

**Universidad Tecnológica de la Mixteca**



**“OBTENCION DE MAPAS DE ESFUERZOS DE  
MEMBRANAS ELASTICAS MEDIANTE INGENIERIA  
ASISTIDA POR COMPUTADORA (CAE)”**

**T E S I S**  
**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**  
**INGENIERO INDUSTRIAL**

**PRESENTA**  
**MORENO RIOS ALMA LILIA**

**DIRECTORES DE TESIS**  
**DR. AGUSTIN SANTIAGO ALVARADO**  
**MC. ALVARO JESUS MENDOZA JASSO**

Huajuapán de León, Oaxaca a 14 Julio de 2008.

## Capítulo 1. Introducción

Actualmente el proyecto de "Óptica Adaptiva de sistemas refractores" (SEP-2004-C01-46080/A1) aprobado por CONACyT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología), tiene como objetivo diseñar, construir y caracterizar una lente adaptiva, que es una lente que permite variar sus parámetros geométricos (*radio de curvatura, distancia focal, grosor, etc.*), en función del volumen del líquido. Para cumplir con el objetivo del proyecto, se originaron diferentes necesidades, entre estas, encontrar mapas de esfuerzos a membranas elásticas y transparentes; que se utilizaran como superficies refractoras del sistema óptico a través de la Ingeniería Asistida por Computadora, CAE por sus siglas en inglés es una aplicación de software y tecnología, resultando una herramienta útil en la simulación de procesos físicos en el sector educativo (Lázaro, 2007) esencialmente en el área de ingenierías, la cual emplea en el Análisis de Elemento Finito (AEF), que es uno de los más utilizados en aplicaciones industriales, aunque su utilización es aplicable a multitud de problemas en física (Vado, 2001).

Esto permite aplicar CAE a un par de membranas elásticas transparentes de contornos circulares, que se utilizarán como *superficies refractoras*<sup>1</sup> en un *sistema óptico*<sup>2</sup>, con el objetivo de obtener los mapas de esfuerzos cuando son sometidas a la presión de un líquido entre estas.

---

<sup>1</sup> Las superficies refractoras son una discontinuidad en el medio que desvía propagación rectilínea de la luz (Vado, 2003).

<sup>2</sup> *Sistema óptico*: un sistema óptico es el arreglo de superficies reflectoras y refractoras, su función es coleccionar y cambiar la forma de una porción del *frente de onda* incidente, con la intención de formar una imagen de un objeto. En un sistema óptico ideal cada punto de una región tridimensional tendrá su imagen perfecta (o astigmática) en otra región (Vado, 2003).

### 1.1 Planteamiento del problema

Los mapas de esfuerzos pueden ser obtenidos experimentalmente utilizando la técnica de fotoelasticidad, que se adapta esencialmente a problemas bidimensionales, además permite obtener la distribución y el valor de las tensiones en piezas de formas variadas; sin embargo, el tiempo para la técnica es prolongado (Rodríguez Avial, 1982).

Analíticamente los mapas de esfuerzos también pueden ser simulados con las ecuaciones de la teoría de la elasticidad, que resultan prácticamente inabordables, si se trata de piezas cuya forma no coincide con las formas geométricas sencillas (Rodríguez Fernando, 1977).

Knollman (1970), desarrolló un modelo matemático para una lente líquida formada por membranas, donde al variar el volumen del líquido contenido entre estas, toma la forma de un paraboloides y a través de este análisis en la superficie se obtienen los esfuerzos. Posteriormente Sugiura (1993), se basa en el modelo matemático de Knollman, para llevarlo a la experimentación, donde comprueba que al variar el volumen del líquido en la membrana, toma la forma de una superficie paraboloides, sin embargo en la zona central es aproximadamente una esfera, en este modelo se introduce el efecto de la gravedad.

En la actualidad, se busca estudiar el comportamiento de membranas elásticas en menor tiempo, bajo costo y sin aparatos especializados, que permitan obtener exactitud (Santiago et al., 2008).

## **1.2 Objetivo general**

Obtener mapas de esfuerzos en membranas elásticas transparentes de forma circular, que se utilizarán como superficies refractoras de un sistema óptico al ser sometidas a cambios de presión, mediante el AEF a través del software Ansys.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Establecer las zonas de la membrana elástica en donde se presentan los mayores esfuerzos mediante el software de análisis Ansys que se basa en el Análisis de Elemento Finito.
- Obtener la forma de la membrana a determinada presión ejercida sobre ella, mediante el software Ansys que se basa en el Análisis de Elemento Finito.
- Obtener la deformación de la membrana para el problema particular presentado en este trabajo de tesis con la expresión matemática de Sugiura.

## **1.4 Hipótesis**

- Los desplazamientos obtenidos por la CAE, son comparables a los obtenidos por el Modelo Sugiura.
- A mayor presión mayor desplazamiento.
- A mayor presión mayor esfuerzo.
- Los esfuerzos son mayores en el centro de la membrana PDMS.

## 1.5 Alcances

Estas superficies refractoras, al incorporarlas a los sistemas ópticos tradicionales permitirán reducir el número de componentes, peso y costo; produciendo resultados dentro de las tolerancias permitidas (Santiago et al., 2006).

Los resultados de este trabajo pueden ser de gran interés en la fabricación de dispositivos ópticos que involucren reflexión, transmisión y concentración de energía, en virtud de la geometría que puede seleccionarse adecuadamente para los fines que se persiguen. Una membrana circular elástica puede ser utilizada en diferentes aplicaciones de nuestra vida diaria: como instrumento musical de percusión, como regulador de presión de gases, como medidor de flujo, como bomba de desplazamiento positivo, como elemento sensor de deformación, como sistema de control y como válvula para el manejo de fluidos (A. I. Olivia et al., 2003).

## 1.6 Limitaciones

a) La simulación se realizará empleando el AEF mediante el software ANSYS, a partir de las propiedades físicas de la membrana, como son sus propiedades mecánicas (módulo de Young<sup>3</sup>, razón de Poisson<sup>4</sup>), físicas (grosor, diámetro, forma circular) y ópticas (índice

---

<sup>3</sup> El módulo de elasticidad o módulo de Young es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza (Piovan, 2008).

<sup>4</sup> El coeficiente de Poisson es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de una probeta de material elástico lineal e isotrópico cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento (Hecht, 2006).

de refracción<sup>5</sup>, coeficientes de absorción<sup>6</sup> y transmisión<sup>7</sup> para el rango visible).

b) Se realizará el cálculo de la deformación de la membrana con ayuda de la ecuación derivada por Sugiura, la cual predice una forma parabólica en el perfil de las membranas.

c) No se analizará el fluido sumergido entre las membranas, por que solo interesa la presión del líquido, considerando además que no influyen otras características para el presente análisis.

### **1.7 Justificación del tema**

- Este proyecto de tesis se aplicará en la instrumentación óptica que ha tenido que evolucionar, incorporando componentes ópticas reflectoras deformables en el rango de centímetros, hasta el momento existen muy pocas referencias que mencionan el uso de estos componentes (Santiago et al., 2006), por lo que es necesario contar con un estudio detallado del funcionamiento, factibilidad de uso y posible incorporación en los instrumentos refractores de uso cotidiano.

- En las membranas es importante estudiar la distribución de esfuerzos que aparecen en estas y el perfil que presentan cuando son sometidas a cambios de presión, para garantizar su exactitud y

---

5 Índice de refracción se le denomina al cociente de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio cuyo índice se calcula (Gere, 2006).

6 El Coeficiente de Absorción consiste en que una porción de un haz de luz incidente que no es reflejada por el material; es absorbida o transmitida a través del mismo (Resnick, 2004).

7 El Coeficiente de transmisión es la fracción del haz que no ha sido reflejada ni absorbida, sino que se transmite a través del material (Resnick, 2004).

eficiencia para la aplicación en sistemas ópticos (A. I. Olivia et al., 2003).

### **1.8 Estructura de la Tesis**

En el capítulo I se menciona la introducción del contenido de la tesis, presentando un panorama de la problemática a tratar y la metodología de la solución.

En el capítulo II se describe el marco teórico, donde se presenta la información necesaria de las membranas elásticas, sistema óptico, el modelo matemático de Sugiura, así como la información de la CAE mediante el AEF a través del software de simulación Ansys.

En el capítulo III se presenta la metodología de simulación a través del software ANSYS obteniendo los mapas de esfuerzos, además se realizará la validación de la simulación del Modelo Sugiura.

En el capítulo IV se exponen los resultados obtenidos.

En el capítulo V se presentan conclusiones y trabajo futuro.

## Capítulo 2. Marco Teórico

### 2.1 Superficies refractoras en un sistema óptico

El sistema óptico considerado para este proyecto de investigación está integrado por un par de membranas elásticas transparentes que funcionan como superficies refractoras de una lente simple, sometidas a cambios de presión por un medio líquido contenido entre ellas; provocando la aparición de esfuerzos. Estos serán analizados mediante Análisis de Elementos Finitos (AEF) con el software de simulación Ansys, que es una Herramienta de Elementos Finitos (HEF) que consiste en la solución de las ecuaciones diferenciales que modelan al problema con sus condiciones iniciales (módulo elástico, coeficiente de Poisson, densidad, presión, radio y grosor) a través de procedimientos numéricos iterativos, para producir la solución del mismo. Los resultados del AEF se validarán por el modelo matemático de Sugiura que describe una lente adaptiva convergente en una ecuación donde relaciona la sagita de la lente (profundidad de la lente en su punto medio a la mitad de su grosor) con la presión del líquido ( $W$ ) y la fuerza de tensión que esta provoca.

#### 2.1.1 Sistema óptico

Un sistema óptico es el arreglo de *superficies reflectoras*<sup>8</sup> y/o refractoras, que tiene como función coleccionar y cambiar la forma de una porción del *frente de onda*<sup>9</sup> incidente, asignando una fase

---

<sup>8</sup> Las superficies reflectoras no permiten la propagación de los rayos de luz llegan a un cuerpo en el cual, salen desviados en otra dirección, es decir, se reflejan (Hecht, 2000).

<sup>9</sup> Frente de onda Mientras una perturbación viaja a lo largo de una dirección, se le puede asignar una fase correspondiente en cada punto en el espacio y en el tiempo. Las

correspondiente en cada punto en el espacio y en el tiempo, con la intención de formar la imagen de un objeto.

El grado de perfección alcanzable en la formación real de imágenes por el sistema óptico está limitado por la *difracción*<sup>10</sup>, a medida que la longitud de onda de la energía radiante disminuye en comparación con las dimensiones físicas del sistema óptico, los efectos de la difracción cobran menos importancia (Hecht, 2000).

El sistema óptico más utilizado es la lente (Malacara, 2004), por lo cual se mencionan sus características a continuación.

### **2.1.2 Lentes**

Una lente es un dispositivo refractor que reconfigura la distribución de la energía que pasa a través de ella, existen distintos criterios sobre la clasificación de las lentes; uno de ellos es por la cantidad de componentes y se dividen en (Hecht, 2000):

- Lente simple formada por un elemento (es decir, cuando tiene sólo dos superficies refractoras esféricas)
- Lente compuesta conformada de más de un elemento (es decir 3 o más superficies refractoras).

El tipo de lente simple es el más utilizado como sistema óptico por que las superficies son rotacionalmente simétricas alrededor de un

---

superficies que unen a todos los puntos de igual fase se conocen como frente de onda. (Hecht, 2000).

<sup>10</sup> Difracción es la desviación de la propagación rectilínea que ocurre cuando la luz avanza más allá de una obstrucción (Flores Cruz, 2004).

eje común y porque pueden adquirir las siguientes formas *asféricas*<sup>11</sup>  
(Ibídem):

- Lentes convexas, convergentes o positivas.
- Lentes cóncavas, divergentes o negativas.

### 2.1.2.1 Lentes convergentes

Las membranas elásticas funcionan como superficies de lentes convergentes que son más gruesas en el centro y tienden a disminuir el radio de curvatura de los frentes de onda, es decir, la onda se hace más convergente a medida que atraviesa la lente. (Ver Figuras 1 y 2).

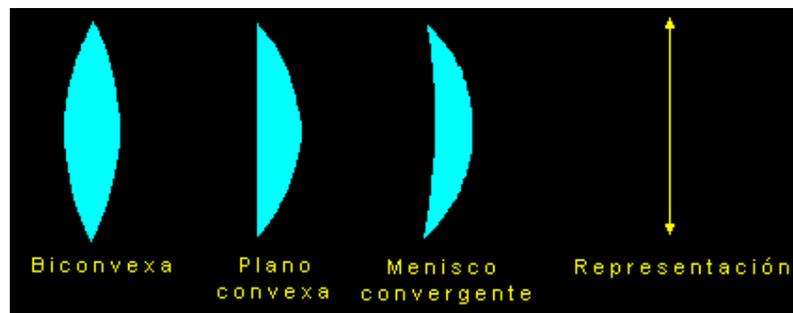


Figura 1. Las lentes convergentes son más gruesas en el centro que en el borde y los rayos de luz se concentran (hacen converger) en un punto (Educaplus, 2008).

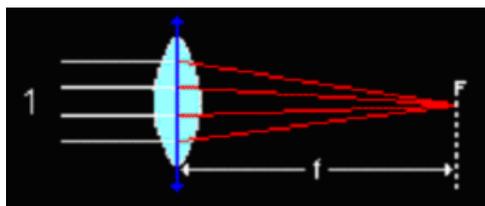


Figura 2. Las lentes convergentes tienen un punto situado sobre el eje llamado foco (F) en el que convergen los rayos que vienen

<sup>11</sup> Asférica es una superficie diferente a la esférica (Hecht, 2000).

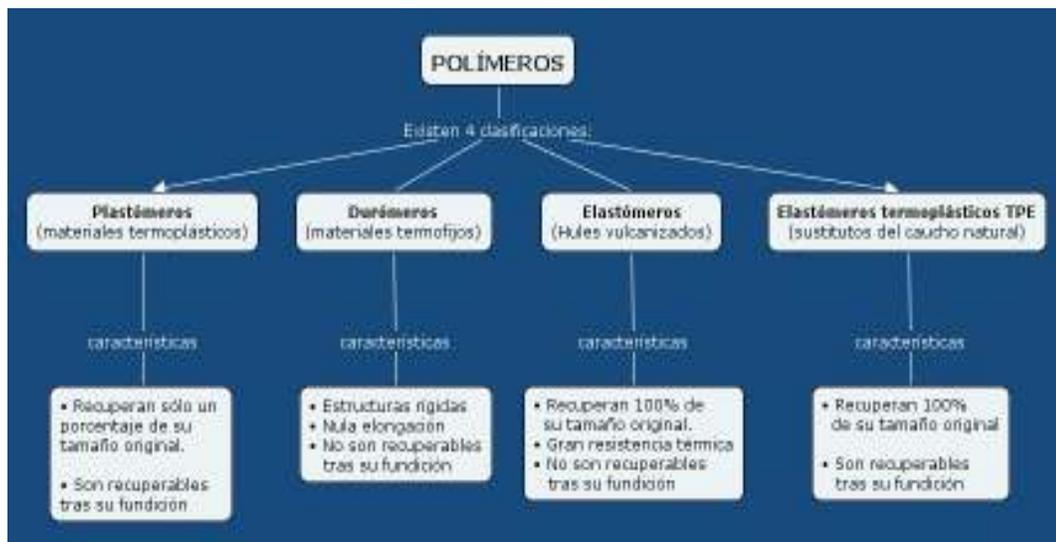
paralelos al eje óptico: a la separación entre el foco y la lente se conoce como distancia focal posterior ( $f$ ) (Educaplus, 2008).

Para describir el funcionamiento de la lente líquida con membranas elásticas como superficies refractoras, se requiere conocer sus características físicas y propiedades (ópticas y mecánicas). Estas propiedades se emplean para el análisis del comportamiento cuando son sometidas a una presión constante (Hecht, 2000).

### 2.1.3 Características y propiedades de las membranas elásticas

Las membranas elásticas están sujetas en sus bordes a una montura y sometidas a cambios de presión por el medio líquido contenido en esta, el cual deformará a la membrana modificando su curvatura y con ello los parámetros ópticos de la lente así formada; las membranas están elaboradas con PoliDiMetilSiloxane Sylgar 184 (PDMS Sylgar 184) pertenece a la familia de Elastómeros termoplásticos TPE (Ver cuadro 1) que proviene del polímero del Silicón que es el material elástico más activo y del que más aplicaciones se han reportado en la literatura.

