más tarde se empezó a construir un segundo telescopio gemelo, del mismo diámetro que el primero formando así el interferómetro Keck. Dos telescopios se pueden usar simultáneamente apuntando al mismo objeto celeste, de tal forma que la señal medida en cada uno de ellos se combina para obtener una señal total con el doble de intensidad, que si solamente se observara con un telescopio. Esta técnica es muy poderosa porque permite ver detalles del objeto observado imposibles de ver con un solo telescopio.

Hablar de un telescopio de 10 m de diámetro significa una seria complicación para la fabricación y la manipulación del espejo. Por esta razón es que para este proyecto se plantea una forma alternativa de generar dicha superficie. Se trata de un espejo segmentado, formado por 36 espejos hexagonales de 1.8 m de lado con la capacidad de orientarse en forma independiente, lo que la convierte en una superficie más fácil de fabricar, montar y manipular.

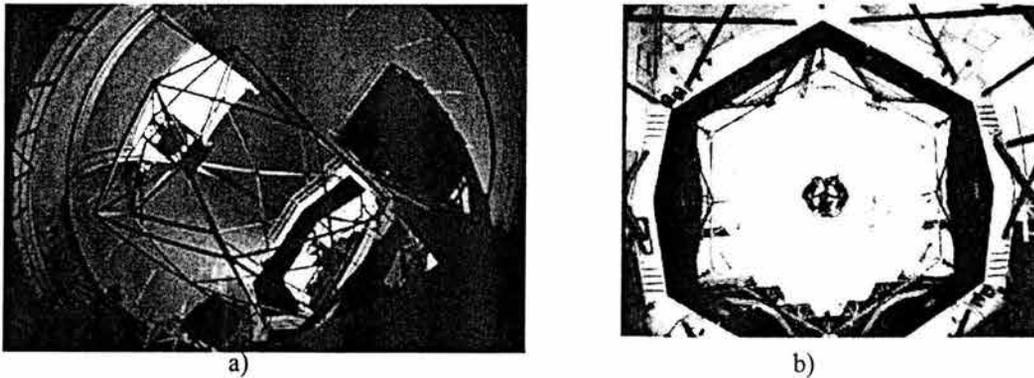


Figura 2.8. a) Vista interior del telescopio Keck. b) Espejo primario del telescopio Keck

Un interferómetro utiliza múltiples telescopios para reunir ondas de luz, después combina las ondas de tal manera que interactúen, o “interfieran” unas con otras. Un fenómeno similar puede observarse al tirar una piedra a un lago y viendo las ondas resultantes. Si se lanza una segunda piedra al agua, el nuevo juego de ondas pueden golpear con las primeras

ondas cambiando su diseño, o pueden juntarse con las primeras, obteniendo ondas más grandes y más potentes. En Astronomía, la idea es combinar las ondas de luz de los múltiples telescopios para simular un telescopio mayor. Esto permite a los científicos capturar imágenes de objetos mucho más pequeños o determinar su tamaño o posición con un mayor grado de precisión.

El desarrollo del Interferómetro Keck está dirigido por el JPL (Laboratorio de Propulsión a Chorro) para la Oficina de Ciencia Espacial de la NASA, en Washington, DC. JPL es una división del Instituto de Tecnología de California (Caltech). El W. M. Keck Observatory esta financiado por Caltech, la Universidad de California, y la NASA y está dirigido por la Asociación California para la Investigación Astronómica (California Association for Research in Astronomy), en Kamuela, Honolulu.

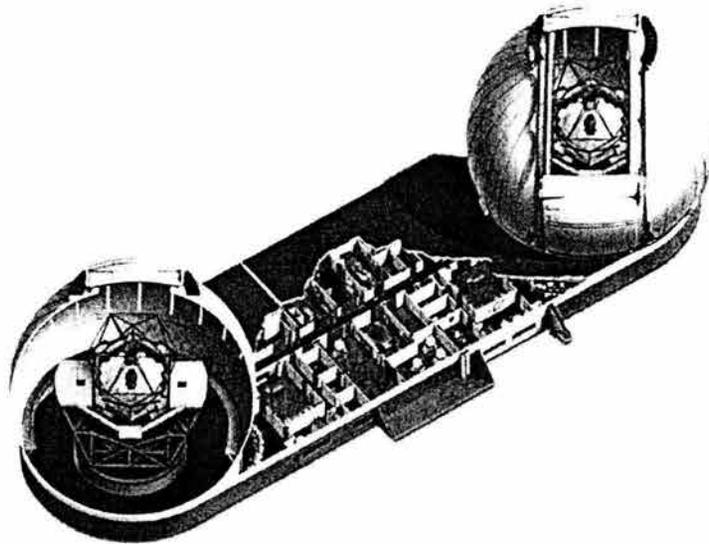


Figura 2.9. Esquema del interferómetro formado por los dos Telescopios Keck

2.2.3 Hubble

Aunque los instrumentos de observación han aumentado notablemente sus capacidades, existen muchos obstáculos difíciles de superar para obtener imágenes más claras. Uno de estos obstáculos es la propia atmósfera terrestre. Las diferentes capas de la atmósfera difractan y filtran la luz, lo que se traduce en imágenes distorsionadas. Por esta razón es

que surge la idea de poner telescopios fuera de la atmósfera terrestre. No fue hasta el año 1923 cuando el científico alemán Hermann Orberth propuso la construcción de un observatorio en el espacio. La carrera espacial comenzó en 1957 con el lanzamiento del satélite Sputnik. En 1962, cuatro años después de que se fundara la NASA, un grupo de científicos estadounidense propuso la creación de un gran telescopio espacial, propuesta que se hizo en varias ocasiones posteriores.

Los primeros satélites artificiales de carácter astronómico lanzados por la NASA fueron en los años 1968 y 1972. Con estos dos satélites se demostró la necesidad de tener un telescopio mayor, mejor y que durara varios años. La aceptación del proyecto de la lanzadera espacial ayudó a decidir también la propuesta del Telescopio Espacial.

En el año 1973 un grupo de científicos de la NASA propuso las líneas generales de construcción de este gran telescopio orbitante cuyas especificaciones fueron revisadas y ampliadas por otro grupo más numeroso en 1977. Ese mismo año el Congreso estadounidense aprobó la partida presupuestaria. Dos años antes, en 1975, la Agencia Espacial Europea (ESA) se había involucrado en el proyecto.

Dos organismos se hicieron cargo del diseño, desarrollo y construcción del telescopio espacial. El primero fue el Centro de Vuelos Espaciales Marshall en Alabama y el segundo fue el Centro de Vuelos Espaciales Goddar en Maryland.

Para la construcción del telescopio fueron contratados las empresas aeroespaciales Perkin-Elmer Corp. y Lockheed Missiles & Space Company. La primera se encargaría de desarrollar los sistemas ópticos y los sensores de guía, mientras que la segunda fabricaría la estructura, los sistemas de soporte y finalmente ensamblaría todo el satélite. La ESA, por su parte, desarrollaría los paneles solares y uno de los instrumentos científicos.

El proceso de construcción tomó casi una década. El espejo principal estaba acabado desde 1981 y el ensamblaje óptico fue entregado para la integración en el satélite en 1984. Los instrumentos científicos estaban disponibles desde 1983 para su calibración. El ensamblaje estaba íntegramente concluido en 1985.

Pero el lanzamiento tuvo que ser pospuesto. Previsto inicialmente para 1986, el desastre del transbordador Challenger en enero de ese mismo año, obligó a un paro de la carrera espacial estadounidense durante varios años hasta verificar y corregir los defectos de las lanzaderas espaciales. Durante ese tiempo, los ingenieros verificaron una y otra vez los instrumentos del telescopio.

Por fin, en el mes de abril del año 1990, el transbordador Discovery transportó en su bodega al Telescopio Espacial Hubble fuera de la superficie de la Tierra.

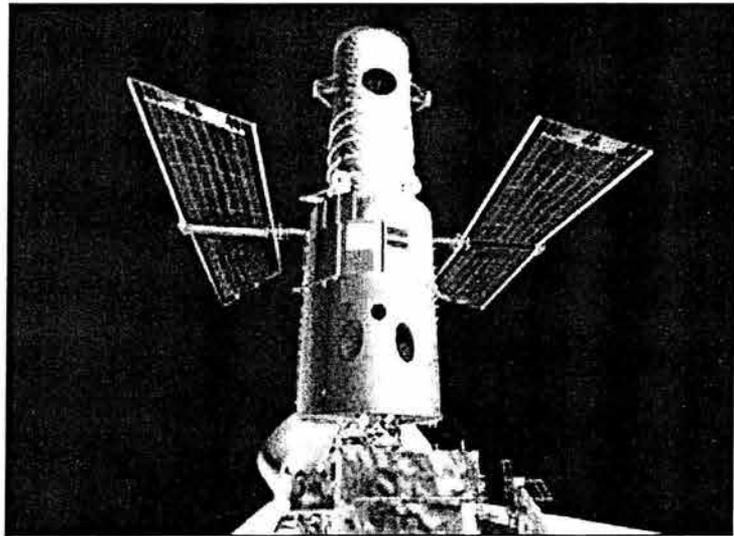


Figura 2.10. Servicio al Telescopio espacial Hubble

El Telescopio Espacial Hubble es un satélite artificial que orbita a la Tierra, al igual que otros satélites utilizados para las telecomunicaciones. Sin embargo, la diferencia más notable es que dirige sus instrumentos hacia el espacio en lugar de hacia nuestro planeta.

La arquitectura principal no difiere mucho de un telescopio terrestre. Es un tubo cilíndrico, en cuyo interior reside un gran espejo de 2,5 metros de diámetro. Comparado con otros telescopios terrestres no es capaz de concentrar tanta luz, ya que los más grandes (como los Keck I y II en Hawai) alcanzan los 10m.

El espejo principal colecta la luz y la concentra en un espejo secundario situado en la boca del telescopio, que a su vez refleja la luz hacia los instrumentos situados por detrás del primario gracias a una abertura en su centro.

Los instrumentos se encargan de recoger la luz y convertirla en datos para su envío a la Tierra. Curiosamente, el Telescopio Espacial Hubble utiliza otros satélites artificiales de comunicaciones para estar permanentemente en contacto con el Instituto Científico del

Telescopio Espacial (STScI), en Baltimore. Esto es así ya que el Hubble no es un satélite geostacionario, sino que da una vuelta alrededor de la Tierra cada 90 minutos, a una altura de 600 km. sobre la superficie.

La arquitectura de este singular telescopio es modular, pensando en las misiones de servicio que los astronautas del transbordador espacial realizan. En 1993, fue sustituido uno de los instrumentos científicos e instalado un aparato denominado COSTAR para corregir el defectuoso pulido del espejo primario, por el cual las imágenes se obtenían borrosas. En 1997, otra misión de servicio, cambió también varios de los instrumentos por otros mucho más sensibles y contruidos con tecnología de punta.

Aunque este telescopio espacial esté situado a 600 km de altura, el rozamiento con la tenue atmósfera terrestre hace que su órbita frene y por tanto descienda 400 metros de altitud por año. Esta situación es corregida mediante la intervención de astronautas.

Esta órbita baja y el frenado de la atmósfera, además, hace que sea difícil conocer la posición exacta del Telescopio. Con dos días de diferencia, la incertidumbre crece 30 km, por lo que conocer con 44 días de anticipación dónde estará el Hubble se convierte en un enigma de unos 4000 km. Por esta razón, no es posible planificar con meticulosidad la agenda de observaciones puesto que no se sabe si la región a estudiar será visible.

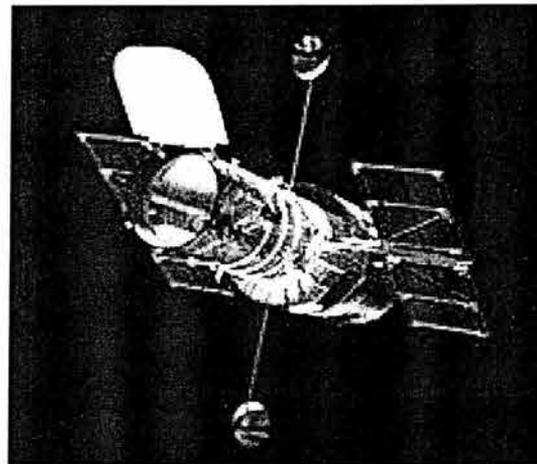


Figura 2.11. Telescopio espacial Hubble

El Telescopio Espacial Hubble gira libremente en los tres ejes, aunque esta libertad queda limitada por algunas restricciones obligadas. El satélite debe orientar siempre los paneles hacia el Sol y éste debe calentar la misma cara del instrumento.

Tampoco puede observar objetos que queden a menos de 50° del Sol, ni a $15,5^\circ$ del limbo de la Tierra ni a 9° de la Luna. Ya que los instrumentos del Telescopio Espacial son demasiado sensibles para observar estos brillantes cuerpos celestes.

Para localizar un objeto celeste el Telescopio Espacial Hubble se guía por un catálogo de estrellas. El Instituto Científico del Telescopio Espacial las selecciona del Catálogo de Estrellas Guías que se preparó para tal fin usando el Atlas Celeste Monte Palomar. El Catálogo de Estrellas Guías consiste en 18 millones de estrellas que llegan hasta la magnitud 14.5. Pero si la precisión del campo a observar lo requiere, se pueden realizar las observaciones en directo para ayudar a dirigir desde Tierra al Telescopio Espacial Hubble.

2.3 APOYOS TÉCNICOS DE LA INGENIERÍA[4]

La relación entre la Astronomía y la Ingeniería es muy rica, muy amplia y cada vez más sofisticada, más estrecha. En general, para poder realizar las investigaciones y conocer mejor el Universo, la Astronomía necesita instrumentos cada vez más poderosos, más complicados. De tal manera que la parte de la Astronomía que tiene que ver con la instrumentación es la parte que se relaciona con la Ingeniería.

Los telescopios modernos son instrumentos de gran precisión, calidad y apertura de diámetros en su óptica principal cada vez mayores. Esto se logra con técnicas de tallado de superficies ópticas y de control de la calidad en éstas. A medida que el telescopio se mueve y apunta a diferentes direcciones del cielo, se necesita más precisión para poder localizar algún objeto celeste. Por otro lado, las estructuras mecánicas que se tienen que construir para albergar los espejos tan grandes que ahora se necesitan también tienen que ser muy elaboradas, para poder compensar las flexiones que se dan a medida que el telescopio se orienta en diferentes direcciones. Es muy importante que tanto la estructura como los mecanismos de movimiento del instrumento cumplan con las especificaciones y requerimientos establecidos para que la calidad de imagen del telescopio no se vea degradada, ya que estamos frente a un instrumento que pesa varias decenas de toneladas y que necesita la precisión de reloj o más.

También se tienen que tomar en cuenta factores que en nuestros días son importantes, dado el rigor y la delicadeza de las observaciones que se hacen, como son los efectos térmicos o los gradientes de temperatura que se dan entre la estructura, la óptica y el exterior. Esto provoca que la óptica se vaya modificando en el curso de la noche y que se afecte la forma de la superficie del espejo, que puede impactar en forma adversa a la calidad de la observación. Todas estas peculiaridades, tienen mucho que ver con Ingeniería de punta.

La relación entre la instrumentación de punta, la Ingeniería y sus aplicaciones permiten ir creando una cultura, que aborda problemas complicados y novedosos que son los que a los países más desarrollados le están dando la ventaja competitiva en el mundo. En nuestros días se está dando con más frecuencia esta importante y rica interacción entre la ciencia básica, la instrumentación y las ingenierías.

EL GRAN TELESCOPIO CANARIAS

3.1 EL GRAN TELESCOPIO CANARIAS (GTC)[5][6]

El gran telescopio CANANRIAS (GTC), tendrá una superficie equivalente a un espejo circular de 10.4 metros de diámetro, será uno de los telescopios más avanzados en el año 2005 cuando se ponga en funcionamiento, y contará con las mejores prestaciones para la investigación astronómica.

La idea surgió en 1987, en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), tras la inauguración del telescopio anglo-holandés “William Herschel”, de 4.2 metros, entonces españoles y británicos se plantearon la conveniencia de iniciar un estudio para la construcción de un gran telescopio en el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM), un potente instrumento de nueva tecnología que impulsara la labor de investigación de los astrofísicos y diera continuidad al excelente trabajo que se venía realizando hasta el momento.

En 1989 se presentó al Comité Científico Internacional una propuesta conjunta de un telescopio con espejo primario monolítico de 8 metros de diámetro, muy similar a otros proyectos iniciados a finales de los ochentas, que sería construido por España y el Reino Unido. Finalmente, en 1990, las autoridades británicas optaron por participar en el proyecto estadounidense GEMINI y se retiraron del proyecto de Canarias. Este hecho no impidió que el IAC decidiera seguir adelante de manera independiente.

No cabe duda de que el GTC responde a una necesidad estratégica de la Astronomía española y mundial. La Astrofísica ha tenido en España un auge espectacular en un breve espacio de tiempo. Con un incremento destacado en el número de investigadores, así como

en la calidad y cantidad de sus publicaciones. De ahí la iniciativa de satisfacer las exigencias y necesidades de los astrofísicos españoles.

Por otra parte, España no participaba en los proyectos de los nuevos grandes telescopios que estaban en marcha (Keck, GEMINI, VLT, etc.). Era pues necesario disponer de un instrumento propio, de última generación, que enriqueciese además el ORM y lo mantuviese al nivel de los mejores observatorios del mundo. El IAC, convencido de que poner en marcha esta estrategia sería primordial para el futuro de la astronomía y tecnología españolas, continuó promocionando el GTC abriendo el proyecto a la participación internacional.

Pocos creían, al principio, que España pudiera llevar adelante sola un proyecto de esta envergadura, pues se consideraba imprescindible la participación internacional y esto condicionaba su puesta en marcha.

Para la dirección del IAC era evidente, sin embargo, que iniciar el proyecto animaría a otros países e instituciones a entrar en él, como de hecho sucedió. En 1993 los responsables de la política científica del Estado y de la Comunidad Autónoma de Canarias favorecieron la aportación de fondos europeos para dar los primeros pasos en los estudios previos al proyecto.

En 1994 el Gobierno Autónomo de Canarias creó la empresa pública “Gran Telescopio de Canarias, S.A.” (GRANTECAN) con el fin prioritario de realizar el estudio de viabilidad para la construcción del GTC en el ORM. Del mismo modo, la comunidad astronómica española (Sociedad Española de Astronomía y todos los grupos españoles que hacen astronomía y astrofísica) fue consultada y se mostró favorable ante la idea de un gran telescopio en Canarias.

Un año después, expertos en grandes telescopios de todo el mundo se reunían en Tenerife para estudiar y evaluar la “propuesta de Telescopio”. A este grupo internacional de expertos se les plantea la alternativa entre espejo monolítico/espejo segmentado, decidiendo hacer un

estudio exhaustivo de esta propuesta. Tras consultar a expertos en esta área, relacionados con la construcción de los telescopios Keck de Hawaii, con espejo primario segmentado, se decide pasar de un telescopio con espejo monolítico de 8 m. a uno con espejo segmentado de 10.4 m.

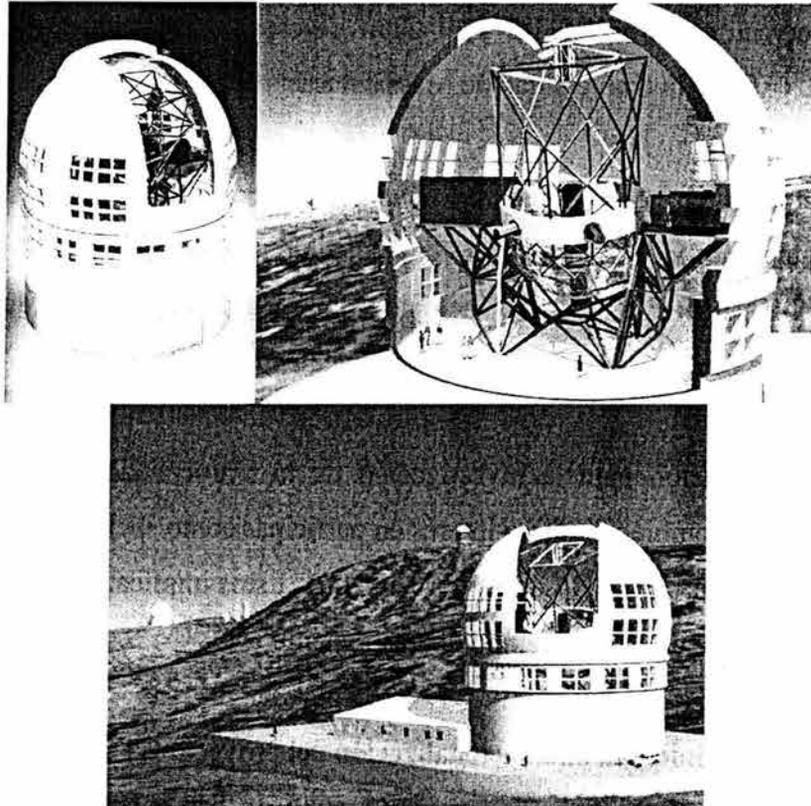


Figura 3.1. Maqueta y modelos 3D del Proyecto GTC (cúpula y estructura del telescopio)

En 1996 se aprueba la ampliación de capital de la empresa GRANTECAN para dar entrada a ella a la Administración General del Estado, por lo que el GTC arrancó con el compromiso de un financiamiento cien por ciento español (50% el Gobierno Central y 50% la Comunidad Canaria), en caso de no existir colaboración internacional.

Actualmente el telescopio está siendo construido, en su mayor parte, a través de contratos con empresas españolas (un 63%), aunque hay un gran número de empresas extranjeras contratadas. Así mismo, el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), y el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (IA-UNAM), firmaron el 31 de julio de 2001 unos acuerdos en virtud de los cuales estas

instituciones mexicanas, financiadas por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT), aportan un 5% del presupuesto del telescopio y de otras actuaciones e inversiones preparatorias previas a su explotación, equivalente a 5.5 millones de euros. Como contrapartida, obtendrán un 5% del tiempo de observación y contribuirán, también con un 5%, a los gastos de operación del GTC, contemplando, además, intercambio de tiempo de observación entre el GTC y el Gran Telescopio Milimétrico (GTM), de 50 metros, que el INAOE y la Universidad de Massachussets construyen en la actualidad.

Simultáneamente, con el fin de fomentar y afianzar el intercambio científico y tecnológico entre estas instituciones y el IAC, se firmó un Protocolo de Cooperación Astrofísica con el INAOE y el IA-UNAM. Este acuerdo incluye programas de intercambio de científicos y tecnólogos, además de colaboración en futuros proyectos instrumentales.

Por su parte la fundación para la investigación de la Universidad de Florida (Estados Unidos), tras mostrar también un claro interés en participar como socios del proyecto, firmó los acuerdos de participación el 17 de octubre de 2001. Estos implican una participación del 5% con la obtención de un 5% de tiempo de observación.

Con estos acuerdos se inició la internacionalización del proyecto GTC.

El GTC se está construyendo sobre una superficie de $5,000 m^2$ en el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM), en la isla canaria de La Palma. Este observatorio se encuentra a 2,400 metros sobre el nivel del mar, por encima del “mar de nubes”.



Figura 3.2. Vista del Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM)

Se trata de un lugar privilegiado para la actividad astrofísica por la atmósfera transparente y estable que proporcionan los Vientos Alisios. Allí geografía y clima se unen, proporcionando unas condiciones excepcionales para la observación astronómica, de ahí que en el ORM se encuentre una de las baterías de telescopios más completa del mundo. Es además uno de los lugares mejor estudiados para la observación astronómica. Se llevan a cabo campañas constantes y continuas prospecciones con el fin de analizar sistemáticamente la calidad y transparencia de la atmósfera, garantizando así la calidad observacional.

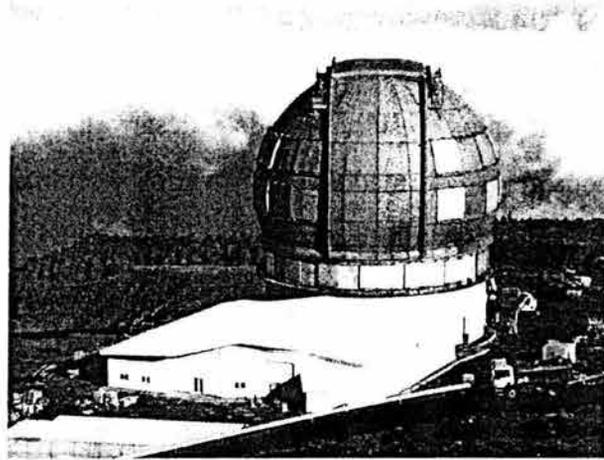


Figura 3.3. Estado actual del edificio que albergará el GTC

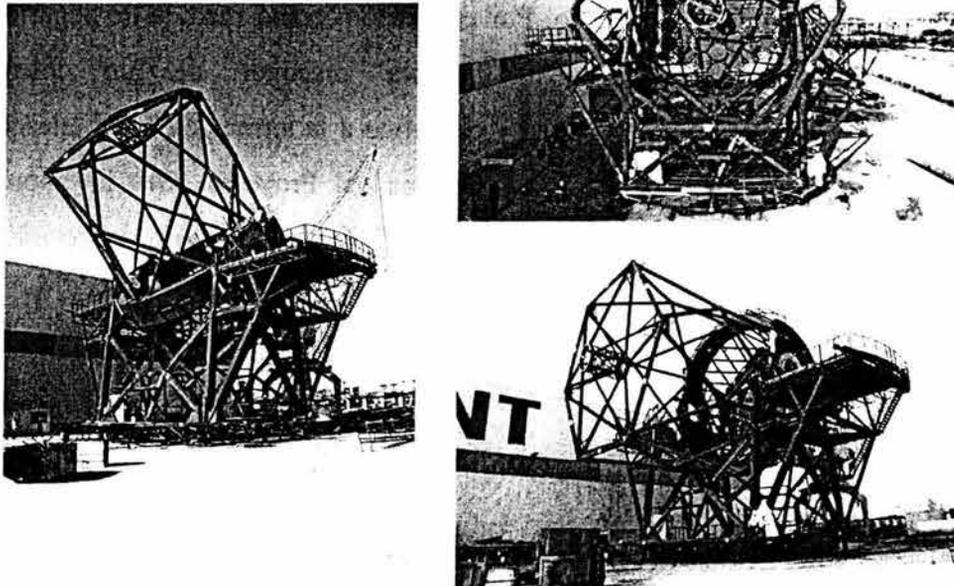


Figura 3.4. Imágenes del estado actual de la estructura del GTC

3.2 INSTRUMENTACIÓN CIENTÍFICA DE DÍA UNO PARA EL GTC[5]

El GTC dispondrá de dos instrumentos científicos ya aprobados para Día Uno: OSIRIS (cámara y espectrógrafo multiobjeto en el visible) y CanariCam (cámara y espectrógrafo, con capacidades de polarimetría y cronografía, en el infrarrojo térmico). Estos dos instrumentos están siendo desarrollados por consorcios formados por varios centros de investigación. El consorcio que desarrolla OSIRIS está liderado por el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), con la participación del IA-UNAM, IFCA e IAA, y el que desarrolla CanariCam por la Universidad de Florida.

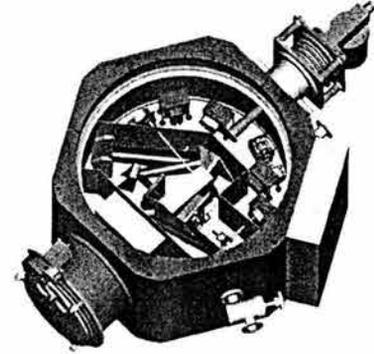


Figura 3.5. Modelo 3D de CanariCam

El desarrollo de instrumentación científica para grandes telescopios es una actividad compleja y con un alto nivel de riesgo lo que, a menudo, hace que dicha instrumentación no esté lista a la finalización del telescopio. Por esta razón, como medida de seguridad que

permita disponer de un instrumento científico a la terminación del telescopio, la Oficina del Proyecto (OP) ha abordado el desarrollo de un instrumento científico de menor complejidad, costo y riesgo denominado ELMER, que sería instalado en GTC en caso de que OSIRIS no estuviese listo a tiempo.

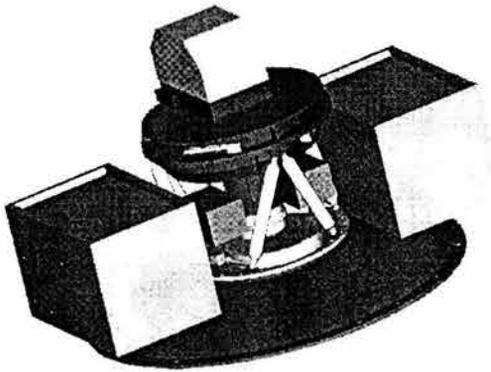


Figura 3.6. Modelo 3D de ELMER en el foco Nasmyth

3.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL INSTRUMENTO OSIRIS[7]

El instrumento OSIRIS (*Optical System for Imaging and low Resolution Integrated Spectroscopy*) podrá obtener imágenes directas de objetos celestes y podrá realizar espectroscopia de varios objetos a la vez. Trabaja en el rango visible, es decir, con la luz que es capaz de percibir el ojo humano. Entre otros resultados, proporcionará nuevos datos a los científicos en diversas áreas de conocimiento de la Astrofísica, como las atmósferas de los planetas del Sistema Solar; los objetos compactos emisores de rayos X; las supernovas muy lejanas, que sirven de referente para conocer la edad del Universo; las llamadas explosiones de rayos gamma (unas grandes explosiones de energía cuyo origen se desconoce) o la formación y evolución de las galaxias.

Además, OSIRIS incorpora el uso de filtros variables. Estos permitirán observar de manera muy precisa una línea determinada del espectro de luz, situada en cualquier posición dentro del rango visible.

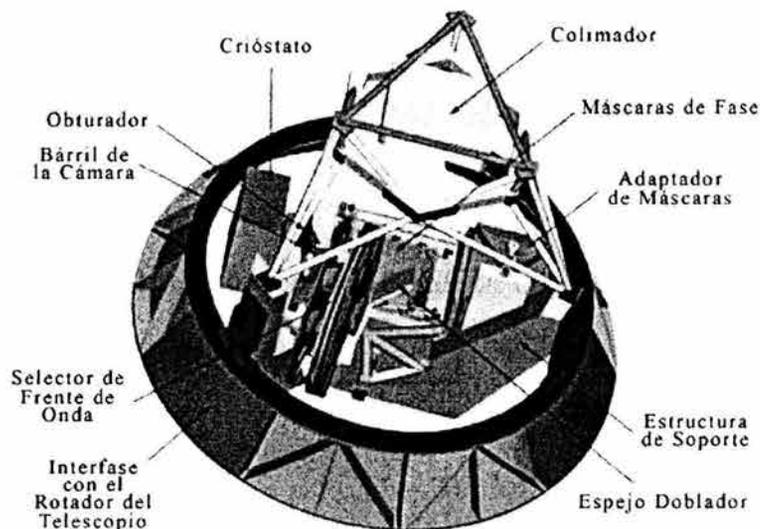


Figura 3.7. Instrumento OSIRIS

OSIRIS está siendo diseñado y construido por el IAC con la participación del IA-UNAM y deberá operar el “Día Uno” de la puesta en funcionamiento del telescopio. Este instrumento

deberá ser colocado en el rotador mecánico del telescopio en la plataforma Nasmyth (véase Figura 3.8).

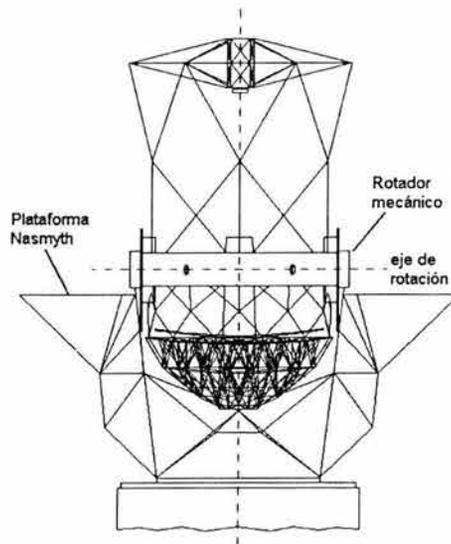


Figura 3.8. Esquema de la estructura del GTC

3.3.1 Barril de la Cámara de OSIRIS [8]

El sistema óptico está contenido en la Unidad de la Cámara que consiste de un barril dividido en dos secciones, la primera formada por el doblete¹ D1 y la Unidad de Enfoque; y la segunda con los singletes S1 y S2 y los dobletes D2 y D3 (véase Figura 3.9). La ventana del crióstato para el CCD contiene el singlete S3 por dentro, y no forma parte del barril.