Cuadro 1. Elastómeros termoplásticos TPE



Con las cuales se han diseñado y elaborado micro lentes que cambian su longitud focal al cambiar el volumen del medio liquido en ellas. El PDMS es un material que presenta las siguientes características (Santiago et al., 2008):

- Alta Transparencia
- Alta elongación
- Fácil manejo de preparación para una lente
- No toxico
- No reactivo con el medio ambiente
- Bajo costo

Por las características que presentan tiene las siguientes aplicaciones y usos industriales (Yoo, 2006):

a) Micro-moldes para realizar replicas de estructuras con formas complejas.

b) Micro-válvulas las cuales regulan el paso de un micro-fluido gracias a la excelente propiedad de sellado que presenta este tipo de material.

c) Hojas de membranas planas para protección de equipos o aislantes donde se requiere caracterizar las propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas.

d) Micro lentes las cuales cambian su longitud focal al cambiar el volumen del medio liquido contenido en ellas.

Tabla 1. Parámetros de membrana elástica PDMS elaborada del elastómero Silicón Sylgar 184.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Módulo Elástico	1.2 MPa ( MN/m <sup>2</sup> )
Coefficiente de Poisson	0.46
Módulo Cortante	411 KPa (KN/m <sup>2</sup> )
Densidad	9.82×10 <sup>-4</sup> gr/mm <sup>3</sup>
Límite de tracción	2.5 MPa (MN/m <sup>2</sup> )
Límite de compresión	
Límite Elástico	700KPa (KN/m <sup>2</sup> )
Conductividad Térmica	0.2 W/(m·K)
Coefficiente de expansión térmica	310µm/(m°C)

Los parámetros que la caracterizan se dividen en dos grupos: Parámetros estructurales y parámetros funcionales. En nuestro caso solo nos enfocaremos en la caracterización de los parámetros funcionales (parámetros físicos).

En la siguiente sección se presentan las propiedades mecánicas y ópticas exhibidas por las membranas elásticas de PDMS:

Las membranas de PDMS tienen parámetros funcionales (diámetro, espesor), propiedades mecánicas (módulo de Young, razón de Poisson) y propiedades ópticas (índice de refracción y sus coeficientes de absorción y transmisión para el rango visible), con los cuales se lleva a cabo la simulación con el software y la validación matemática con el modelo de Sugiura.

### 2.1.3.1 Propiedades Ópticas

Las propiedades ópticas son las que se relacionan con la interrelación entre un material y la radiación electromagnética en forma de ondas o partículas de energía, conocidas como fotones. Esta interacción produce una diversidad de efectos, como absorción, transmisión, reflexión y refracción de la luz (Flores Cruz, 2004).

La refracción ocurre cuando un haz de luz es transmitido provocando la polarización de electrones en el material y al interactuar con el material polarizado, pierde parte de su energía en consecuencia, cambia su velocidad y por ello, cambia de dirección (Ibídem).

La velocidad relativa de la luz que pasa a través de un medio se expresa por medio de una propiedad óptica llamada Índice de Refracción (n). El valor del índice de refracción se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío, (C) y la velocidad de la luz en el medio considerado, (v) (Hecht, 2000).

$$n = \frac{C}{v} \quad \dots (1)$$

El índice de refracción medido en la membrana PDMS es  $n = 1.4157 \pm 0.0001$  (Santiago et al., 2008).

La reflectividad (R) se define como la fracción de luz reflejada en una entrecara y está relacionada con el índice de refracción a través de la siguiente fórmula (Flores Cruz, 2004):

$$R = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad \dots (2)$$

La R para las membranas de PDMS es de 0.02961 (Santiago et al., 2008).

La absorción consiste en que una porción de un haz de luz<sup>12</sup> incidente que no es reflejada por el material; es absorbida o transmitida a través del mismo. La fracción de luz absorbida está relacionada con el tipo y el espesor del material; así como la forma en la cual los fotones interactúan con su estructura. La intensidad del haz, después de pasar a través del material, está dada por la siguiente expresión (Resnick, 2004):

$$I = I_0 \exp^{-mx} \dots (3)$$

Donde  $x$  es la trayectoria a través de la cual se mueven los fotones (el espesor del material),  $m$  es el coeficiente lineal de absorción del material para los fotones,  $I_0$  es la intensidad del haz, incidente en la superficie delantera, e  $I$  es la intensidad del haz cuando llega a la superficie posterior.

La absorción de la membrana de PDMS es de 0.04% aproximadamente (Santiago et al., 2008).

La transmisión es la fracción del haz que no ha sido reflejada ni absorbida, sino que se transmite a través del material. Podemos determinar la fracción del haz que se ha transmitido definido por la gráfica de la siguiente ecuación (Flores Cruz, 2004).

$$I_t = I_0(1-R)^2 \exp^{-mx} \dots (4)$$

---

<sup>12</sup> Haz de luz es un conjunto de rayos (un rayo es una trayectoria rectilínea imaginaria trazada por el espacio que describe de manera conveniente el movimiento de un *tren de ondas*, mas no constituye una entidad física) que parten desde un punto (Resnick, 2004).

Donde  $x$  es la trayectoria a través de la cual se mueven los fotones (el espesor del material),  $m$  es el coeficiente lineal de absorción del material para los fotones,  $I_0$  es la intensidad del haz, después de reflejarse en la superficie delantera,  $R$  es la reflectividad del material e  $I_t$  la transmisión.

La intensidad del haz transmitida dependerá de la longitud de onda de los fotones dentro del haz. Si sobre un material incide un haz de luz blanca y se absorben, se reflejan y se transmiten fracciones equivalentes de fotones con longitudes de onda diferentes, el haz transmitido también será de luz blanca. Pero, si los fotones de longitud de onda más larga son absorbidos en mayor proporción que los de longitud de onda más corta, la luz transmitida aparecerá del color de la longitud de onda corta cuya absorción haya sido menor (Resnick, 2004).

El índice de transmisión espectral de las membranas de PDMS es arriba del 90% en la región visible (Santiago et al., 2008).

#### **2.1.3.2 Propiedades Mecánicas**

Las propiedades mecánicas de los materiales son las características inherentes que permiten diferenciar un material de otros, desde el punto de vista del comportamiento mecánico de los materiales en ingeniería.

Odian (2001) menciona que hay que tener en cuenta el comportamiento que puede tener un material en los diferentes procesos que pueda tener. Entre estas características mecánicas destacan:

a) El límite elástico, también denominado esfuerzo de fluencia convencional, que se define como el esfuerzo máximo aplicado al material que no le permita recobrar toda la deformación ocasionada por la aplicación de una fuerza al momento de cesar (Piovan, 2008).

El límite elástico en las membranas PDMS es de 700 KPa ( $1 \times 10^3$  pascales) (Santiago et al., 2008).

b) El Módulo de elasticidad o módulo de Young se presenta cuando un material es linealmente elástico (relación lineal entre el esfuerzo y la deformación) y se describe mediante la ley de Hooke (Gere, 2006):

$$E = \sigma / \xi \quad \dots (5)$$

Donde, E es el módulo de elasticidad,  $\sigma$  es el esfuerzo o tensión y  $\xi$  es la deformación.

El valor del módulo de Young en las membranas PDMS es de 1.2 MPa ( $1 \times 10^6$  Pascales).

c) La razón de Poisson (o módulo de Poisson) es el cociente entre la deformación lateral y la deformación axial de un material (Gere, 2006).

$$v = (\text{deformación lateral} / \text{deformación axial}) \dots (6)$$

Donde v es la razón de Poisson, la deformación lateral es perpendicular a la dirección de la carga aplicada y la deformación axial es paralela a la dirección de la carga aplicada.

La razón de Poisson es de 0.46 para membranas de  $0.5 \times 10^{-3}$  m y  $1 \times 10^{-3}$  m de espesor con diámetro de  $20 \times 10^{-3}$  m (Santiago et al., 2008).

Las propiedades mecánicas de las membranas PDMS dependen de propiedades químicas que están presentes en el proceso de fabricación (Santiago et al., 2008) y se requieren para aplicarlas al software de simulación Ansys.

## **2.2 CAE - AEF - ANSYS**

Boon (1991) menciona que la manufactura, es un mecanismo para la transformación de materiales en artículos útiles para la sociedad, esto obliga a nuevos requerimientos en la industria sobre la utilización de nuevas técnicas en los procesos de fabricación y análisis, de esta manera se introdujo el CAE (Ingeniería Asistida por Computadora) por la necesidad de analizar, optimizar y evaluar productos de difícil complejidad.

Un factor predominante es el aumento de productividad y otros factores no menos importantes como la precisión, la rapidez y la flexibilidad.

Con lo anterior se utilizan nuevos sistemas como el CAD (Diseño Asistido por Computadora) que puede utilizarse para generar modelos con características de un determinado producto, almacenadas en dibujos 2D y 3D, una vez almacenados se pueden manipular o modificar con mayor facilidad para avanzar en el desarrollo del producto (Escalona, 2006).

Valentino (2005) menciona que cuando los sistemas CAD se conectan a equipos de fabricación también controlados por computadora conforman un sistema integrado CAD/CAM (Manufactura Asistida por Computadora) para automatizar las operaciones de maquinado, concretadas en las máquinas herramientas que producen las piezas y productos con notables niveles de rapidez y precisión.

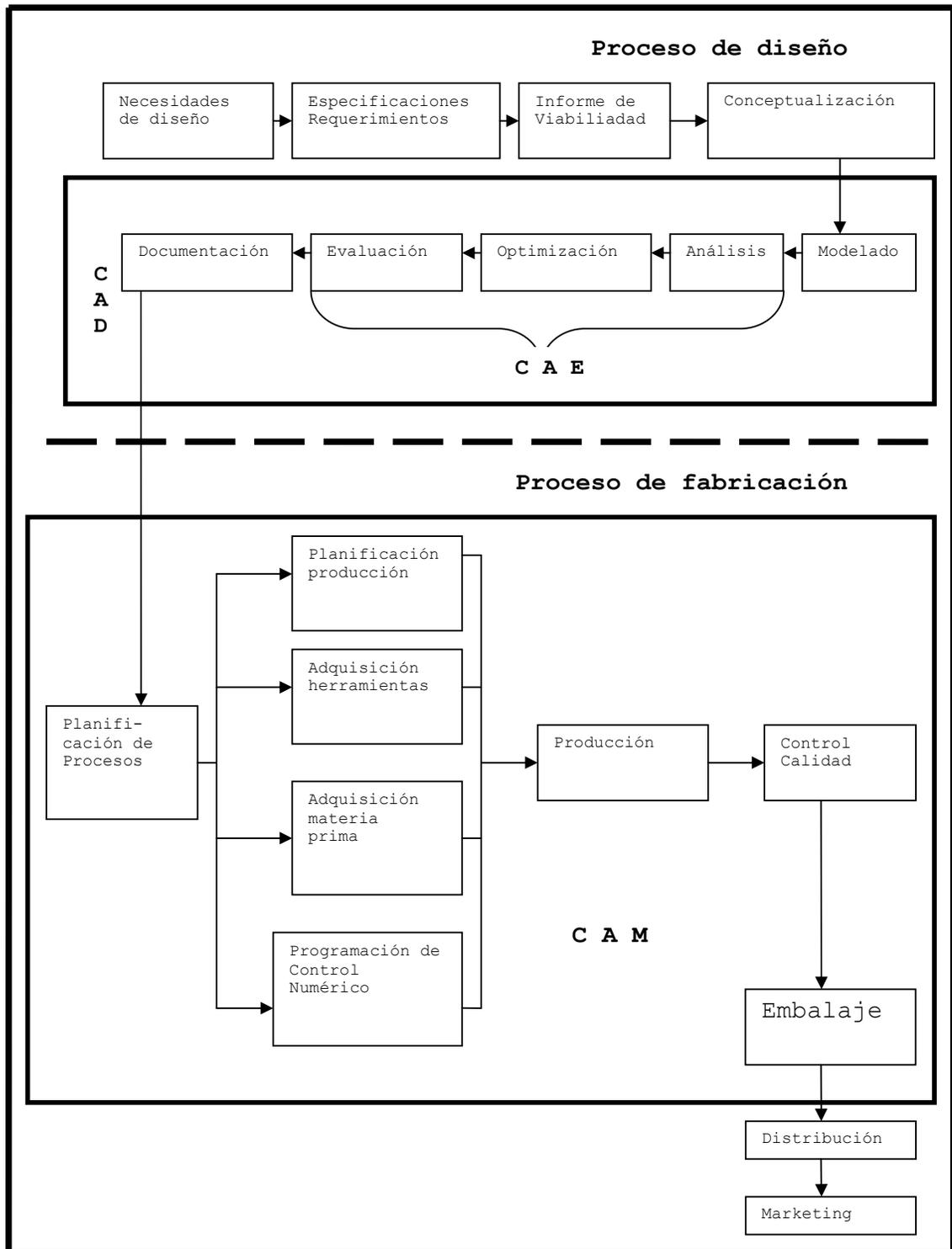
Los equipos CAM conllevan la eliminación de los errores del operador y la reducción de los costes de mano de obra.

El CAE crea el vínculo entre los sistemas CAD y CAM (Iturbide et al. 2008) (Ver Cuadro 1).

La ingeniería asistida por computadora (CAE) surgió del avance de la tecnología, destinada a favorecer a las industrias en el área de ingeniería para la optimización en el desarrollo del ciclo de vida de un producto a través de sus tres análisis (Lázaro, 2007):

- Cinemático
- De elementos finitos
- Maquinado por control numérico

Cuadro 2. CAE vinculación entre el CAD y CAM.



El Análisis de Elementos Finitos reproduce la realidad a partir de la solución numérica por medio de un ordenador, mediante expresiones matemáticas que describen dicha realidad, de forma eficiente y cómoda; a estos procesadores se les denomina herramientas de análisis por elementos finitos, o simplemente (HEF) (Ródenas, 2005).

El AEF es aplicado a una gran diversidad de software conocido como Herramienta de Análisis de Elementos Finitos (HEF), en los cuales cada uno tiene diferentes tipos de análisis, el Cuadro 3 muestra el software comerciales más destacados en el mercado (Iturbide et al. 2008):

Cuadro 3. HEF de CAE.

<b>Tipos de análisis</b>	<b>ADAMS</b>	<b>ANSYS</b>	<b>Pro/MECHANICA</b>	<b>DADS</b>	<b>FALANCS</b>	<b>FEMCOS</b>	<b>ALGOR</b>	<b>ADINA</b>	<b>FLUENT</b>	<b>CATIA/CADAM</b>	<b>LARSA</b>	<b>CADRE</b>	<b>COSMOS</b>	<b>ABAQUS</b>	<b>SYSNOISE</b>
Estático	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	
Dinámico	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	
Frecuencia		x				x		x		x	x	x	x	x	
Pandeo	x	x	x	x	x	x		x		x	x	x	x	x	
No linear		x	x	x	x	x	x	x		x			x	x	
Fatiga	x	x	x		x	x				x			x		
Optimización de forma			x		x					x			x		
Electromagnético		x								x			x		
Mecánica de fluidos		x					x	x	x				x	x	
Desplazamientos	x	x	x		x	x				x		x	x		
Térmico	x	x	x			x		x		x			x		
Termoeléctrico										x				x	
Esfuerzos geoestáticos											x	x		x	
Transferencia de calor	x	x			x	x	x		x	x			x	x	
Difusión de masa														x	
Respuesta elástica y viscoplástica								x						x	
Simulador de eventos mecánicos	x	x	x	x	x		x							x	
Simulador de instalaciones							x		x	x					
Creep								x							
Electroestático							x	x							
Simulador de elementos a presión							x								
Vibraciones	x	x	x		x	x		x		x		x			x
Acústico		x						x		x					x
Inyección de plásticos											x				
Impacto	x	x	x		x					x		x			
sísmico											x	x			

De los cuales el tipo estático es utilizado para el análisis estructura. Para el caso de las membranas se utilizo el software comercial ANSYS es una HEF (Prieto López, 1998) que se emplea para el estudio de simulación de las membranas elásticas. La simulación es tan exacta, como las ecuaciones de partida y la capacidad de ANSYS para resolverlas, lo cual fija límites a su utilización (Huebner, 1995).