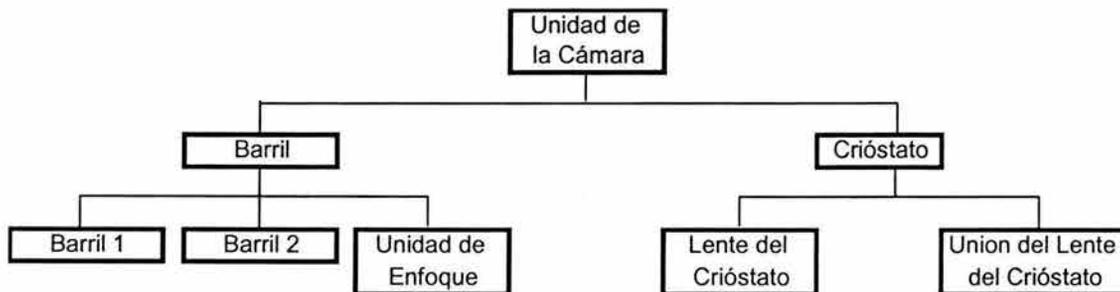


Figura 3.9. Diagrama de árbol de la cámara para OSIRIS

¹ Sistema óptico formado con dos lentes en contacto.

En la Figura 3.10 se muestra el diagrama de los elementos ópticos en la posición que deberán tener en la cámara. El obturador para tomar las imágenes es soportado por la estructura de soporte de OSIRIS y no está unido con el barril de la cámara. Las dimensiones generales de cada lente provienen del diseño óptico de la cámara, la mayor de éstas tiene un diámetro de 14.5 *cm* aproximadamente.

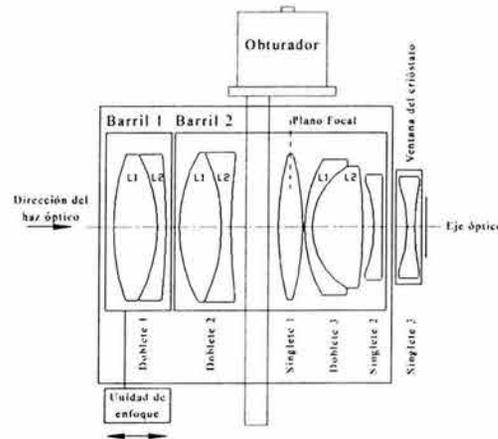


Figura 3.10. Diagrama funcional de la cámara OSIRIS

Los materiales y coeficientes de expansión térmica de los diferentes lentes que componen la cámara son muy específicos y si a esto agregamos el costo de manufactura, los lentes se convierten en los componentes más caros del instrumento. Por si ésto fuera poco, su fabricación puede llevar varios meses, por estas razones es necesario tener extremo cuidado con el manejo de los lentes en todas sus etapas².

3.3.1.1 Especificaciones y requerimientos

La cámara de OSIRIS deberá cumplir con los requerimientos establecidos. Sus especificaciones incluyen restricciones de deformación y esfuerzos por cargas gravitatorias y térmicas, así como de ensamble y repetibilidad. De las especificaciones el apartado más crítico es el de esfuerzos. Durante la operación del instrumento ninguna de sus componentes ópticas, bajo ninguna circunstancia, podrá tener un esfuerzo mayor a 3.4 *MPa*. Esto es debido a que se puede presentar el fenómeno de birrefringencia³. En función

² FARAH A. *Diseño optomecánico preliminar del Barril para la Cámara de OSIRIS*. pp 40

³ *Birrefringencia*, fenómeno por el cual el vidrio de la lente cambia su índice de refracción.

de las especificaciones y requerimientos establecidos, y como parte del Diseño Conceptual del barril los siguientes criterios, parámetros e indicadores de diseño que fueron considerados son⁴:

- El intervalo de temperatura de operación del instrumento es de -6 a 30 °C.
- El comportamiento térmico es el más crítico ya que varía con el tiempo.
- Considerar temperaturas de maquinado diferentes a las de diseño.
- Isothermalización, los coeficientes de expansión térmica deben tener valores lo más similares posible al de los vidrios.
- La cámara deberá tener el menor peso posible.
- Diseñar para que el esfuerzo de birrefringencia no se presente dentro de las aperturas ópticas de las lentes.

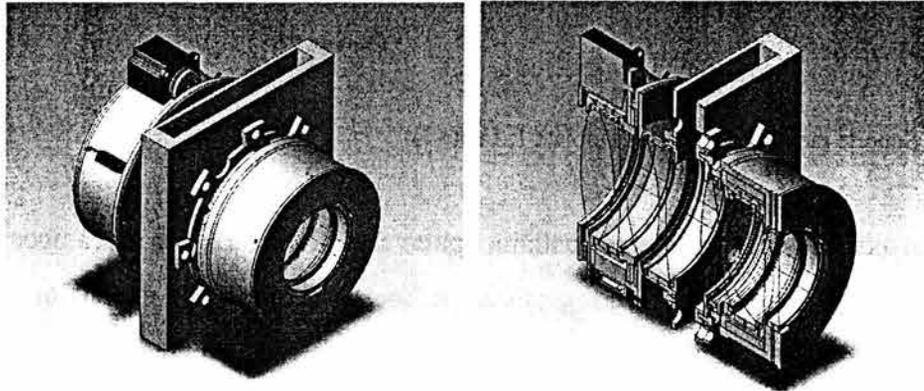
El funcionamiento del instrumento OSIRIS requiere que la luz que concentra el telescopio se encuentre ubicada en la posición espacial definida para el detector *CCD*. Si alguno de los lentes del sistema óptico estuviera en una posición diferente a la especificada el haz no se concentraría en el lugar previsto, provocando imágenes de baja calidad no aceptables. En las especificaciones se define la posición de cada lente en el sistema óptico y tolerancia de posición que garantiza el buen desempeño del instrumento (véase Figura 3.10). El orden de magnitud de las tolerancias de posición del sistema es de micrómetros en todo su intervalo de operación, el caso más crítico demanda 50 micrómetros de descentrado. Estos valores no son fáciles de lograr debido a la variación de las condiciones ambientales a las que el instrumento estará sujeto.

El fenómeno de la birrefringencia no es conveniente durante la adquisición de imágenes astronómicas, éste provocaría que el objeto observado tuviera un aspecto similar a un fantasma (con un halo de luz). Este fenómeno se presenta por dos causas primordiales; los esfuerzos inducidos y los cambios de temperatura. Los soportes de los lentes fueron diseñados para minimizar los esfuerzos inducidos y para evitar la birrefringencia por cambios de temperatura se hizo el diseño de la Unidad Pasiva de Desplazamiento (*UPD*).

⁴ FARAH A. *Diseño optomecánico preliminar del Barril para la Cámara de OSIRIS*. pp 39

3.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL BARRIL DE LA CÁMARA[8]

El diseño del sistema mecánico de soporte para las lentes del Barril es modular para permitir su ensamble y desensamble (véase Figura 3.11). Está compuesto por 4 subensambles y dos interfaces. El Barril 1 incluye a D1 y a 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 (véase Figura 3.7).



(a) vista isométrica

(b) vista isométrica en corte

Figura 3.11. Modelo tridimensional del Barril de la Cámara OSIRIS

Los dobletes D1, D2 y D3, así como las lentes S1 y S2 del Barril están contenidos en su propia celda. El acceso a cualquiera de estos componentes se puede lograr sin la necesidad de desensamblar el sistema completo. El ensamble de toda la cámara es por medio de tornillos con tuerca y la repetibilidad de este proceso se garantiza con pernos guía de alineación.

El soporte radial de cada lente es un anillo con muelles de amortiguación para las expansiones térmicas, contenido en su celda correspondiente. Es un soporte compuesto por una sola pieza, que una vez maquinado a las dimensiones deseadas no requiere de ajustes posteriores. La forma y su desempeño mecánico garantizan la calidad de imagen deseada (véase Figura 3.12)⁵.

⁵ FARAH A. *Diseño optomecánico preliminar del Barril para la Cámara de OSIRIS*. pp 69

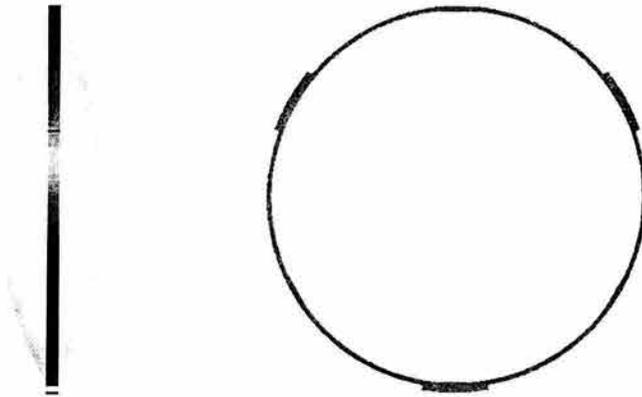


Figura 3.12. Soporte radial de los lentes (Doblete 1, Lente 1)

La posición axial de cada lente en el sistema óptico se define con topes mecánicos a 90° (de tipo “*Sharp Edge*”). Para liberar los posibles esfuerzos debidos a la expansión térmica se utiliza un O-ring de plástico (véase Figura 3.13). Los esfuerzos generados por las precargas y las expansiones se analizaron para cada caso en específico y se garantiza que están por debajo del nivel especificado. El material y las dimensiones propuestas de cada componente fueron propuestas a partir del comportamiento térmico del sistema⁶.



Figura 3.13. 1) Celda 2 de B2, 2)soporte radial, 3) lente, 4) O-ring y 5) y 6) separadores de S1

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

⁶ FARAH A. *Diseño optomecánico preliminar del Barril para la Cámara de OSIRIS*. pp 70

medio de roscas. El enfoque se logra gracias a la traslación de la celda a lo largo de una guía lineal. El movimiento se transmite a partir de un motor de pasos con un sistema de engranes helicoidales. 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 (véase Figura 3.14).

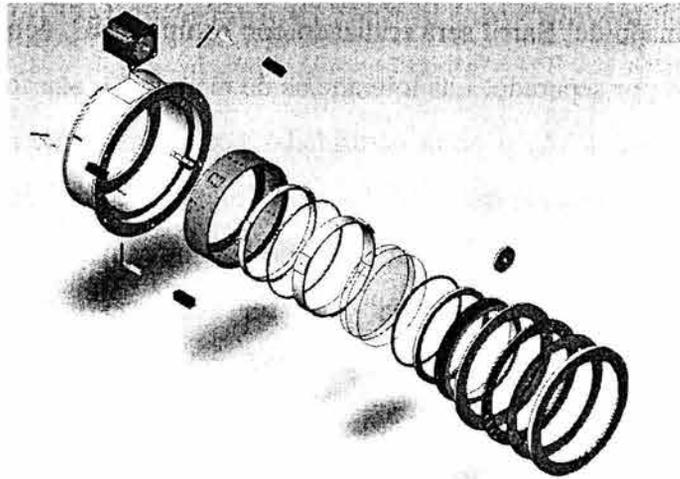


Figura 3.14. Unidad de Enfoque ,vista en explosión

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 (véase Figura 3.15). La longitud del cilindro se calculó en función del *CTE* del material elegido ($180 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Las propiedades de este elemento serán 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 celda⁷.

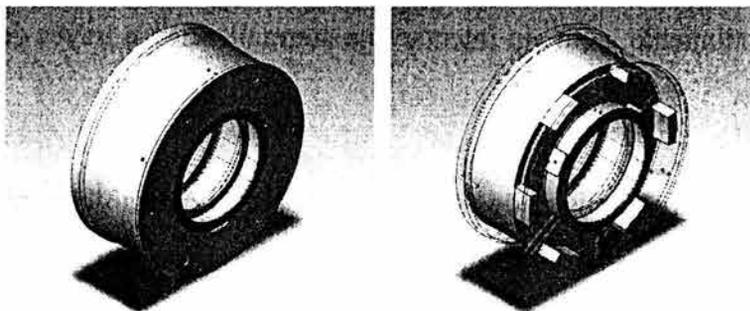


Figura 3.15. Unidad Pasiva de Desplazamiento, *UPD*

⁷ FARAH A. *Diseño optomecánico preliminar del Barril para la Cámara de OSIRIS*. pp 73

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. El número total de componentes estimados es de 55 con un peso aproximado de 24.2 kg. En esta estimación no se considera el peso de los tornillos, tuercas y elementos de ajuste.

El proceso de maquinado del Barril será realizado con equipo CNC, donde cada una de las celdas se maquinarán por separado. Las tolerancias de maquinado son factibles de alcanzar con equipo convencional *CNC*, y serán certificadas por el fabricante (*CIDESI*⁸). Una vez terminadas y con las dimensiones aproximadas a las deseadas se procederá al ensamble con ayuda de pernos guía y tornillos. Las dimensiones de la cámara serán verificadas en laboratorios especializados de metrología y de ser necesario rectificadas. El proceso garantiza la coincidencia de los ejes mecánicos de cada celda en el Barril.

3.4.1 Efectos de la temperatura sobre la óptica de la cámara[9]

El instrumento OSIRIS debe mantener su rendimiento óptico dentro del rango de temperatura de observación nominal, de -2°C a 19°C , medido en el sitio GTC de La Palma, de modo que la degradación y movimiento total de la imagen por efectos ópticos térmicos debe mantenerse por debajo de los valores presupuestados.

El diseño óptico del Barril de la Cámara de OSIRIS se optimizó para la temperatura nocturna media en el sitio GTC ($T_0=8.5^{\circ}\text{C}$), mediante la selección de cristales que maximizan el rendimiento, pero sin intentar una atermalización a través de combinaciones de vidrios ópticos.

El efecto que tienen los cambios de temperatura sobre la óptica de la cámara es que los índices de refracción de los lentes varían, aunque esta variación es mínima, altera la calidad de la imagen que se registra. Al variar el índice de refracción de los lentes el plano donde se concentra la luz se mueve unas cuantas micras hacia adelante o hacia atrás (dependiendo de

⁸ CIDESI: Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial de Querétaro

si el cambio de temperatura es positivo o negativo), del plano del detector, lo que provoca que la imagen en el detector quede fuera de foco. Si se considera que la luz que llega a ese plano focal es la luz que se concentra de un espejo de 10 metros de diámetro, el error producido por este pequeño desplazamiento es muy grande.

3.4.2 Compensación térmica[9]

Existen diferentes combinaciones de las separaciones de los lentes que pueden compensar los efectos térmicos residuales, siempre y cuando sus movimientos requeridos sean físicamente posibles y estén controlados correctamente.

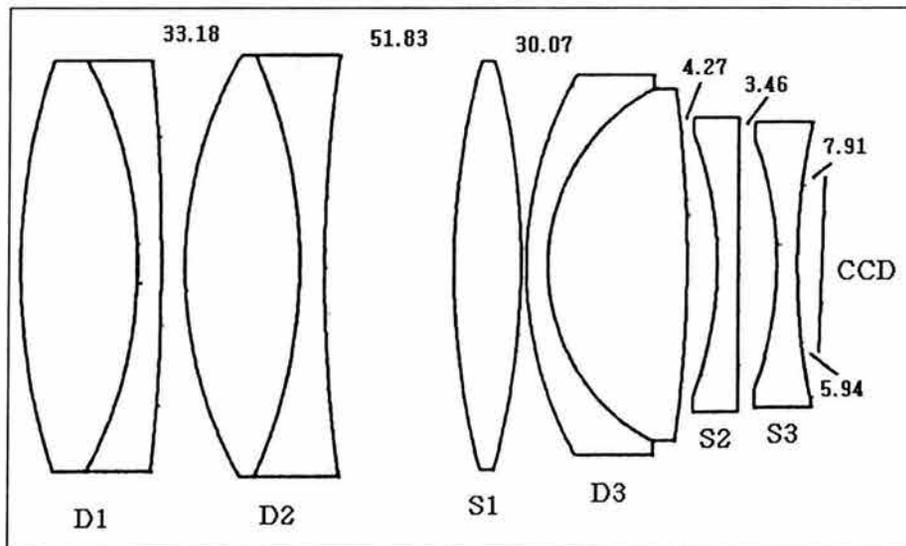


Figura 3.16. Nomenclatura de los lentes y separaciones de los bordes (*mm*) del Barril de la Cámara de OSIRIS.

Aunque las separaciones entre los lentes en la cámara de OSIRIS son apretadas (Figura 3.16), todos los espacios son posibles compensadores térmicos. Por esto se exploró el comportamiento compensador de los movimientos axiales de los elementos de los lentes y el CCD, solos o en combinaciones. Algunos elementos son buenos compensadores de foco, otros son buenos compensadores de escala de placa, pero muy pocos pueden corregir ambos efectos a la vez.

Por ejemplo el doblete D1, el elemento de enfoque fino de la cámara, compensa para una ampliación térmica de imagen y puede también compensar por variaciones térmicas de escala de placa, pero desafortunadamente ese efecto exige movimientos axiales para D1 de signo diferente, con lo que este elemento se vuelve un mal compensador térmico (lo mismo ocurre para el segundo doblete D2, y el segundo singlete S2). Por otra parte, el primer singlete S1 y el tercer doblete D3 son ambos excelentes compensadores del movimiento y del deterioro de la imagen⁹.

3.4.2.1 Desempeño del doblete D3 como compensador térmico[9]

Se exploró el comportamiento compensador de los movimientos axiales de los lentes y el CCD, solos o en combinaciones, de los resultados obtenidos se determinó que el doblete D3 es claramente el mejor compensador, ya que puede mantener la escala de la placa y la calidad de la imagen mucho más allá de la temperatura nominal si se mueve $13.2 \mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ (alejándose de S2 cuando aumenta la temperatura y acercándose cuando disminuye). Este compensador mantiene el tamaño y movimiento de la imagen en todo el campo bajo control, y es suficiente como compensador único⁹.

Como OSIRIS se va a someter a repentinas aceleraciones y cambios en las orientaciones de gravedad, la estructura de soporte tal vez necesite todo el presupuesto de movimiento de la imagen. Para permitir esta posibilidad, se exploró la compensación de D3 junto con otros elementos en la cámara para reducir el cambio residual de escala de placa todavía más. Quedando claro que un par de compensación puede reducir el movimiento de la imagen a menos de la mitad de una micra para todo el rango de temperatura de la operación.

⁹ GONZALEZ J, et al. *Thermal effects and thermal compensation in the OSIRIS camera*. pp 5

3.5 DISEÑO CONCEPTUAL PARA COMPENSACIÓN TÉRMICA PASIVA [9]

Se propuso un actuador pasivo de un material cuyo coeficiente de expansión térmica fuera el adecuado para lograr el movimiento deseado, ya que utilizar un motor eléctrico para lograr el desplazamiento, empleando un sistema equivalente al sistema de enfoque fino, generaría calor y turbulencias al interior del barril y se vería afectada la calidad de la imagen y además se tienen muchas limitaciones en cuanto al espacio.

Es deseable diseñar un mecanismo compensador que ofrezca pasivamente el movimiento axial de aproximadamente $13 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ de D3 durante la expansión térmica de algún material adecuado. El espacio disponible en frente y después del doblete D3 (Figura 3.16) indica que se puede colocar un accionador de aproximadamente 100 mm de largo entre la superficie trasera de S1 y la superficie frontal de S3. Para esa dimensión, podría funcionar un material de CTE $\sim 150[\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}]$, como Nylon (CTE de 50 a $180 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$), algunas aleaciones de ABS/PVC y polietileno U.H.M.W. entre otros.

En el diseño conceptual de la cámara, el barril se forma apilando las celdas de cada uno de sus 6 elementos ópticos (tres dobletes y tres lentes sencillos). Como el singlete S2 está entre los extremos del accionador D3 que se está proponiendo, su celda debe permitir al accionador que pase libremente entre sus lados mientras que al mismo tiempo se mantenga firmemente pegada a la celda anterior.

Se trata de que la celda S2 contenga a la celda D3, dando así las superficies de referencia y soporte para que rodamientos lineales guíen el movimiento de D3, además de ser el medio de abrochar los accionadores pasivos al lado externo del S2 (Figura 3.17).

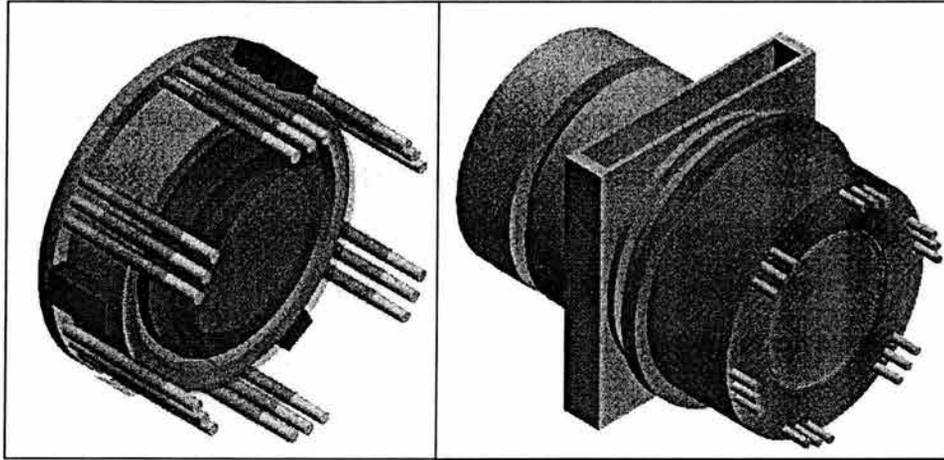


Figura 3.17. Izquierda: Vista 3D de la celda D3, que muestra el concepto de tres rodamientos lineales soportados por la celda S2 (que no se muestra) y seis grupos de accionadores térmicos que distribuyen la carga. Derecha: Vista 3D del BC, se pueden ver con claridad los extremos de los bastones que sobresalen de la celda S2 (la celda D3 está encerrada en la celda S2).

Primero se simularon los accionadores pasivos como bastones de Nylon de 6 mm de diámetro. Teniendo en cuenta el peso en movimiento de cristal más metal y suponiendo un coeficiente de fricción de 0.1 para los accionadores lineales (hierro/hierro lubricado), se simuló el comportamiento del sistema en el caso más crítico con un Análisis de Elemento Finito. Después de un par de diseños de iteración, se planteó un sistema con 6 grupos de tres bastones de Nylon de 7 mm de diámetro, que apenas cumplen las especificaciones para cualquier orientación de la cámara.

Fácilmente se pudo mejorar la fortaleza del sistema haciendo más gruesos los bastones o con lozas cilíndricas. Finalmente el diseño preliminar del accionador quedó como una única pieza cilíndrica (figura 3.18)

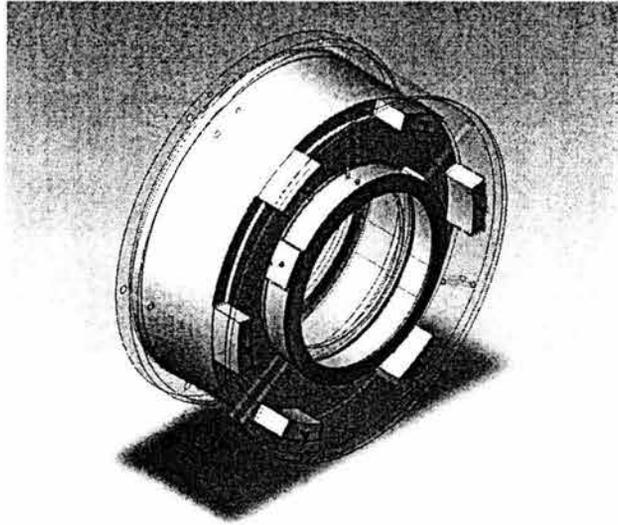


Figura 3.18. Diseño preliminar del compensador térmico pasivo.

En el diseño de la estructura de soporte se puede exigir más presupuesto de movimiento de la imagen, forzando a la cámara a que use también el doblete de enfoque para la compensación térmica, hasta ahora no ha sido necesario. Si así se requiere, el mecanismo del elemento de enfoque puede montarse también en un sistema pasivo semejante.

CAPÍTULO 4

DEFINICIÓN DEL MATERIAL PARA EL COMPENSADOR TÉRMICO

4.1 SELECCIÓN DE MATERIAL

Las características principales que se consideraron en la selección del material para el compensador térmico del Barril de la Cámara de OSIRIS, fueron su capacidad de deformación debida a los cambios de temperatura, expresada en términos del coeficiente de expansión térmica lineal (CTE), y su resistencia mecánica definida por el Módulo de Young.

En cuanto a la expansión térmica es necesario un material que aumente sus dimensiones a una tasa de $13 \pm 1 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$, en dirección axial, el espacio disponible permite colocar un accionador de aproximadamente 100 mm de largo entre la superficie trasera de S1 y la superficie frontal de S3. Para esa dimensión, podría funcionar un material de $\text{CTE} \sim 150 [\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}]$. Los materiales que pueden cumplir con esta especificación son algunos polímeros como el Nylon, el ABS/PVC, el polietileno, entre otros, estos materiales tienen un CTE aproximado de $150 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$. Otro tipo de materiales como los metales y los materiales cerámicos no funcionan para esta aplicación ya que sus coeficientes de expansión térmica son muy bajos, entre 10 y $20 [\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}]$ para los materiales metálicos y entre 0.5 y $10 [\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}]$ para los cerámicos.

Sin embargo la mayoría de los materiales poliméricos que cumplen con la especificación del CTE son muy deficientes en cuanto a su comportamiento mecánico, ofrecen resistencia muy baja, por lo que fue necesario consultar materiales compuestos, principalmente resinas plásticas reforzadas con materiales cerámicos.

4.1.1 Plásticos reforzados con fibra de vidrio

Las matrices poliméricas reforzadas combinan la resistencia mecánica y la rigidez de las fibras reforzantes, con la buena resistencia al impacto de la matriz plástica original. Las fibras por sí solas, son usualmente muy frágiles y su resistencia y rigidez no pueden ser aprovechadas completamente. La matriz protege estas fibras y les transfiere la carga. Esto origina un material que combina las buenas propiedades de la fibra y de la matriz.

La mayoría de las resinas pueden reforzarse con diversos materiales, sin embargo el refuerzo más común es la fibra de vidrio, los plásticos reforzados con fibra de vidrio son utilizados en muchas aplicaciones en donde reemplazan con ventajas a materiales tradicionales como la madera, acero, etc.

La gran versatilidad de la fibra de vidrio también permite su uso en aplicaciones específicas en las cuales no pueden ser usados los materiales convencionales. La Fibra de Vidrio engloba en un solo material varias características de excelencia.

4.1.1.1 Resina o matriz polimérica

Los polímeros (componentes derivados del petróleo) se diferencian por su composición química en "termoplásticos" y "termofijos".

Los termoplásticos como el Nylon, PET, ABS, policarbonato, poliestireno, etc, poseen la característica de "ablandarse" con el calor, por lo cual pueden fundirse varias veces adquiriendo la forma del molde (donde se vacíen) al enfriarse.

Los termofijos como su nombre lo indica, una vez que se ha llevado a cabo la reacción de polimerización o "curado" de la resina (o plástico) el cambio del estado líquido al sólido es permanente.

Las principales características que proporciona la matriz polimérica son:

- Resistencia química
- Protección de las Fibras de Vidrio
- Mantener estructura
- Color

4.1.1.2 Refuerzo de fibra de vidrio

La Fibra de Vidrio es una combinación de vidrio y un aglutinante químico que lo hace ser compatible con matrices plásticas y se abastece al mercado en las siguientes presentaciones:

- filamentos continuos o rovings
- fieltro o colchoneta de fibra de vidrio
- filamentos cortados
- fibra molida
- telas tejidas

Las principales propiedades que proporciona el refuerzo de fibras de vidrio son:

- Soporte estructural
- Resistencia mecánica

4.1.2 Materiales Propuestos para el Compensador Térmico del BC

Los materiales que se propusieron (Tabla 4.1) para esta aplicación fueron analizados considerando como primer criterio de selección que tuvieran un CTE mayor a $150 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$, ya que la especificación más importante es la variación de sus dimensiones de acuerdo a los cambios de temperatura, finalmente de los materiales analizados se seleccionó el que presenta mejores propiedades mecánicas, Módulo de Young más alto.

El material seleccionado es un nylon reforzado con fibra de vidrio del fabricante DuPont, el *ZYTEL HTNFR51G35L*, ya que es el que mejor cumple con las especificaciones de diseño para el Compensador Térmico del BC de OSIRIS.

Material	CTE¹ [$\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$]	Módulo¹ de Young [GPa]
Kolon NOPLA® KE531HC PEN-PET Copolyester	400	
Kolon SPELLOY® KB133G15 PC+PBT Alloy Resin	450	
DuPont Delrin® 911P NC010, Low Viscosity Acetal	170	3.3
DuPont Delrin® 527UV NC010, UV Stabilized Acetal	210	3.2
DuPont Zytel® HTNFR51G35L NC010 Nylon Copolymer	180	13.1
Nylon 12	160	2.9
Nylon 612, Glass Fiber Filler	220	3.4
ABS/PVC Alloy	166	3.0
PTSGrade POMH-2500 General Purpose Acetal Homopolymer	180	
PVC/Polypropylene Alloy	230	3.0
Semitron® Esd 225, Copolymer acetal, static dissipative	168	1.4
NyLamid Extruded	180	1.3
Polyethylene – U.H.M.W.	200	1.2

Tabla 4.1. Materiales propuestos para el Compensador Térmico del BC de OSIRIS

4.1.3 Descripción del ZYTEL HTN[10]

ZYTEL HTN de DuPont es una familia de poliamidas semi-aromáticas que satisfacen una amplia gama de usos de alto rendimiento en las industrias automotrices, eléctricas y electrónicas e industriales.

Las resinas ZYTEL HTN de DuPont tienen una combinación única de características:

1. Bajo efecto de la humedad
 - Excelente retención de propiedades

¹ Valores proporcionados por los fabricantes

- Buena estabilidad dimensional
2. Buenas características de alta temperatura
 - Alto punto de fusión (hasta 310°C)
 - Temperatura de transición vítrea elevada (Tg hasta 140°C)
 - Alta temperatura de deformación por calor (288°C)
 3. Resistencia Química
 - Aceites de motor, de transmisión y de transformador
 - Combustibles
 - Glicoles
 - Agua, vapor
 4. Estabilidad dimensional
 - Pandeo reducido al mínimo
 - Coeficiente lineal de expansión térmica (CTE) aproximado de $180\mu m/m^{\circ}C$

Debido a estas características únicas, el ZYTEL HTN de DuPont es un material muy adecuado no solamente en la presencia de temperaturas elevadas, sino siempre que la estabilidad dimensional, la retención de características en ambientes húmedos, la resistencia química o las características eléctricas sean indispensables para la aplicación.

4.1.3.1 Productos y composiciones

El ZYTEL HTN puede ser:

- Sin refuerzo
- Reforzado con fibra de vidrio
- Reforzado con minerales
- Con retardador de flama

Actualmente existen cuatro familias de ZYTEL HTN disponibles:

- ZYTEL HTN “51”
 - Serie semi-aromática de alto rendimiento, demuestra absorción mínima de la humedad, bajo pandeo, resistencia química muy alta, estabilidad

dimensional excelente y buen comportamiento ante el envejecimiento por calor sobre 175°C.

- Además, conserva el módulo casi sin cambiar hasta 140°C, debido a su Tg (temperatura de transición vítrea) alta.
 - Se recomiendan temperaturas de 140°C a 160°C para el mejor funcionamiento al moldear las partes
- ZYTEL HTN “52”
 - Serie semi-aromática de alto rendimiento, moldeable “en frío” (temperaturas del molde: 80 a 130°C), con alto punto de fusión (310°C) y un buen comportamiento ante el envejecimiento por calor debajo de 170°C. Este grado también es conveniente para los componentes de montaje superficial (SMT por sus siglas en inglés) tales como conectores.
 - ZYTEL HTN “53”
 - Serie semi-aromática de alto rendimiento reforzada con fibra de vidrio, desarrollado para usos estructurales que requieren alta rigidez y resistencia de impacto, con baja sensibilidad a la humedad, se puede procesar en moldes calentados por agua (temperatura del molde: 80 a 120°C).
 - ZYTEL HTN “54”
 - Serie semi-aromática de alto rendimiento reforzada con fibra de vidrio, desarrollado para usos estructurales que requieren alta rigidez y resistencia de impacto, buena retención de propiedades a altas temperaturas, con baja sensibilidad a la humedad, se puede procesar en moldes calentados por agua (temperatura del molde: 80 a 120°C).

4.1.3.2 Aplicaciones más comunes

El ZYTEL HTN de DuPont se utiliza para una amplia variedad de aplicaciones en las siguientes áreas:

- Automotriz:
 - Inducción de aire: resonadores
 - Climatización: cubiertas del termostato
 - Enfriamiento del motor: salidas y conectores de agua
 - Sistema de combustión: conducción del combustible
 - Electrónica: conectores, bobinas de la ignición

- Eléctrica y electrónica:
 - Componentes electrónicos: SMT y conectores de cables
 - Ramificando y control: cubiertas de los interruptores y componentes, pozos del buje del transformador
 - Componentes eléctricos: estructura de bobinas, aisladores de la armadura de motores, interruptores y relevadores.

- Industrial y del consumidor:
 - Múltiples de caldera y válvulas
 - Aplicaciones pequeñas: piezas de planchas de vapor
 - Aplicaciones grandes: ventiladores para hornos y soportes para cristal.

4.1.3.3 Procesabilidad

El ZYTEL HTN de DuPont se puede procesar en máquinas convencionales de moldeo por inyección y equipo convencional de extrusión.

Las resinas de ZYTEL HTN se envían empaquetadas en bolsas resistentes a la humedad, con el nivel de humedad abajo del 0.2%. Para las características óptimas, la resina se debe secar hasta el 0.1% antes de ser procesada.

4.1.3.4 Propiedades del ZYTEL HTN

Las propiedades del material seleccionado, el DuPont *ZYTEL HTNFR51G35L*, que son de mayor interés para el desarrollo del Compensador Térmico se presentan en la Tabla 4.2, las propiedades completas se encuentran en el Anexo A.

Propiedades	Sistema Internacional	Sistema inglés	Comentarios
Densidad	1.65 g/cc	0.0596 lb/in ³	ASTM D792
Resistencia de Tensión	165 MPa	23900 psi	ASTM D638
Modulo de Tensión	13.1 GPa	1900 ksi	ASTM D638
Modulo de Flexión	12.4 GPa	1800 ksi	ASTM D790
CTE, lineal 20°C	180 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	100 $\mu\text{in}/\text{in}^{\circ}\text{F}$	
CTE, lineal 100°C	180 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$	100 $\mu\text{in}/\text{in}^{\circ}\text{F}$	

Tabla 4.2. Principales propiedades del Zytel HTNFR51G35L.²

² Tomado de Zytel HTN Product Guide and Properties

CAPÍTULO 5

PRUEBAS MECÁNICAS

5.1 PRUEBAS MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas del material para el compensador térmico deben ser verificadas para garantizar su correcto funcionamiento. Por eso, el polímero propuesto (*ZYTEL HTNFR51G35L*) de DuPont, fue sometido a una serie de ensayos mecánicos para comprobar que dicho material cumple con las propiedades que el fabricante reporta.

Para este componente las propiedades que tienen relevancia son la **resistencia a la tracción del material** y su **comportamiento térmico** definido por su coeficiente de expansión térmica lineal (CTE). Para poder corroborar las propiedades proporcionadas se propusieron las siguientes pruebas:

- **Coeficiente de Expansión Térmica (CTE).** Es la propiedad más importante para el desarrollo del componente, ya que esta define la variación de sus dimensiones respecto a los cambios de temperatura. Para esto es necesario hacer pruebas en ambientes controlados, al menos en la temperatura, para poder determinar la deformación relativa del material respecto a la variación de temperatura.
- **Ensayo de Tracción.** Es conveniente corroborar que el módulo de Young del material es el que especifica el fabricante, este valor se puede obtener de un diagrama de esfuerzo-deformación del material, la información necesaria para la determinación de este diagrama se obtiene a partir de un ensayo de tracción.

5.1.1 Coeficiente de expansión térmica lineal[11]

La mayor parte de los cuerpos sólidos se expande en todas sus direcciones cuando se incrementa su temperatura, sin embargo existen algunas sustancias cristalinas que se expanden a lo largo de una dirección y se contraen a lo largo de otra, o sustancias como el agua, en su forma sólida (hielo), que se expande al disminuir su temperatura. Este fenómeno juega un papel importante en un gran número de aplicaciones en la ingeniería. Por ejemplo, se deben incluir uniones de dilatación térmica en los edificios, carreteras de concreto, vías de trenes y puentes con el fin de compensar las variaciones en sus dimensiones debido a los cambios de temperatura.

La dilatación térmica de un cuerpo es consecuencia del cambio en la distancia media entre sus átomos o moléculas. Para comprender esto, se considera un sólido cristalino, el cual consta de un arreglo regular de átomos mantenidos juntos por fuerzas eléctricas. Las fuerzas interatómicas se consideran elásticas por su naturaleza. A temperaturas ordinarias (temperatura ambiente), los átomos vibran respecto de sus posiciones de equilibrio con una amplitud aproximada de 10^{-11} m y una frecuencia aproximada de 10^{13} Hz . El espacio promedio entre los átomos es del orden de 10^{-10} m . Al aumentar la temperatura del sólido, los átomos vibran con amplitudes más grandes y la separación promedio entre ellos aumenta. En consecuencia, el sólido como un todo se dilata al aumentar su temperatura.

Si la expansión de un objeto es suficientemente pequeña en comparación con sus dimensiones iniciales, entonces el cambio en cualquier dimensión (longitud, ancho o espesor), dentro de una buena aproximación, es una función lineal de la temperatura.

Supongamos que la dimensión lineal de un cuerpo a lo largo de alguna dirección es l para cierta temperatura. La longitud se incrementa en una cantidad Δl para un cambio de temperatura ΔT . De manera experimental se encuentra que el cambio en la longitud es proporcional al cambio en la temperatura y a la longitud inicial siempre que ΔT sea suficientemente pequeño. Por lo tanto, la ecuación básica para la dilatación de un sólido es:

$$\Delta l = \alpha l \Delta T \quad (5.1)$$

donde la constante de proporcionalidad α se conoce como coeficiente promedio de dilatación lineal para un material dado. A partir de esta expresión se ve que:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l\Delta T} \quad (5.2)$$

En otras palabras, el coeficiente promedio de dilatación lineal de un sólido es el cambio fraccionario en la longitud ($\Delta l/l$) por cambio de un grado ($^{\circ}\text{C}$) en la temperatura. La unidad de α es grado^{-1} ($^{\circ}\text{C}^{-1}$). Por ejemplo, un valor $\alpha=11 \times 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$ significa que la longitud del objeto cambia en 11 partes por millón de su longitud original por cada grado Celsius de cambio en la temperatura. Puede ser útil pensar en la dilatación térmica como una amplificación efectiva o como una amplificación fotográfica de un objeto al ser calentado.

Por lo general, el coeficiente de dilatación lineal varía con la temperatura. Comúnmente esta variación con la temperatura es despreciable a la escala en que se realizan la mayor parte de las mediciones.

Debido a que las dimensiones lineales de los cuerpos cambian con la temperatura se deduce que el área y el volumen de un cuerpo también cambian con la temperatura, el cambio en el volumen a presión constante es proporcional al volumen original V y al cambio en la temperatura ΔT de acuerdo con la relación donde β es el coeficiente promedio de expansión volumétrica. Para un sólido isotrópico (un sólido isotrópico es uno en el que el coeficiente de dilatación lineal es el mismo en todas las direcciones) el coeficiente de expansión volumétrica es el triple del coeficiente de dilatación lineal, o $\beta=3\alpha$. Por lo tanto la ecuación para la expansión volumétrica de un sólido queda:

$$\Delta V = \beta V \Delta T \quad (5.3)$$

Por lo general, los líquidos aumentan su volumen al aumentar la temperatura y tienen coeficientes de expansión volumétrica aproximadamente diez veces más grande que el de los sólidos.

5.1.2 Ensayo de tracción[12]

El ensayo de tracción en ingeniería es ampliamente utilizado, pues suministra información sobre la resistencia de los materiales utilizados en el diseño y también sirve para verificar las propiedades de un material para su aceptación.

La curva de esfuerzo-deformación ingenieril o nominal se obtiene a partir de las medidas de carga y alargamiento, estas mediciones se pueden obtener de los resultados de un ensayo de tracción, este ensayo consiste en aplicar una carga P axialmente sobre una probeta de dimensiones estandarizadas, al aplicarse la carga P sobre las probetas se toman mediciones de la longitud l , entonces para cada valor de carga se tiene un valor de longitud.

El valor del esfuerzo que soporta el material se define como:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (5.4)$$

El alargamiento es la variación de la longitud

$$dl = l_f - l_0 \quad (5.5)$$

y la deformación nominal se define como

$$\varepsilon = \frac{dl}{l_0} \quad (5.6)$$

entonces de las ecuaciones 5.5 y 5.6 tenemos que:

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (5.7)$$

Casi todos los materiales metálicos tienen una combinación de comportamiento elástico y plástico en mayor o menor proporción (el mercurio no se puede clasificar así ya que su estado natural es líquido).

Elasticidad: es la propiedad de un material en virtud de la cual las deformaciones causadas por la aplicación de una fuerza desaparecen cuando cesa la acción de la fuerza. "Un cuerpo completamente elástico se concibe como uno de los que recobra completamente su forma y dimensiones originales al retirarse la carga"

Plasticidad: es aquella propiedad que permite al material soportar una deformación permanente sin fracturarse.

Todo cuerpo al soportar una fuerza aplicada trata de deformarse en el sentido de aplicación de la fuerza. En el caso del ensayo de tracción, la fuerza se aplica en dirección del eje de ella y por eso se denomina axial, la probeta se alargara en dirección de su longitud y se encogerá en el sentido o plano perpendicular. Aunque el esfuerzo y la deformación ocurren simultáneamente en el ensayo, los dos conceptos son completamente distintos.

Si a todos los valores de la carga aplicados progresivamente los dividimos por el área inicial de la probeta A_0 , obtenemos los diferentes valores del esfuerzo convencional o nominal aplicados y si a todos los valores de dl observados y medidos los dividimos por la longitud inicial de prueba l_0 , obtenemos los diferentes valores de deformación convencional ingenieril o nominal del ensayo. Estos valores se pueden representar en un sistema de ejes ortogonales obteniendo el diagrama σ vs ϵ .

El valor del esfuerzo (f / a_0) esta dado en N/m^2 (Pa) , $lb/pulg^2$ (psi) o en kgf/mm^2 y la deformación que es adimensional puede estar dada en %, $pulg/pulg$, cm/cm o mm/mm .

La primera región que encontramos (elástica) en la mayoría de materiales metálicos y algunos cerámicos presenta una variación o dependencia lineal que nos indica que dentro de un rango de valores existe una proporcionalidad directa entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida dada por la pendiente de la curva en esta zona (línea recta) según la Ley de Hooke¹

$$\sigma = E\epsilon \quad (5.8)$$

¹ En honor de Robert Hooke quien descubrió esta ley en 1676 trabajando con resortes

donde: E = Constante de Hooke, Módulo de elasticidad o Módulo de Young².

El valor del módulo es una medida de la rigidez del material, entre mayor pendiente tenga la curva más rígido será el material. Otros valores característicos del ensayo en esta región elástica, son el límite proporcional y el límite elástico. El valor del límite proporcional es el valor del mayor esfuerzo, para el cual existe proporcionalidad directa entre el esfuerzo y la deformación.

El valor del límite elástico es el mayor valor del esfuerzo hasta el cual el material mantiene un comportamiento elástico.

En la segunda región de la curva (plástica) aparecen los siguientes valores característicos: esfuerzo de fluencia o cedencia, el esfuerzo máximo último o resistencia a la tracción y el esfuerzo de fractura o rotura.

Se denomina esfuerzo de fluencia o cedencia al menor valor del esfuerzo para el cual se produce una deformación permanente o deformación plástica. Se llama fluencia convencional al valor del esfuerzo para una deformación permanente del 0.2%. El valor del esfuerzo máximo o último (resistencia a la tracción) es el mayor valor del esfuerzo en una curva σ vs ϵ convencional o al valor del esfuerzo para el punto de máxima carga en el ensayo;

$$S_u = S_{\max} = \frac{P_{\max}}{A_0} \quad (5.9)$$

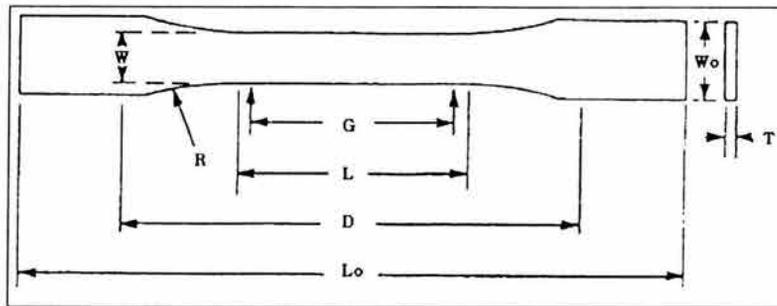
este valor de esfuerzo, junto con el de fluencia o límite elástico, se encuentran tabulados para la mayoría de los materiales.

El esfuerzo de fractura es el valor al cual se reproduce la fractura de la probeta, y cuyo valor no tiene gran importancia, pues una vez se supere el máximo valor, la probeta fallará, irremediablemente, a menores valores de esfuerzo. Los valores de resistencia a la tracción y límite elástico son parámetros de resistencia mecánica.

² En honor de Thomas Young quien publicó en 1807 su trabajo sobre el tema

5.1.2.1 Probetas para el ensayo de tracción

Las probetas utilizadas tienen formas y dimensiones estandarizadas por la ASTM³, la DIN⁴, y otras normas internacionales, de acuerdo al material a ensayar. En el ensayo de tracción un espécimen se somete a una fuerza de tracción uniaxial la cual se incrementa continuamente, mientras se realiza observación simultánea de la elongación de éste. La probeta del ensayo se encuentra normalizada, y para el caso de los plásticos las dimensiones son las siguientes.



		Dimensión mm (in)	Tolerancia mm (in)
W	Ancho de la sección de pruebas	13 (0.50)	±0.5 (±0.02)
L	Longitud de la sección de pruebas	57 (2.25)	±0.5 (±0.02)
T	Espesor	3.2 (0.13)	±0.4 (±0.02)
Wo	Ancho total	19 (0.75)	±6.4 (±0.25)
Lo	Longitud total	165 (6.5)	
G	Zona de prueba	50 (2.0)	±0.25 (±0.01)
D	Distancia entre las zonas de sujeción	115 (4.5)	±5 (±0.2)
R	Radio de los filetes	76 (3.0)	±1 (±0.04)

Figura 5.1. Dimensiones de las probetas para pruebas de tracción en plásticos⁵

³ American Society for Testing and Materials[13]

⁴ Deutsches Institut für Normung

⁵ Según la norma ASTM D 638[13]

5.2 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

Para realizar las pruebas mecánicas antes planteadas es necesario inyectar las probetas. Para esto se pidió la colaboración de la Facultad de Ingeniería, en concreto de la M.I. Magdalena Trujillo Barragán responsable del área de polímeros del Departamento de Ingeniería Mecánica, ya que se cuenta con una inyectora de plásticos de la capacidad necesaria y con el molde para fabricar las probetas para las pruebas mecánicas bajo las normas ASTM.

Para hacer una inyección adecuada fue necesario consultar las recomendaciones del fabricante en cuanto al manejo del material, el equipo de inyección y las condiciones o parámetros de operación de la máquina, estas recomendaciones se encuentran en el documento “ZYTEL HTN Moulding Guide” distribuido por DuPont y se mencionan a continuación.

5.2.1 Precauciones para el uso del material[14]

El uso adecuado del material es muy importante, ya que permite que las propiedades y características del material se mantengan óptimas, si el material no se trabaja de una forma adecuada estas propiedades se ven disminuidas. Las tres principales consideraciones que se tienen que hacer son:

- Cuidar la humedad del medio ambiente al hacer uso del material.
- La humedad y secado del material antes de su uso
- Cuidar las posibles fuentes de contaminación.

5.2.1.1 Humedad

Las resinas de Zytel HTN son secadas antes de su comercialización (menos de 0.2% de humedad por peso) y están listas para moldearse directamente de los empaques de envío. Sin embargo, el nylon puede absorber o perder agua, dependiendo del contenido de agua del material y de la humedad relativa y temperatura de la atmósfera. Si la resina de nylon absorbe cantidades excesivas de agua antes del moldeo, las características mecánicas, la

viscosidad y el aspecto de las piezas moldeadas se afectan. El contenido de humedad para las características óptimas del material es del 0.1%.

En las temperaturas sobre el punto de fusión, el agua reacciona rápidamente con el nylon. Esta reacción (hidrólisis) da lugar a una disminución del peso molecular (viscosidad del derretimiento) y de la dureza de la resina. En el mismo tiempo, el agua absorbida puede formar el vapor que da lugar a marcas del derrame y a burbujas internas en la parte moldeada. La reacción entre el agua y el nylon fundido es acelerada por la exposición prolongada a temperaturas sobre el punto de fusión.

Las dificultades del moldeo debido a la humedad pueden ser evitadas si se utilizan los procedimientos siguientes:

- Verificar que el envase o bolsa de la resina y su contenido están en o sobre la temperatura del área de funcionamiento antes de abrirlos. Este procedimiento previene la condensación de la humedad en la resina.
- Utilizar un secador para la tolva. Para todas las resinas Zytel la temperatura de secado recomendada es 80°C (175°F).
- No exponer la resina a la atmósfera.
- El Zytel se provee comúnmente en bolsas y cajas. La bolsa es un envase sellado en caliente, de alta resistencia, con espacio de almacenamiento mínimo, abertura fácil y resistencia excelente a la humedad. Las bolsas abiertas se deben enrollar y utilizar cuanto antes para reducir al mínimo la recolección de humedad. Las bolsas se pueden sellar en caliente o cerrar firmemente con polietileno.

5.2.1.2 Secado

El proceso de secado para el Zytel depende de:

- La humedad relativa de la atmósfera de secado. El tiempo de secado disminuye si el contenido de agua en el aire es menor. Un punto de condensación de -18°C (0°F) o menor es recomendable.

- La temperatura de secado. El aumento de la temperatura de secado reduce el tiempo de secado. Pero una temperatura del aire de secado que exceda de 95°C (200°F) para más de 3 horas descolorara el nylon. La temperatura recomendada para secar las resinas Zytel es 80°C (175°F).

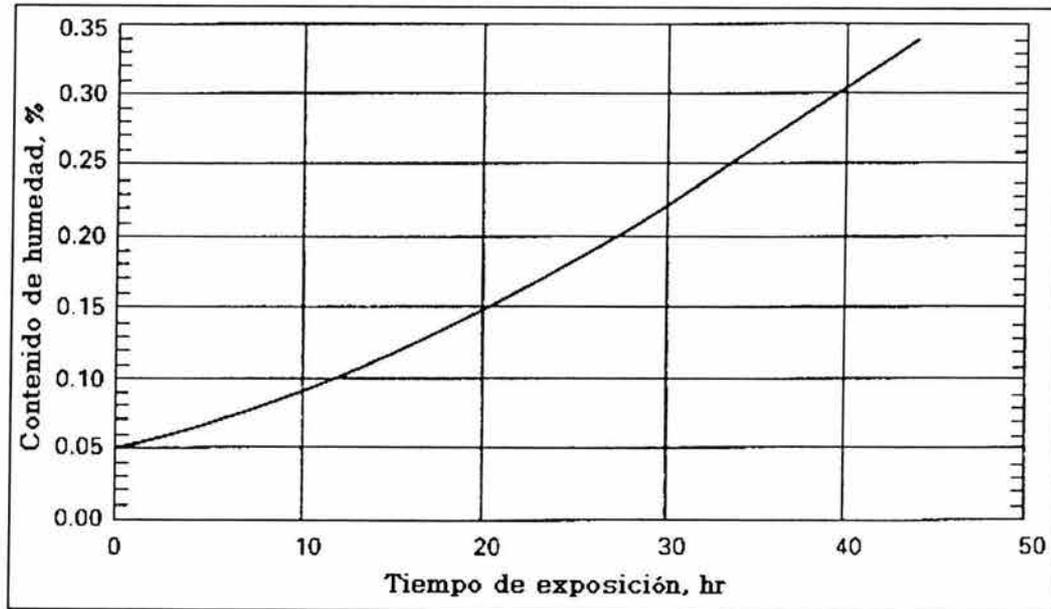


Figura 5.2. Retención de humedad vs tiempo de exposición, para el Zytel en aire a 23°C (73°F) a 50% de humedad relativa

- Contenido de agua inicial y final. El contenido de agua inicial de la resina se puede estimar de la Figura 5.2, que muestra el contenido de agua del Zytel en varias humedades relativas como función del tiempo de exposición. El contenido de agua final es determinado por los requerimientos del moldeo y generalmente es menos de 0.2%. Para las propiedades óptimas del material se recomienda 0.1%.

Un sistema de secado eficiente consiste en circular el aire a través de un deshumidificador donde se quita el agua. El aire caliente seco se pasa sobre el nylon. Para que cualquier sistema de deshumidificación sea eficaz, el horno y los tubos de aire deben ser herméticos. El sistema se debe verificar periódicamente para saber si hay escapes, para estar seguro que el equipo permitirá un secado eficiente. El tiempo de secado en función del contenido de agua de la resina se muestra en la Figura 5.3.

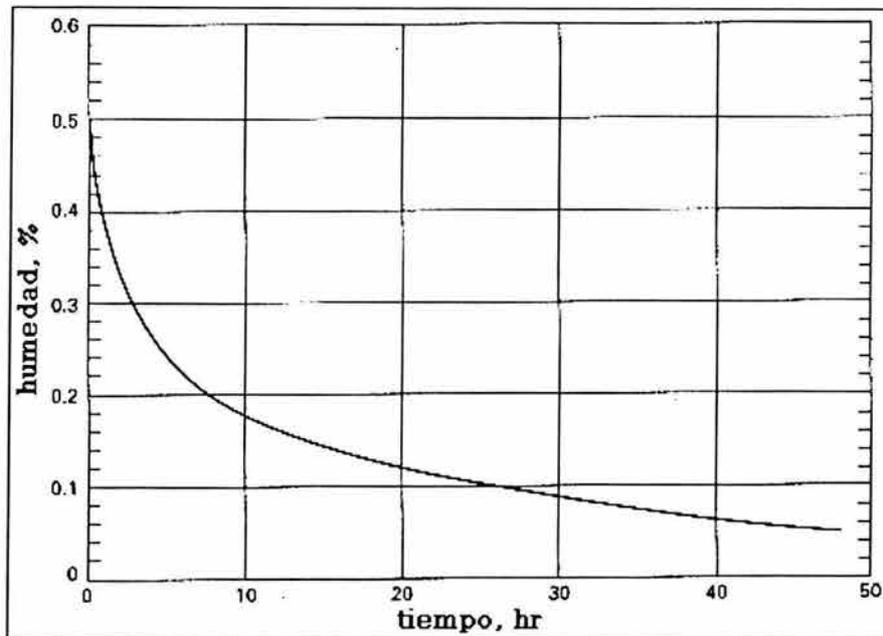


Figura 5.3. Tiempo de secado para el Zytel a 80°C (175°F)

5.2.1.3 Contaminación

La contaminación al igual que la humedad puede afectar el aspecto y las propiedades nominales de las piezas moldeadas. Es necesario un buen manejo de la resina para limitar la exposición de la resina a las fuentes de contaminación, algunas sugerencias para evitar la contaminación son:

- Mantener un área de trabajo limpia.
- Cerciorarse de que el material reutilizado esté libre de contaminación.
- Limpiar las molidoras de desecho.
- Almacenar el material reciclado en envases cubiertos. Los envases y las tolvas de la máquina deben tener tapas ajustadas. Siempre que sea posible, eliminar el almacenaje intermedio del material reciclado.
- Almacenar el material reciclado solamente en envases a prueba de humedad. Los envases de cartón no se recomiendan, puesto que las fibras de la pelusa y del papel son una fuente de humedad y contaminación.

- No pintar el interior de tolvas, de tapas de la tolva, y de envases de almacenaje.
- Limpiar la tolva y la máquina al cambiar los materiales. Desechar el material de purga.
- Evitar colocar el nylon en un horno con otros materiales. Los materiales se pueden contaminar entre ellos. Limpiar las bandejas del horno y el horno con frecuencia.

5.2.2 Parámetros de Inyección para el equipo[14]

Los parámetros proporcionados por el fabricante son muy importantes, ya que éstos dan una idea de las condiciones de operación de la máquina para obtener resultados óptimos en las piezas inyectadas, sin embargo estos parámetros son únicamente guías y pueden variar dependiendo de las condiciones ambientales, el estado de la máquina etc, por esto necesario hacer pruebas y variar dichos parámetros hasta lograr una inyección adecuada.

5.2.2.1 Temperaturas del cilindro y de derretimiento

Las temperaturas recomendadas para el cilindro de la inyectora se dan en la Tabla 5.1. Los datos tomados para las resinas reforzadas con vidrio PA 66 indican que el uso de temperaturas altas en la zona posterior del cilindro, mejoran el retorno del tornillo, reducen la fractura de las fibras de vidrio y reducen el desgaste del tornillo y del barril.

		Temperaturas del cilindro				Temperatura de derretimiento
		Parte posterior del cilindro	Parte central del cilindro	Parte frontal del cilindro	Boquilla De inyeccion	
Zytel	°C	300-315	305-315	305-315	310-320	315-325
HTN	°F	570-600	580-600	580-600	590-610	600-617

Tabla 5.1. Temperaturas recomendadas para el cilindro de la inyectora y temperatura de derretimiento

Resultados similares se esperarían para las resinas reforzadas con fibra de vidrio de Zytel HTN. Sin embargo, si el volumen de la inyección es pequeño comparado con el tamaño del

tiro de la máquina y si se utilizan ciclos largos, entonces las temperaturas de la zona posterior deben ser reducidas. Las temperaturas recomendadas para el derretimiento también se dan en la Tabla 5.1. Para reducir la degradación térmica de la resina, el tiempo máximo que debe permanecer en el cilindro debe ser menos de 10 minutos. El tiempo recomendado es entre 3 y 5 minutos.

5.2.2.2 Temperatura del Inyector

La temperatura de la boquilla de inyección se debe ajustar de modo que la resina no escurra ni se endurezca prematuramente, en la Tabla 5.1 se presentan las temperaturas sugeridas para dicha boquilla.

5.2.2.3 Temperatura del molde

Para una estabilidad dimensional óptima, la temperatura recomendada para la superficie del molde es de 135 a 155°C (275 a 310°F). La temperatura varía según el espesor de la pieza, véase Tabla 5.2. Calentadores de aceite o sistemas de calefacción eléctrica son necesarios para estas temperaturas del molde. A estas temperaturas, la contracción del molde será maximizada y la contracción post-moldeo será reducida al mínimo. Debido al alto nivel de cristalinidad de la resina, otras características tales como resistencia química, resistencia al arrastramiento y retención de características sobre la temperatura de cristalización (T_g) serán maximizadas.

Espesor de la pieza, mm (in)	Temperatura sugerida para el molde, °C (°F)
0.75 (0.030)	155 (310)
1.5 (0.060)	150 (300)
3.0 (0.125)	145 (295)
6.2 (0.250)	135 (275)

Tabla 5.2. Temperaturas sugeridas para el molde basadas en el espesor de la pieza

5.2.2.4 Presión de inyección

El flujo dependerá de la cantidad de fibras de vidrio en la resina y de la temperatura de derretimiento, también depende de la presión de la inyección de la resina. Las presiones de inyección recomendadas para las resinas reforzadas con vidrio de Zytel HTN, se encuentran dentro del rango de 400-1065 *bar* (6000 a 16.000 *psi*).

5.2.2.5 Tiempo de inyección

Las resinas Zytel HTN se solidifican rápidamente en el molde. Para optimizar el brillo superficial de la pieza y para mejorar las características de la pieza se recomienda utilizar un llenado rápido (0,5 a 4 segundos) durante el moldeo. Si el molde no está bien ventilado el llenado rápido puede resultar en partes de la pieza quemadas.

5.2.2.6 Descompresión del tornillo

La descompresión del tornillo se puede utilizar en algunos casos para controlar el escurrimiento en el molde. Sin embargo, la causa del escurrimiento debe ser identificada y corregida. Por ejemplo, está el escurrimiento causado por la degradación de la resina (una temperatura demasiado alta de derretimiento, resina mojada, tiempos largos de interrupción), un mal control de la temperatura del inyector, el diseño del inyector, etc.

5.2.3 Inyección de las probetas

Para la inyección de las probetas fue necesario verificar bien el contenido de humedad del material y las posibilidades de secarlo antes de la inyección, ya que un contenido mayor al 0.2% de humedad reduce considerablemente las propiedades del material. Para esto fue necesario revisar la norma ASTM D 789⁶, esta norma indica los equipos y procedimientos que se tienen que seguir para la verificación del contenido de humedad en los polímeros.

⁶ ASTM D789 "Standard Test Methods for Determination of Relative Viscosity and Moisture Content of Polyamide (PA)"

El procedimiento planteado por esta norma es algo complicado y se requiere un equipo sofisticado, el cuál no se encuentra disponible en ninguna dependencia de la UNAM.

Se consultó con el personal del Instituto de Materiales de la UNAM para saber si contaban con algún equipo o método alternativo para determinar el contenido de humedad en polímeros y de secado. Nos comentaron que ellos no contaban con un equipo especial para esta prueba, pero que se podría implementar algún método, sin embargo no fue necesario emplear ningún método de secado ya que después de revisar la documentación enviada junto con el material, se confirmó que el contenido de humedad del polímero en su empaque sellado, garantizado por el fabricante, es de 0.08%. Por lo tanto no fue necesario secar el material antes de hacer la inyección.

La inyección de las probetas se realizó el 31 de octubre del 2003 en la inyectora de la Facultad de Ingeniería, una DEMAG ERGOtech pro 50-270, siguiendo los procedimientos recomendados en el documento proporcionado por DuPont.

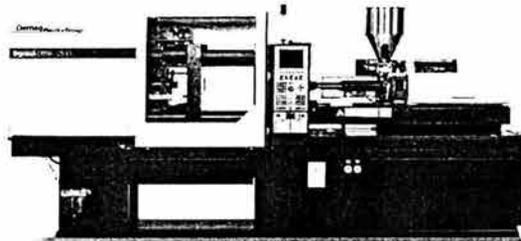


Figura 5.4. Maquina inyectora equivalente a la de la Facultad de Ingeniería.

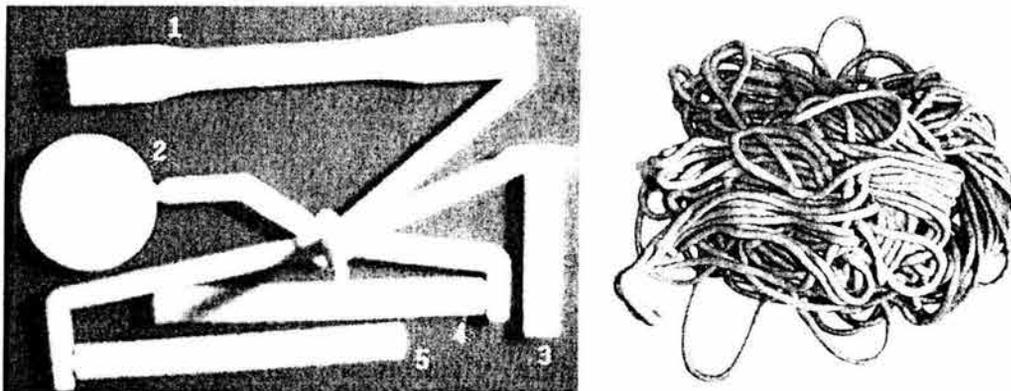


Figura 5.5. Probetas inyectadas para diferentes pruebas mecánicas bajo la norma ASTM. 1) tracción, 2) dureza, 3) impacto, 4) fatiga térmica y 5) fatiga por flexión. Y subproducto de la inyección.

5.2.3.1 Inicio del proceso de inyección[14]

- Fijar la temperatura del inyector a la temperatura sugerida de derretimiento y la temperatura del cilindro en 30°C (54°F) debajo de la temperatura mínima de proceso. Permitir que el calor se difunda por lo menos 20 minutos y después llevar las temperaturas del cilindro a las temperaturas de funcionamiento; utilizar la Tabla 5.1 como guía.
- Comprobar y confirmar que el inyector esté a la temperatura requerida.
- Con el cilindro en la posición retraída, activar el tornillo. Si el tornillo no rota, dar un plazo mayor para que el calor se difunda en todo el cilindro.
- Cuando el tornillo comience a rotar, abrir la compuerta de alimentación brevemente y después cerrar. Comprobar la carga en el tornillo. Si es excesiva, aumentar las temperaturas del cilindro. El inyector debe estar abierto en este momento.
- Abrir la alimentación, mantener el tornillo en la posición delantera aumentando la presión trasera. Extruir el material derretido y si se observan partículas sin derretir aumentar la temperatura del cilindro.
- Reducir la presión trasera, ajustar el movimiento del tornillo para aproximar el peso del material inyectado. Comprobar la temperatura de derretimiento y, si es necesario, ajustar las temperaturas del cilindro para obtener la temperatura recomendada de derretimiento.
- Mover el cilindro a la posición delantera para iniciar la inyección. Comenzar en una presión de inyección baja (a menos que las inyecciones pequeñas puedan causar problemas en la eyección de la pieza) y ajustar las variables del moldeo para mejorar la calidad del producto.

Una vez que las variables de moldeado se ajustan a los valores recomendados, se hacen las primeras inyecciones del molde, y según los resultados observados (inyecciones incompletas, quemadas, con muchas burbujas, etc.), se van ajustando los valores hasta obtener las piezas con la calidad deseada. Este proceso de ajuste es largo ya que se tiene que hacer por ensayo y error, una vez que se tienen las variables en sus valores óptimos se puede hacer la inyección de las piezas finales.