### **2.2.1 CAE**

Lázaro (2004) define a la Ingeniería asistida por computadora o por ordenador (CAE, del inglés Computer Aided Engineering) es el conjunto de herramientas informáticas que permiten analizar y simular características y propiedades de los procesos físicos en el área de ingeniería, con la finalidad de optimizar la solución al reducir al máximo las pruebas para la obtención del análisis deseado, destacando las siguientes características (Iturbide et al., 2008):

- o Construir, manipular y visualizar modelos geométricos.
- o Estudiar y analizar problemas geométricos, cinemáticos y dinámicos.
- o Identificar en una fase temprana posibles fallos, provocando bajo coste en el rediseño, mayor calidad productos.
- o Simular modelos permite bajo coste de prototipos, menor tiempo de salida al mercado.
- o Mayor productividad, flexibilidad e innovación.

Con estas características, ha permitido una gran diversidad de aplicaciones, algunas de las principales son (Lázaro, 2004):

- Cálculo de propiedades físicas: volumen, masa, centro de gravedad, momentos de inercia, etc.

- Análisis tensional, cálculo mecánico y estructural: lineal y no lineal.
- Simulación del proceso de inyección de un molde: análisis dinámico y térmico del fluido inyectado (inyección virtual).
- Simulación de procesos de fabricación: mecanizado, conformado de chapas metálicas, soldaduras, análisis de fijaciones, etc. (fabricación virtual).

La simulación en la Ingeniería Industrial permite optimizar los recursos (tiempo, materiales, personal, costos, etc.) y la solución a los problemas también es optimizada ya que el software utiliza procedimientos numéricos que permiten que la solución tenga una convergencia rápida y exacta.

CAE permite el desarrollo de un producto, el descubrimiento de fallas en el diseño para mejorar la calidad y cualidades del producto. Esta ventaja es importante en el sector industrial (ibídem).

La CAE esta constituida por tres módulos, para ser aplicados a la diversidad de procesos físicos (Lázaro, 2008):

- Análisis cinemático.
- Análisis por el método de elementos finitos (AEF).
- Maquinado por control numérico CNC (Computered Numeric Control).

El AEF es el módulo más aplicado en la ingeniería para procesos de análisis a causa del advenimiento del procesamiento por computadora con su superior potencia de cálculo, ha revolucionado la forma de análisis, haciendo que se extienda el uso de los métodos numéricos (Huebner, 1995).

### **2.2.2 Análisis de Elemento Finito (AEF)**

El análisis de elemento finito es un método numérico, que surgió en la década de los 60's, desde entonces a la fecha ha pasado de ser una herramienta novedosa a una herramienta necesaria tanto a nivel académico como industrial. Se ha aplicado en casi todos los campos del saber con éxito sobre todo en el campo de la ingeniería, debido al surgimiento de computadoras más rápidas y con mayor capacidad de almacenamiento y manejos de datos, aunado al desarrollo de programas especializados (Guerrero, 2000).

El AEF se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales (condiciones de trabajo) que caracterizan el comportamiento físico del problema, en una serie de bloques no intersectantes entre sí llamados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio denominada discretización, dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos citados como nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. Al conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se le llama malla (Guerrero, 2000).

El AEF consiste en la resolución de las ecuaciones diferenciales que modelan el problema mediante procedimientos numéricos iterativos, esta técnica es muy utilizada en el ámbito de la ingeniería, debido a que es posible modelar algún problema físico de forma discreta, tomando en cuenta las propiedades físicas de los materiales empleados, los elementos del entorno de la vecindad, las condiciones de contorno y las fuentes generadoras de campos (Huebner, 1995).

Para la correcta solución de un problema de AEF se siguen los siguientes pasos (Iturbide et al., 2008):

1. El objeto a analizar se divide, mediante líneas o superficies imaginarias en un número de elementos finitos. Esta parte del proceso se desarrolla habitualmente mediante algoritmos incorporados a programas informáticos de mallado durante la etapa de preproceso.
2. Los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos o "nodos", situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos son fundamentales para el problema.
3. El conjunto de funciones que definen de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada "elemento finito" esta en función de los desplazamientos nodales de dicho elemento.
4. Estas funciones de desplazamientos definirán entonces de manera única el estado de deformación del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las propiedades constitutivas del material, definirán a su vez el estado de tensiones en todo el elemento, y por consiguiente en sus contornos.
5. Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, tal que equilibre las tensiones en el contorno y cualesquiera cargas repartidas, resultando así una relación entre fuerzas y desplazamientos.
6. La resolución del sistema anterior permite obtener los desplazamientos en los nodos y con ellos definir de manera aproximada el campo de desplazamientos en el elemento finito.
7. En la etapa de postproceso se presentan los resultados, generalmente de forma gráfica para su análisis.

El análisis tiene tres perspectivas diferentes (Huebner, 1995):

- a) Discretización.
- b) Interpolación.
- c) Utilización de métodos numéricos.

Mediante métodos numéricos es posible generar sólidos de aspectos casi reales, comprobar su comportamiento bajo diversas condiciones de trabajo, esto permite un conocimiento profundo de un producto antes de que éste exista físicamente, siendo posible detectar problemas que de otro modo se hubieran detectado posteriormente en el producto real (Ródenas, 2005). Es decir, hablando en términos de ingeniería industrial, los tiempos de diseño del producto se acortan, lo cual muestra la ventaja de utilizar un software para hacer la simulación; es bien sabido en la ingeniería industrial que la etapa de diseño de los productos es la que mas tiempo consume, pero en la que se pueden hacer cambios que implican menos costos a largo plazo.

### **2.2.3 Ansys**

Ansys fundado en 1970 (A. I. Olivia et al., 2003), actualmente se desarrolla a nivel mundial para el análisis de ingeniería de software utilizado por ingenieros y diseñadores en una amplia gama de industrias; como menciona Samsung (2007) Ansys simula de forma realista y eficiente las condiciones del objeto bajo estudio que necesita menos prototipos y ensayos para la solución, lo que redundo la reducción del tiempo de análisis, lo cual es uno de los principales objetivos de la Ingeniería Industrial.

Se centra en el desarrollo de soluciones abiertas y flexibles que permiten a los usuarios analizar diseños directamente en el

escritorio, proporcionando una plataforma común para una rápida, eficiente y consciente solución (Lázaro, 2005).

Ansys es una Herramienta de Elemento Finito que permite aplicarse a un problema físico específico, éste software ayuda a obtener importantes ventajas de la tecnología de análisis en el proceso de desarrollo de un producto, por medio de una gama completa de soluciones (ver Figura 3) para sistemas de ingeniería, especialmente los adaptados a satisfacer las necesidades del sector industrial (ANSYS Inc., 2008).

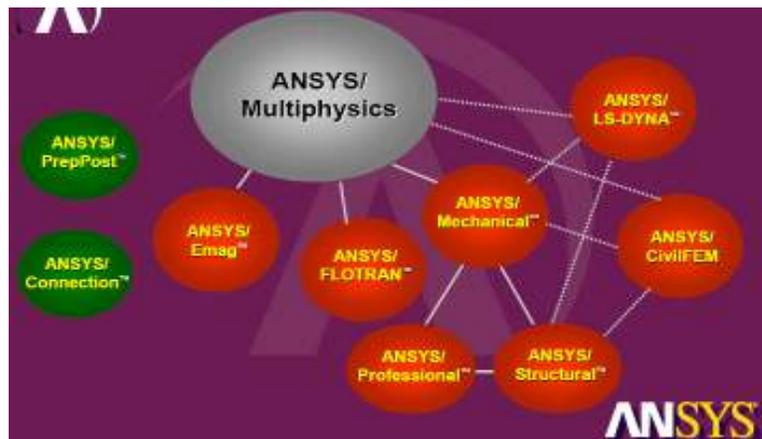


Figura 3. Familia de productos ANSYS (ANSYS Inc., 2008).

Para las membranas elásticas de PDMS que funcionan como superficies refractoras de sistemas ópticos se analizara en el módulo estructural que se define como (Russel, 1997): Un conjunto de elementos con forma geométrica que, unidos entre sí por medio de nodos, soportan cargas que son transmitidas a sus apoyos a través de los elementos estructurales que la integran.

Por lo cual el análisis estructural se define como la predicción del comportamiento de una estructura bajo cargas prescritas y otros efectos externos (Kassimali, 2001).

Por lo cual el análisis estructural es una de las partes mas importantes para el desarrollo de cualquier proyecto de ingeniería, siendo su función la de predecir que sucederá con el objeto de acuerdo con características y condiciones específicas del objeto.

A demás tienen un comportamiento isotrópico<sup>13</sup> es decir la magnitud de la presión se considero igual en toda la membrana, además tiene un comportamiento no lineal, el material es hiperelástico ortótropo,<sup>14</sup> es decir tiene un alto modulo de elasticidad respecto a otros materiales elásticos y la presión se aplica en la misma dirección en toda la membrana (ANSYS Inc., 2008).

Partiendo de dicho modelo se realizará el análisis a fin de obtener mapas de esfuerzos así como los desplazamientos máximos, espesor de la membrana y la geometría final después de aplicarse una presión.

Sugiura (1993) planteó un modelo matemático para obtener el desplazamiento máximo a partir de un esfuerzo en un punto ( $r$ ) menor o igual al radio ( $a$ ); aplicando dicho modelo al problema particular del objeto de la tesis, se pueden determinar las deformaciones de las membranas; por lo tanto en el siguiente apartado se explica en qué consiste este modelo matemático.

---

13 Isotropico (del gr. isos, igual + tropas, manera) se aplica al cuerpo o medio que transmite la acción recibida de la misma forma en cualquier punto de su masa (Larousse, 2008).

14 Hiperelasticidad ortótropa es la característica de un material completamente elástico en la misma dirección (Enciclopedia Visual, 2000).

### 2.3 Modelo matemático Sugiura

Knollman (1970) desarrolló una lente hidroacústica donde al variar el volumen del líquido contenido entre dos membranas, observó que éstas adquieren la forma de una curva paraboloidal, logrando con ello producir una lente biconvexa como se puede ver en la Figura 4.

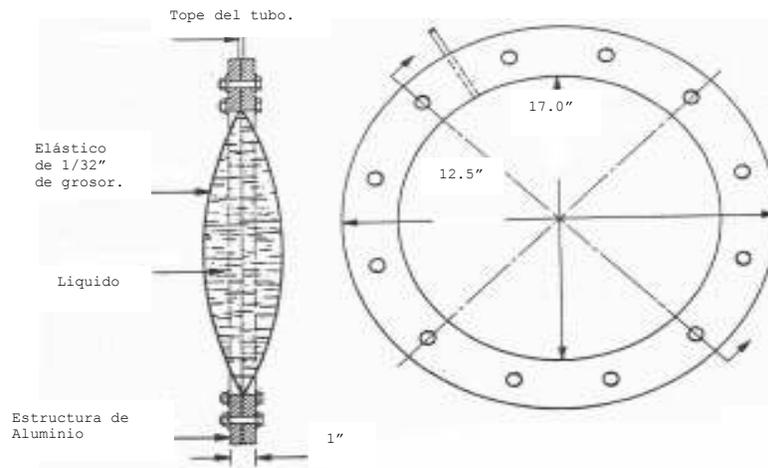


Figura 4. La lente hidroacústica desarrollada por Knollman en 1970 (Sugiura, 1993).

Sugiura (1993), posteriormente realizó una lente líquida adaptiva en la cual desprecia el grosor de la membrana, comprobó que al variar el volumen del líquido en una lente formada de una superficie plana de vidrio y una membrana elástica, la lente toma la forma plano-convexa (curva paraboloidal) (Ver Figura 5) y observó que es simétrica al eje óptico.

Al introducir a presión constante el líquido (W) (Ver Figura 6), la lente elástica va tomando una forma curva y al llegar a presiones mayores en posición vertical, el efecto de la gravedad de la lente es máxima.

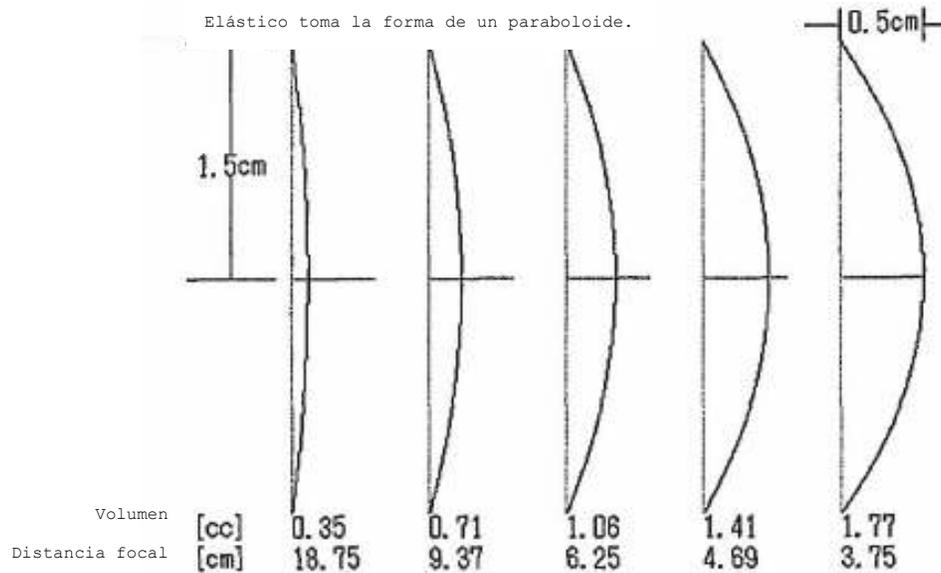


Figura 5. Sugiura (1993) comprueba la forma paraboloide de las superficies al ser llenadas de líquido.

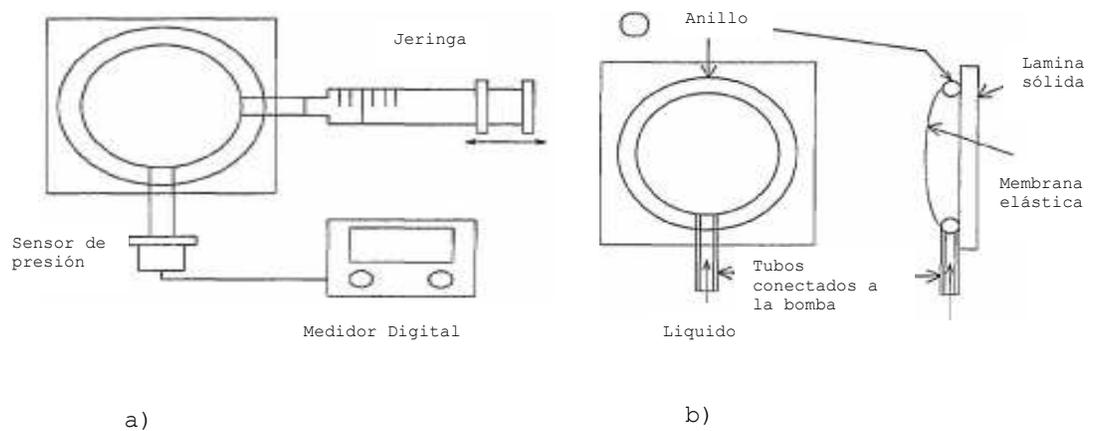


Figura 6. Sugiura (1993) a) introduce líquido y registra su presión constante. b) La lente elástica, toma la forma planoconvexa, prensada en el contorno por una lámina sólida.

Sugiura (1993) relacionó la sagita de la lente (profundidad de la lente en su punto medio a la mitad de su grosor) con la variable  $k$

que depende de la presión del líquido (W), la densidad del líquido ( $\rho$ ) y la gravedad (g) (ver ecuación 7).

$$K = W / (2gp) \dots \text{Ecuación (7)}$$

En la figura 7 se observa que para  $k = 1$  no coincide el centro de la deformación máxima con el vértice de la superficie, cuando  $k = 10$  la imagen muestra una pequeña deformación y hacia  $k = 30$  no se distingue ninguna deformación en la imagen.