Una vez que se tienen las piezas suficientes hay un procedimiento sugerido por el fabricante para finalizar el proceso de inyección de este material.

5.2.3.2 Fin del proceso de inyección[14]

La máquina se debe purgar a fondo con polietileno antes de apagarla. El purgar con polietileno reducirá el tiempo en el inicio subsecuente y reduce la contaminación. Se sugiere el siguiente procedimiento para finalizar el proceso:

- Moldear el último ciclo y cerrar la compuerta de alimentación de la tolva.
- Vaciar la tolva, agregar polietileno de alta densidad a la tolva, contraer el cilindro y purgar con el polietileno hasta que salga totalmente limpio.
- Reducir las temperaturas del cilindro, cerrar la alimentación de la tolva, continuar purgando con el polietileno hasta que el tornillo quede seco.
- Poner el tornillo en la posición delantera.
- Apagar la fuente de alimentación.

Al final del proceso de inyección se obtuvieron 10 juegos de probetas para hacer las pruebas mecánicas necesarias para la verificación del material.

5.3 PRUEBA DE EXPANSIÓN TÉRMICA

La prueba de la expansión térmica del material se realizó en el Instituto de Astronomía, para esta se utilizaron las probetas de fatiga que se obtuvieron de la inyección realizada en la Facultad de Ingeniería. La prueba consistió en tomar la medida de longitud de una probeta a diferentes temperaturas, tomando una temperatura y su longitud medida como referencia, basándonos en la Norma ASTM E831⁷ [13]. Para poder realizar esta prueba se maquinó una probeta para garantizar el paralelismo entre las caras que se iban a utilizar para tomar la medición de longitud.

a)	Temperatura	Longitud
	[°C]	[mm]
1	22.4	100.02
2	22.3	99.99
3	22.2	100.01
4	22.2	100.03
5	22.5	99.97
promedio	22.32	100.004

b)	Temperatura	Longitud
	[°C]	[mm]
1	6.6	99.93
2	6.8	99.90
3	6.7	99.91
4	6.8	99.92
5	6.8	99.89
promedio	6.74	99.910

c)	[°C]	[mm]
1	-16.0	99.86
2	-16.1	99.85
3	-16.0	99.86
4	-16.2	99.87
5	-16.0	99.84
promedio	-16.06	99.856

Tabla 5.3. Tablas de mediciones de longitud a diferentes temperaturas

La primera prueba que se realizó consistió en medir 5 veces la longitud de una probeta a temperatura ambiente, Tabla 5.3 inciso a), después se midió la longitud, también 5 veces, a

⁷ Norma ASTM E831 "Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis"

una temperatura más baja, Tabla 5.3 inciso b) y finalmente se midió a una temperatura bajo cero, Tabla 5.3 inciso c). Las mediciones de longitud se realizaron con un vernier digital marca Mitutoyo⁸ con resolución de 10 micras.

A partir de estas mediciones, utilizando los promedios y tomando como referencia las mediciones hechas a temperatura ambiente se calcularon ΔT y ΔL . Con estos valores se obtiene la gráfica de la Figura 5.6, de la que se puede calcular el valor para el Coeficiente de Expansión Térmica Lineal (α) de este material.

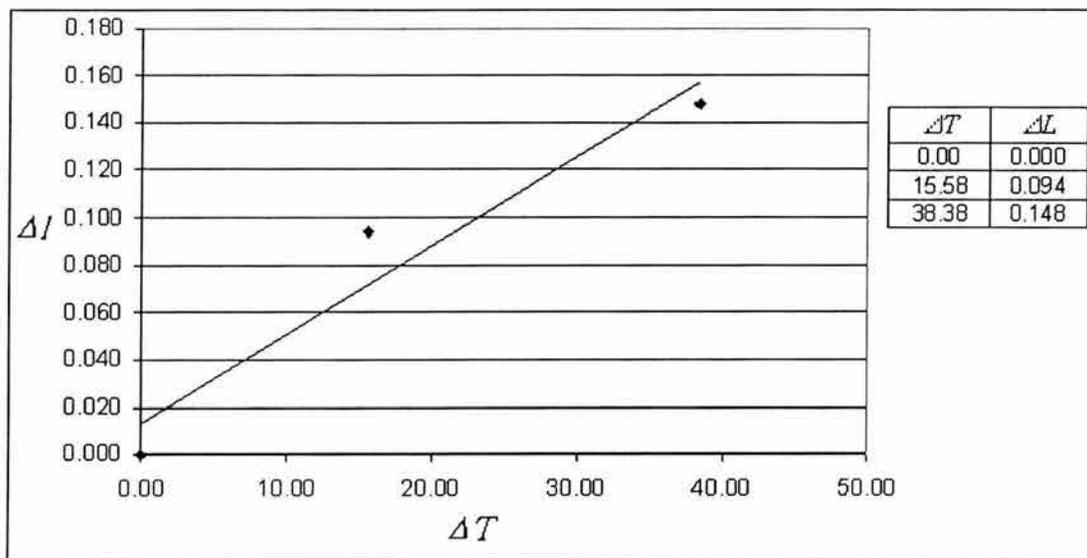


Figura 5.6. Gráfica de ΔT vs ΔL para el Zytel HTNFR51G35L, primera prueba

La ecuación obtenida experimentalmente queda:

$$\Delta L = 0.0037\Delta T + 0.0133 \quad (5.10)$$

Partiendo de la ecuación básica para la dilatación de un sólido, Ecuación 5.1, la pendiente de la recta es el valor del coeficiente de expansión térmica (α), multiplicado por la longitud de referencia (l).

⁸ Mitutoyo serie 500 de 8 pulgadas

Entonces tomando la pendiente de la recta obtenida experimentalmente de la Ecuación 5.10 e igualándola al producto αl , se tiene:

$$0.0037 = \alpha l \quad (5.11)$$

conociendo la longitud de referencia $l=100.004 \text{ mm}$, se despeja α y se sustituye l de la Ecuación 5.11 para obtener el valor del Coeficiente de Expansión Térmica (CTE)

$$\alpha = \frac{0.0037}{100.004} = 36.99 \times 10^{-6} [^{\circ}\text{C}^{-1}] \quad (5.12)$$

El valor obtenido experimentalmente es muy lejano al valor de especificación que proporciona el fabricante. Analizando este resultado y revisando la bibliografía disponible, se concluyó que el valor de α depende de la temperatura medida y de la temperatura de referencia escogida para determinar l , por lo tanto no es un valor constante, esta variación por lo general es despreciable cuando los cambios en temperatura son pequeños y se puede considerar como constante. Sin embargo si el cambio de temperatura es grande el Coeficiente de Expansión Térmica (CTE) ya no se puede considerar un valor constante, y por lo tanto la función no se comporta linealmente.

En el caso de esta prueba los cambios de temperatura (ΔT) son muy grandes, por lo tanto el comportamiento no es lineal, al aproximarlos a una recta el valor de la pendiente obtenida experimentalmente, y el valor del Coeficiente de Expansión Térmica (α) obtenido a partir de ésta son muy lejanos al valor esperado.

Por esto fue necesario hacer otra prueba cuidando que las mediciones se realizaran siempre dentro del intervalo de temperaturas de operación y tomando mediciones de temperatura muy cercanas para que el ΔT fuera pequeño. Las mediciones de temperatura y longitud se presentan en la Tabla 5.4 a partir de estas mediciones se calcularon ΔT y ΔL , tomando una temperatura y su respectiva longitud como referencia.

Temperatura [°C]	Longitud [mm]	ΔT	ΔL
21.9	128.30	-1.5	-0.03
21.3	128.29	-0.9	-0.02
21.1	128.29	-0.7	-0.02
20.8	128.28	-0.4	-0.01
20.4 ⁹	128.27	0.0	0.00
20.2	128.26	0.2	0.01
19.9	128.25	0.5	0.02
19.5	128.24	0.9	0.03
19.0	128.23	1.4	0.04
18.9	128.23	1.5	0.04
18.6	128.22	1.8	0.05
17.9	128.21	2.5	0.06
17.5	128.20	2.9	0.07
16.9	128.19	3.5	0.08
16.5	128.18	3.9	0.09
15.9	128.17	4.5	0.10
15.3	128.15	5.1	0.12
14.9	128.14	5.5	0.13
14.2	128.13	6.2	0.14
13.5	128.11	6.9	0.16

Tabla 5.4. Temperaturas y longitudes medidas para la segunda prueba de CTE

Graficando los valores de ΔT y ΔL , Figura 5.7, se encontró la ecuación de la recta obtenida experimentalmente:

$$\Delta l = 0.0226\Delta T + 0.0035 \quad (5.13)$$

⁹ Temperatura de referencia

Y siguiendo un procedimiento similar al del caso anterior calculamos el valor del CTE para el material en este rango de temperaturas.

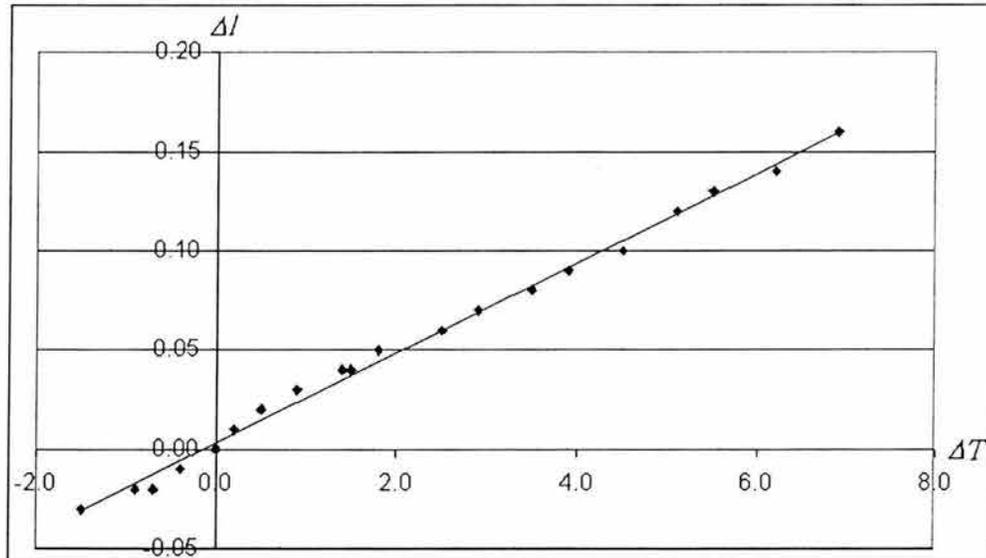


Figura 5.7. Gráfica de ΔT vs ΔL para el Zytel HTNFR51G35L, segunda prueba

Se tomó la pendiente de la recta obtenida experimentalmente de la Ecuación 5.13 y se igualó al producto αl :

$$0.0226 = \alpha l \quad (5.14)$$

Conociendo la longitud de referencia $l=128.27 \text{ mm}$, se despejó α y se sustituyó l en la Ecuación 5.14 para obtener el valor del Coeficiente de Expansión Térmica (CTE)

$$\alpha = \frac{0.0226}{128.27} = 176.191 \times 10^{-6} \text{ } [^{\circ}\text{C}^{-1}] \quad (5.15)$$

Este valor obtenido experimentalmente es muy cercano al valor que da el fabricante, véase Tabla 4.2, para el rango de temperaturas que se utilizó, por lo tanto se puede concluir que el material se comporta de forma adecuada en cuanto a su Coeficiente de Expansión Térmica.

Valor teórico	Valor experimental	% de error
$180 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$	$176.19 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$	2.12 %

5.4 ENSAYO DE TRACCIÓN

De las inyecciones realizadas se seleccionaron las diez mejores probetas, para las pruebas mecánicas. El ensayo de tracción se realizó también en la Facultad de Ingeniería, para este ensayo se contó con el apoyo del Ing. Adolfo Altamirano Mesa, además del de la M.I. Magdalena Trujillo Barragán. Las pruebas se realizaron en la máquina Instron¹⁰ del Departamento de Ingeniería Mecánica, bajo la Norma ASTM D638¹¹[13].

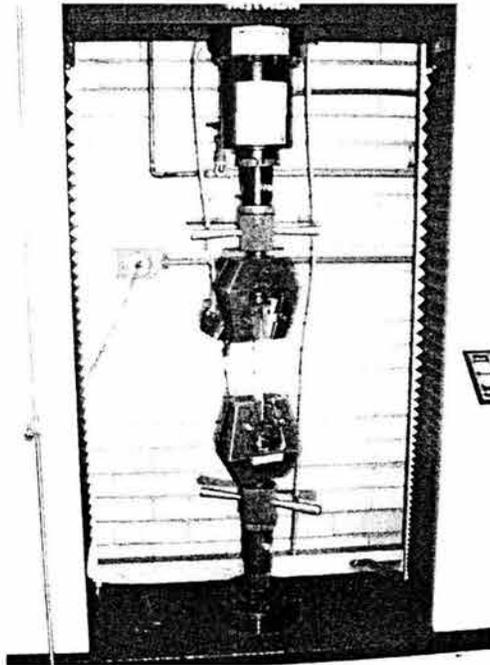


Figura 5.8. Máquina Instron de la Facultad de Ingeniería

Primero se realizaron pruebas a algunas probetas que no se consideraban dentro de los especímenes a probar, esto se hizo para calibrar la máquina y verificar los instrumentos de medición. Al hacer estas primeras pruebas surgieron algunos problemas.

El primer problema que se encontró fue que la medición de elongación de las probetas no se pudo hacer de la manera prevista, con un extensómetro, debido a que el extensómetro chocaba con las mordazas de sujeción de la probeta, y al colocarlo de manera que no existiera esa interferencia, las probetas quedaban mal sujetadas. Por lo tanto las mediciones

¹⁰ Instron Corporation. Series IX Automated Materials Testing System 1.04

¹¹ Norma ASTM D638 “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”

de deformación (alargamiento) se tuvieron que tomar de la máquina, y no directamente de la probeta. Esto induce un error, ya que esta forma de medir es mediante la posición relativa entre las mordazas, esto implica que en la medición no solo aparece la medición de la deformación de las probetas, también se encuentran las deformaciones de las mordazas, los brazos y la estructura de la máquina, este error podría considerarse despreciable ya que los materiales de la máquina y el material probado son muy diferentes en cuanto a su resistencia, por lo tanto la deformación de los elementos de la máquina es despreciable en comparación con la deformación de la probeta, sin embargo hay que estar conscientes de que el error existe.

Otro problema que se encontró fue en la sujeción de las probetas, si la mordaza no se aprieta bien, la probeta resbala al momento de aplicar la carga, sin embargo, si se aplica más torque, se produce una precarga que genera un esfuerzo en la zona de sujeción de la probeta, provocando que ésta se fracture en esa zona y no en la zona de prueba.

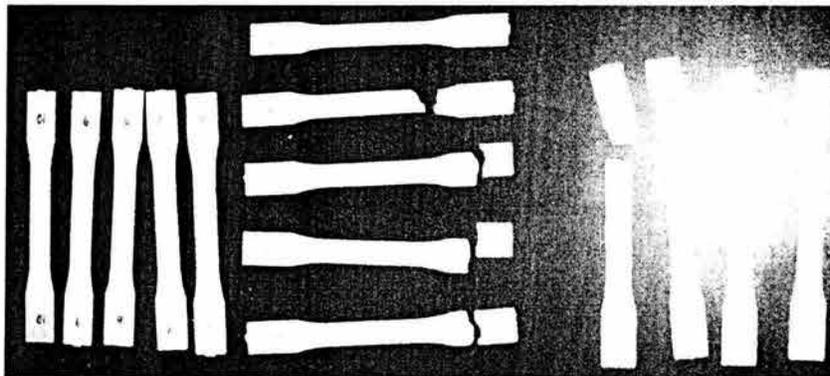


Figura 5.9. Probetas utilizadas en el ensayo de tracción realizado en la Facultad de ingeniería

Aún con estas limitaciones y deficiencias se realizaron las pruebas en las primeras 5 probetas, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 5.10 y en la Tabla 5.5.



Figura 5.10. Resultados de la prueba de tracción realizadas en la Facultad de Ingeniería

Specimen Number	Displacement at Peak (mm)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Strain at Peak (mm/mm)	Displacement at 0.2% Yield (mm)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Strain at 0.2% Yield (mm/mm)	Displacement at Break (mm)
1	3.480	5.943	141.00	.0696	.8494	2.323	55.12	.0170	3.480
2	2.730	5.267	120.20	.0546	.8676	2.436	55.58	.0174	2.730
3	3.430	5.005	111.50	.0686	.5336	1.224	27.28	.0107	3.430
4	3.670	6.048	137.00	.0734	.5828	1.530	34.66	.0117	3.670
5	1.240	2.440	53.98	.0248	.6234	1.804	39.91	.0125	1.857
Mean:	2.910	4.941	112.70	.0582	.6914	1.864	42.51	.0138	3.033
Standard Deviation:	.999	1.466	34.98	.0200	.1560	.516	12.55	.0031	.748

Specimen Number	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Strain at Break (mm/mm)	Young's Modulus (MPa)
1	5.943	141.00	.0696	3865.
2	5.267	120.20	.0546	3803.
3	5.005	111.50	.0686	3263.
4	6.048	137.00	.0734	3697.
5	2.368	52.38	.0371	4007.
Mean:	4.926	112.40	.0607	3727.
Standard Deviation:	1.497	35.66	.0150	283.

Tabla 5.5. Resultados de la prueba de tracción realizada en la Facultad de Ingeniería.

Los resultados de estas pruebas no fueron lo que se esperaba ya que los valores obtenidos del Módulo de Young fueron menores. El valor según el fabricante es del orden de 13 *GPa* y el valor medio obtenido por nosotros es de 3.727 *GPa*.

A partir de este resultado, y considerando las deficiencias y los problemas que se presentaron al momento de hacer las pruebas en la Facultad, se decidió hacer el resto de las pruebas en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI)¹², en la ciudad de Querétaro. Para esto se mandaron las 5 probetas restantes junto con la petición de las pruebas y mediciones que requeríamos.

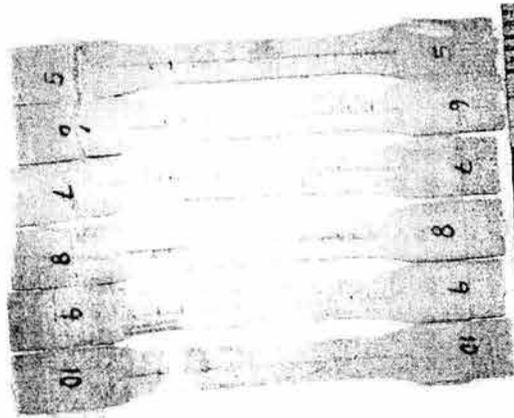


Figura 5.11. Probetas utilizadas en el primer ensayo de tracción realizado por el CIDESI

Los resultados de las pruebas que se realizaron en el CIDESI, tampoco fueron muy alentadores, debido a que en un principio no se lograban interpretar adecuadamente o a que la interpretación que se hacía de estos nos llevaba a pensar que se había cometido algún error en la realización de las pruebas o en la elaboración del reporte.

Los principales problemas fueron que en el reporte del CIDESI se especificaron dos velocidades de prueba diferentes (véase Figura 5.12) esto no puede ser posible ya que se trata de un ensayo destructivo, que se hace una sola vez a una velocidad determinada. El otro problema encontrado fue que el valor reportado para el Módulo de Young no correspondía a la relación entre la carga y el alargamiento, divididos previamente entre el área y longitud iniciales para obtener el esfuerzo y la deformación respectivamente.

¹² CIDESI, Av Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, C.P. 76130, Querétaro, Qro.

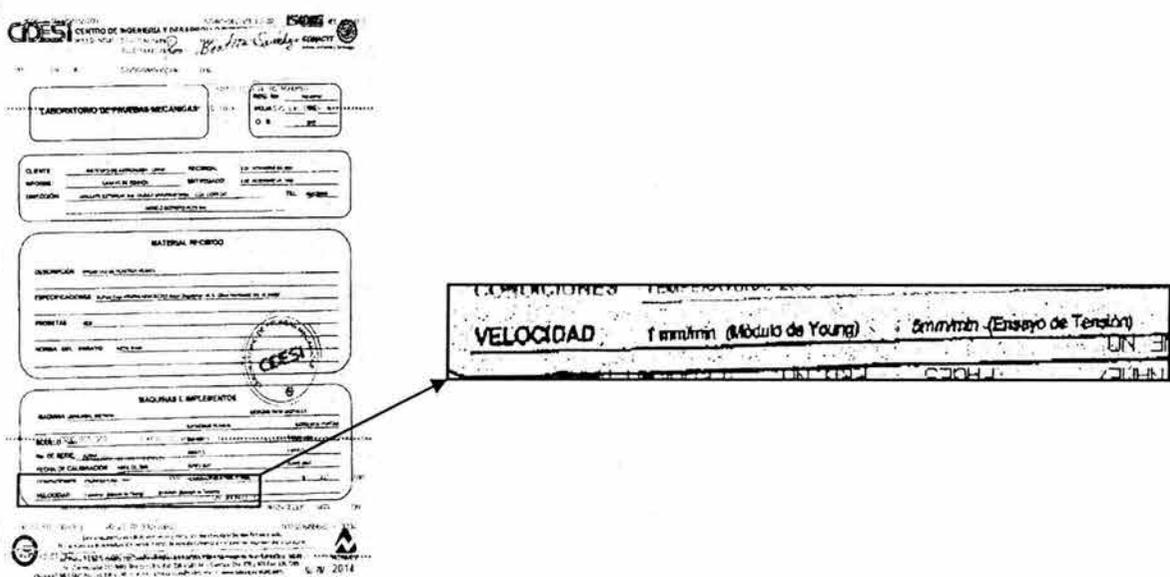


Figura 5.12. Carátula de reporte de CIDESI y detalle de las velocidades de las pruebas, véase Anexo D.

Por lo tanto se contactó a los responsables del laboratorio de Pruebas Mecánicas del CIDESI, para que nos ayudaran a resolver las dudas que surgieron al interpretar sus resultados. Después de una charla con ellos se llegó a la conclusión de que habían realizado dos pruebas distintas sobre las mismas probetas, primero realizaron una prueba para medir la deformación, a una velocidad, sin llegar al punto de fractura y luego una segunda prueba para determinar el Módulo de Young, a otra velocidad. Es por esto que reportaban dos velocidades distintas y que los valores del Modulo de Young obtenidos no correspondían a los valores de deformación. Además comentaron que tuvieron un problema similar al que se presentó en la Facultad en la sujeción de las probetas.

Al darse cuenta de que habían cometido un error, los responsables del laboratorio de CIDESI ofrecieron realizar nuevamente las pruebas, para lo que se les enviaron más probetas.

Los resultados obtenidos en la segunda prueba realizada por el CIDESI son muy similares a los obtenidos en las pruebas que realizamos en la Facultad de Ingeniería, el Módulo de Young calculado a partir de las gráficas proporcionadas en el reporte del CIDESI, mostradas en la Figura 5.13, es del orden de 3.5 *GPa*.

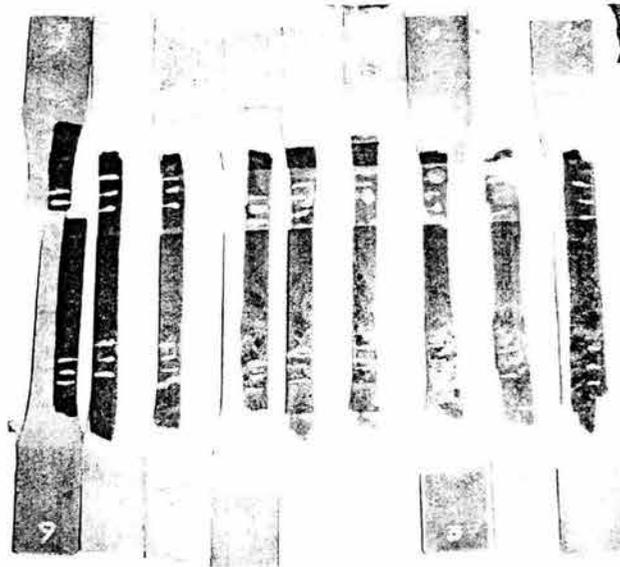


Figura 5.14. Probetas utilizadas en el segundo ensayo de tracción realizado por el CIDESI

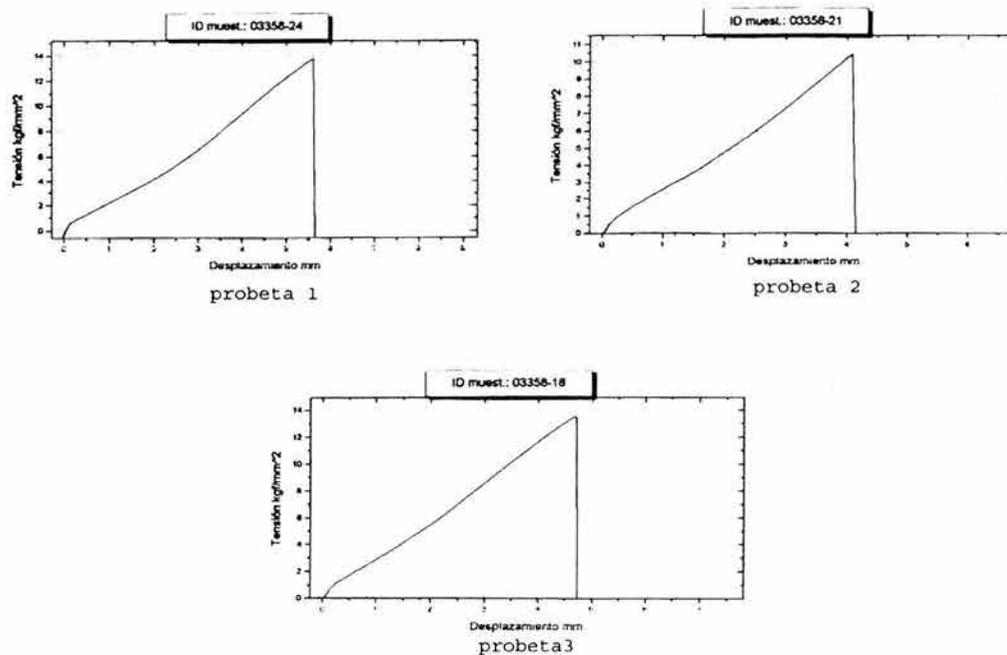


Figura 5.13. Graficas de tensión vs desplazamiento, de la segunda prueba realizada por el CIDESI.

5.4.1 Análisis de resultados

El valor que obtuvimos para el Módulo de Young en las pruebas realizadas en la Facultad de Ingeniería, Tabla 5.5, nos dejó insatisfechos, ya que, aunque evidentemente se esperaba

un valor por abajo del valor proporcionado por el fabricante, 12 *GPa*, no se esperaba que la diferencia fuera tan grande.

La diferencia entre el valor medido por nosotros y por el fabricante se debía a diferentes factores o variables de la prueba que no se podían controlar, como la temperatura y humedad relativa al hacer las pruebas, las cuales se pueden monitorear pero no controlar en el laboratorio de pruebas mecánicas de la Facultad. Otro factor podían ser las deficiencias que se presentaron en cuanto a la medición de alargamiento y a la sujeción de las probetas. También pensamos que como la máquina Instron de la Facultad de Ingeniería es utilizada con fines didácticos principalmente, era posible que no estuviera bien calibrada.

Es por esto que se decidió hacer otras pruebas en algún lugar donde nos pudieran certificar los resultados. Se consideraron diferentes laboratorios y finalmente se decidió hacerlo en el CIDESI, ya que el Instituto mantiene una buena relación de trabajo con este centro debido a diferentes proyectos que se han llevado conjuntamente.

Lamentablemente las primeras pruebas que se hicieron por parte del CIDESI entregaron resultados muy deficientes. En un principio no lográbamos interpretar los resultados, nos surgían varias dudas en cuanto a su forma de reportar los resultados e incluso nos hacían pensar que se habían cometido errores en las pruebas o en el reporte. Después de contactar a los responsables nos comentaron que realizaron dos pruebas sobre las mismas probetas.

El problema de que se hayan realizado dos pruebas sobre las mismas probetas es que los resultados obtenidos en la segunda prueba se vieron afectados por la primera prueba. Aunque las probetas no llegaran a su punto de fractura, la carga aplicada en la primera prueba produce una deformación en la probeta, haciendo que sus propiedades varíen, entonces los resultados obtenidos en la segunda prueba ya no pueden ser válidos. A partir de esto se decidió descartar los resultados de esa prueba. En el Anexo D se incluyen los resultados de las diferentes pruebas de tracción realizadas.

De la segunda prueba realizada por el CIDESI los resultados los obtuvimos de la siguiente manera:

Para la probeta 1, basándonos en la gráfica de la Figura 5.15, prolongamos la recta de la parte elástica, sobre ésta obtuvimos las coordenadas de dos puntos.

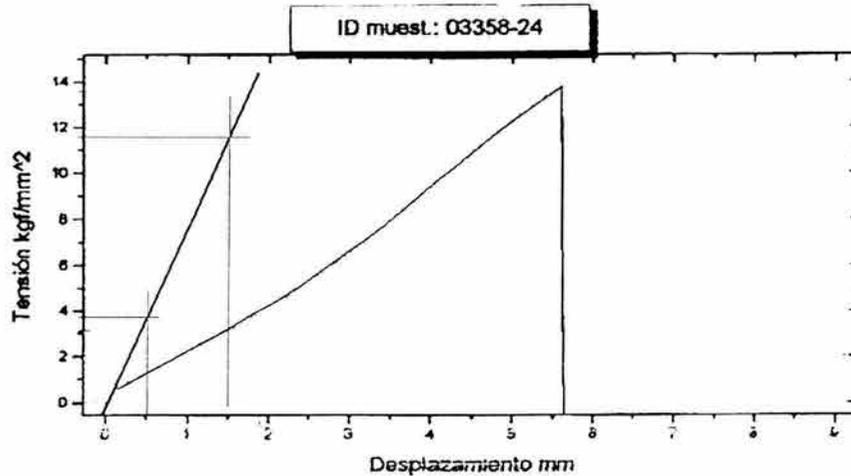


Figura 5.15. Gráfica tensión vs desplazamiento de la probeta 1 de la segunda prueba realizada en el CIDESI

Los puntos obtenidos son: (1.5,11.5) y (0.5,4), a partir de estos puntos se calcula la pendiente de la recta, dividiendo los valores de desplazamiento entre la longitud inicial ($l=50\text{ mm}$), para obtener deformación:

$$m = \frac{11.5 - 4}{(1.5 - 0.5)/50} = 375 \left[\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \right] \quad (5.16)$$

Finalmente hicimos una conversión de unidades para poder comparar los resultados

$$m = 375 \left(\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \right) \cdot \left(\frac{9.81\text{N}}{1\text{kgf}} \right) \cdot \left(\frac{1\text{mm}^2}{1 \times 10^{-6}\text{m}^2} \right) = 3678750000 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \quad (5.17)$$

Los resultados para las otras dos probetas se obtuvieron de manera similar, de tal forma que los valores para el Módulo de Young de las tres probetas se presentan en la Tabla 5.6.

Probeta	Modulo de Young
1	3678.75 MPa
2	3432.28 MPa
3	3537.65 MPa

Tabla 5.6. Valores del Módulo de Young obtenidos en la segunda prueba realizada en el CIDESI.

De la segunda prueba realizada por el CIDESI, los resultados que se obtienen son muy similares a los que obtuvimos en las pruebas hechas en la Facultad. Esto nos puso a pensar que en realidad los problemas presentados al momento de realizarlas no fueron un factor determinante en el resultado obtenido, y que la diferencia entre los valores obtenidos y los valores esperados se debe a otros factores.

Los resultados obtenidos en las pruebas de tracción nos llevaron a hacer una revisión del material seleccionado, se verificaron las propiedades de los otros materiales consultados y el valor obtenido para el Módulo de Young del Zytel, aún siendo mucho menor que el esperado, aproximadamente $4GPa$, es mayor que el valor de los otros materiales disponibles (véase Tabla 4.1). También se hizo un análisis por Elementos Finitos de la deformación máxima de la pieza, considerando el valor de Módulo de Young obtenido en las pruebas y el resultado fue que aún con este valor seguíamos dentro de la especificación. Por lo tanto decidimos seguir trabajado con el Zytel HTN de DuPont. Además de que nuestra propiedad crítica es la expansión térmica del material (CTE) y en este caso el resultado obtenido es muy satisfactorio.

CAPÍTULO 6

OPTIMIZACIÓN Y DISEÑO DEL MOLDE DE INYECCIÓN

6.1 REDISEÑO DEL COMPENSADOR

Fue necesario hacer un nuevo análisis de la geometría planteada en el diseño conceptual del Compensador Térmico, debido a la capacidad de la inyectora DEMAG ERGOtech pro 50 - 270 con que cuenta la Facultad de Ingeniería, donde se hará la inyección final de la pieza, y tomando en cuenta los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas, especialmente el Módulo de Young de los ensayos de tracción, aproximadamente $4GPa$.

La inyectora tiene una capacidad máxima de inyección de 144 cm^3 , y el volumen de nuestra pieza planteada en el diseño conceptual, Figura 6.1, es mayor, sin considerar los canales de distribución para la inyección el volumen era de 272.38 cm^3 . Por esta razón fue necesario hacer una optimización en la cual se disminuyera el volumen de la pieza, bajo la premisa de siempre mantenernos dentro de la especificación de desplazamiento máximo.

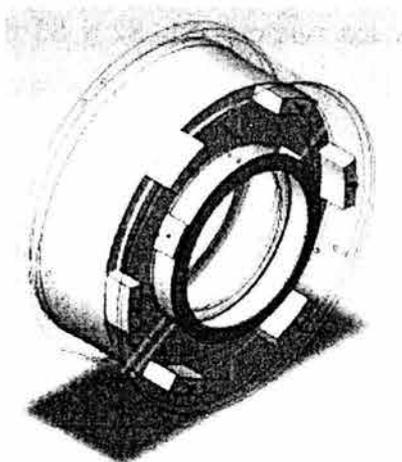


Figura 6.1. diseño preliminar del compensador térmico pasivo.

6.1.1 Especificaciones básicas para el rediseño [15]

Existen dos especificaciones relativas a la posición de los lentes, una se refiere al desplazamiento máximo entre todos los lentes contiguos, y la otra a la posición de los lentes respecto al sistema de referencia de la cámara, las especificaciones generales se presentan en el Anexo B.

Desplazamientos radiales

Los desplazamientos radiales relativos entre los lentes en el Barril de la Cámara y la interfase del Barril, debidos a las cargas gravitacionales, tienen que estar dentro de las tolerancias siguientes:

- Desplazamiento en el eje X $< 10 \mu m$
- Desplazamiento en el eje Y $< 10 \mu m$

Estos valores son para el desplazamiento máximo entre lentes, esto incluye la deformación de cada uno de los elementos de la celda del Doblete 3, por lo que el valor de desplazamiento del Compensador Térmico tiene que ser menor a esta especificación.

Tolerancias de posición de los lentes respecto a la interfase del Barril de la Cámara.

Los dobletes D1, D2 y D3 y los singletes S1, S2 y S3 tienen que ser centrados con respecto al CULCS (Camera Unit Local Coordinate System), siguiendo las tolerancias mostradas en la Tabla 6.1.

	inclinación	descentrado	axial
D1	$\pm 0.6 \text{ mrad}$	$\pm 150 \mu m$	N/A
D2	$\pm 0.4 \text{ mrad}$	$\pm 100 \mu m$	$\pm 100 \mu m$
S1	$\pm 0.4 \text{ mrad}$	$\pm 50 \mu m$	$\pm 100 \mu m$
D3	$\pm 0.4 \text{ mrad}$	$\pm 100 \mu m$	$\pm 60 \mu m$
S2	$\pm 0.4 \text{ mrad}$	$\pm 56 \mu m$	$\pm 100 \mu m$
S3	$\pm 0.9 \text{ mrad}$	$\pm 208 \mu m$	$\pm 223 \mu m$

Tabla 6.1. Tolerancias de posición de los lentes respecto a la interfase del Barril de la Cámara.

Como la tolerancia de desplazamiento radial es más crítica, considerando el valor de tolerancia de descentrado para el Doblete 3, la especificación a seguir es que el desplazamiento máximo de la celda D3 sea menor a $10 \mu m$.

Tomando en cuenta estas especificaciones, para el rediseño se plantearon diferentes cambios a la sección del compensador, con los cuales se fue reduciendo considerablemente el volumen.

Para cada una de las geometrías planteadas se hizo un análisis por Método de Elementos Finitos (MEF), véase Anexo C, de desplazamiento, para garantizar que seguíamos dentro de la especificación.

6.1.2 Propuestas de optimización del diseño

Las propuestas de optimización que se desarrollaron para el rediseño del Compensador Térmico del Barril de la Cámara se presentan a continuación junto con su resultado de desplazamiento calculado por MEF.

Las opciones de rediseño se plantearon utilizando tres geometrías básicas, y sobre estas se variaron las dimensiones para lograr el volumen requerido, las geometrías básicas con las cotas que se fueron variando se presentan a continuación en la Figura 6.2.

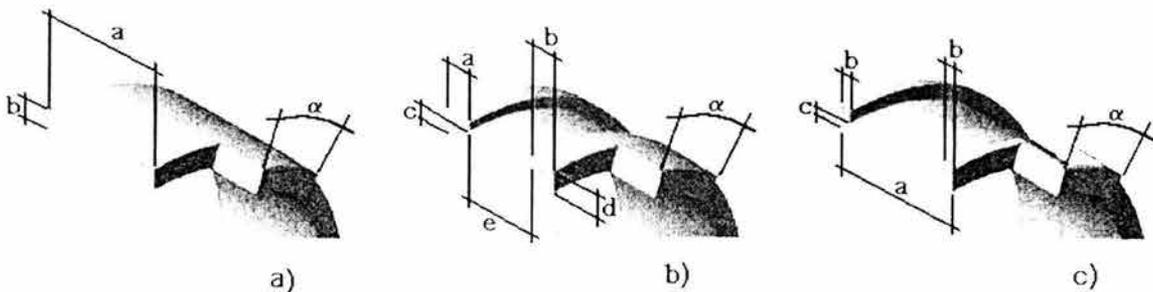


Figura 6.2. Geometrías propuestas para el rediseño.

Para hacer los cálculos de deformación para el compensador térmico fue necesario tomar en cuenta el peso de los componentes que van soportados por éste, para esto se tomó el ensamble del compensador térmico con la celda del Doblete 3, Figura 6.3, y se hizo el análisis considerando 5 gravedades para simular el peso de los componentes del doblete; lentes, soportes radiales, anillos, separadores, etc. El ensamble se hizo desde SolidWorks¹ y de ahí se pasó a ALGOR² para hacer el mallado, definir los materiales de los componentes, fijar las condiciones de frontera y finalmente hacer el cálculo por MEF.

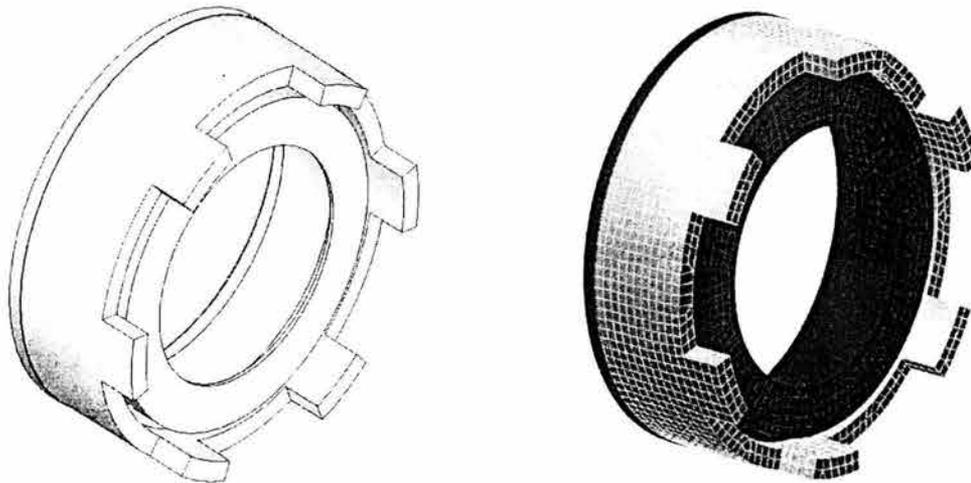


Figura 6.3. Izquierda: ensamble en Solid Works. Derecha: mallado hecho en ALGOR.

Los cálculos de deformación por MEF se hicieron considerando las siguientes propiedades mecánicas del material DuPont Zytel HTNFR51G35L, las propiedades completas se presentan en el Anexo A.

- Módulo de Elasticidad³: 4 *GPa*
- Densidad: 1695 *Kg/m³*
- Módulo de Poisson: 0.32
- CTE : 180 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}^{-1}$

¹ 2003 SolidWorks Corporation. www.solidworks.com

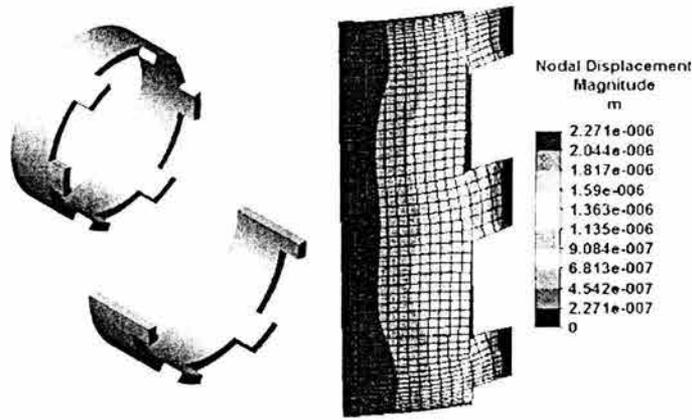
² ALGOR Products, 150 Beta Crive Pittsburg PA USA. www.Algor.com

³ Se consideró este valor ya que es el obtenido en las pruebas mecánicas que se realizaron

6.1.2.1 Resultados obtenidos de las propuestas de optimización

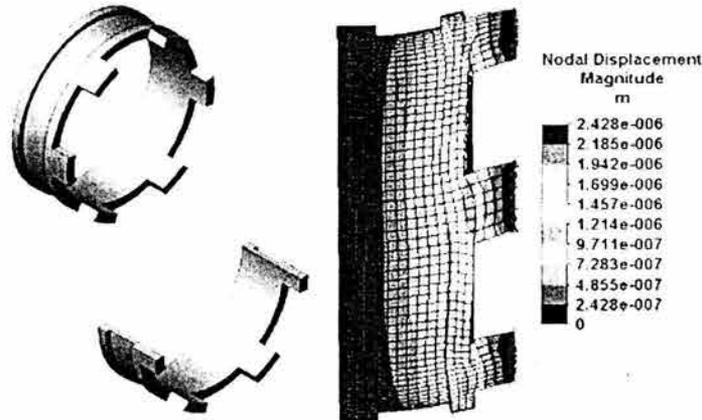
A continuación se presentan los diferentes conceptos generados, cada uno con su análisis de desplazamiento y su volumen máximo.

- *PTC Diseño Cero*, esta es la geometría planteada en el diseño conceptual, sus dimensiones, tomando como referencia la Figura 6.2 inciso a), son: $a=0.05\text{ m}$, $b=0.0095\text{ m}$, $\alpha=20^\circ$.



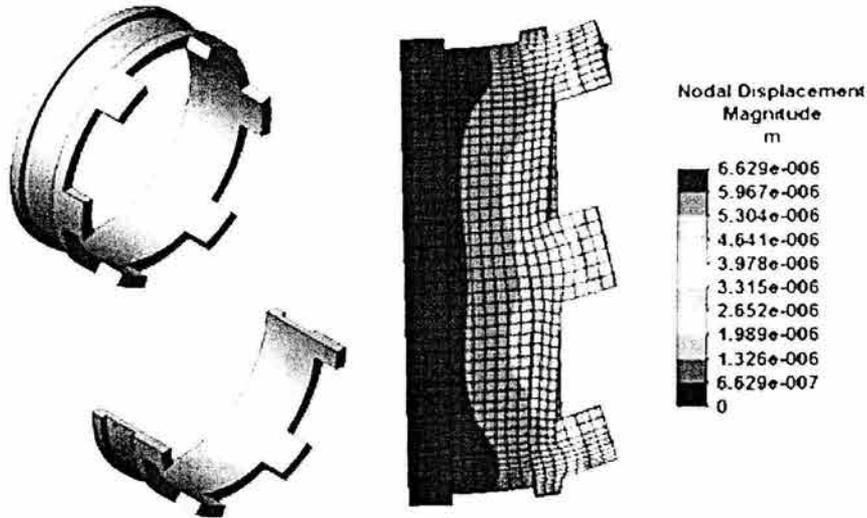
Volumen = 0.00027238 metros cúbicos

- *Concepto 1*, en la primera optimización se decidió reducir el volumen haciendo un canal en el cuerpo del compensador, las dimensiones de esta pieza, tomando como referencia la Figura 6.2 inciso b), son: $a=0.01\text{ m}$, $b=0.01\text{ m}$, $c=0.005\text{ m}$, $d=0.0095\text{ m}$, $e=0.03\text{ m}$, $\alpha=20^\circ$.



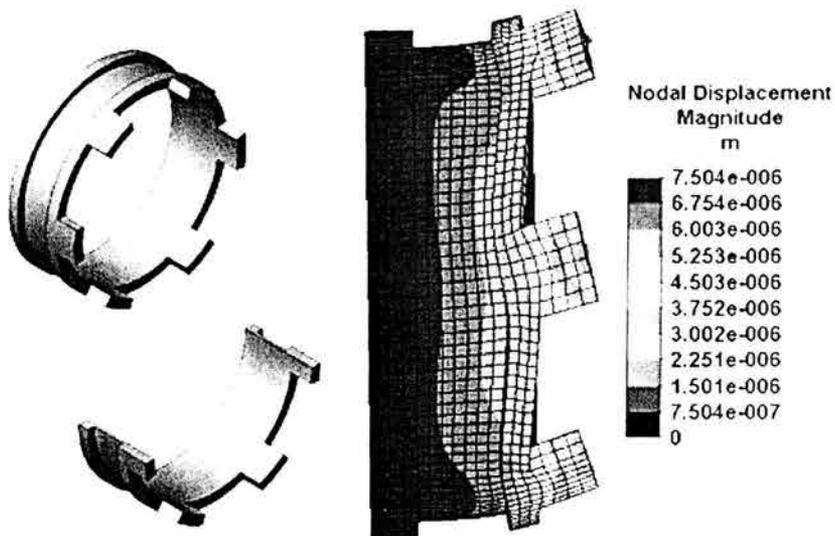
Volumen = 0.00021392 metros cúbicos

- *Concepto 2*, en este caso se redujo el espesor total de la pieza, cambiando únicamente el valor de la cota *d*, el cual pasó de 0.0095 a 0.009 *m*. Las otras dimensiones permanecieron igual que en *Concepto 1*.



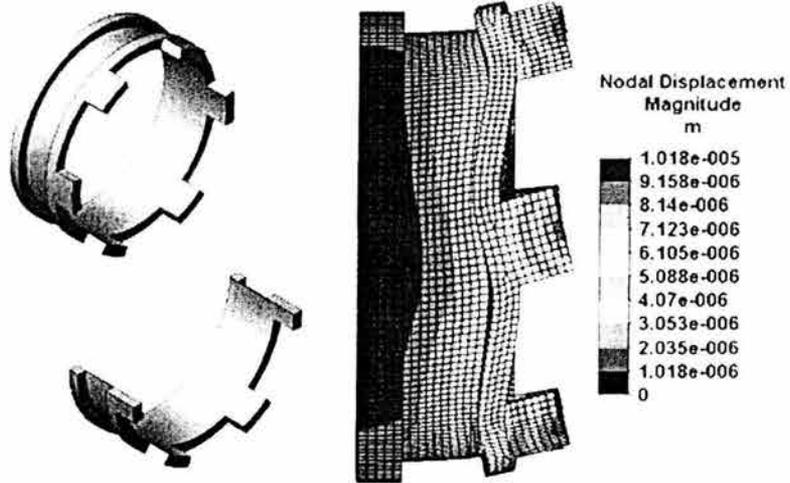
Volumen = 0.00020640 metros cúbicos

- *Concepto 3*, en la siguiente optimización se aumentó la profundidad del canal central, cambiando únicamente el valor de la cota *c*, el cual pasó de 0.005 a 0.003 *m*. Las otras dimensiones permanecieron igual que en *Concepto 2*.



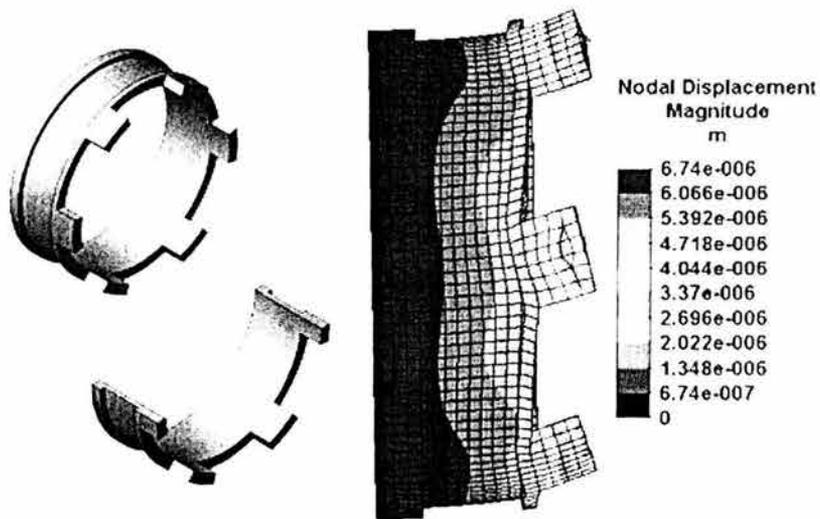
Volumen = 0.00017455 metros cúbicos

- *Concepto 4* para esta optimización se aumentó aún más la profundidad del canal central, cambiando únicamente el valor de la cota c , el nuevo valor fue 0.001 m . Las otras dimensiones permanecieron igual que en *Concepto 2* y *Concepto 3*.



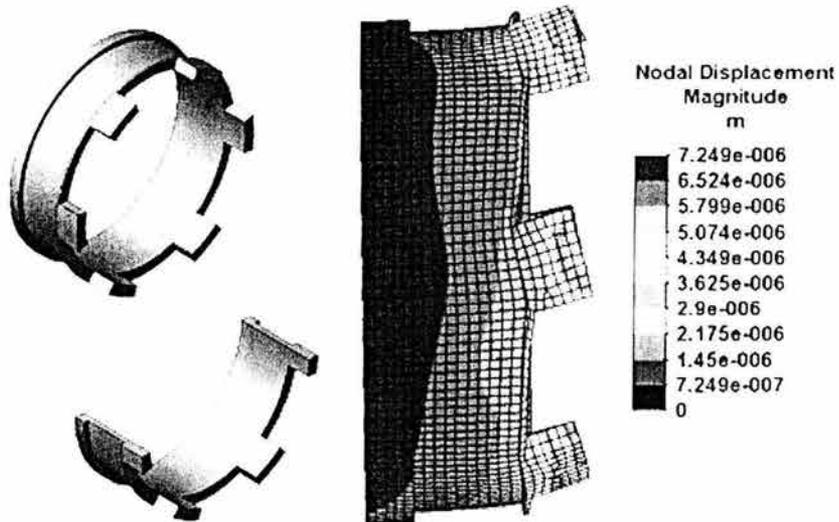
Volumen = 0.00014345 metros cúbicos

- *Concepto 5*, como en la optimización anterior se llegó a un espesor de la pieza demasiado pequeño, 1 mm , el siguiente cambio que se propuso fue agrandar el canal central, manteniendo la profundidad de la primera optimización, las medidas quedaron de la siguiente manera: $a=0.01\text{ m}$, $b=0.005\text{ m}$, $c=0.005\text{ m}$, $d=0.009\text{ m}$, $e=0.035\text{ m}$, $\alpha=20^\circ$.



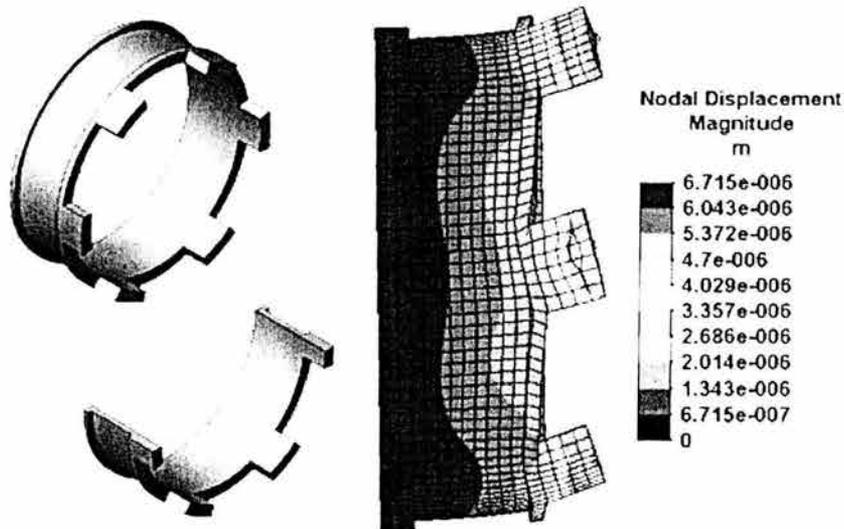
Volumen = 0.00019541 metros cubical

- *Concepto 6*, para esta optimización se aumentó el tamaño del canal, manteniendo la profundidad de éste, al hacer este cambio, con respecto a *Concepto 5* cambiaron la dimensión b , que pasó de 0.005 a 0.002 m , y la dimensión e que pasó de 0.035 a 0.038 m .



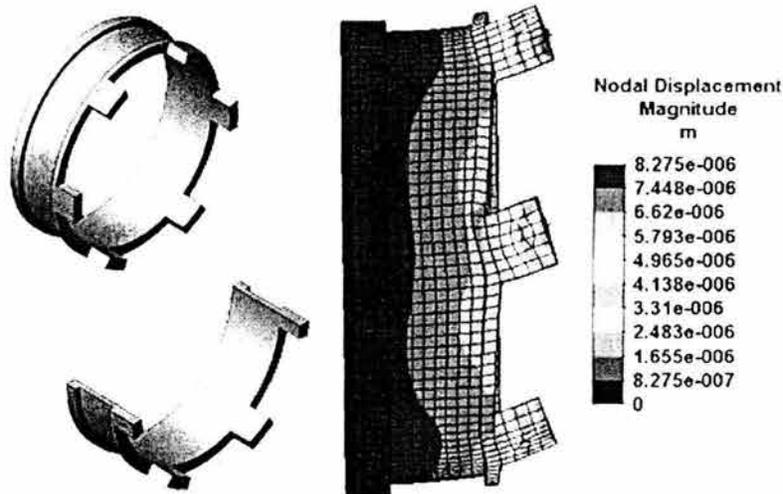
Volumen = 0.00018881 metros cúbicos

- *Concepto 7*, en este caso se considero aumentar el ancho del canal de manera simétrica, las dimensiones de esta optimización quedaron: $a=0.005\ m$, $b=0.005\ m$, $c=0.005\ m$, $d=0.009\ m$, $e=0.04\ m$, $\alpha=20^\circ$.



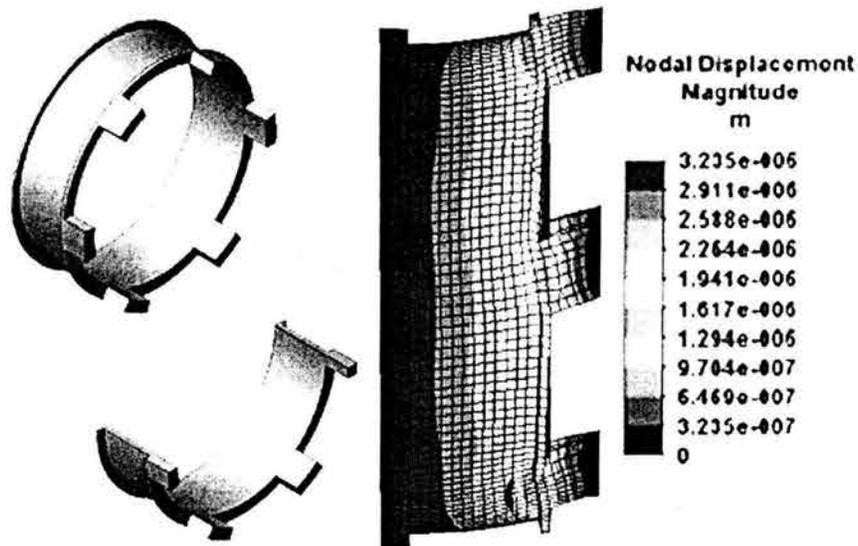
Volumen = 0.00018441 metros cúbicos

- *Concepto 8*, para este caso se planteó reducir el tamaño de los brazos, reduciendo el ángulo de éstos, esta optimización es igual a *Concepto 5* en cuanto al cuerpo, sin embargo la dimensión α de los brazos cambió de 20° a 16° .



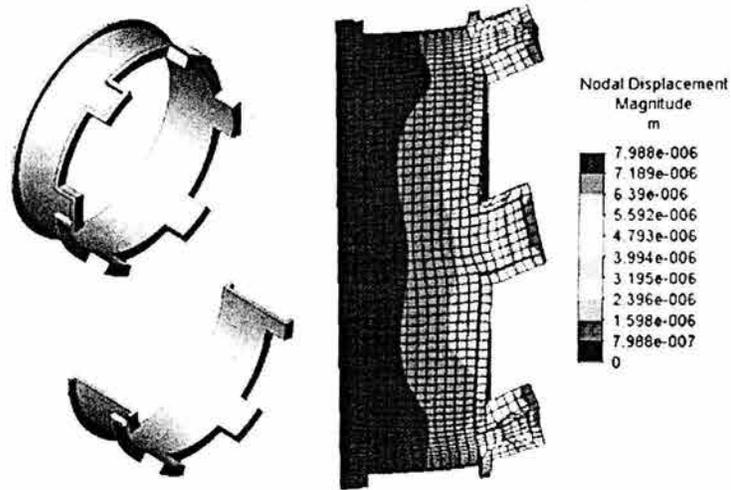
Volumen = 0.00018900 metros cúbicos

- *Concepto 9*, para esta optimización se aumentó el ancho del canal y su profundidad, también se consideraron los brazos más pequeños, quedando sus dimensiones, en referencia a la Figura 6.2 inciso b), de la siguiente forma: $a=0.003\text{ m}$, $b=0.003\text{ m}$, $c=0.004\text{ m}$, $d=0.009\text{ m}$, $e=0.044\text{ m}$, $\alpha=16^\circ$.



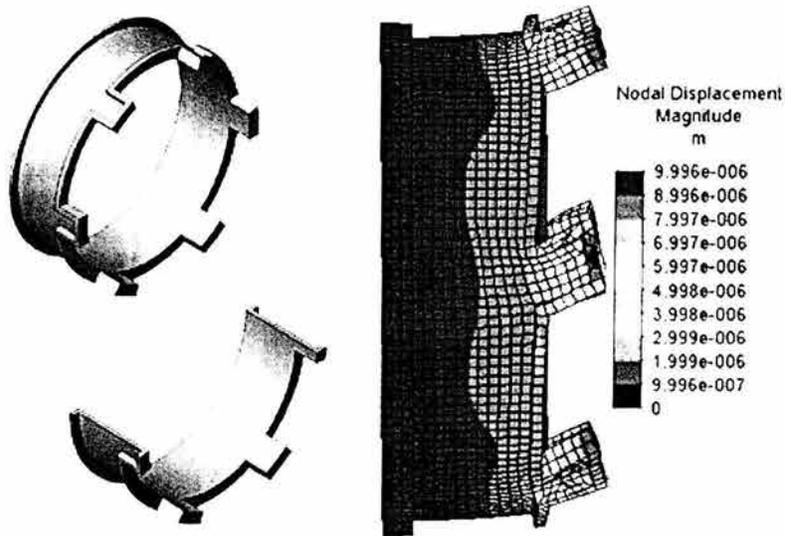
Volumen = 0.00014571 metros cúbicos

- *Concepto 10*, en los casos siguientes se plantea otra solución, la cual consiste en hacer un vaciado de toda la pieza, incluidos los brazos, las dimensiones de esta opción son: $a=0.05\text{ m}$, $b=0.004\text{ m}$, $c=0.004\text{ m}$, $\alpha=20^\circ$, basándonos en la Figura 6.2 inciso c).



Volumen = 0.00014416 metros cúbicos

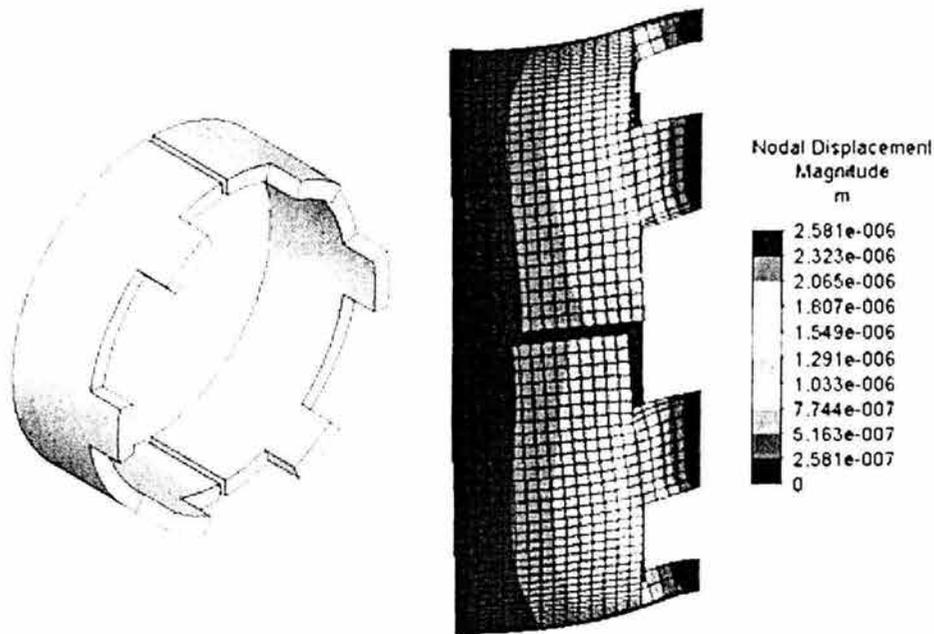
- *Concepto 11*, para esta opción el único cambio que se realizó fue reducir el tamaño de los brazos, el valor de α pasó de 20° a 16° , las otras dimensiones permanecieron igual que en *Concepto 10*.



Volumen = 0.00014140 metros cúbicos

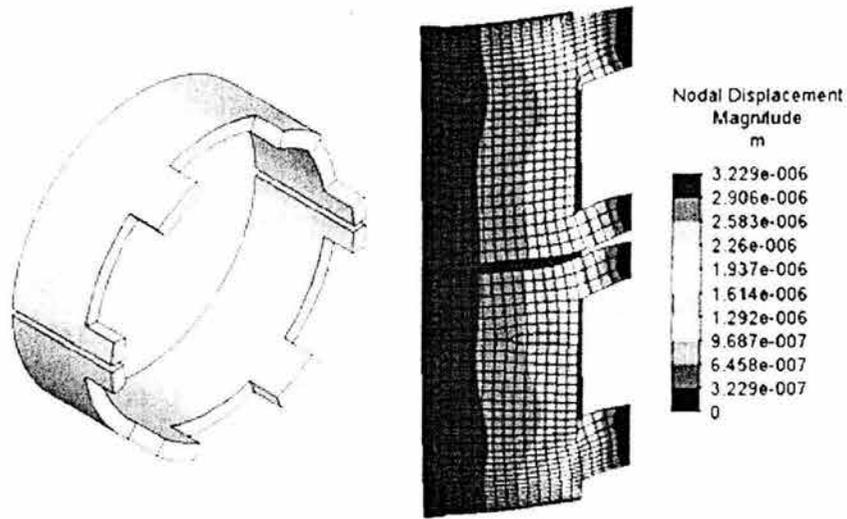
Después de analizar todas estas propuestas de rediseño que se desarrollaron, nos dimos cuenta que era muy complicado llegar al volumen planteado manteniendo el compensador como una sola pieza, ya que se llegó a tener espesores de la pieza muy pequeños, aproximadamente de 1mm , y no se logró reducir el volumen hasta el valor necesario. Por lo que se decidió continuar el rediseño pensando en dos piezas iguales.

- *Concepto 12*, este fue el primer planteamiento que se realizó pensando en dos piezas. La primera opción fue considerando la mitad de la pieza original planteada en el diseño conceptual, haciendo el corte en la zona entre los brazos.