Sugiura (1993) determino que el efecto de la gravedad es independiente de las propiedades elásticas de la lente, para valores de  $k$  mayores de 30. (Ver figura 7) es decir que cuando la presión del líquido es 30 veces mayor que la presión de la gravedad sobre las membranas, esta no influye en su desplazamiento ni en la forma de la lente.

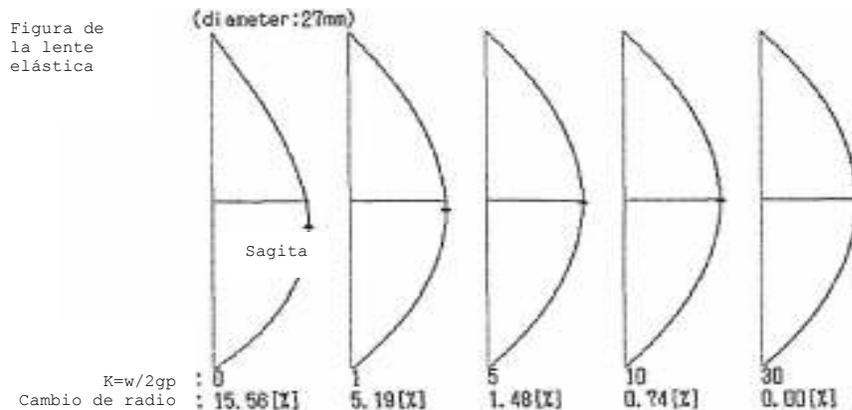


Figura 7. Sugiura (1993) determinó que en la zona central de la membrana es aproximadamente una esfera y que el efecto de la gravedad es despreciable para valores de  $k$  mayores a 30.

Sugiura obtuvo la siguiente ecuación de equilibrio:

$$Z = (W/4T) (a^2 - r^2) \quad \dots \text{Ecuación 8}$$

Donde

Z= Es la sagita (Punto medio de la lente).

T = Esfuerzo.

a = radio de la lente.

r = radio en un punto de análisis donde  $r < a$

W = es la presión.

Con la ecuación 8 se puede obtener el desplazamiento de la sagita Z en un punto de análisis (r) respecto al radio total (a).

## Capítulo 3. Metodología

### 3.1 Diseño de la investigación

Creswell (2005) define un experimento como una situación de control en la cual se manipulan de manera intencional, una o más variables independientes (causas) para analizar consecuencias de tal manipulación sobre una o más variables dependientes (efectos).

Kuehl (2003) puntualiza a las variables como un tipo específico de tratamiento<sup>15</sup> (temperatura, humedad, presión, etc.) y se clasifican en:

- Cuantitativas que son aquellas cuyos niveles pueden asociarse con punto en una escala numérica.
- Cualitativas que sus niveles no pueden ordenarse por magnitud.

Cada variable tiene diversas categorías conocidas como niveles y éstas tiene un número determinado de observaciones, conocidas como réplicas que implica una repetición independiente del experimento básico (Ibídem).

Hernández (2006) propone dos tipos de diseño para la investigación:

- No experimental
- Experimental

---

<sup>15</sup> Tratamiento son variables creadas para el experimento, en respuesta a la hipótesis de investigación (Kuehl, 2003)

Cuando los datos se van a coleccionar en forma directa (mediante el trabajo del investigador) da lugar a un diseño experimental, para la presente investigación los datos son obtenidos de forma directa.

Los diseños de experimento se clasifican en (Ibídem):

- Preexperimentos
- Cuasi-experimento
- Experimentos puros

De los cuales el cuasi-experimento manipula deliberadamente al menos una variable independiente para observar su efecto y relación con una o más variables dependientes, la limitación radica en no poder generalizar los resultados, por lo que su validez se reduce al objeto de estudio (Sabino, 1996).

### **3.1.1 Designación de las variables**

Montgomery (2006) propone que las variables para probar la hipótesis de una investigación se deben clasificar en dos categorías:

a) Variables potenciales de diseño.

- Variables de Diseño, son las que se seleccionan para estudiarlas en el experimento.
- Variables constantes, son variables que pueden tener cierto efecto sobre la variable de respuesta pero que para los fines del experimento no son de interés por lo que se mantiene fijos en un nivel específico.

- Variables a los que se permite variar, son aquellos Variables que tienen efectos sobre la variable de respuesta.

b) Variables perturbadoras

- Variables controlables, es aquella cuyo nivel puede ser ajustado por el experimentador.
- Variables no controlables, es aquella Variable que varia de manera natural.

A partir de ésta clasificación de las variables para probar una hipótesis, se aplico a las membranas PDMS según las características que tiene cada una.

Tabla 2. Variables del cuasi-experimento de las membranas PDMS.

<b>Variab de Dise</b>	<b>Variab constan</b>	<b>Variab a las q se permit cambiar</b>	<b>Variab control</b>	<b>Variab no control</b>
Presión del líquido.	Características físicas.	Capacidad de Hardware.	Destreza para realizar el modelo determinístico.	Condiciones ambientales.
	Propiedades Mecánicas.			
	Propiedades ópticas.			
	Propiedades químicas.			
	Elemento Finito.			

### 3.1.2 Elección de niveles

Montgomery (2006) propone que la elección de los niveles se lleva a cabo por medio del conocimiento del proceso que incluye la experiencia práctica y conocimientos teóricos (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Elección de niveles

Investigador	Presión de líquido Kilo Pascales (KP)
Santiago et al. (2008)	13.3, 26.7, 45.3
Mendoza (2008)	13.3, 26.7, 45.3

El factor de la presión se realizará en tres niveles: 1.33, 2.67, 4.53 sin réplica, porque el análisis se basa en el método iterativo que es de igual para cualquier magnitud de presión y en las propiedades mecánicas de la membrana PDMS, si éstas no se cambian los resultados siempre serán los mismos.

### 3.1.3 Elección de la variable de respuesta

Montgomery (2006) sugiere que para seleccionar la variable de respuesta, se debe tener la certeza de que la variable proporciona información útil acerca del objeto de estudio, de esta forma se seleccionó la deformación de la membrana PDMS, porque este parámetro es provocado por la magnitud del esfuerzo inducido en ésta.

### 3.1.4 Elección del diseño experimental

Existe una variedad de métodos para realizar y analizar los esfuerzos en una membrana elástica como la Técnica de Fotoelasticidad, la Teoría Elástica, modelos matemáticos y CAE; se eligió esta última en el módulo de AEF mediante Ansys por las ventajas que presenta respecto a los otros análisis:

- El AEF es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones) (Guerrero, 2000).
- AEF es adaptable a varios problemas (estructural, transmisión del calor, electromagnetismo, cálculo de estructuras, etc). Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de algunos problemas (Huebner, 1995).
- El AEF se convierte en la única alternativa práctica de cálculo (Guerrero, 2000).
- Una importante propiedad del AEF es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones (Huebner, 1995).
- AEF se programa en un software para calcular deformaciones y tensiones respectivamente (Huebner, 1995).
- Esta técnica tiene un bajo costo a largo plazo porque se encuentra automatizada en las herramientas software comerciales, llamadas herramientas de análisis por elementos finitos para problemas físicos tanto de propósito general, como aplicadas a problemas físicos particulares (ANSYS Inc., 2008).
- La resolución de las ecuaciones diferenciales que modelan un problema físico son de gran complejidad (Guerrero, 2000).

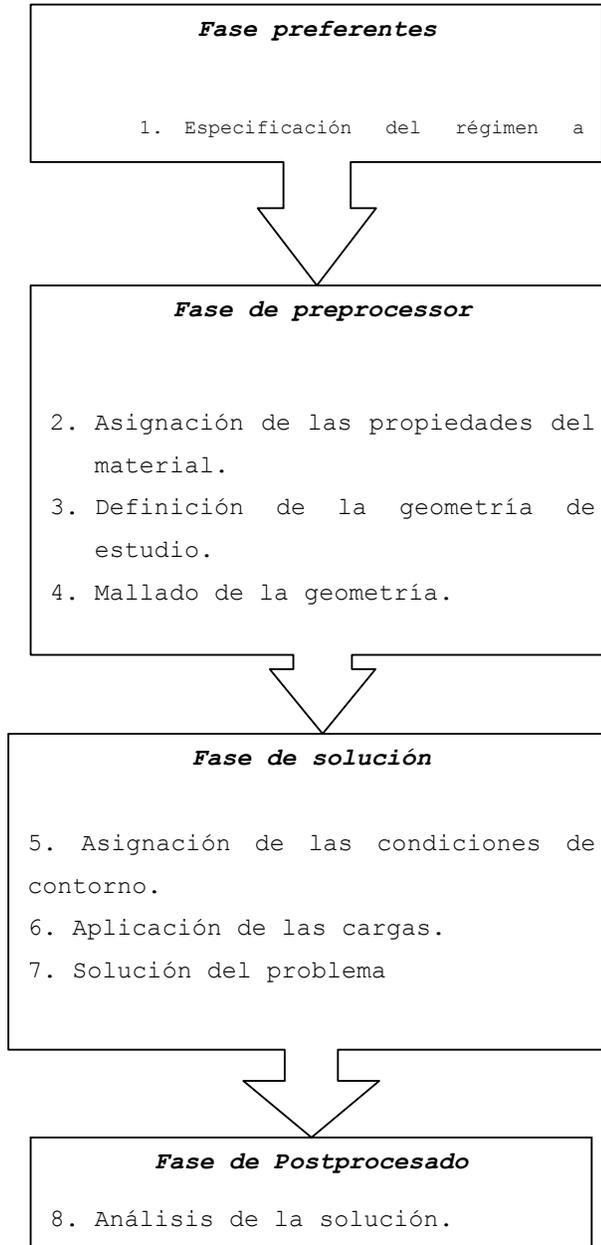
- La implementación de Ansys tiene desarrollo virtual que permite ahorrar dinero y tiempo (Samsung, 2007).
- Ansys garantiza que el diseño cumpla con los requerimientos del cliente para el diseño y la calidad (Ferit, 2008).
- ANSYS diseña, desarrolla y realiza el soporte de las soluciones que ofrece para la simulación de todo el ciclo de desarrollo del producto de forma realista y eficiente, cubriendo un amplio abanico de sectores industriales (Samsung, 2007).
- ANSYS colabora en la consecución de mayor calidad, porque necesita menos prototipos y ensayos para la solución (Ferit, 2008).

### **3.2 Desarrollo AEF mediante Ansys**

La técnica de AEF divide la geometría de la membrana en pequeños elementos en los cuales se resuelven las ecuaciones diferenciales correspondientes a un campo estructural de forma discreta, teniendo en cuenta las propiedades del material, las condiciones de contorno y las fuentes generadoras de campo. La solución de estas ecuaciones es de forma discreta y se realiza de forma iterativa hasta que se alcanza convergencia en la solución (Huebner, 1995).

La solución mediante AEF a través Ansys abarca cuatro fases (menús principales), donde cada una tiene los siguientes comandos para realizar el proceso de simulación (Ibídem):

**Cuadro 4. Metodología ANSYS**



A continuación se desglosan estos pasos para la membrana PDMS.

Se selecciona del menú principal de Ansys el comando *Preferentes* al activarlo aparece la ventana *Preferentes For GUI Filtering* para especificar el sistema a estudiar.

### 3.2.1 Especificación del régimen a estudiar

Al activar el comando *Preferentes For GUI Filtering* aparece la gama que Ansys proporciona para la solución de un problema, se especifica el módulo Estructural para el estudio de las membranas PDMS porque éstas son una estructura geométrica delimitada con parámetros físicos y mecánicos. Automáticamente se define el método iterativo para la solución (Ver Figura 8).

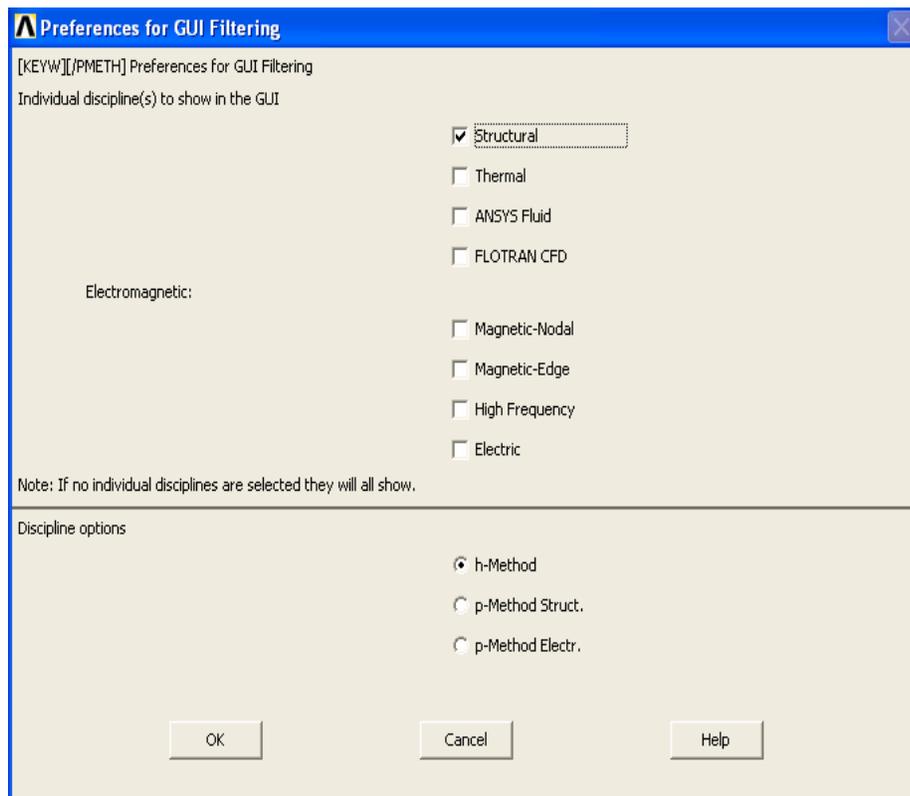


Figura 8. Ventana de módulos Ansys para seleccionar el régimen Estructural para las membranas PDMS y el método iterativo de la solución.

Posteriormente se selecciona del menú principal *preprocessor* el comando *Library of Element Types* donde se elige el tipo de elemento finito, según las características del material, se eligió el elemento SHELL 181 (Ver Figura 9) porque se acopla adecuadamente a las membranas elásticas con las siguientes características:

- SHELL181 es adecuado para el estudio de elasticidad, con seis grados de libertad en cada nodo: X, Y y Z direcciones y las rotaciones sobre los X, Y y Z ejes.
- Es apropiado para el análisis de gran tensión en aplicaciones no lineales.
- Cambio en el espesor se contabilizan en análisis no lineal.
- Analiza los efectos de la distribución de presiones.
- El elemento es isotrópico y las propiedades elásticas como el modulo de elástico y coeficiente de Poisson son datos de entrada para el análisis.

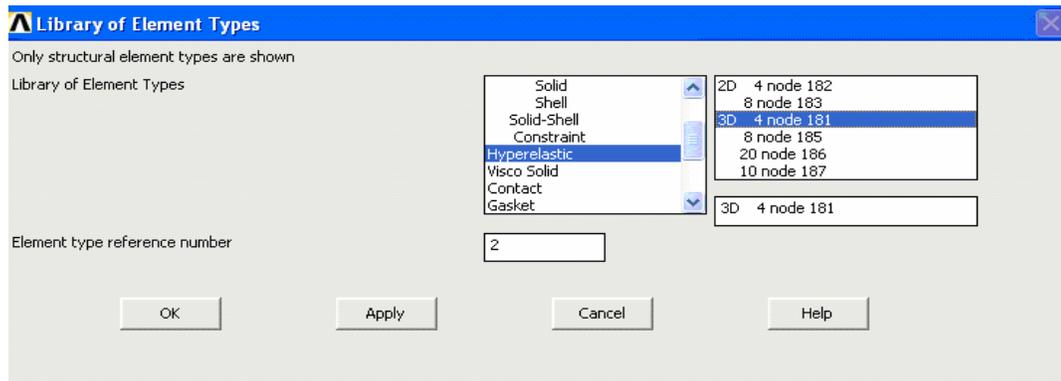


Figura 9. Librería de elementos Ansys, seleccionando al Elemento Shell 181.