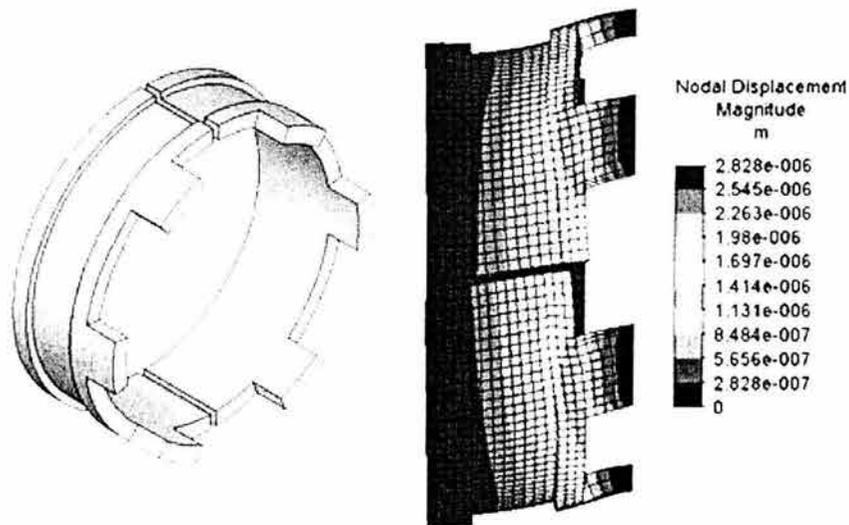
Volumen = 0.00013484 metros cúbicos (cada pieza)

- *Concepto 13*, para este caso el corte se hizo en los brazos, manteniendo la configuración del diseño conceptual.



Volumen = 0.00013439 metros cúbicos (cada pieza)

- *Concepto 14*, después de analizar las dos opciones anteriores, *Concepto 12* y *Concepto 13* se concluyó que lo mejor era hacer el corte entre los brazos, sin embargo en estos dos casos el volumen seguía siendo alto, por lo que se planteó hacer dos piezas considerando la geometría planteada para *Concepto 1*, haciendo el corte entre los brazos.



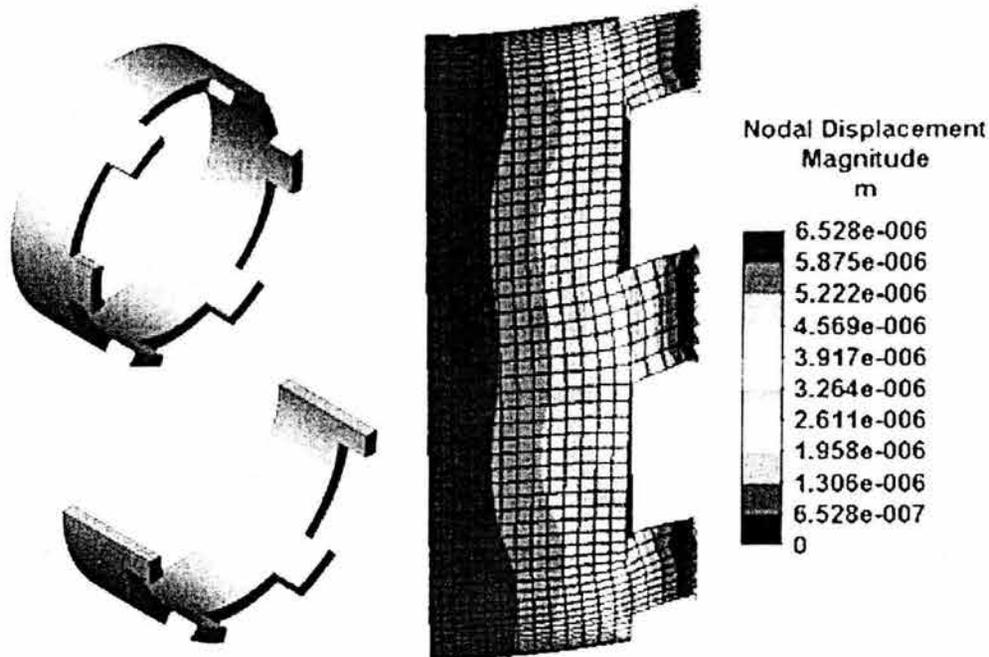
Volumen = 0.00010188 metros cúbicos (cada pieza)

Finalmente se consideró también el NyLamid Extruded como un material emergente, el cual se podría utilizar en caso de que el Zytel no funcionara adecuadamente. Este material se consigue comercialmente en tubo extruido, por lo que se podría fabricar en una sola pieza.

Las propiedades mecánicas que se consideraron para el análisis de este material son las siguientes⁴:

- Módulo de Elasticidad: 1.3 *GPa*
- Densidad: 1330 *Kg/m³*
- Módulo de Poisson: 0.32
- CTE : 180 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}^{-1}$

PTC Nylamid Extruded



Volumen = 0.00027238 metros cúbicos

⁴ Proporcionadas por el fabricante

6.1.2.2 Análisis de los resultados obtenidos de la optimización

Los resultados obtenidos, condensados en la Tabla 6.2, sirven para tener un parámetro de comparación entre las propuestas de optimización que se plantearon y para tener una aproximación del valor real de deformación, el peso simulado es mayor al peso real de los componentes contenidos en la celda, por lo que la aproximación tiene un margen de error.

	Volumen [cm ³]	Desplazamiento [μm]	Nodos fijos
<i>PTC Diseño Cero</i>	272.38	2.271	cara
<i>Concepto 1</i>	213.92	2.428	cara
<i>Concepto 2</i>	206.40	6.629	un nodo
<i>Concepto 3</i>	174.55	7.504	un nodo
<i>Concepto 4</i>	143.45	10.180	un nodo
<i>Concepto 5</i>	195.41	6.740	un nodo
<i>Concepto 6</i>	188.81	7.249	un nodo
<i>Concepto 7</i>	184.41	6.715	un nodo
<i>Concepto 8</i>	189.00	8.275	un nodo
<i>Concepto 9</i>	145.71	3.235	cara
<i>Concepto 10</i>	144.16	7.988	un nodo
<i>Concepto 11</i>	141.40	9.996	un nodo
<i>Concepto 12</i>	134.84	2.581	cara
<i>Concepto 13</i>	134.39	3.229	cara
<i>Concepto 14</i>	101.88	2.828	cara
<i>PTC Nylamid</i>	272.38	6.528	cara

Tabla 6.2. Resultados del proceso de optimización del Compensador Térmico

Considerando estos resultados se decidió que la mejor opción para el Compensador Térmico es la *Concepto 14*, ya que ésta es la de menor volumen, aproximadamente 102 cm³, y tiene un desplazamiento máximo de 2.83 μm. Esta opción es la que mejor cumple con la combinación de restricciones que se tenían al iniciar las propuestas de optimización, un volumen menor a 143 cm³ y una deformación máxima menor a diez micras.

6.1.2.3 Verificación de la opción seleccionada

Para verificar que la optimización elegida es la adecuada se hizo un nuevo análisis por MEF para los casos más críticos, estos son cuando el vector gravedad actúa colineal al eje óptico (eje x) o perpendicular a éste (ejes y y z).

	Desplazamiento máximo [μm]	
Eje x	0.516	colineal al eje óptico
Eje y	2.427	Perpendiculares al eje óptico
Eje z	2.828	

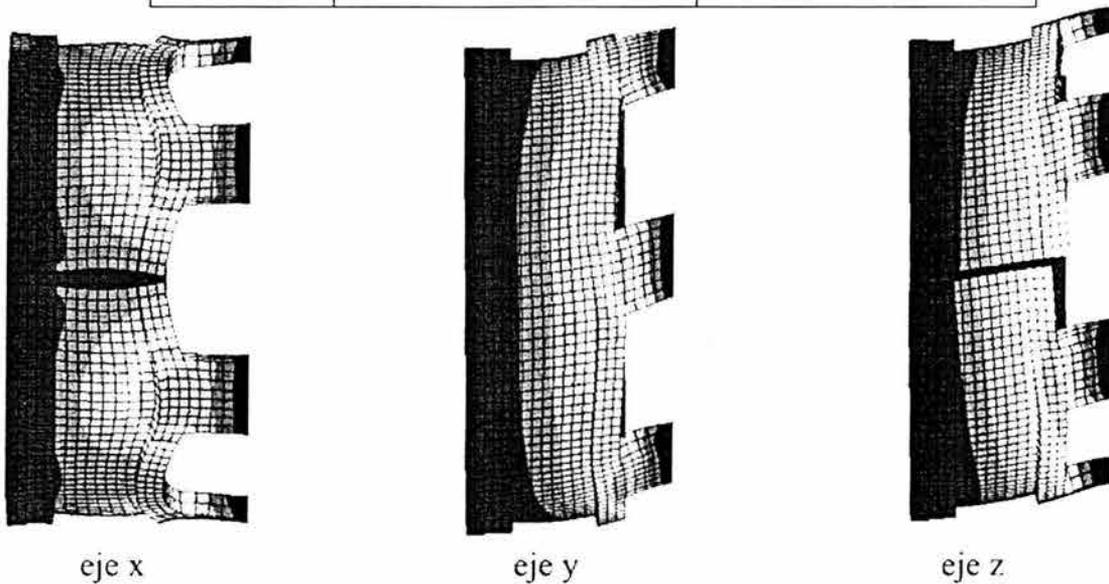


Figura 6.4. Resultados del análisis por MEF de los casos críticos de desplazamiento para la optimización elegida.

También se analizó la expansión térmica cuando existe un gradiente térmico de $36^{\circ}C$, tanto analíticamente como por MEF.

Partiendo de la Ecuación 5.1, el resultado analítico se presenta a continuación:

$$\Delta l = \alpha l \Delta T = (180 \times 10^{-6}) (0.07) (36) \quad (6.1)$$

$$\Delta l = 453.6 \times 10^{-6} \quad (6.2)$$

El resultado obtenido por MEF se presenta en la Figura 6.5

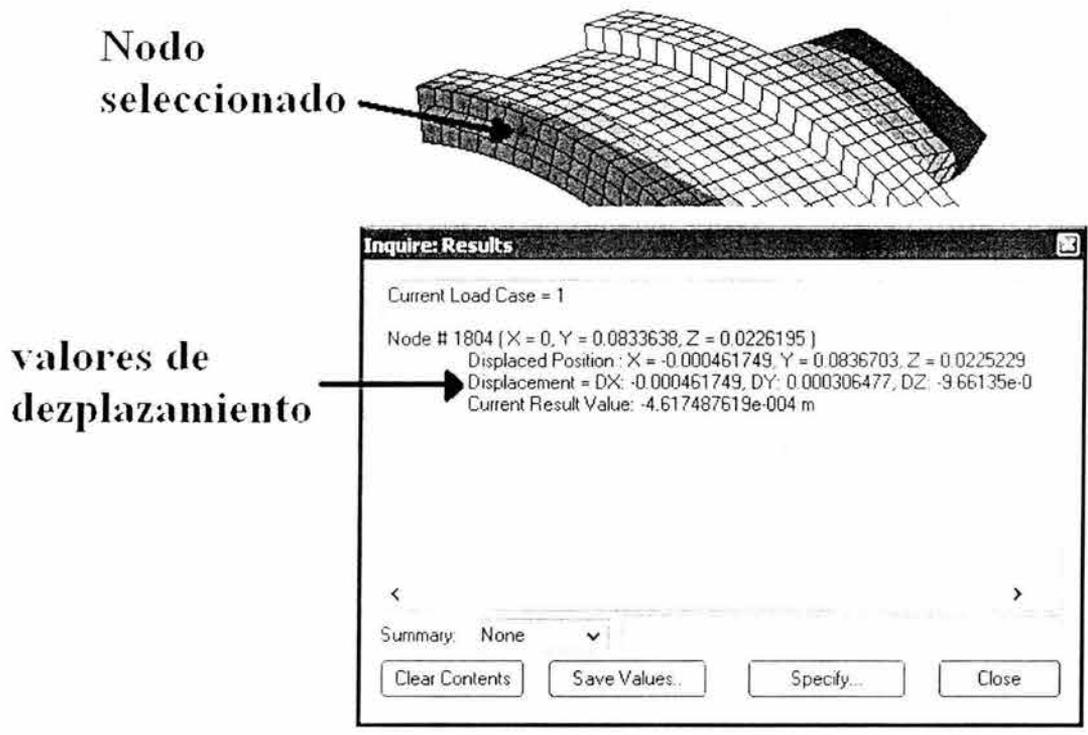


Figura 6.5. Resultado del análisis de expansión térmica por MEF para un nodo ubicado en la superficie donde se sujetará la celda del Doblete D3.

Haciendo una comparación entre el resultado obtenido analíticamente y el obtenido por MEF se puede calcular el porcentaje de error entre ambos.

Resultado analítico	Resultado numérico (MEF)
$453.6 \times 10^{-6} \text{ m}$	$461.75 \times 10^{-6} \text{ m}$

$$\%diferencia = \frac{(461.75 \times 10^{-6}) - (453.6 \times 10^{-6})}{453.6 \times 10^{-6}} \times 100 = 1.80\% \quad (6.3)$$

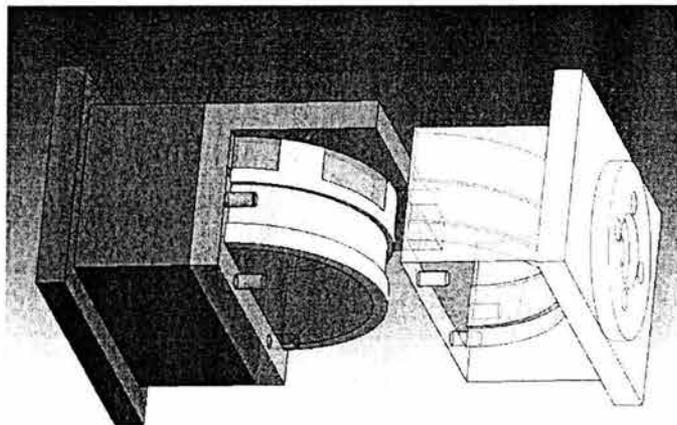
6.2 DISEÑO DEL MOLDE PARA LA INYECCIÓN

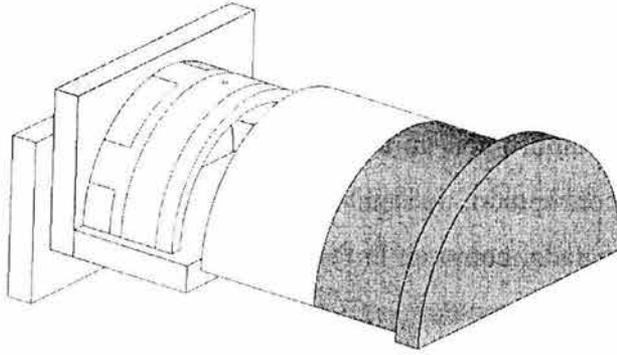
Con el diseño del Compensador Térmico terminado, lo siguiente es diseñar el molde para hacer la inyección, la geometría que resultó del rediseño presenta mayores dificultades para su fabricación. Para esta pieza, medio cilindro con un canal en el cuerpo central, el diseño del molde se complica, tanto en su concepción, pensando en como se puede sacar la pieza o desacoplar el molde una vez inyectada, como en la forma que se tendrían que hacer los maquinados de cada una de las partes del molde.

Se han considerado diferentes opciones las cuales se han desechado debido a su complejidad para sacar la pieza inyectada, a la complejidad para manufacturar las piezas del molde y en algunos casos debido a la imposibilidad de fabricarlas. También se plantearon diversas geometrías para los canales de distribución de la inyección.

El diseño del molde se está haciendo actualmente con la colaboración de la M.I. Magdalena Trujillo Barragán. A continuación se presentan dos diferentes opciones que se han propuesto para el molde.

Primera opción: En esta opción se buscó una configuración de dos piezas, para que la apertura del molde se realice tan solo con el movimiento de apertura de la máquina inyectora y no se requiera un desensamble adicional. La posición de la boquilla de inyección fue al centro de la pieza y en su parte de mayor espesor. No se utilizaron canales de distribución.





Segunda opción: para esta se cambió de manera drástica la configuración. La salida de la pieza después de ser inyectada resulta ser un problema grave en las demás versiones por lo que se resolvió. Se mantiene una configuración de dos piezas principales, pero se agrega un corazón removible de manera manual.

Estas dos opciones se encuentran en una etapa de diseño conceptual, y se están estudiando otras alternativas. Todavía falta generar más alternativas, lo cual resulta muy complicado debido a la geometría de la pieza, hacer una selección de la mejor alternativa y llevar a cabo el proceso de diseño de detalle de ésta.

CONCLUSIONES GENERALES

Para el desarrollo del Compensador Térmico se requerían materiales que cubrieran la combinación de restricciones y especificaciones que se plantearon, como el coeficiente de expansión térmica aproximado de $150 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$, y una alta resistencia mecánica expresada en términos del Módulo de Young. Existen escasos materiales, muy especializados y con poca información sobre ellos aún entre quien los comercializa, casi todos son de importación y sobre pedido. Después de analizar diversos materiales se seleccionó el Zytel HTNFR51G35L del fabricante DuPont porque de todos los que cumplen con la especificación del CTE es el que tiene la más alta resistencia mecánica. Este material es la primera vez que se importa a México proveniente de Japón.

Se realizaron las pruebas mecánicas necesarias, las de expansión térmica lineal resultaron muy satisfactorias ya que se obtuvo un valor muy cercano al esperado, en el ensayo de tracción se presentaron problemas al momento de verificar las propiedades del material ya que los resultados del Módulo de Young fueron menores a los que el fabricante ofrece en su producto, la diferencia en el resultado del ensayo de tracción se debió a deficiencias en el molde utilizado durante el proceso de inyección de las probetas, donde no fue posible que todas las variables del proceso llegaran a su óptima parametrización debido al propio diseño del molde. No obstante los resultados de las pruebas mecánicas, se decidió continuar trabajando con este material porque los valores obtenidos son superiores a los que ofrecen los otros materiales analizados que existen comercialmente.

Se analizó la posibilidad de trabajar con un material emergente, el Nylamid Extruded, en caso de que el Zytel no funcione adecuadamente, ya que este material se comercializa en tubo o barra extruída lo que facilita la fabricación de la pieza requerida. A diferencia del Zytel que viene en una presentación en pellets. El tipo de presentación del Zytel requiere un mayor control en las variables del proceso de inyección, para que sus propiedades sean óptimas.

Fue necesario hacer una optimización en el diseño de la pieza, ya que el diseño conceptual que se tenía excedía la capacidad de la máquina de inyección que se va a utilizar. A partir de esta optimización se planteó una nueva geometría de la pieza que cumple perfectamente con las especificaciones tanto de posicionamiento como de resistencia.

Esta tesis concluye en esta etapa pero se continúa trabajando en el proyecto. Actualmente se está trabajado en el diseño mecánico del molde de inyección. Una vez que se tengan las piezas inyectadas se harán pruebas en laboratorios de metrología para comprobar el funcionamiento adecuado del Compensador Térmico, y finalmente se ensamblará con el resto de la Cámara y el Instrumento OSIRIS. Para quedar instalados en el GTC, en el Observatorio de Roque de los Muchachos en la isla de La Palma, en Canarias, España y pueda entrar en operación por primera vez en el año 2005 junto con todo el telescopio.

REFERENCIAS

1. Astronomía Autodidacta, Astronomía colombiana. *Historia de la Astronomía*
http://almaak.tripod.com/temas/historia_astronomia.htm
2. Astronomía Autodidacta, Astronomía colombiana. *Historia de la Astronomía II*
http://almaak.tripod.com/temas/historia_astronomia2.htm
3. Astronomíaonline, recursos astronómicos en internet. *Historia del telescopio*
<http://www.astronomiaonline.com.ar/informacion/telescopio/>
4. Sociedad Astronómica de la Facultad de Ingeniería
<http://www.fi-b.unam.mx/safir/sn/>
5. *Proyecto GTC. Gran Telescopio de Canarias*
<http://www.gtc.iac.es/>
6. *GTC Digital. Página de divulgación del proyecto GTC*
<http://www.gtcdigital.net/gtc.htm>
7. *Página principal del instrumento OSIRIS*
<http://www.iac.es/proyect/OSIRIS/>
8. FARAH A. *Diseño optomecánico preliminar del Barril para la Cámara de OSIRIS*. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería 2004
9. GONZALEZ J., TEJADA C., FARAH A., RASILLA J.L., FUENTES J.. *Thermal effects and thermal compensation in the OSIRIS camera*. Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes. Edited by Iye, Masanori; Moorwood, Alan F. M. Proceedings of the SPIE, Volume 4841, pp. 1480-1486 (2003).
10. DUPONT ENGINEERING POLYMERS, *Zytel HTN, High performance polyamide resin, Product guide and Properties*.
<http://www.plastics.dupont.com/plastics/pdflit/europe/zytel/L12444.pdf>
11. POPOV, E.P., *Mecánica de Sólidos*, 2ª Ed., Pearson Educación, México 2000
12. Escuela de Ingeniería de Antioquia. *Ensayo de Tracción*
http://materiales.eia.edu.co/laboratorios/traccion/ensayo_de_traccion1.htm

13. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
Annual book of astm standards 2000, section eight volume 08.01.
<http://www.astm.org/>
14. DUPONT ENGINEERING POLYMERS, *Zytel HTN, High temperature nylon resin, Moulding Guide*
15. *Camera Unit Specification*
code: DM/SR-OSI/143v.3.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

1. FARAH A., CANTÓ J.J., PALENCIA J.A., RIVERA H.. *Diseño optomecánico del Barril de la Cámara de OSIRIS*, SOMI Congreso de Instrumentación XVIII, Ciudad Universitaria, México D.F., Octubre 2003.
2. CHANDRUPATLA, T.R., BELEGUNDU, A.D., *Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería*, 2ª Ed., Prentice Hall Hispanoamericana, México 1999.
3. ZIENKIEWICZ, O.C., TAYLOR R.L., *El método de los elementos finitos* Volumen 1, 4ª Ed., Mc-Graw Hill, Barcelona España 1994.
4. GUERREO M. VALDERRABÁNO S. Y OTROS. *Aplicación del método de elemento finito al análisis nodal*. Ingenierías, enero-abril 1999, Vol II, No. 3, UANL
http://www.uanl.mx/publicaciones/ingenierias/3/pdf/3_Martha_Guerrero_et_al_Aplicacion_metodo.pdf
5. HALLIDAY, D., RESNICK, R., *Fundamentos de Física, versión ampliada*. 2ª Ed., Compañía Editorial Continental, México 1994.
6. HIBBELER, R.C. *Mecánica de Materiales*. 3ª Ed., Prentice Hall, México 1998.
7. POPOV, E.P. *Mecánica de Materiales*, Limusa, México 1995
8. SERWAY, R.A., *Física*, Tomo I, 2ª Ed., Mc Graw Hill, México 1995
9. VAN VLACK, L.H. *Materiales para Ingeniería*, Compañía Editorial Continental, México 1994
10. Mat Web. The online Materials Information Resource
<http://matweb.com/>
11. ISO. International Organization for Standardization
<http://www.iso.ch/iso/en/ISOOnline/>
12. Moldex 3D Website
<http://www.moldex3d.com/>
13. Eportal DuPont
<http://www.plastics.dupont.com/plastics/>

ANEXO A

PROPIEDADES DEL ZYTEL HTNFR51G35L¹

DuPont Zytel® HTNFR51G35L NC010 Nylon Copolymer, 45% Glass Reinforced, Dry As Molded

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	<u>1.65 g/cc</u>	0.0596 lb/in ³	ASTM D792
Water Absorption	<u>0.25 %</u>	0.25 %	24 hr. ASTM D570
Linear Mold Shrinkage	<u>0.002 cm/cm</u>	0.002 in/in	Flow Direction
Linear Mold Shrinkage, Transverse	<u>0.007 cm/cm</u>	0.007 in/in	
Linear Mold Shrinkage, Transverse	<u>0.007 cm/cm</u>	0.007 in/in	3.2 mm: ASTM D955

Mechanical Properties

Hardness, Rockwell M	108	108	ASTM D785
Hardness, Rockwell R	124	124	ASTM D785
Tensile Strength, Ultimate	<u>165 MPa</u>	23900 psi	ASTM D638
Elongation at Break	1.3 %	1.3 %	ASTM D638
Tensile Modulus	<u>13.1 GPa</u>	1900 ksi	ASTM D638
Flexural Modulus	<u>12.4 GPa</u>	1800 ksi	ASTM D790
Flexural Yield Strength	<u>228 MPa</u>	33100 psi	ASTM D790
Compressive Yield Strength	<u>293 MPa</u>	42500 psi	ASTM D695
Shear Strength	<u>64 MPa</u>	9280 psi	ASTM D732
Izod Impact, Notched	<u>0.85 J/cm</u>	1.59 ft-lb/in	ASTM D256
Izod Impact, Unnotched	<u>5.4 J/cm</u>	10.1 ft-lb/in	ASTM D256
Compressive Modulus	<u>3.58 GPa</u>	519 ksi	ASTM D695
Taber Abrasion, mg/1000 Cycles	57	57	CS-17 Wheel

¹ Tomado de Mat Web. The online Materials Information Resource. <http://matweb.com/> y de Zytel HTN Product Guide and Properties

Electrical Properties

Electrical Resistivity	<u>1e+016 ohm-cm</u>	1e+016 ohm-cm	ASTM D257
Surface Resistance	<u>1e+013 ohm</u>	1e+013 ohm	ASTM D257
Dielectric Constant	4	4	at 1 MHz; ASTM D150.
Dielectric Constant, Low Frequency	4.3	4.3	at 1 kHz; ASTM D150
Dielectric Strength	<u>24.5 kV/mm</u>	622 kV/in	1.6 mm (63 mils); ASTM D149
Dissipation Factor	0.01	0.01	at 1 MHz; ASTM D150
Dissipation Factor, Low Frequency	0.01	0.01	at 1 kHz; ASTM D150
Arc Resistance	<u>80 sec</u>	80 sec	
Comparative Tracking Index	375 V	375 V	

Thermal Properties

CTE, linear 20°C	<u>180 µm/m-°C</u>	100 µin/in-°F	Flow Direction.
CTE, linear 20°C Transverse to Flow	<u>50 µm/m-°C</u>	27.8 µin/in-°F	
CTE, linear 100°C	<u>180 µm/m-°C</u>	100 µin/in-°F	Flow Direction
CTE, linear 100°C	<u>60 µm/m-°C</u>	33.3 µin/in-°F	Cross-Flow
Melting Point	<u>300 °C</u>	572 °F	ASTM D3418
Maximum Service Temperature, Air	<u>260 °C</u>	500 °F	Deflection temperature at 1.8 MPa
Deflection Temperature at 1.8 MPa	<u>260 °C</u>	500 °F	ASTM D648
Glass Temperature	<u>125 °C</u>	257 °F	DMA Method
Flammability, UL94	V-0	V-0	V-0 0.81 mm; UL94
Oxygen Index	44 %	44 %	ASTM D2863

ANEXO B

ESPECIFICACIONES Y REQUERIMIENTOS PARA EL BARRIL DE LA CÁMARA DE OSIRIS

Se presentan las especificaciones y requerimientos del barril para la cámara de OSIRIS¹ que son relevantes en el desarrollo de este trabajo. Se presentan en su formato original con el cual fueron solicitadas.

List of acronyms and abbreviations

CB	Camera Barrel
CL	Cryostat Lens
CoG	Centre of Gravity
CU	Camera Unit
CULCS	Camera Unit Local Coordinate System
DU	Detector Unit
GTC	Gran Telescopio Canarias
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
IAC	Instituto de Astrofísica de Canarias
MPMNT	Mean Preventive Maintenance Night Time
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair
NA	Not Applicable
OA	Optical Aperture
OPT	OSIRIS Project Team
OSIRIS	Optical System for Imaging and low/intermediate Resolution Integrated Spectroscopy
4ORM	Roque de Los Muchachos Observatory (at La Palma)
OSS	OSIRIS Support Structure
PDR	Preliminary Design Review
ROC	Radius of Curvature
RT	Temperature of Reference (8.5 °C)
TBC	To Be Confirmed
TBD	To Be Defined

5. REQUIREMENTS

All the requirements in the following section shall have the following code: SP/IN-OS-CA/NNN, where NNN is the index that appears immediately before the requirement title

¹ Tomado de Camera Unit Specification code: DM/SR-OSI/143v.3.

5.1 General Requirements

5.1.1 Local Coordinate Systems

The Camera Unit Local Coordinate System (CULCS) is named (X_{ca}, Y_{ca}, Z_{ca})
The origin is in the intersection between the plane of the CB axial reference and the axis of the BC radial reference (according A.2)
 X_{ca} and Y_{ca} are in the plane of the CB axial reference (according A.2)
 Z_{ca} is perpendicular to the CB axial reference (according A.2)

Source: OSIRIS System Group

5.4 Mechanical Performance Requirements

5.4.1 Radial displacements

The relative radial displacements between each lens on the Camera Barrel and the Barrel Interface, due to gravitational loads, shall be within the following tolerances:
 X_{ca} displacements $< 2 \mu\text{m}$
 Y_{ca} displacements $< 2 \mu\text{m}$

Source: Error Budget of image movement in spectroscopic mode

Justification: Camera barrel has been assumed fully rigid in the present FEA model. The specified values are the radial displacements of individual lenses inside the barrel that contribute to the image movement with the value assigned in the error budget of image movement. It is assumed that all the lenses have the same displacements, and the contributions of individual lenses to the image movement are rms added

5.4.2 Athermalization

The camera shall be passively athermalized to maintain the contribution of plate scale variations inside the value allowed in the image movement error budget.

Athermalization is obtained mounting a large CTE spacer between D3 and S2 to increase this distance at a rate of $13 \pm 1 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$

Plate scale and focus are insensitive to barrel materials having $\text{CTE} \leq 25 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

The lenses shall not move radially nor tilt due to thermal effects. The errors introduced on radial positions by temperature changes shall be considered as an additional source of error on the positional tolerances, which shall be limited as per 5.6

Parent requirement: RQ/IN-OS/5.1.8.15

Source: Error Budget of image movement in spectroscopic mode

Justification: The variation of the distance between lenses has no effect on image quality (it is perfectly compensated using the focus mechanism), but has an important impact on image movement due to plate scale variations

5.4.3 Lens stresses

Compressive or tensile stress in lenses and couplant interfaces (in doublets) shall not exceed 3.4 Mpa to avoid birefringence

Source: OSIRIS Mechanical Group

Justification: "Mounting lenses in Optical Instruments", P.R. Yoder, SPIE ed. p. 75 (1995)

5.5 Physical Requirements

5.5.1 Lenses nominal geometry

The nominal geometry of the camera lenses shall be as defined in Annex #1 (L1 and L2 refers to the first and second lens in a doublet). The positions of each lens reference vertex are included in the drawings

Source: OSIRIS Optical Group

5.5.2 Lenses optical aperture

The optical aperture of camera lenses are:

	OA
D1 (L1)	130 mm
D1 (L2)	130 mm
D2 (L1)	134 mm
D2 (L2)	134 mm
S1	130 mm
D3 (L1)	119 mm
D3 (L2)	109 mm
S2	91 mm
S3	87 mm

L1 and L2 have the same meaning than in 5.5.1

Source: OSIRIS Optical Group

5.5.3 Lenses nominal position

The coordinates of the reference vertex of each nominal lens are:

	X_{ca}	Y_{ca}	Z_{ca}
D1 (L1)	0.0	0.0	172.64 mm
D1 (L2)	0.0	0.0	128.56 mm
D2 (L1)	0.0	0.0	110.86 mm
D2 (L2)	0.0	0.0	68.28 mm
S1	0.0	0.0	11.78 mm
D3 (L1)	0.0	0.0	-15.22 mm
D3 (L2)	0.0	0.0	-23.2 mm
S2	0.0	0.0	-85.90 mm
S3	0.0	0.0	-108.40 mm

Source: OSIRIS Optical Group

ANEXO C

EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Los métodos numéricos son técnicas mediante las cuales es posible resolver, aproximadamente, complejos problemas matemáticos de integración, diferenciación, resolver sistemas de ecuaciones y encontrar raíces de ecuaciones, por medio del simple uso de operaciones aritméticas. Ya que casi todos los procesos físicos se pueden representar matemáticamente mediante una ecuación o algún conjunto de ecuaciones, es por lo tanto posible resolver problemas complicados con técnicas numéricas.

Dentro de los métodos numéricos existe una gran variedad de estos, dependiendo de la aplicación que tiene el método y del concepto del que se parte para hacer la simplificación, es decir, cambiar el problema complejo por una serie de operaciones aritméticas.

El método de los elementos finitos es un método numérico, que surgió como tal en la década de los 60's, desde entonces a la fecha ha pasado de ser una herramienta novedosa a necesaria tanto a nivel académico como industrial. Se le ha aplicado casi en todos los campos con éxito, alcanzando sus mayores aplicaciones en el campo de la ingeniería. El éxito del método también se debe al surgimiento de computadoras más rápidas y con mayor capacidad de almacenamiento y manejo de datos, aunado al desarrollo de programas especializados¹.

El concepto básico de este método es el de dividir el continuo en un número finito de elementos (de allí su nombre), es decir discretizar el continuo y resolver sobre cada uno de los elementos las ecuaciones del sistema para después ensamblar la solución total.

¹ CHANDRUPATLA, T.R., BELEGUNDU, A.D., *Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería*.

El método fue propuesto primero en 1943, pero no fue hasta 1956 que se presentaron los primeros resultados obtenidos con este método y en 1960 se le llamó al método como se le conoce ahora.