Carrascal (2007) menciona las ventajas que tiene el Elemento Shell 181:

- Permite el mallado automático de cualquier superficie (con doble curvatura, etc.).
- Representa adecuadamente un estado tensional, más acorde con el comportamiento real de la malla.
- Utiliza una formulación consistente para grandes deformaciones.
- Análisis no lineal del cambio en el grosor.

Al establecer el elemento *Shell 181* aparece su ventana para definir las constantes reales; como el espesor de la membrana PDMS de  $0.5 \times 10^{-3}$  m, (.5mm) (Ver figura 10) como es igual para toda la membrana entonces solo escribe ese valor en TK(I).

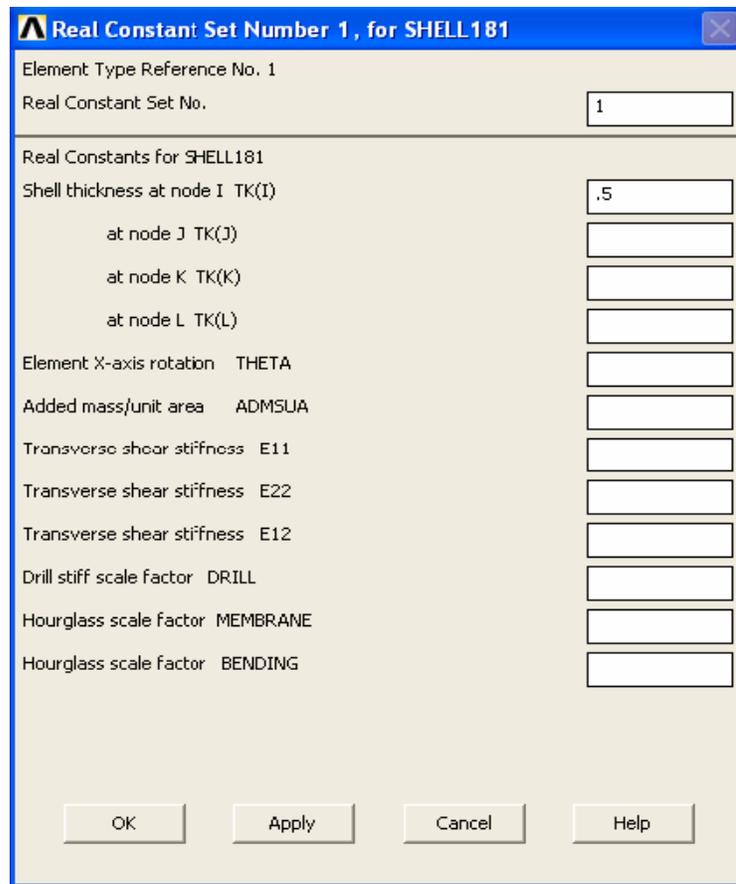


Figura 10. Ventana del Elemento Shell 181 espesor en mm.

Posteriormente del menú principal se selecciona *Preprocessor* que despliega el comando *Define el Material Model Behavior* para definir el material.

### 3.2.2. Asignación de las propiedades del material.

Al activar el comando aparece la ventana donde se definen las características de las membranas PDMS como la densidad y el comportamiento isotrópico que se encuentran dentro del módulo estructural (Ver Figura 11).

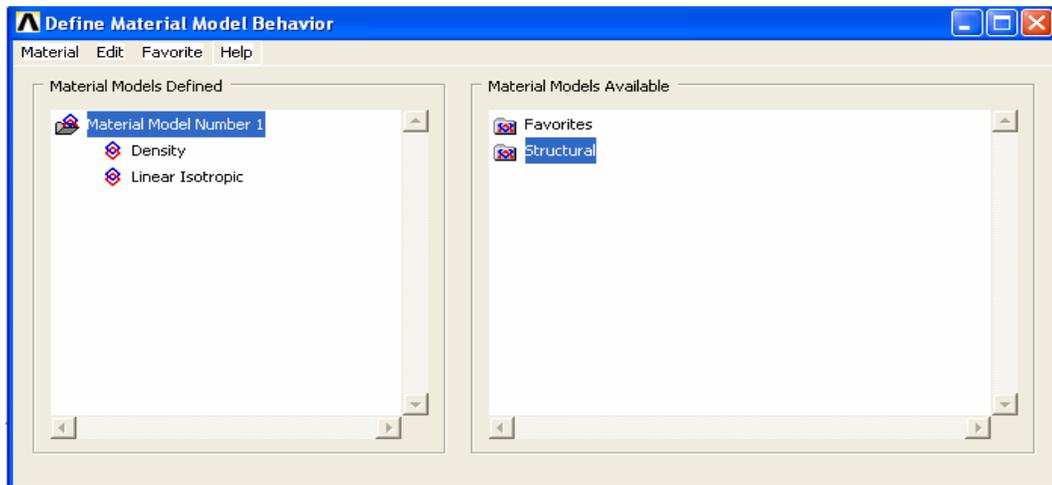


Figura 11. Librería para definir las características del material para la membrana PDMS.

Al activar cada característica aparece la ventana respectiva, como el caso de la densidad, para las membranas PDMS es de  $984 \text{ Kg/m}^3$  ( $.000984 \text{ gr/mm}^3$ ) ver Figura 12

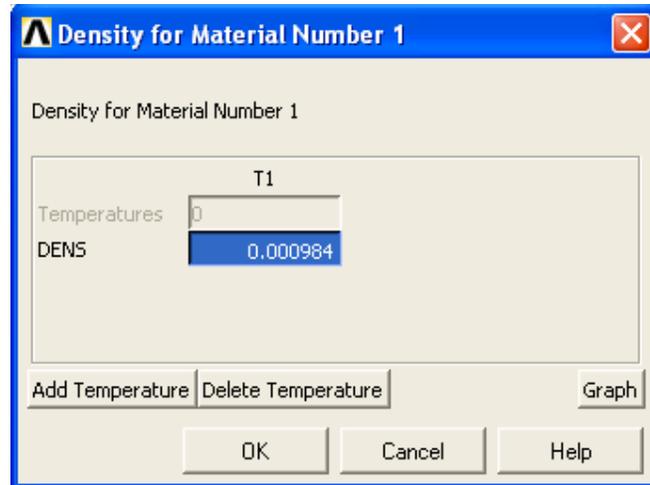


Figura 12. Ventana Ansys para definir la densidad del material.

En el comportamiento isotrópico se necesita el módulo Elástico (EX) de las membranas PDMS el cual es de  $1.2 \times 10^6$  Pascales y el coeficiente de Poisson (PRXY)=0.46 (Ver figura 13)

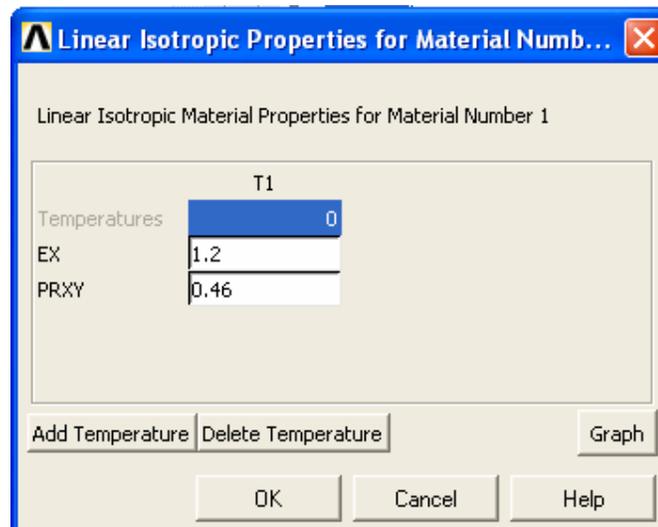


Figura 13. Ventana Ansys para definir el módulo elástico ( $\text{N/mm}^2$ ) y el coeficiente de Poisson.

Al definir las propiedades del material se necesita la forma geométrica para ser analizada.

### 3.2.3. Definición de la geometría de estudio

Del menú principal se elige *Preprocessor* posteriormente el comando *Modeling/ Create Areas*, para elegir el área circular *Area by dimensions*. Al ejecutarlo aparece la ventana característica, que pide un radio, para el caso particular de las membranas PDMS es de 10mm (Ver Figura 14).

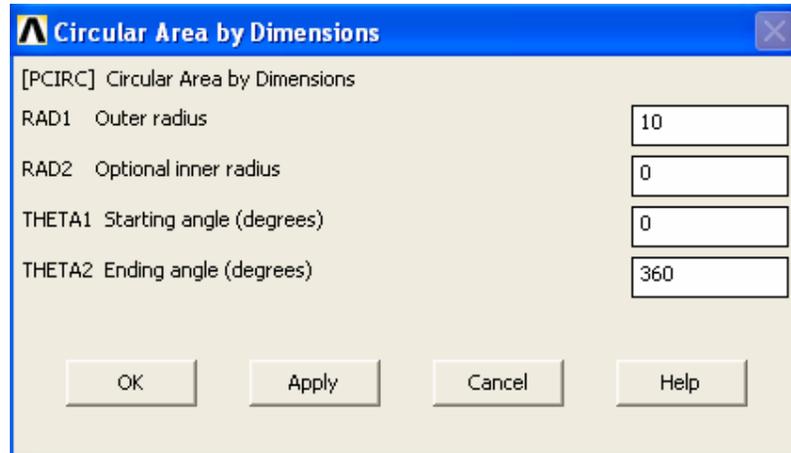


Figura 14. Ventana para definir el área del círculo con un radio de 10mm.

Al ejecutar la ventana aparece el área circular a la que se le aplica el mallado (Ver Figura 15).

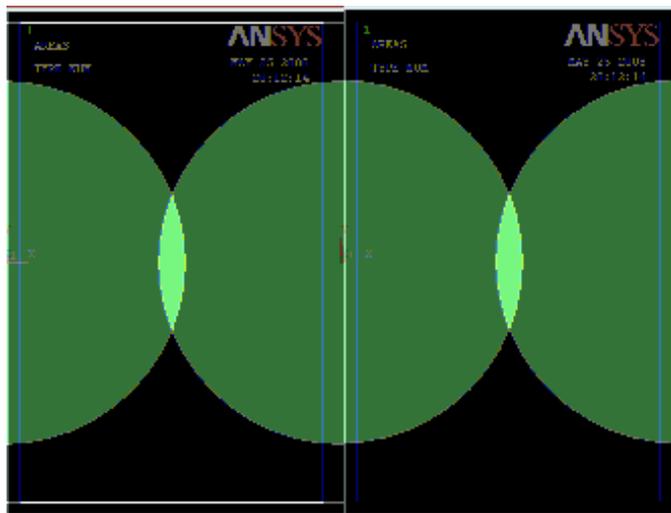


Figura 15. Área de la membrana PDMS con radio de .01m y espesor  $0.5 \times 10^{-3}$  m.

Al estar el área, se requiere realizar un mallado adecuado para el análisis de esta.

#### 3.2.4. Mallado de la geometría

Ansys (2008) sugiere que el mallado del área circular de la membrana sea de forma triangular porque se logro el mallado del contorno circular como se propone en la Figura 16. Por lo cual se activa el comando *Mesh Tool* de menú *preprocessor* que se encuentra en el menú principal para proponer el mallado triangular.

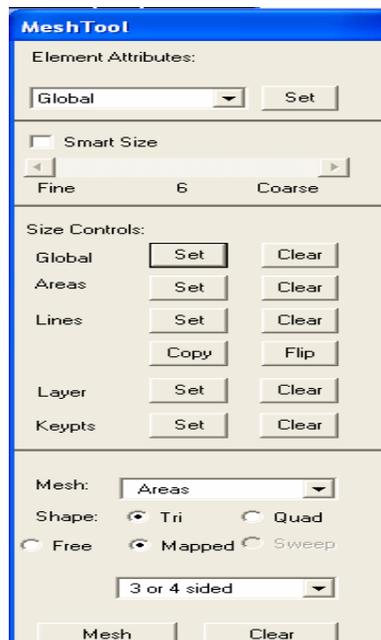


Figura 16. EL mallado es triangular de la membrana PDMS.

A si como se requiere la medida del mallado y se eligieron 20 divisiones para obtener la división del diámetro de .02m (20 mm), y obtener un mallado simétrico que facilite el análisis como se muestra en la Figura 17.

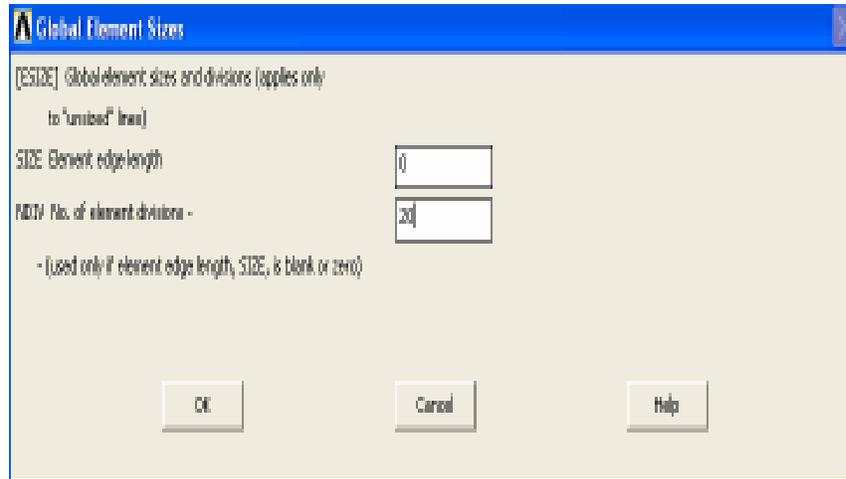


Figura 17. 20 divisiones del mallado de la membrana PDMS.

Al ejecutar la ventana se obtiene el mallado automáticamente  
(Ver figura 18)

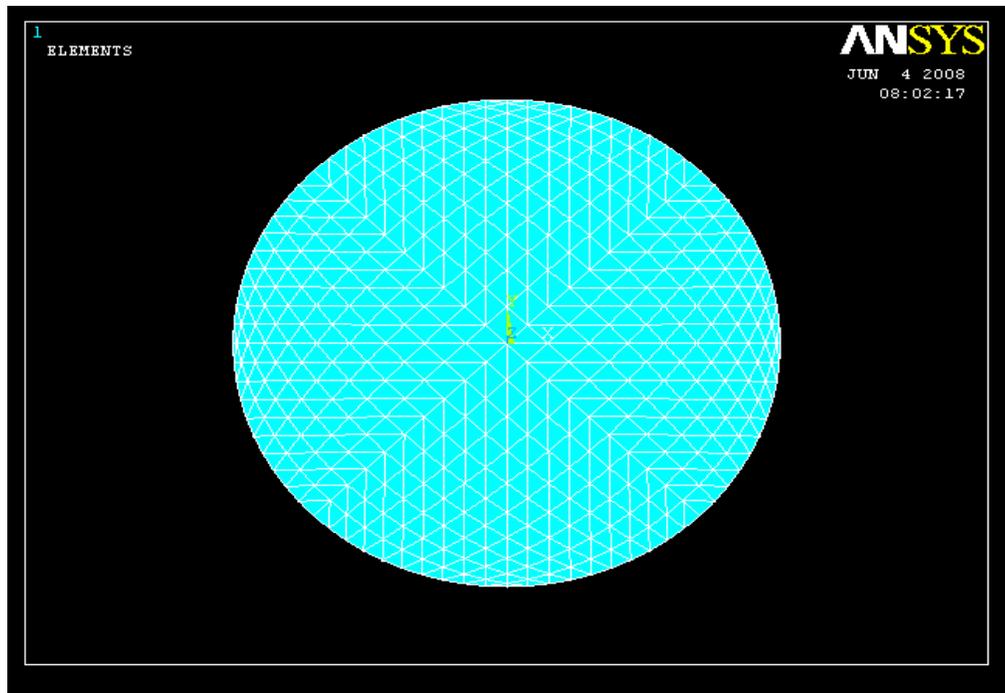


Figura 18. Mallado de la membrana PDMS.

Posteriormente se continúa con la fase Solución donde se asignan las condiciones de contorno y las cargas del mallado circular.

Es importante resaltar que al terminar esta fase se tecleó en la barra de tareas Ansys el comando *NLGEOM,ON* para activar la geometría, así como *AUTOTS, ON* Y *NSUBST,400,1200,25* que son característicos del elemento Shell 181 para el análisis elástico antes de continuar a la fase de solución.

### 3.2.5 Asignación de las condiciones de contorno

El mallado generó 441 nodos (Ver figura 19) que se restringen según la ubicación; en el centro el nodo solo debe desplazarse en Z, por lo que se restringen los demás grados de libertad UX, UY, ROTX, ROTY y ROTZ, los nodos del contorno no se permite el desplazamiento en UX, UY, UZ y RZ pero se aceptan rotaciones en RX y RY, en el resto de los nodos se restringe la rotación en Z ya que se permite la traslación en todas direcciones ver la tabla 3. Lo anterior se realizó al seguir la siguiente ruta a partir del menú *Solucion/Define Loads/Apply / Estructural /Displacement/Nodes*.

Tabla 4. Ubicación y restricción de 441 nodos del mallado de la membrana PDMS.

Nodo	Ubicación	Restricción
1-80	Contorno	UX, UY, UZ y ROTZ
81-260	Área	ROZ Z
261	Centro	UX, UY, ROTX, ROTY y ROTZ.
262-441	Área	ROZ Z

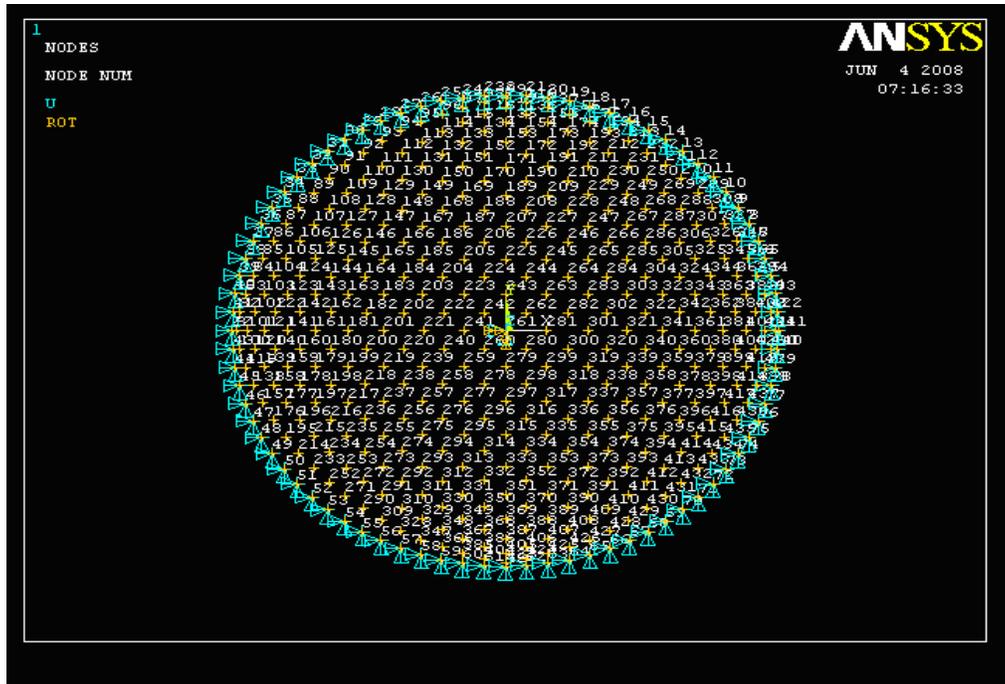


Figura 19. Asignación de las restricciones de 441 nodos de la membrana PDMS.

### 3.2.6 Aplicación de las cargas

Se entiende por cargas, las fuentes activas de campo. En el caso particular del análisis de esfuerzos, la fuente de campo es la presión del fluido. La presión utilizada para el procedimiento es de 45.59 KPa ( $1 \times 10^3$  Pascales) ya que esta es la máxima presión que se puede aplicar en el AEF porque para 45.7 KPa no permite la convergencia en la solución; es decir que para esa presión el material ya se deforma permanentemente o se rompe. De esta forma se realiza de tres niveles 13.3 KPa, 26.7KPa y 45.3KPa Para realizar aplicar la carga en Ansys se selecciona el menú *Solucion/Define Loads/Apply/Estructural /Pressure/On Elements* para que aparezca la ventana *Aply PRES on elements* (Ver figura 20).

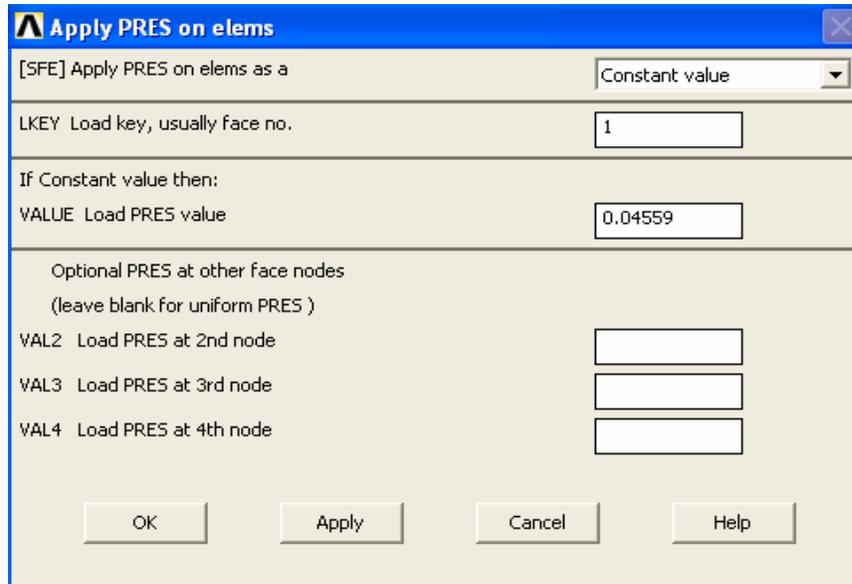


Figura 20. Ventana donde se aplica la presión de  $0.04559 \text{ N/mm}^2$  a la membrana PDMS.

Al aceptar la ventana de la Figura 20 se observa que la presión es aplicada a los 800 elementos formados de los 441 nodos del mallado de la membrana. (Ver figura 21).

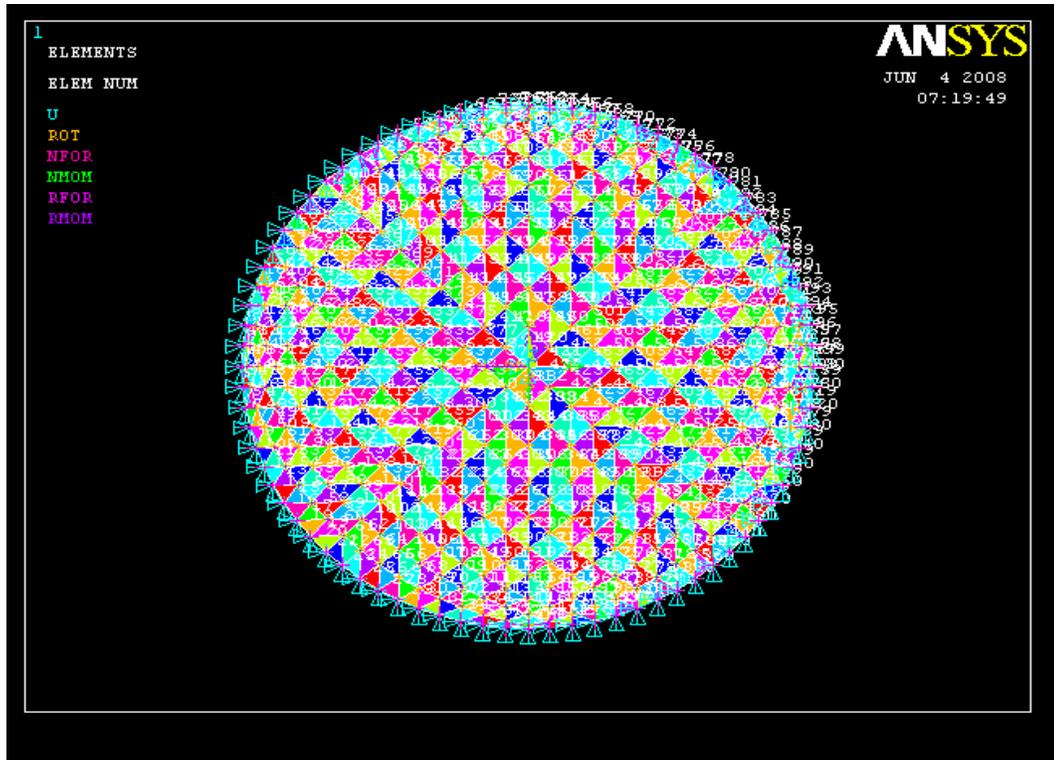


Figura 21. Los 800 elementos de la membrana PDMS a los cuales se aplica la presión.

Posteriormente se continúa con el *General Postproceso* donde se encuentra en comando *Plot results / contour plot/nodal solución* para presentar los resultados.

## Capítulo 4. Análisis y resultados

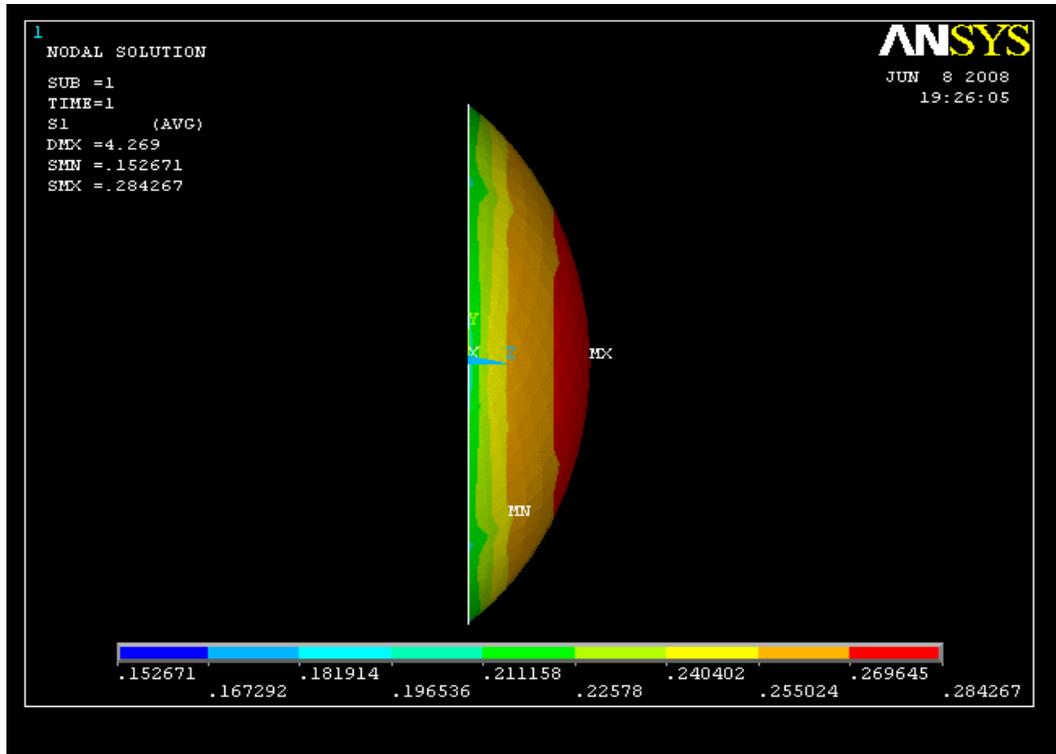
Una vez que los datos de la membrana han sido introducidos en los módulos de Ansys; se representan a continuación los resultados obtenidos para su análisis.

### 4.1 Análisis y resultados

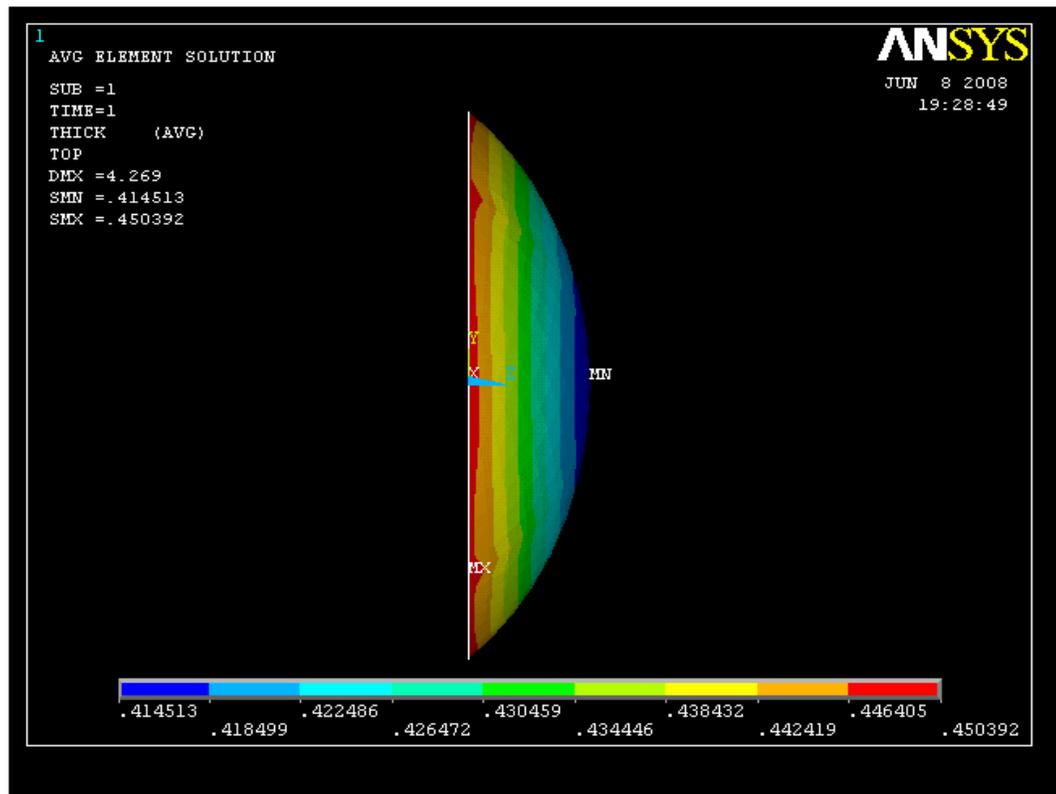
Se representan los resultados según las tres presiones que fueron introducidas de los niveles seleccionados: 13.3 KPa, 26.7KPa y 45.3KPa.