Para construir un modelo numérico se define un número finito de puntos, los cuales podrán estar unidos después por líneas para formar superficies y sólidos y de esta manera la superficie a estudiar. Estos puntos son llamados nodos, estos se encuentran en la frontera de los elementos que se generaron por la discretización del continuo, además son los responsables de mantener la continuidad al mantener unidos a los elementos. El sistema es ahora un conjunto de elementos unidos mediante nodos.

Ahora bien, las ecuaciones aritméticas que reemplazan a las ecuaciones diferenciales que gobiernan al sistema objeto de estudio, se conocen como ecuaciones de forma. Para llegar a ellas se utilizan diversas metodologías matemáticas, las más comunes son: aproximación directa, método variacional, método de residuos ponderados, series de Taylor y balance de energía².

Para obtener la solución de un problema mediante el método de elementos finitos se siguen los siguientes pasos genéricos: generación de la geometría, discretización del sistema, selección del tipo de elemento, asignación de propiedades del material o materiales, definición de cargas y condiciones de frontera y solución del conjunto de ecuaciones.

En general el método presenta ventajas sobre los métodos tradicionales, ya que es posible modelar situaciones muy complejas que experimentalmente sería muy costoso y/o tardado llevar a cabo, además se pueden estudiar un número infinito de posibilidades, que sería imposible estudiar en planta o experimentalmente. También presenta ventajas sobre el método analítico (teórico), porque en ocasiones el proceso a simular es tan complejo, que se imposibilita encontrar una solución exacta, mientras que con el método de elementos finitos es posible encontrar una variedad de soluciones aproximadas.

² ZIENKIEWICZ, O.C., TAYLOR R.L., *El método de los elementos finitos*

Las futuras aplicaciones de este método dependerán en gran parte de las necesidades de nuestra sociedad y de profesionistas debidamente capacitados para desarrollar este tipo de trabajos.

ANEXO D

REPORTES DE LOS ENSAYOS DE

TRACCIÓN REALIZADOS

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
 FACULTAD DE INGENIERIA
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Ensayo traccion elasticos

Test type: Tensile	Instron Corporation
Operator name: m.trujillo	Series IX Automated Materials Testing System 1.04
	Test Date: 05 Nov 2003
Sample Identification: ZYNTEL1B	Sample Type: ASTM
Interface Type: 4200 Series	
Machine Parameters of test:	
Sample Rate (pts/sec): 5.00	Humidity (%): 50
Crosshead Speed (mm/min): 5.000	Temperature (deg. C): 18

Dimensions:

	Spec. 1	Spec. 2	Spec. 3
Width (mm)	13.000	13.000	13.000
Thickness (mm)	3.2000	3.2000	3.2000
Spec gauge len (mm)	50.000	50.000	50.000
Grip distance (mm)	115.00	115.00	115.00

Out of 3 specimens, 0 excluded.

Specimen Number	Displcment at Peak (mm)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Strain at Peak (mm/mm)	Displcment at 0.2% Yield (mm)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Strain at 0.2% Yield (mm/mm)	Displcment at Break (mm)
1	2.520	6.044	145.3	.0504	1.666	4.530	108.90	.0333	2.520
2	2.690	5.875	141.3	.0538	1.785	4.196	100.90	.0357	2.690
3	2.720	6.040	145.2	.0544	1.700	4.127	99.24	.0340	2.720
Mean:	2.643	5.986	143.9	.0529	1.717	4.284	103.00	.0343	2.643
Standard Deviation:	.108	.096	2.3	.0022	.061	.215	5.18	.0012	.108

Specimen Number	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Strain at Break (mm/mm)	Young's Modulus (MPa)
1	6.044	145.3	.0504	3985.
2	5.875	141.3	.0538	3904.
3	6.040	145.2	.0544	3991.
Mean:	5.986	143.9	.0529	3960.
Standard Deviation:	.096	2.3	.0022	49.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
 FACULTAD DE INGENIERIA
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

Ensayo traccion plasticos

Test type: Tensile		Instron Corporation
Operator name: m.trujillo		Series IX Automated Materials Testing System 1.04
		Test Date: 05 Nov 2003
Sample Identification: ZYNTEL2		Sample Type: ASTM
Interface Type: 4200 Series		
Machine Parameters of test:		
Sample Rate (pts/sec): 5.00		Humidity (%): 50
Crosshead Speed (mm/min): 5.000		Temperature (deg. C): 18

Dimensions:

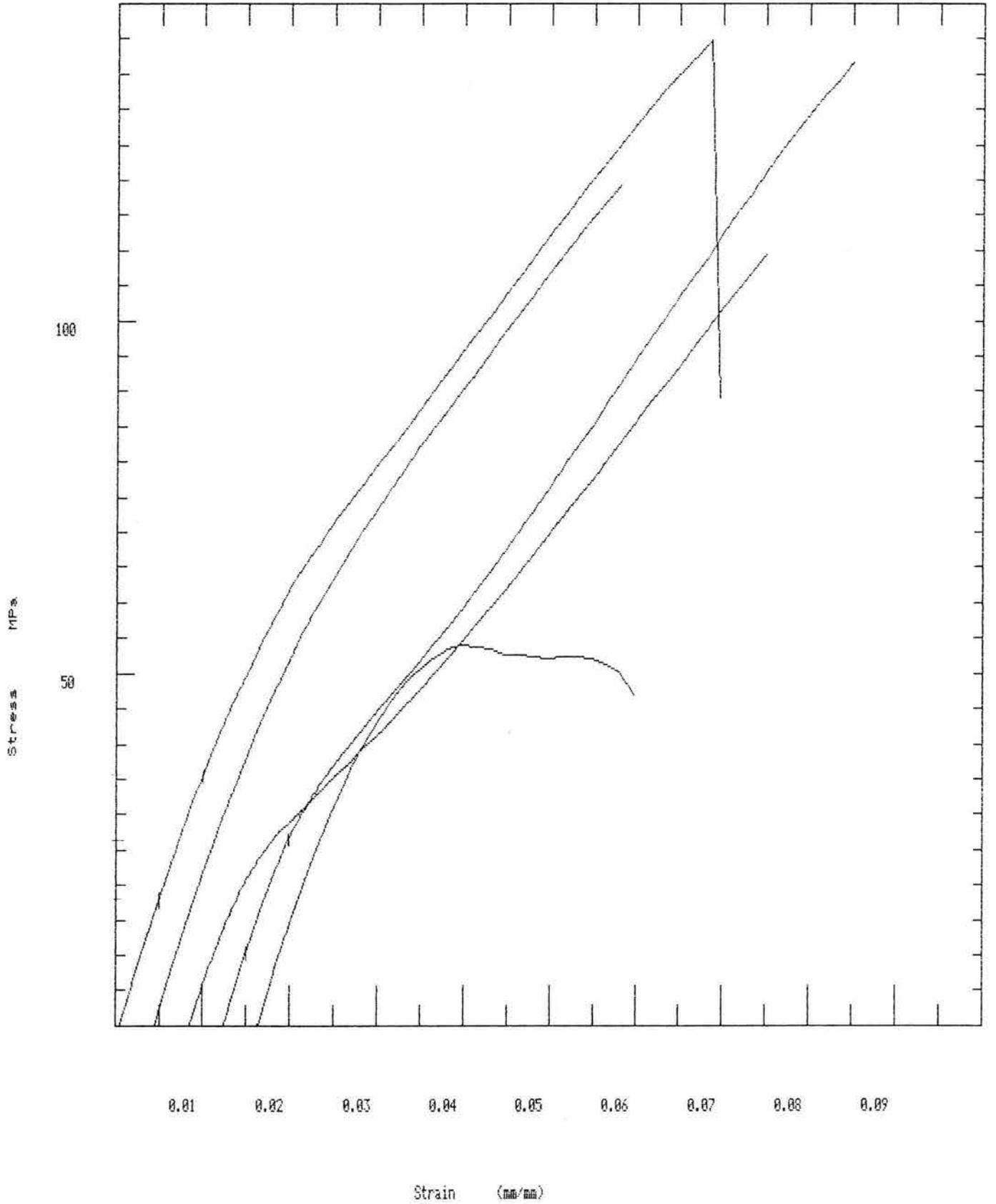
	Spec. 1	Spec. 2	Spec. 3	Spec. 4	Spec. 5
Width (mm)	13.600	13.700	13.600	13.800	13.700
Thickness (mm)	3.1000	3.2000	3.3000	3.2000	3.3000
Spec gauge len (mm)	50.000	50.000	50.000	50.000	50.000
Grip distance (mm)	115.00	115.00	115.00	115.00	115.00

Out of 5 specimens, 0 excluded.

Specimen Number	Displcment at Peak (mm)	Load at Peak (KN)	Stress at Peak (MPa)	Strain at Peak (mm/mm)	Displcment at 0.2% Yield (mm)	Load at 0.2% Yield (KN)	Stress at 0.2% Yield (MPa)	Strain at 0.2% Yield (mm/mm)	Displcment at Break (mm)
1	3.480	5.943	141.00	.0696	.8494	2.323	55.12	.0170	3.480
2	2.730	5.267	120.20	.0546	.8676	2.436	55.58	.0174	2.730
3	3.430	5.005	111.50	.0686	.5336	1.224	27.28	.0107	3.430
4	3.670	6.048	137.00	.0734	.5828	1.530	34.66	.0117	3.670
5	1.240	2.440	53.98	.0248	.6234	1.804	39.91	.0125	1.857
Mean:	2.910	4.941	112.70	.0582	.6914	1.864	42.51	.0138	3.033
Standard Deviation:	.999	1.466	34.98	.0200	.1560	.516	12.55	.0031	.748

Specimen Number	Load at Break (KN)	Stress at Break (MPa)	Strain at Break (mm/mm)	Young's Modulus (MPa)
1	5.943	141.00	.0696	3865.
2	5.267	120.20	.0546	3803.
3	5.005	111.50	.0686	3263.
4	6.048	137.00	.0734	3697.
5	2.368	52.38	.0371	4007.
Mean:	4.926	112.40	.0607	3727.
Standard Deviation:	1.497	35.66	.0150	283.

ZYTEL2 ALL





LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

REG. No. PM-03358-1

HOJA 1 DE 9

O. S. 3037

CLIENTE: INSTITUTO DE ASTRONOMIA UNAM RECIBIDA: 12 DE FEBRERO DE 2004

INFORME: ENSAYO DE TENSION ENTREGADO: 17 DE FEBRERO DE 2004

DIRECCIÓN: CIRCUITO EXTERIOR S/N CIUDAD UNIVERSITARIA COL. COPILCO TEL: 556223906

MEXICO DISTRITO FEDERAL

MATERIAL RECIBIDO

DESCRIPCIÓN PROBETAS DE PLASTICO RIGIDO.

ESPECIFICACIONES DuPont Zytel HTNFR51G35LNC010 Nylon Copolymer, 45 % Glass Reinforced, dry as model

PROBETAS TRES.

NORMA DEL ENSAYO ASTM D 638

MAQUINAS E IMPLEMENTOS

MAQUINA UNIVERSAL INSTRON

CALIBRADOR VERNIER DIGITAL

MODELO 4482

CD-6" C

No. DE SERIE C3911

28013

FECHA DE CALIBRACION ABRIL DE 2003

JUNIO DE 2003

CONDICIONES TEMPERATURA: 20°C

HUMEDAD RELATIVA: 43%

VELOCIDAD 10 mm/min



Este documento es válido sólo en original y con las correspondientes firmas y sello.
No se autoriza la reproducción parcial o total de este documento sin el permiso expreso del laboratorio.



LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

ENSAYO DE TENSION

REG. No. PM-03358-1

HOJA 2 DE 9

O. S. 3037

NORMA DEL MATERIAL	
RESISTENCIA DE TENSION	165 Mpa (23 900 Psi)
LIMITE DE CEDENCIA	
ALARGAMIENTO EN	1.3 %

LAMINA		RESULTADOS OBTENIDOS					
CARACTERISTICAS		PROBETA 1		PROBETA 2		PROBETA 3	
LONGITUD INICIAL	mm (Pulg.)	50.80	(2.000)	50.80	(2.000)	50.80	(2.000)
LONGITUD FINAL	mm (Pulg.)	51.58	(2.031)	51.19	(2.015)	51.13	(2.013)
ANCHO INICIAL	mm (Pulg.)	13.81	(0.544)	13.64	(0.537)	13.65	(0.537)
ESPESOR INICIAL	mm (Pulg.)	3.20	(0.126)	3.15	(0.124)	3.20	(0.126)
AREA INICIAL	mm ² (Pulg. ²)	44.19	(0.068)	42.97	(0.067)	43.68	(0.068)
CARGA MAXIMA	Kg (Lbs.)	601	(1325)	622	(1372)	589	(1299)
RESISTENCIA A LA TENSION	MPa (Lbs./Pulg. ²)	133	(19344)	142	(20591)	132	(19180)
ALARGAMIENTO	% (%)	2%	(2%)	1%	(1%)	1%	(1%)

COMENTARIOS

PROBETAS DE PLASTICO RIGIDO.

SE ANEXA GRAFICA



Ma. Concepción Obregón Zepeda

Q.A. MA. CONCEPCIÓN OBREGÓN ZEPEDA
ANALISTA

M.C. Joel Chaparro González

M.C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ
DIRECTOR DE LA UNIDAD

ESTE REGISTRO NO ES VALIDO SIN LAS CORRESPONDIENTES FIRMAS Y SELLO
ESTE INFORME AMPARA UNICAMENTE A LAS MUESTRAS ENSAYADAS
NO SE AUTORIZA SU REPRODUCCION PARCIAL O TOTAL SIN EL PERMISO EXPRESO DEL LABORATORIO
AV. PLAYA PIE DE LA CUESTA No. 702 DESARROLLO HABITACIONAL SAN PABLO, QUERETARO, QRO, C.P. 76130 FAX 20-63-65



LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

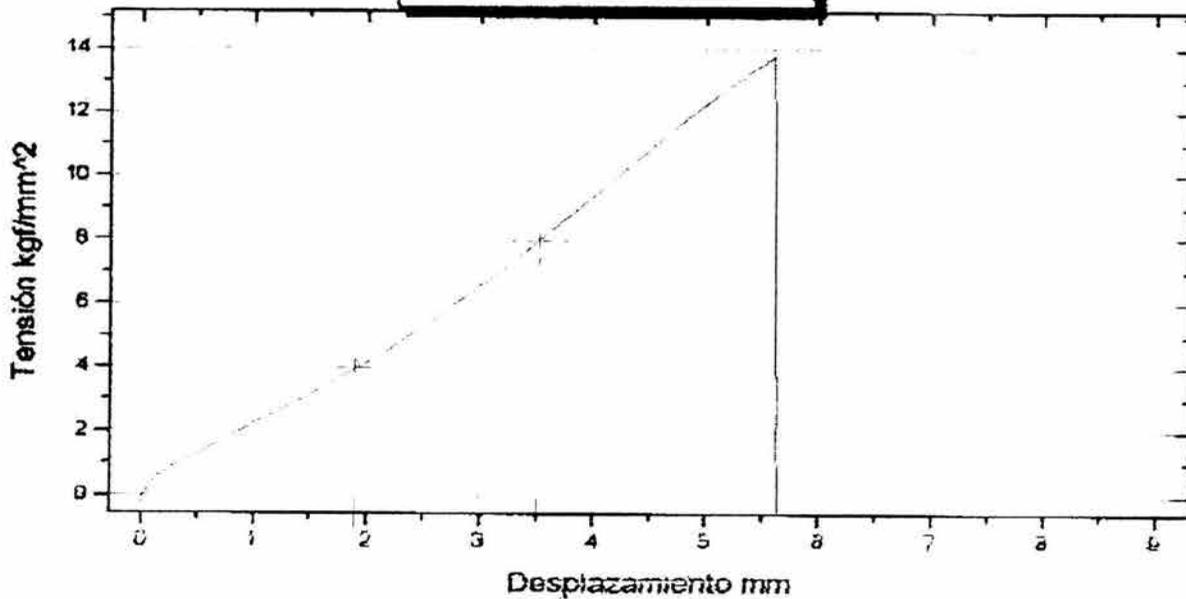
GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No. PM-03358-1

HOJA 3 DE 5

O. S. 3037

ID muestr.: 03358-24



OBSERVACIONES

PROBETA 1



Q.A. MA. CONCEPCION OBREGÓN ZEPEDA

ANALISTA

M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

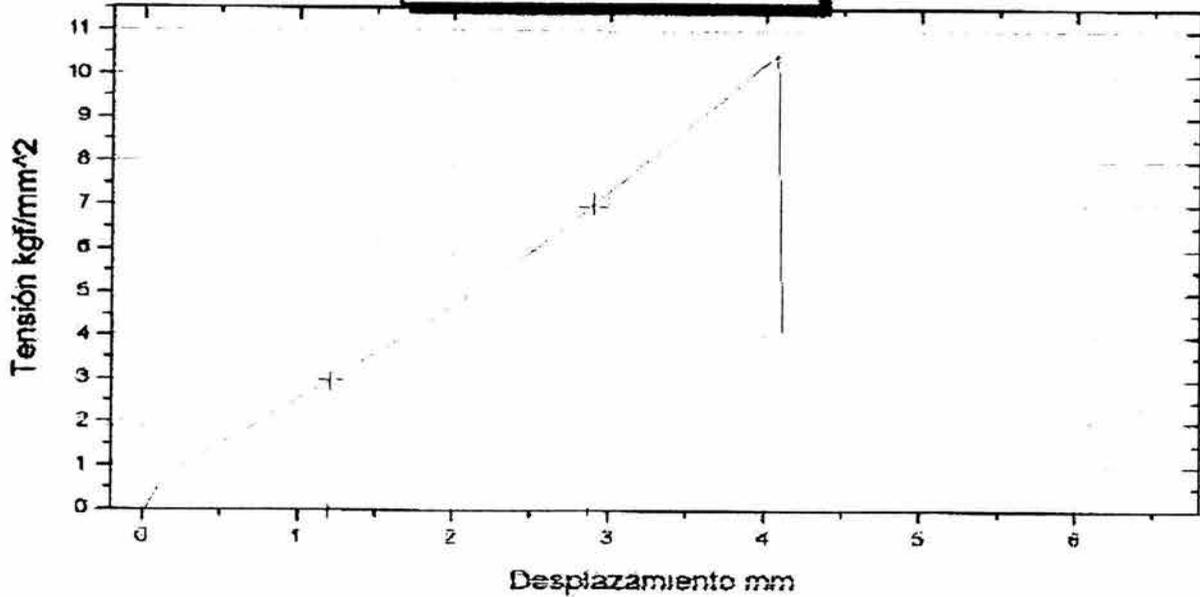
DIRECTOR DE LA UNIDAD

LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No.	PM-03358-1
HOJA	4 DE 5
O. S.	3037

ID muestr.: 03358-21



OBSERVACIONES

PROBETA 2



Q.A. MA. CONCEPCIÓN OBREGÓN ZEREDA

ANALISTA

M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

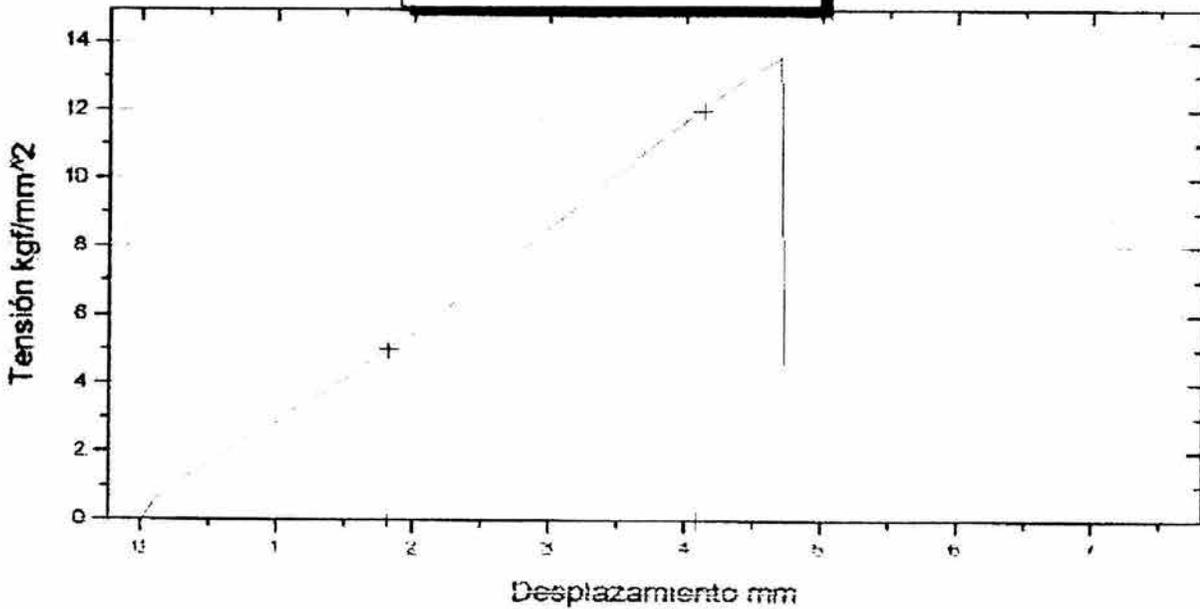
DIRECTOR DE LA UNIDAD

LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

GRAFICO DEL ENSAYO

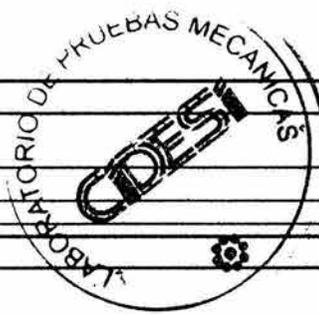
REG. No. PM-03358-1
 HOJA 5 DE 5
 O. S. 3037

ID muestr.: 03358-18



OBSERVACIONES

PROBETA 3



Ma. Concepción Obregón Zepeda
 Q.A. MA. CONCEPCION OBREGÓN ZEPEDA

ANALISTA

M. En C. Joel Chaparro González
 M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

DIRECTOR DE LA UNIDAD

LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

REG. No. PM-03358
HOJA 1 DE 16
O. S. 3037

CLIENTE: INSTITUTO DE ASTRONOMIA / UNAM RECIBIDA: 3 DE DICIEMBRE DE 2003
INFORME: ENSAYO DE TENSION ENTREGADO: 3 DE DICIEMBRE DE 2003
DIRECCIÓN: CIRCUITO EXTERIOR S/N CIUDAD UNIVERSITARIA COL COPILCO TEL: 558223906
MÉXICO DISTRITO FEDERAL

MATERIAL RECIBIDO

DESCRIPCIÓN PROBETAS DE PLASTICO RIGIDO

ESPECIFICACIONES DuPont Zytel HTNFR51G35LNC010 Nylon Copolymer, 45% Glass Reinforced, dry, as model

PROBETAS SEIS

NORMA DEL ENSAYO ASTM D 638



MAQUINAS E IMPLEMENTOS

MAQUINA	MICRÓMETROS DIGITALES	
	EXTREMOS PLANOS	EXTREMOS PUNTAS
<u>UNIVERSAL INSTRON</u>		
MODELO <u>4482</u>	<u>293-369</u>	<u>CPM30-10M</u>
No. DE SERIE <u>C3911</u>	<u>8026713</u>	<u>1101813</u>
FECHA DE CALIBRACION <u>ABRIL DE 2003</u>	<u>JUNIO 2003</u>	<u>JUNIO 2003</u>
CONDICIONES <u>TEMPERATURA: 20°C</u>	<u>HUMEDAD RELATIVA: 45%</u>	
VELOCIDAD <u>1 mm/min (Módulo de Young)</u>	<u>5mm/min (Ensayo de Tensión)</u>	



Este documento es válido sólo en original y con las correspondientes firmas y sello.
No se autoriza la reproducción parcial o total de este documento sin el permiso expreso del laboratorio.



LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

ENSAYO DE TENSION

REG. No. PM-03358

HOJA 2 DE 16

O. S. 3037

NORMA DEL MATERIAL	
RESISTENCIA DE TENSION	165 Mpa (23 900 Psi)
LIMITE DE CEDENCIA	
ALARGAMIENTO EN	1.3 %

LAMINA		RESULTADOS OBTENIDOS					
CARACTERISTICAS		PROBETA 1		PROBETA 2		PROBETA 3	
LONGITUD INICIAL	mm (Pulg.)	57.00 (2.244)	57.00 (2.244)	57.00 (2.244)	57.00 (2.244)	57.00 (2.244)	57.00 (2.244)
LONGITUD FINAL	mm (Pulg.)	57.71 (2.272)	57.71 (2.272)	57.50 (2.264)	57.50 (2.264)	57.63 (2.269)	57.63 (2.269)
ANCHO INICIAL	mm (Pulg.)	13.65 (0.537)	13.65 (0.537)	13.67 (0.538)	13.67 (0.538)	13.61 (0.536)	13.61 (0.536)
ESPESOR INICIAL	mm (Pulg.)	3.00 (0.118)	3.00 (0.118)	3.05 (0.120)	3.05 (0.120)	3.01 (0.119)	3.01 (0.119)
AREA INICIAL	mm ² (Pulg. ²)	40.94 (0.063)	40.94 (0.063)	41.67 (0.065)	41.67 (0.065)	40.96 (0.063)	40.96 (0.063)
CARGA MAXIMA	Kg (Lbs.)	580 (1278)	580 (1278)	517 (1139)	517 (1139)	533 (1176)	533 (1176)
CARGA CEDENCIA	Kg (Lbs.)	248 (546)	248 (546)	185 (407)	185 (407)	154 (340)	154 (340)
RESISTENCIA A LA TENSION	MPa (Lbs./Pulg. ²)	139 (20138)	139 (20138)	122 (17630)	122 (17630)	128 (18516)	128 (18516)
LIMITE CEDENCIA	MPa (Lbs./Pulg. ²)	59 (8606)	59 (8606)	43 (6304)	43 (6304)	37 (5362)	37 (5362)
ALARGAMIENTO	% (%)	1.25% (1.25%)	1.25% (1.25%)	0.9% (0.9%)	0.9% (0.9%)	1.11% (1.11%)	1.11% (1.11%)

COMENTARIOS

PROBETAS 1, 2 Y 3 CORRESPONDEN A LA IDENTIFICACIÓN: 5, 6 Y 7 RESPECTIVAMENTE.
LAS TRES PROBETAS ROMPEN EN LA ZONA DE LA MORDAZA.

SE ANEXA GRAFICA



Ma. Concepción Obregón Zepeda
Q.A. MA. CONCEPCIÓN OBREGÓN ZEPEDA
ANALISTA

M.C. Joel Chaparro González
M.C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ
DIRECTOR DE LA UNIDAD

ESTE REGISTRO NO ES VALIDO SIN LAS CORRESPONDIENTES FIRMAS Y SELLO
ESTE INFORME AMPARA UNICAMENTE A LAS MUESTRAS ENSAYADAS
NO SE AUTORIZA SU REPRODUCCION PARCIAL O TOTAL SIN EL PERMISO EXPRESO DEL LABORATORIO
AV. PLAYA PIE DE LA CUESTA No. 702 DESARROLLO HABITACIONAL SAN PABLO, QUERETARO, QRO, C.P. 76130 FAX 20-63-65



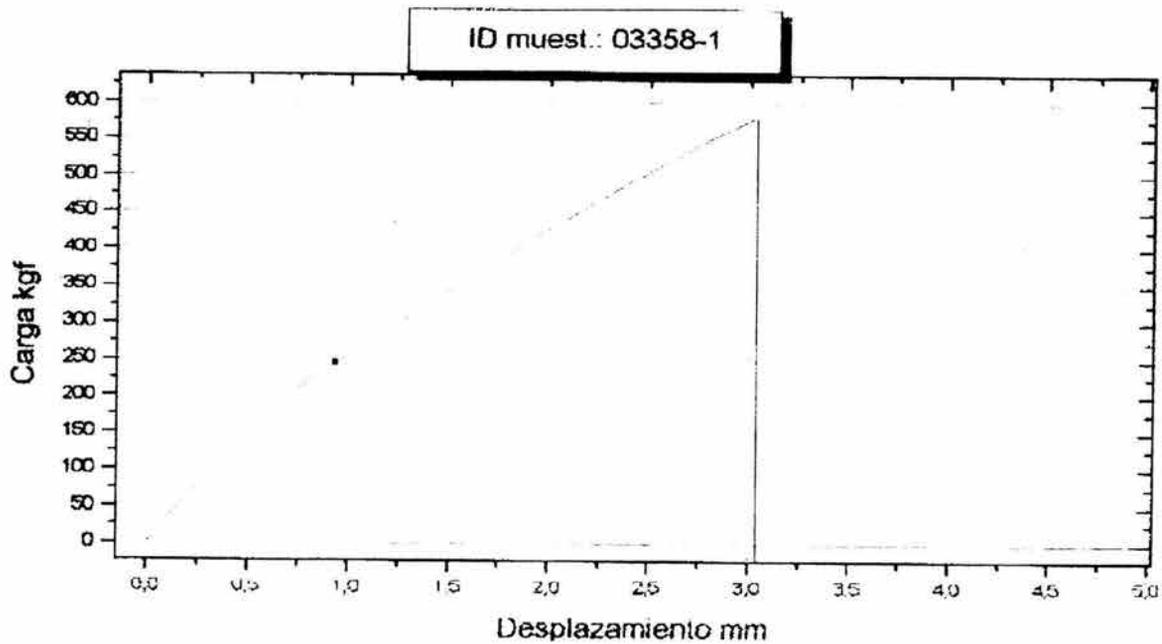
LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No. PM-03358

HOJA 3 DE 16

O. S. 3037



OBSERVACIONES

PROBETA 5



Q.A. MA. CONCEPCIÓN OBREGÓN ZEPEDA

ANALISTA

M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

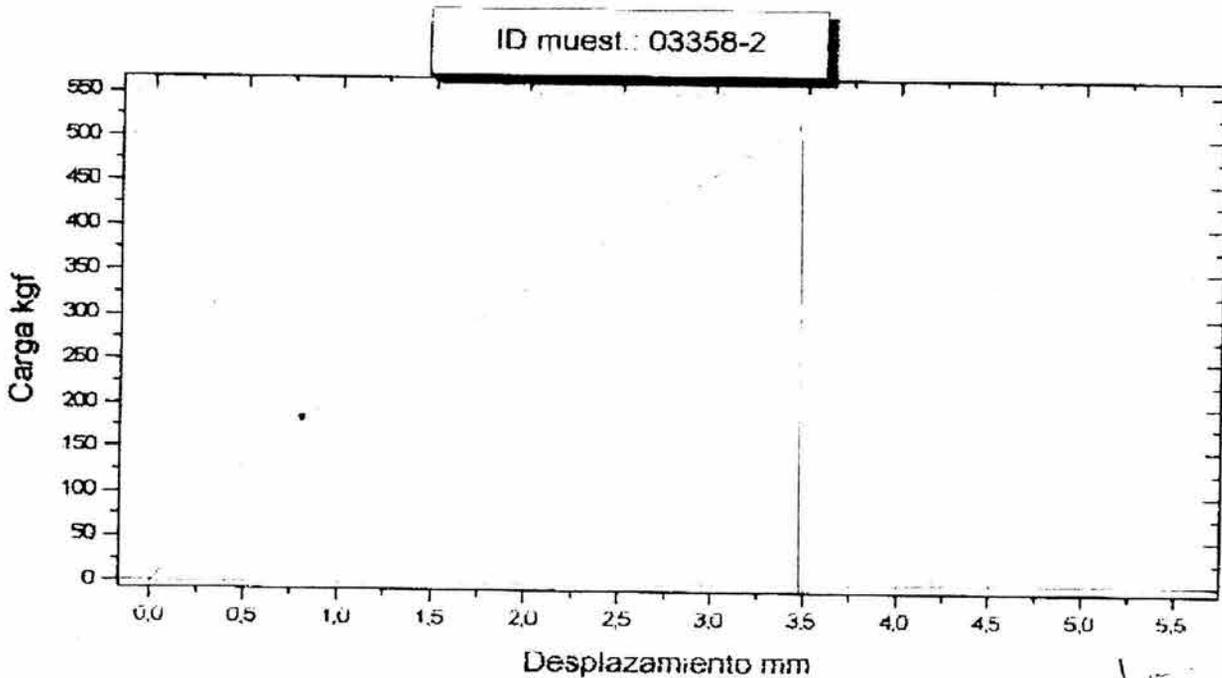
DIRECTOR DE LA UNIDAD



LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No. PM-03358
HOJA 4 DE 16
O. S. 3037



OBSERVACIONES PROBETA 6

M. Concepción Obregón Zepeda
Q.A. MA. CONCEPCION OBREGÓN ZEPEDA

ANALISTA

M. En C. Joel Chaparro González
M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

DIRECTOR DE LA UNIDAD

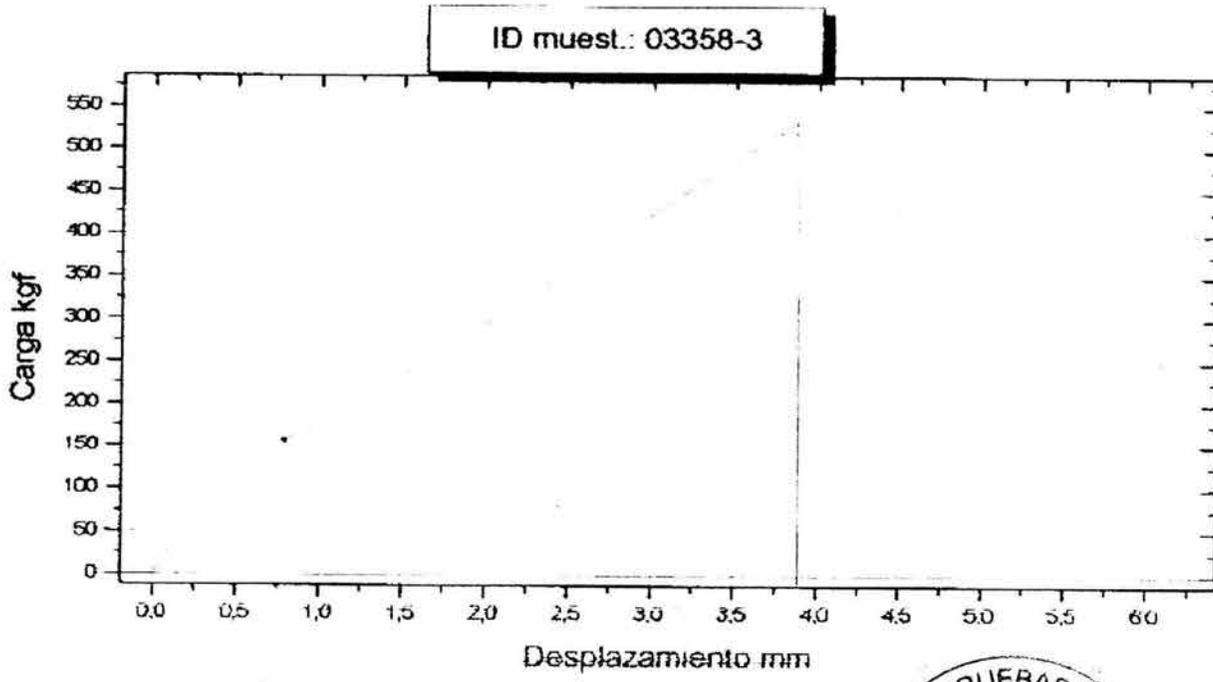
LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No. PM-03358

HOJA 5 DE 16

O. S. 3037



OBSERVACIONES PROBETA 7

M. Concepción Obregón Zepeda
Q.A. MA. CONCEPCIÓN OBREGÓN ZEPEDA

ANALISTA

M. En C. Joel Chaparro González
M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

DIRECTOR DE LA UNIDAD

LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

ENSAYO DE TENSION

REG. No. PM-03358

HOJA 6 DE 16

O. S. 3037

NORMA DEL MATERIAL	
RESISTENCIA DE TENSION	165 Mpa (23 900 Psi)
LIMITE DE CEDENCIA	
ALARGAMIENTO EN	1.3 %

LAMINA		RESULTADOS OBTENIDOS					
CARACTERISTICAS		PROBETA 4		PROBETA 5		PROBETA 6	
LONGITUD INICIAL	mm (Pulg.)	57.00	(2.244)	57.00	(2.244)	57.00	(2.244)
LONGITUD FINAL	mm (Pulg.)	57.55	(2.266)	57.59	(2.267)	57.72	(2.272)
ANCHO INICIAL	mm (Pulg.)	13.64	(0.537)	13.63	(0.536)	13.64	(0.537)
ESPESOR INICIAL	mm (Pulg.)	3.01	(0.119)	3.02	(0.119)	3.01	(0.119)
AREA INICIAL	mm ² (Pulg. ²)	41.05	(0.064)	41.08	(0.064)	41.07	(0.064)
CARGA MAXIMA	Kg (Lbs.)	501	(1104)	519	(1144)	603	(1329)
CARGA CEDENCIA	Kg (Lbs.)	112	(247)	94	(207)	118	(261)
RESISTENCIA A LA TENSION	MPa (Lbs./Pulg. ²)	120	(17347)	124	(17960)	144	(20871)
LIMITE CEDENCIA	MPa (Lbs./Pulg. ²)	27	(3886)	22	(3254)	28	(4093)
ALARGAMIENTO	% (%)	0.96%	(0.96%)	1.04%	(1.04%)	1.26%	(1.26%)

COMENTARIOS

PROBETAS 4, 5 Y 6 CORRESPONDEN A LA IDENTIFICACIÓN: 8, 9 Y 10 RESPECTIVAMENTE.