#### a) 13.3 KPa

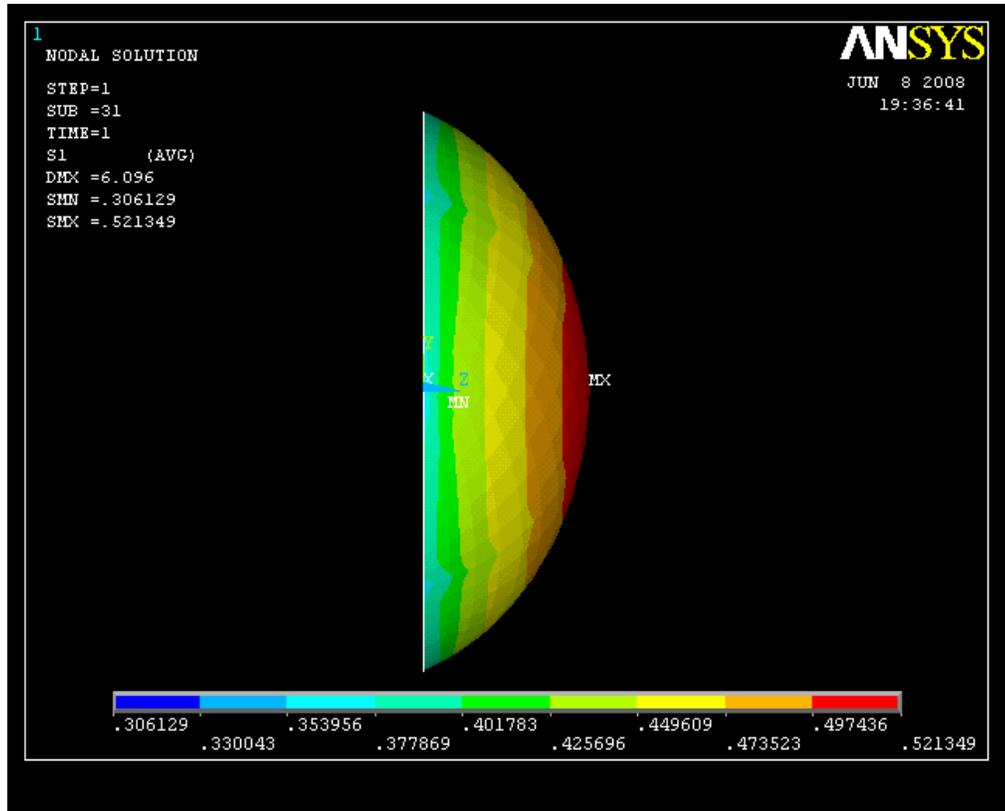
El esfuerzo máximo (SMX) y mínimo (SMN) provocado por la presión de 13.3 KPa son de  $.284267 \text{ N/mm}^2$  (284.267 KPa) y  $.152671 \text{ N/mm}^2$  (152.671 KPa) respectivamente con un desplazamiento máximo (DMX) de 4.269mm ( $.4269 \times 10^{-3} \text{ m}$ ) (Ver gráfica 1) en donde se aprecia que en el centro de la membrana está el mayor esfuerzo, el mayor desplazamiento y el menor grosor de la membrana PDMS con .414513mm (Ver gráfica 2).



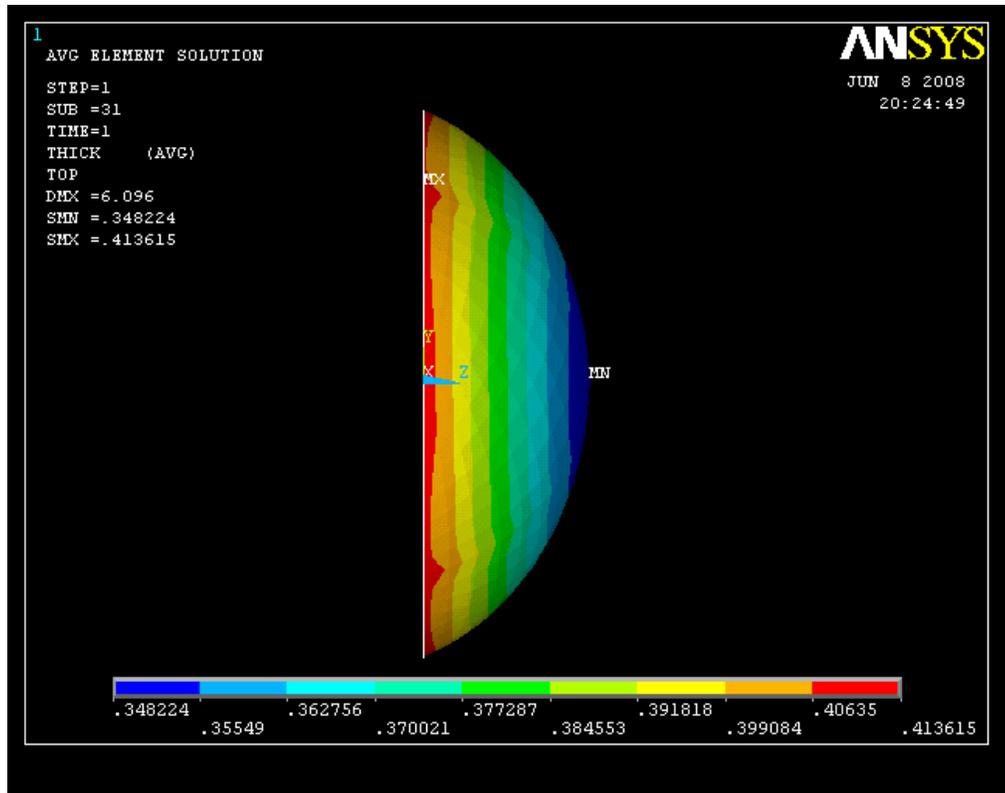
Gráfica 1. Mapa de esfuerzos de 13.3 KPa.



Gráfica 2. Mapa del espesor de la membrana PDMS con 13.3 KPa.



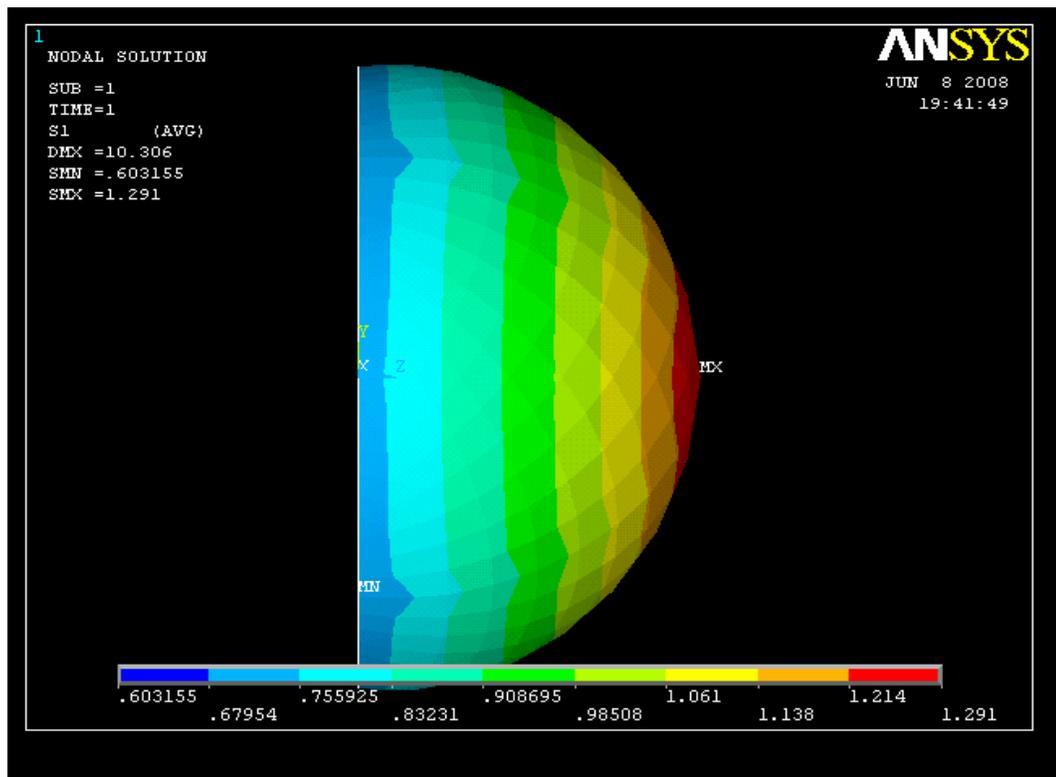
Gráfica 3. Mapa de esfuerzos de 26.7KPa.



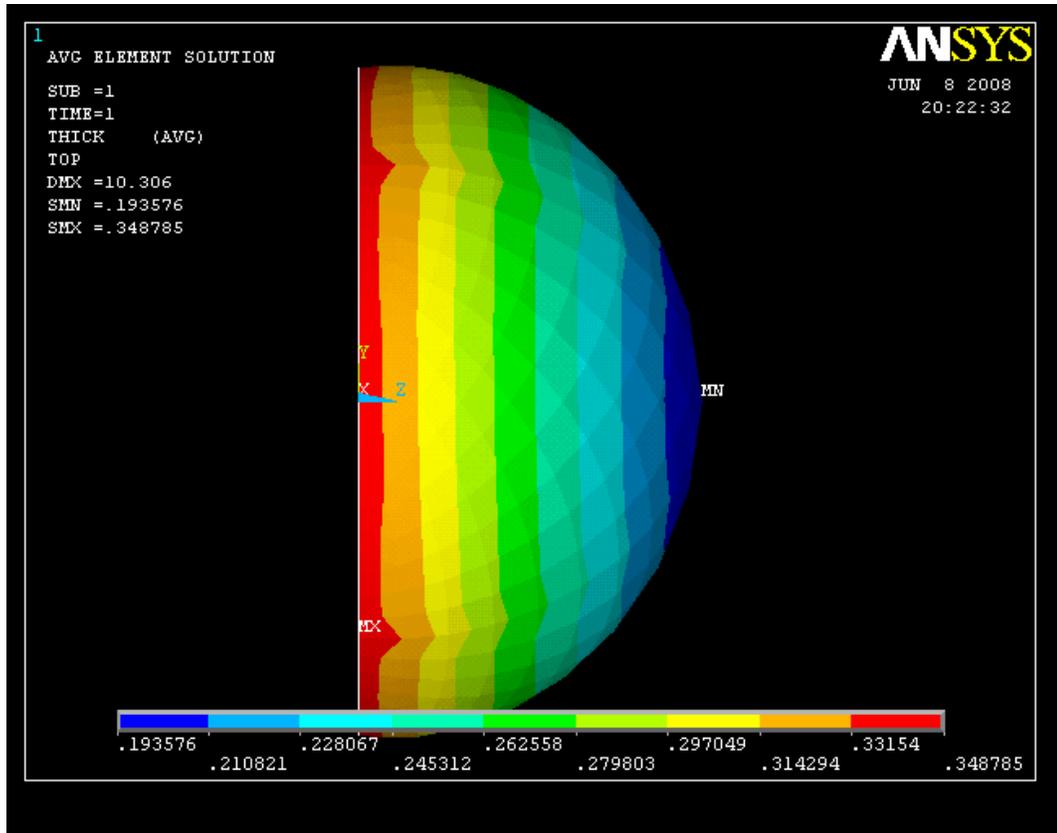
Gráfica 4. Mapa del espesor de la membrana PDMS con 26.7KPa.

**b) 45.3KPa.**

El esfuerzo máximo (SMX) y mínimo (SMN) provocado por 45.3KPa. son de  $1.291 \text{ N/mm}^2$  ( $1.291 \text{ MPa}$ ) y  $.603155 \text{ N/mm}^2$  ( $603.155\text{KPa}$ ) respectivamente con un desplazamiento máximo (DMX) de  $10.306\text{mm}$  ( $10.306 \times 10^{-3}$ ) (Ver gráfica 5) en donde se aprecia de igual manera que en el centro de la membrana esta el mayor esfuerzo y el mayor desplazamiento. El espesor de la membrana PDMS es menor en el máximo esfuerzo con  $.193576 \text{ mm}$  ( $.193576 \times 10^{-3}$ ) (Ver gráfica 6) donde también muestra el desplazamiento máximo DMX.



Gráfica 5. Mapa de esfuerzos de 45.3KPa.



Gráfica 6. Mapa del espesor de la membrana PDMS con 45.3KPa.

La síntesis de los datos de los tres niveles de presión se muestran en la Tabla 5 en donde se realizan otros análisis para cinco niveles con el fin de observar el comportamiento de las variables de respuesta.

Tabla 5. Resultados de los ocho niveles de presión para la membrana PDMS

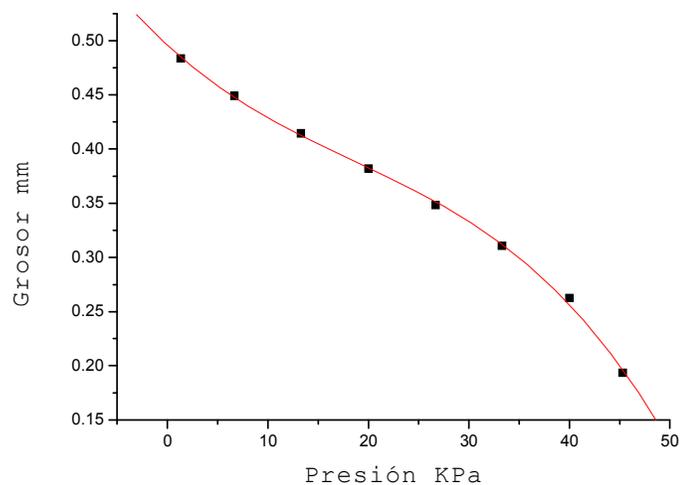
Variable De respuesta	Esfuerzo mínimo. N/mm <sup>2</sup>	Esfuerzo máximo. N/mm <sup>2</sup>	Desplazamiento máximo. mm	Espesor mínimo Mm	Espesor máximo mm
Nivel KPa					
1.33	.01754	.062115	1.768	.483561	.490449
6.67	.080376	.171964	3.194	.448968	.470247
13.3	.152671	.284267	4.269	.414513	.450392
20.0	.226816	.396674	5.186	.381911	.432031
26.7	.306129	.521349	6.096	.348224	.413615
33.3	.390817	.673393	7.103	.310684	.394172
40.0	.490677	.894785	8.41	.262604	.37205
45.3	.603155	1.291	10.306	.193576	.348785

Con los datos de la tabla 5, se realizan gráficas entre las siguientes variables:

- Presión aplicada y grosor mínimo.
- Presión aplicada y desplazamiento máximo.
- Presión aplicada y el esfuerzo máximo.

Con el objetivo de aplicar un análisis de regresión lineal para cada caso, buscando la ecuación que se ajuste a la gráfica.

Los niveles de presión y el grosor mínimo de cada uno de estos se presentan en la siguiente gráfica.



Gráfica 7. Grosor mínimo respecto a los niveles de presión aplicados a la membrana PDMS.

En la gráfica 7 se muestra el ajuste polinomial cúbico a la distribución de presiones, donde se puede apreciar que se presenta un comportamiento lineal decreciente en el grosor para presiones menores a 40KPa es decir, el grosor es proporcional a la presión aplicada en este rango. Para presiones mayores a 40 KPa disminuye más lentamente

cuando aumenta la presión al valor de convergencia. Además se confirma la hipótesis propuesta que a mayor presión el grosor de la membrana PDMS es menor.

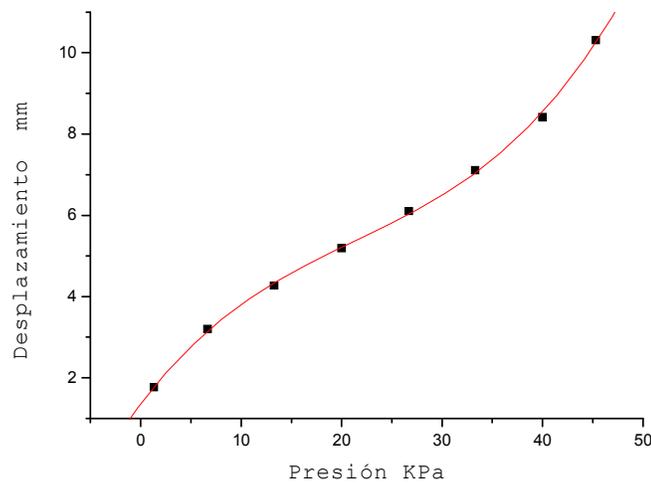
Este ajuste permite mostrar la siguiente expresión que describe del grosor a una determinada presión en KPa.

Ecuación 9. . . Grosor

$$\text{Grosor} = 0.49577 - 0.00852*W + 2.22831E-4 *W^2 - 3.9851E-6*W^3$$

Donde W representa la presión aplicada, con una desviación estándar en el ajuste de 0.00407, que como se observa en la gráfica es prácticamente ideal, por lo cual se considera bueno el ajuste.

También se gráfico el desplazamiento máximo respecto a los niveles de presión aplicados a la membrana PDMS.



Gráfica 8. Desplazamientos máximos para los niveles de presión aplicados a la membrana PDMS.