PROBETAS 4 Y 5 ROMPEN EN LA ZONA DE LA MORDAZA, LA PROBETA 6 ROMPE EN EL LÍMITE DE LA ZONA CALIBRADA.

SE ANEXA GRAFICA

M. Concepción Obregón Zepeda
 Q.A. MA. CONCEPCIÓN OBREGÓN ZEPEDA
 ANALISTA

M.C. Joel Chararro González
 M.C. JOEL CHARARRO GONZALEZ
 DIRECTOR DE LA UNIDAD



LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

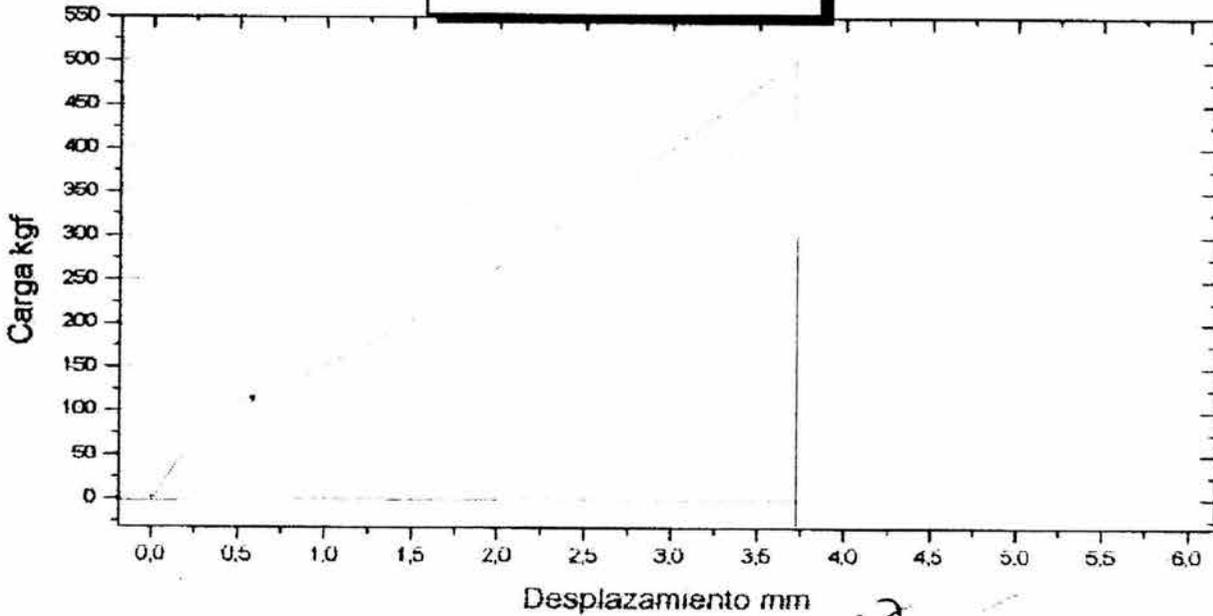
GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No. PM-03358

HOJA 7 DE 16

O. S. 3037

ID muestr.: 03358-4



OBSERVACIONES

PROBETA 8



Ma Concepción Obregón Zepeda
Q.A. MA. CONCEPCIÓN OBREGÓN ZEPEDA

ANALISTA

M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ
M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

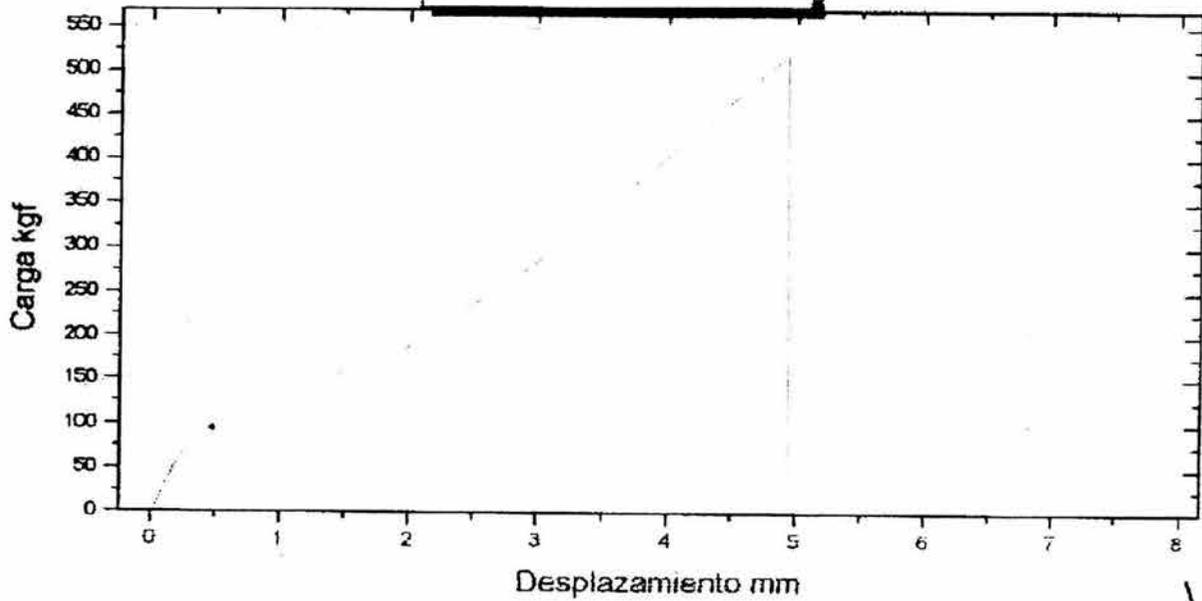
DIRECTOR DE LA UNIDAD

LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No.	PM-03358
HOJA	8 DE 16
O. S.	3037

ID muestr.: 03358-5



OBSERVACIONES PROBETA 9

Q.A. MA. CONCEPCIÓN OBREGÓN ZEPEDA

ANALISTA

M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

DIRECTOR DE LA UNIDAD



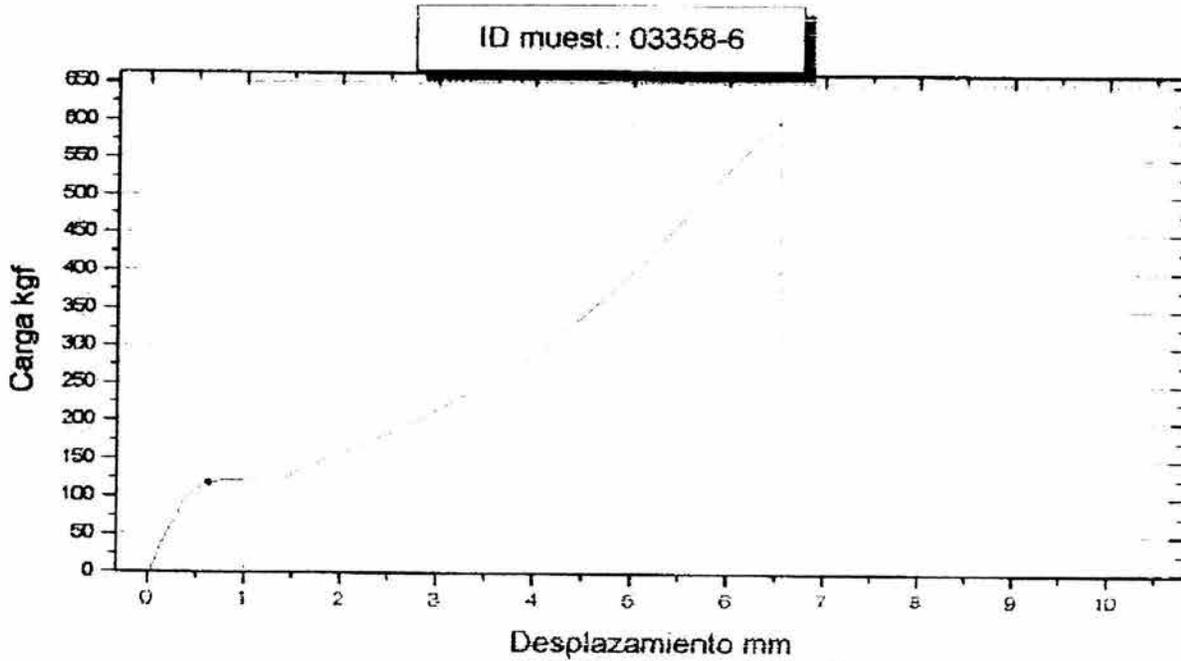
LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No. PM-03358

HOJA 9 DE 16

O. S. 3037



OBSERVACIONES

PROBETA 10



Q.A. Ma. Concepción Obregón Zereda
Q.A. MA. CONCEPCIÓN OBREGÓN ZEREDA

ANALISTA

M. EN C. Joel Chaparro González
M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

DIRECTOR DE LA UNIDAD



LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS
REPORTE DE ENSAYOS DE TENSÓN

REG. No. PM 03358
HOJA 10 DE 16
O. S. 3037

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	PROBETA					
		5	6	7	8	9	10
ANCHO	mm	13.65	13.67	13.61	13.64	13.63	13.64
ESPESOR	mm	3.01	3.02	3.01	3.0	3.05	3.01
DESPLAZAMIENTO MÁXIMO	mm	3.041	3.513	3.896	3.750	3.943	6.554
CARGA MÁXIMA	KN	5.68	5.06	5.22	4.91	5.08	5.91
ESFUERZO MÁXIMO	Mpa	139	122	128	120	124	144
DESPLAZAMIENTO AL 0.2%	mm	0.96	0.8	0.79	0.56	0.48	0.62
CARGA AL 0.2%	Kn	2.428	1.81	1.509	1.099	0.92	1.158
ESFUERZO AL 0.2%	Mpa	59	43	37	27	22	28
DESPLAZAMIENTO A LA RUPTURA	mm	3.041	3.513	3.896	3.750	3.943	6.554
CARGA A LA RUPTURA	Kn	5.68	5.06	5.22	4.91	5.08	5.91
ESFUERZO A LA RUPTURA	Mpa	139	122	128	120	124	144
MÓDULO DE YOUNG	Mpa	1290	1394	1412	1549	1446	1477

COMENTARIOS LOS DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS Y, A LA RUPTURA; ASÍ COMO EL ESFUERZO MÁXIMO
Y EL ESFUERZO A LA RUPTURA PRESENTAN LOS MISMOS VALORES, PARA ÉSTE MATERIAL.

M. Concepción Obregón Zepeda
Q.A. MA. CONCEPCION OBREGON ZEPEDA
ANALISTA

Joel Chaparro González
C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ
DIRECTOR DE LA UNIDAD



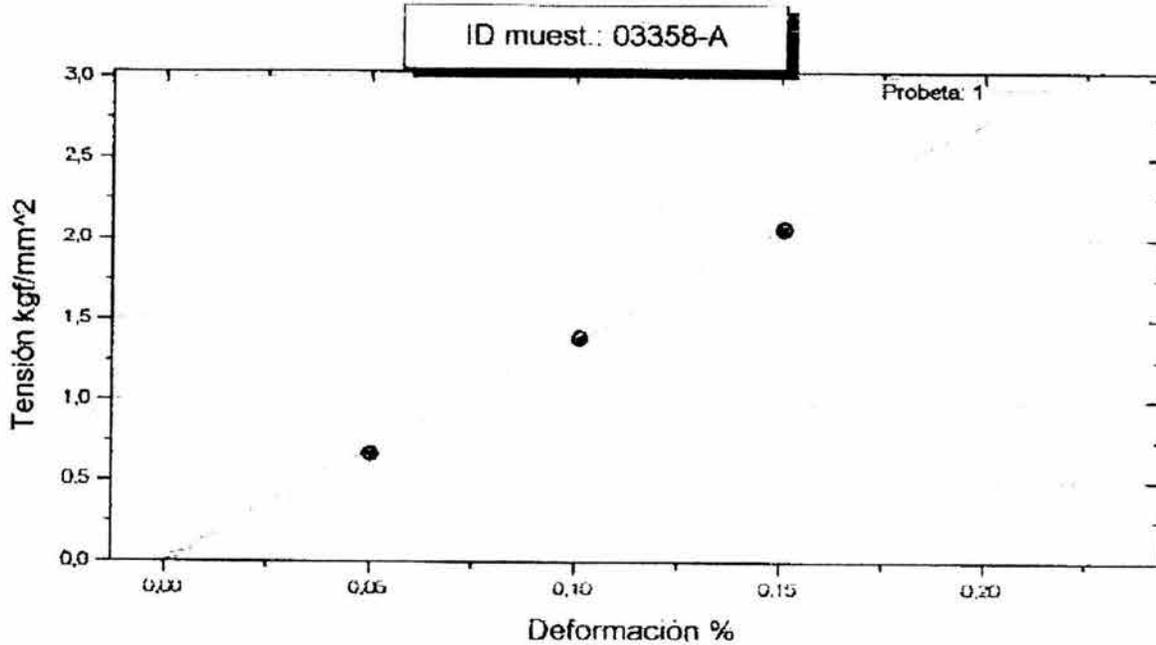
LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No. PM-03358

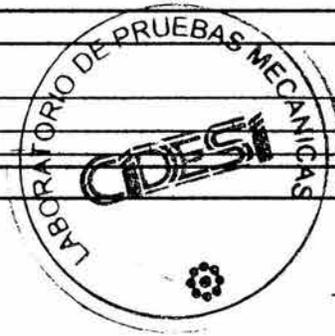
HOJA 11 DE 18

O. S. 3037



OBSERVACIONES

PROBETA 5



Q.A. Ma. Concepción Obregón Zepeda
Q.A. MA. CONCEPCIÓN OBREGÓN ZEPEDA

ANALISTA

M. EN C. Joel Chaparro González
M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

DIRECTOR DE LA UNIDAD

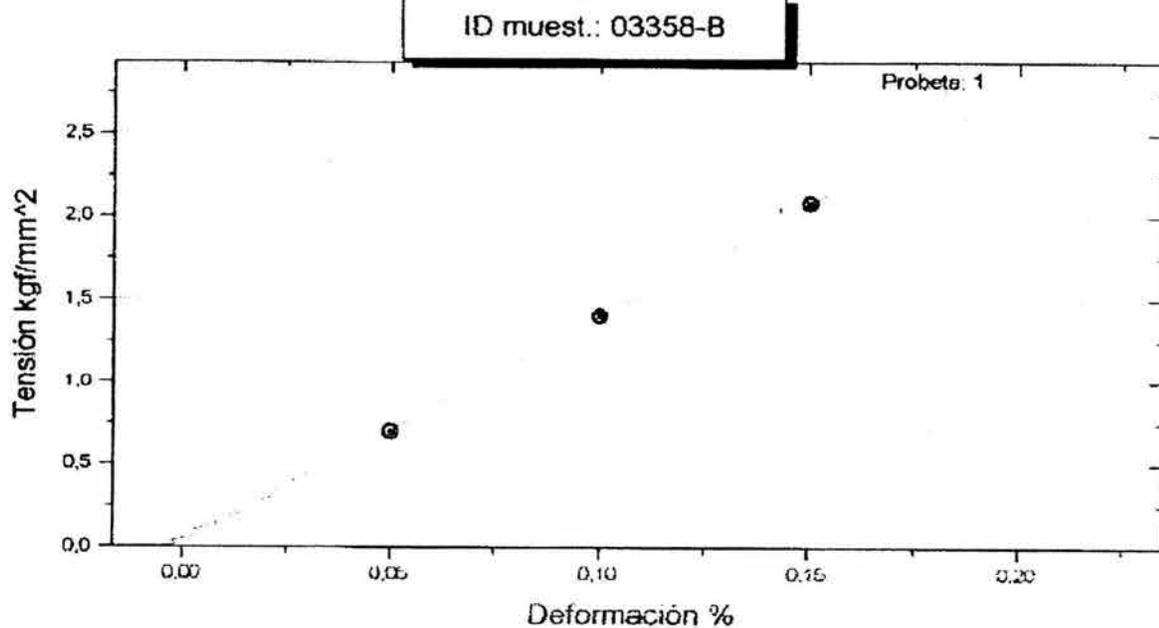
LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No. PM-03358

HOJA 12 DE 16

O. S. 3037



OBSERVACIONES

PROBETA 6



Concepción Obregón Zepeda
Q.A. MA. CONCEPCIÓN OBREGÓN ZEPEDA

ANALISTA

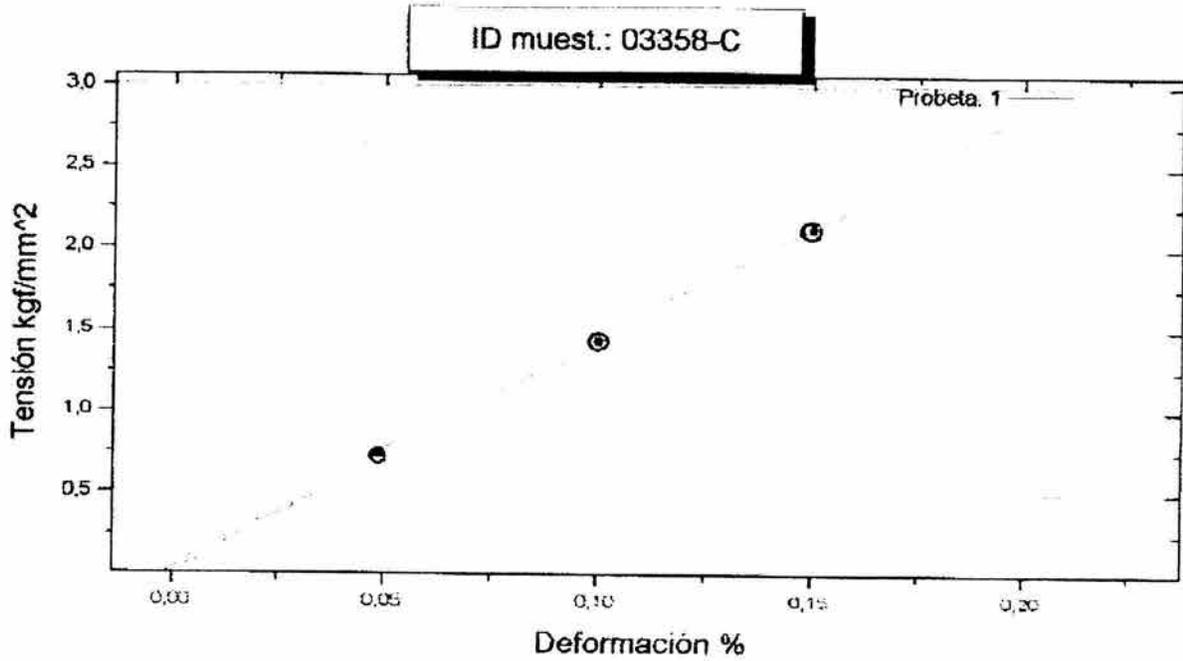
Joel Chaparro González
M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

DIRECTOR DE LA UNIDAD

LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

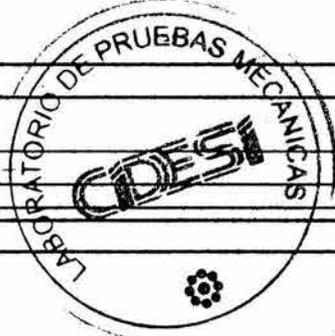
GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No. PM-03358
 HOJA 13 DE 16
 O. S. 3037



OBSERVACIONES

PROBETA 7



Ma Concepcion Obregon Zepeda
 Q.A. MA. CONCEPCION OBREGÓN ZEPEDA

ANALISTA

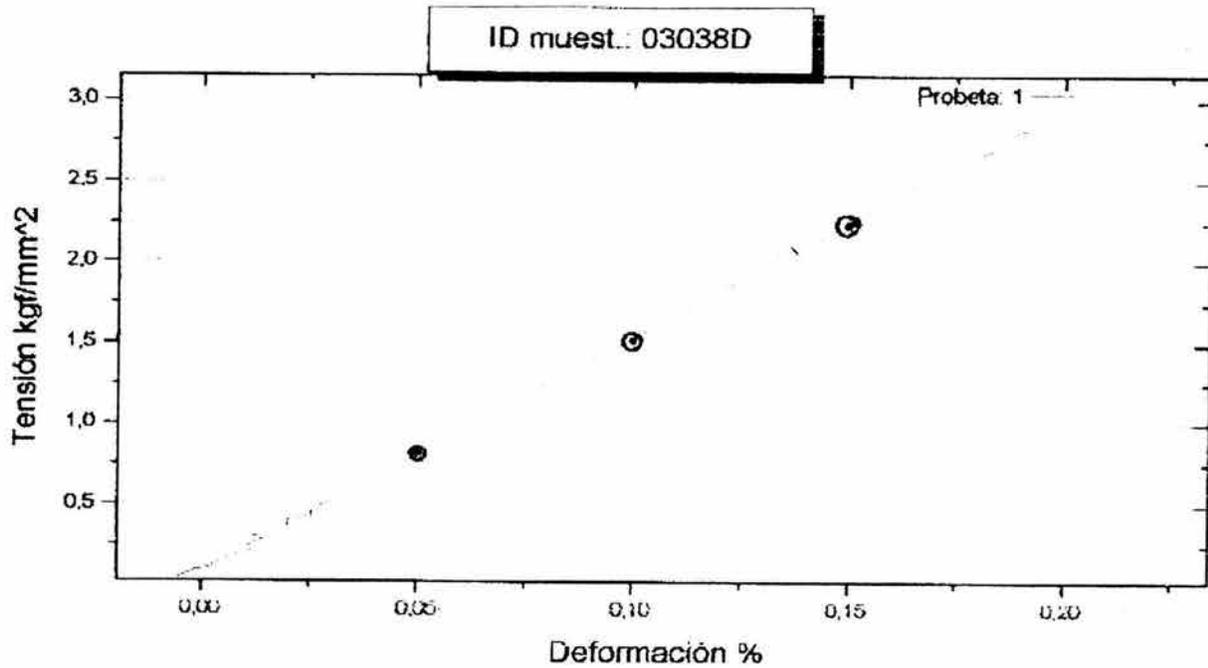
M. En C. Joel Chaparro Gonzalez
 M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

DIRECTOR DE LA UNIDAD

LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No. PM-03358
HOJA 14 DE 16
O. S. 3037



OBSERVACIONES

PROBETA 8



M. Concepción Obregón Zepeda
Q. A. MA. CONCEPCION OBREGON ZEPEDA

ANALISTA

M. En C. Joel Chaparro González
M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

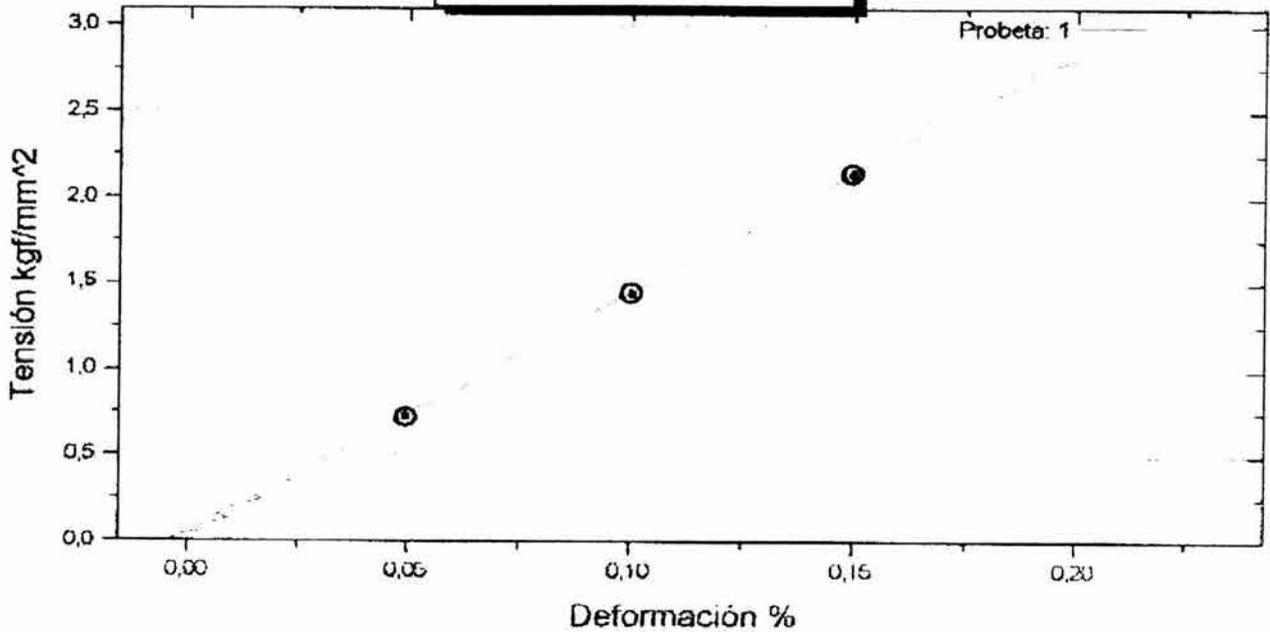
DIRECTOR DE LA UNIDAD

LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No.	PM-03358
HOJA	15 DE 16
O. S.	3037

ID muestr.: 03358-E



OBSERVACIONES

PROBETA 9



Q.A. Ma. Concepción Obregón Zepeda
Q.A. MA. CONCEPCIÓN OBREGÓN ZEPEDA

ANALISTA

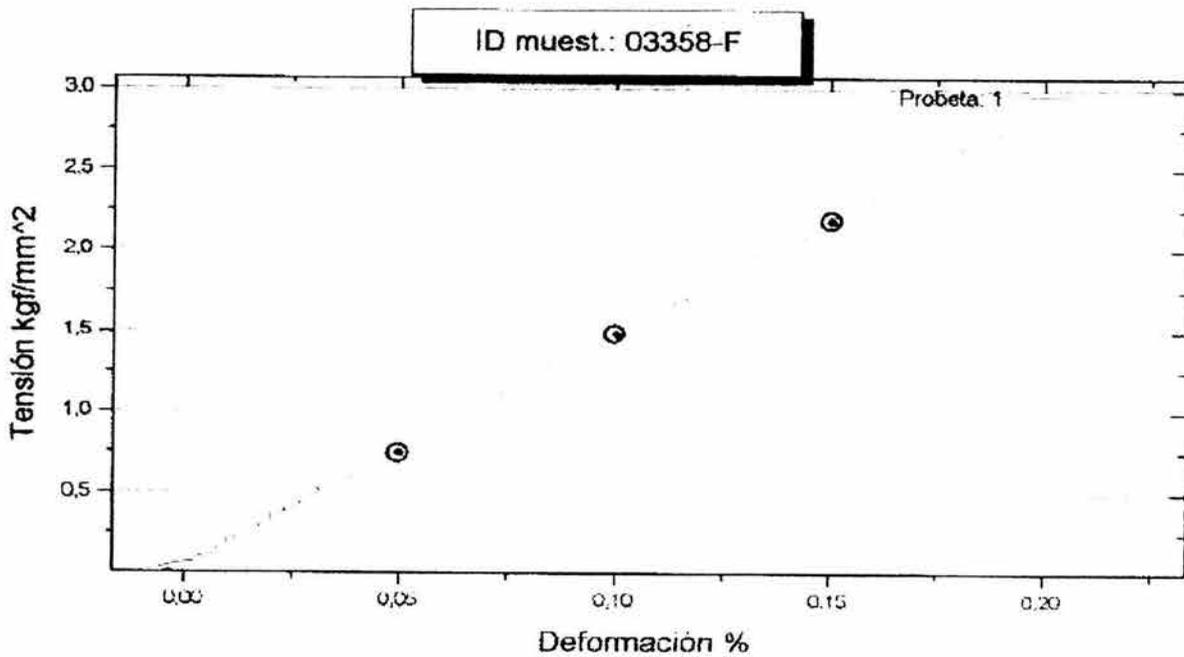
M. EN C. Joel Chaparro González
M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

DIRECTOR DE LA UNIDAD

LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

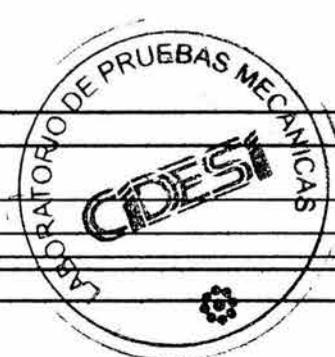
GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No.	PM-03358
HOJA	16 DE 16
O. S.	3037



OBSERVACIONES

PROBETA 10



Q.A. MA. CONCEPCION OBREGON ZEPEDA

ANALISTA

M. EN C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

DIRECTOR DE LA UNIDAD