En la gráfica 8 los desplazamientos son provocados por la presión ejercida sobre la membrana PDMS que genera un esfuerzo o tensión en el interior del material, provocando la deformación del mismo. Se muestra el ajuste polinomial cúbico del desplazamiento máximo respecto a la presión, donde se puede apreciar que se presenta un comportamiento lineal creciente para presiones menores a 25KPa, a esta relación se le llama Ley de Hooke. No obstante, si se rebasa el modulo de elástico del material puede quedar deformado de manera permanentemente y la ley de Hooke ya no es válida. Arriba de los 25KPa de presión aplicada los desplazamientos presentan un comportamiento de crecimiento diferente a la concavidad inicial, presentándose un cambio en la razón de crecimiento del desplazamiento (cambio de pendiente).

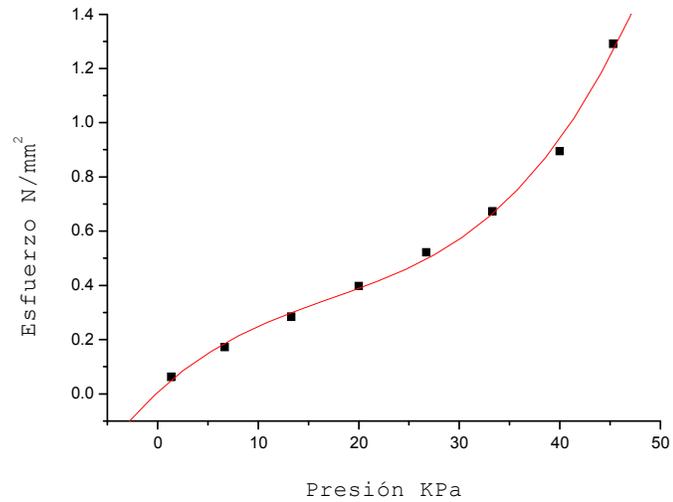
La gráfica 8 se muestra el ajuste polinomial cúbico que describe el desplazamiento máximo a una presión.

Ecuación 10. . . Desplazamiento

$$\text{Desplazamiento} = 1.36187 + 0.32475*W - 0.0096*W^2 + 1.49223E-4*W^3$$

Donde W representa la presión aplicada, con una desviación estándar de 0.09593 que sigue siendo menor a .01 como se observa en la gráfica, por lo cual se considera un adecuado ajuste.

Por ultimo se gráfica el esfuerzo máximo provocado por la presión.



Gráfica 9. Esfuerzos máximos por los niveles de presión aplicados a la membrana PDMS.

En la gráfica 9 se muestra el ajuste polinomial cúbico a la distribución de esfuerzos, donde se presenta un comportamiento lineal creciente para valores menores de los 20KPa. La máxima presión que las membranas PDMS pueden soportar según el AEF es de 45.59 KPa que provoca un esfuerzo de  $1.23\text{N/mm}^2$  que no rebasa el límite elástico e indica que la estructura molecular del material (la distancia entre sus moléculas), cuando no está sometido a ningún esfuerzo hay equilibrio entre las fuerzas moleculares de atracción y repulsión, al aplicar la presión crea una tensión en el interior del material, las distancias moleculares cambian y el material se deforma. Por debajo del límite de elasticidad de las membranas PDMS es de 1.2 MPa, por tanto todas las presiones aplicadas al presente trabajo de tesis, vuelven a su posición de equilibrio y el material elástico recupera su forma original. Arriba de los 20KPa de presión aplicada los esfuerzos presentan un comportamiento de crecimiento diferente a la concavidad inicial, presentándose un cambio en la razón de crecimiento del desplazamiento (cambio de pendiente).

En la Gráfica 9 se realiza el ajuste polinomial cúbico que describe el esfuerzo máximo a una presión aplicada a la membrana PDMS.

Ecuación 11. . . Esfuerzo máximo

$$\text{Esfuerzo máximo} = 0.00648 + 0.03425*W - 0.00125*W^2 + 2.43469E-5*W^3$$

Donde W representa la presión aplicada, con una desviación estándar de 0.03248 que sigue siendo mínima, por lo cual se considera un ajuste afectivo.

#### **4.2 Sugiura para el caso de las membranas PDMS**

Para hacer una comparación de los resultados obtenidos en Ansys se tomo el modelo teórico matemático de Sugiura; con los mismos valores de presión por medio de la ecuación 12.

$$Z = (W/4T) (a^2 - r^2) . . . \text{Ecuación 12}$$

Donde

Z= Es la sagita (Punto medio de la lente).

T = Esfuerzo.

a = radio de la lente.

r = radio en un punto de análisis donde  $r < a$

W = es la presión.

La ecuación se programó en el software Matemática 5.1 con los tres niveles (13.3 KPa, 26.7KPa y 45.3KPa) Dando lo siguientes resultados para cada caso.

**a) 13.3 KPa (0.01333 N/mm<sup>2</sup>).**

Datos

W= 0.01333 N/mm<sup>2</sup> (Es la presión aplicada a la membrana PDMS)

T= 0.284267 N/mm<sup>2</sup> (Es el esfuerzo obtenido del AEF para 0.01333 N/mm<sup>2</sup>)

a= 10 mm (El radio de la membrana PDMS)

gra100=Table[(r, ((W)/4T))\*(a<sup>2</sup> - r<sup>2</sup>)], {r,-10,10}

Donde

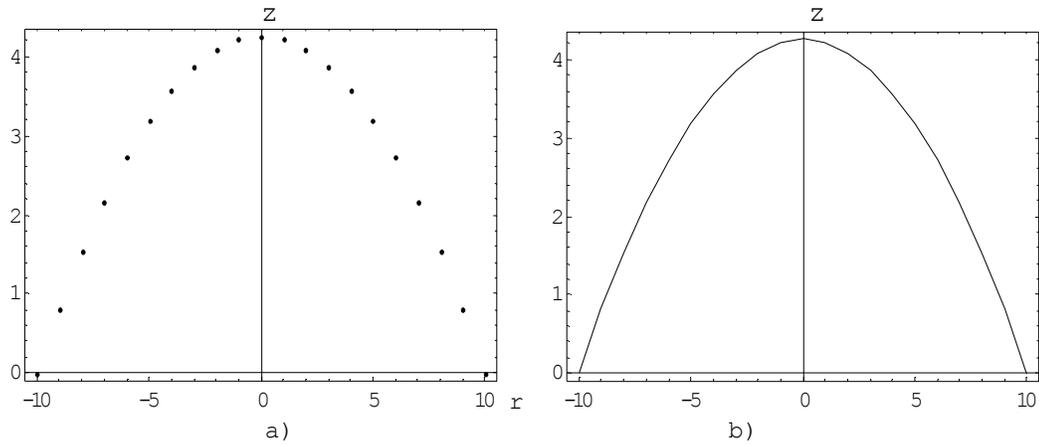
r es el punto de análisis [-10,10]

Z la profundidad en el punto r.

Tabla 6.Puntos de la ecuación Sugiura con 0.01333 N/mm<sup>2</sup>.

{r,z}
{-10,0}
{-9,0.808527}
{-8,1.53195}
{-7,2.17026}
{-6,2.72346}
{-5,3.19155}
{-4,3.57454}
{-3,3.87242}
{-2,4.08519}
{-1,4.21285}
{0,4.25541}
{1,4.21285}
{2,4.08519}
{3,3.87242}
{4,3.57454}
{5,3.19155}
{6,2.72346}
{7,2.17026}
{8,1.53195}
{9,0.808527}
{10,0}

Se grafican los puntos de la Tabla 6 para observar la forma que toma la membrana PDMS.



Gráfica 10. Ecuación Sugiura para 0.01333 N/mm<sup>2</sup> a) puntos b) Conjunto de puntos.

**b) 26.7KPa (0.02666 N/mm<sup>2</sup>).**

**Datos**

W= 0.02666 N/mm<sup>2</sup> (Es la presión aplicada a la membrana PDMS)

T= 0.521349 N/mm<sup>2</sup> (Es el esfuerzo obtenido del AEF para .02666 N/mm<sup>2</sup>)

a= 10 mm (El radio de la membrana PDMS)

gra200=Table[(r, ((W)/4T)\*(a<sup>2</sup> - r<sup>2</sup>)], {r,-10,10}

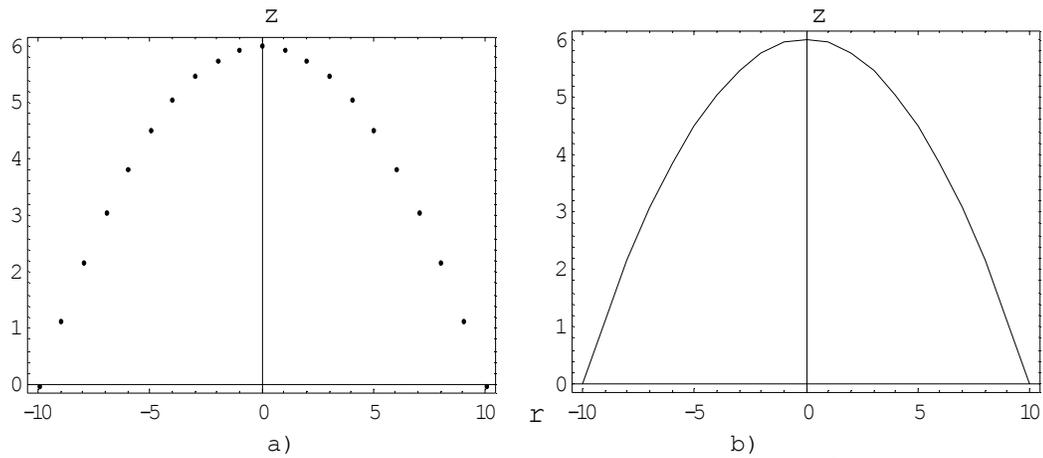
r es el punto de análisis [-10,10]

z la profundidad en el punto r.

Tabla 7. Puntos de la ecuación Sugiura con  $.02666 \text{ N/mm}^2$ .

{r,z}
{{-10,0}}
{-9,1.14086}
{-8,2.16162}
{-7,3.0623}
{-6,3.84288}
{-5,4.50338}
{-4,5.04378}
{-3,5.4641}
{-2,5.76432}
{-1,5.94446}
{0,6.0045}
{1,5.94446}
{2,5.76432}
{3,5.4641}
{4,5.04378}
{5,4.50338}
{6,3.84288}
{7,3.0623}
{8,2.16162}
{9,1.14086}
{10,0}}

Se grafican los puntos de la Tabla 7 para observar la forma que toma la membrana PDMS.



Gráfica 11. Ecuación Sugiura para  $.02666 \text{ N/mm}^2$  a) puntos b) Conjunto de puntos.

c) 45.3KPa (0.04533 N/mm<sup>2</sup>).

**Datos**

W= 0.04533 N/mm<sup>2</sup> (Es la presión aplicada a la membrana PDMS)

T= 1.291 N/mm<sup>2</sup> (Es el esfuerzo obtenido del AEF para 0.04533 N/mm<sup>2</sup>)

a= 10 mm (El radio de la membrana PDMS)

gra300=Table[(r, ((W)/4T))\*(a<sup>2</sup> - r<sup>2</sup>)], {r,-10,10}

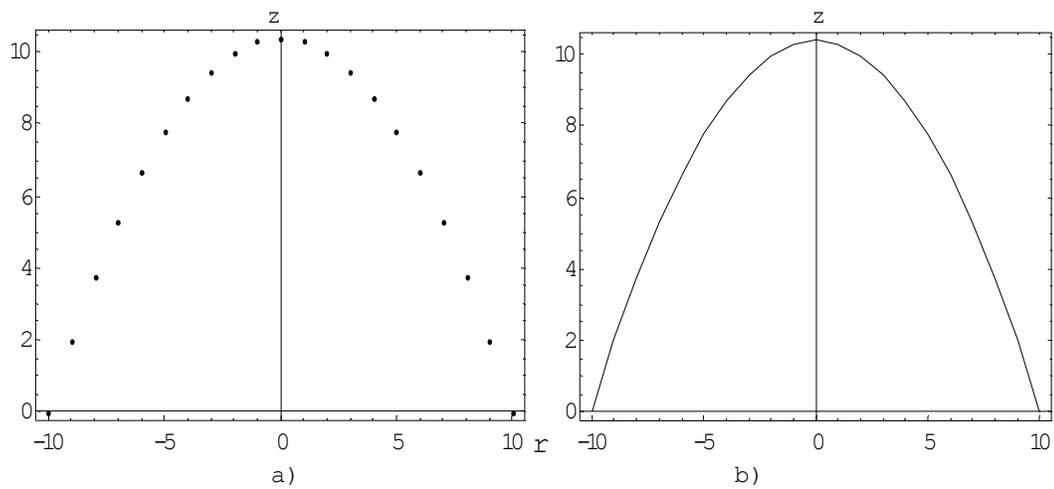
r es el punto de análisis [-10,10]

z la profundidad en el punto r.

Tabla 8. Puntos de la ecuación Sugiura con 0.04533 N/mm<sup>2</sup>.

{r,z}
{-10,0}
{-9,1.97371}
{-8,3.73966}
{-7,5.29785}
{-6,6.64829}
{-5,7.79096}
{-4,8.72588}
{-3,9.45303}
{-2,9.97243}
{-1,10.2841}
{0,10.3879}
{1,10.2841}
{2,9.97243}
{3,9.45303}
{4,8.72588}
{5,7.79096}
{6,6.64829}
{7,5.29785}
{8,3.73966}
{9,1.97371}
{10,0}

Se grafican los puntos de la Tabla 8 para observar la forma que toma la membrana PDMS.

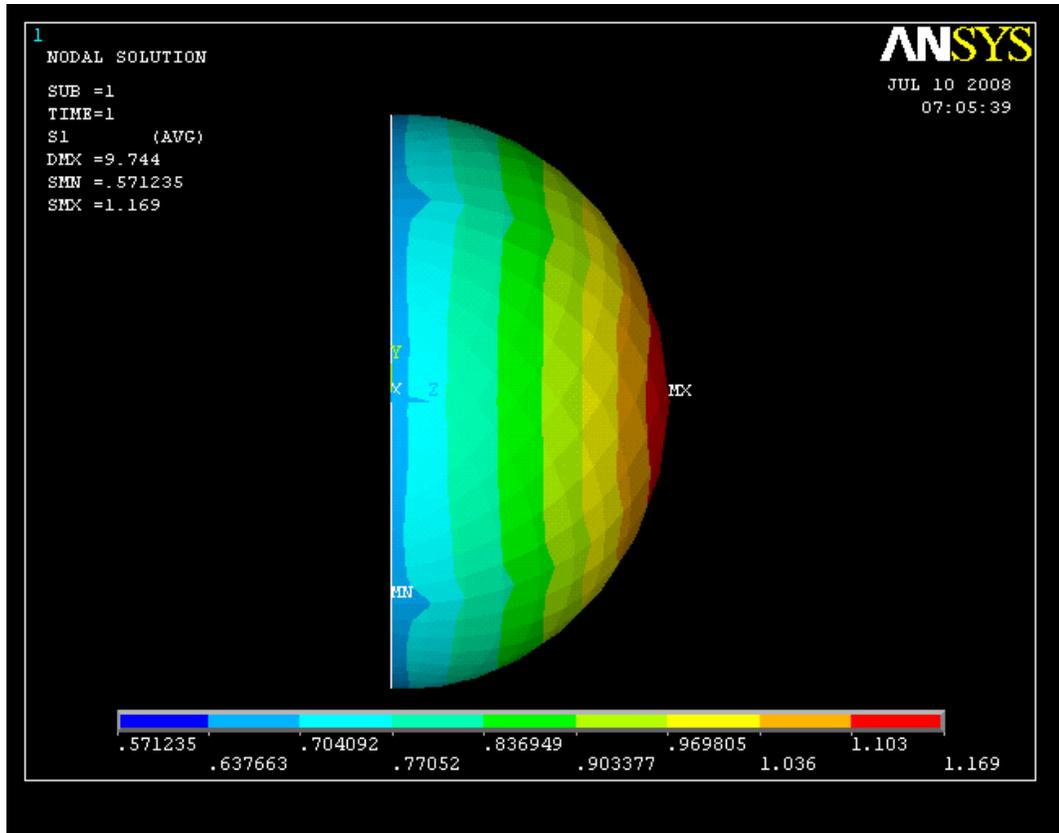


Gráfica 12. Ecuación Sugiura para 0.04533 N/mm<sup>2</sup> a) puntos

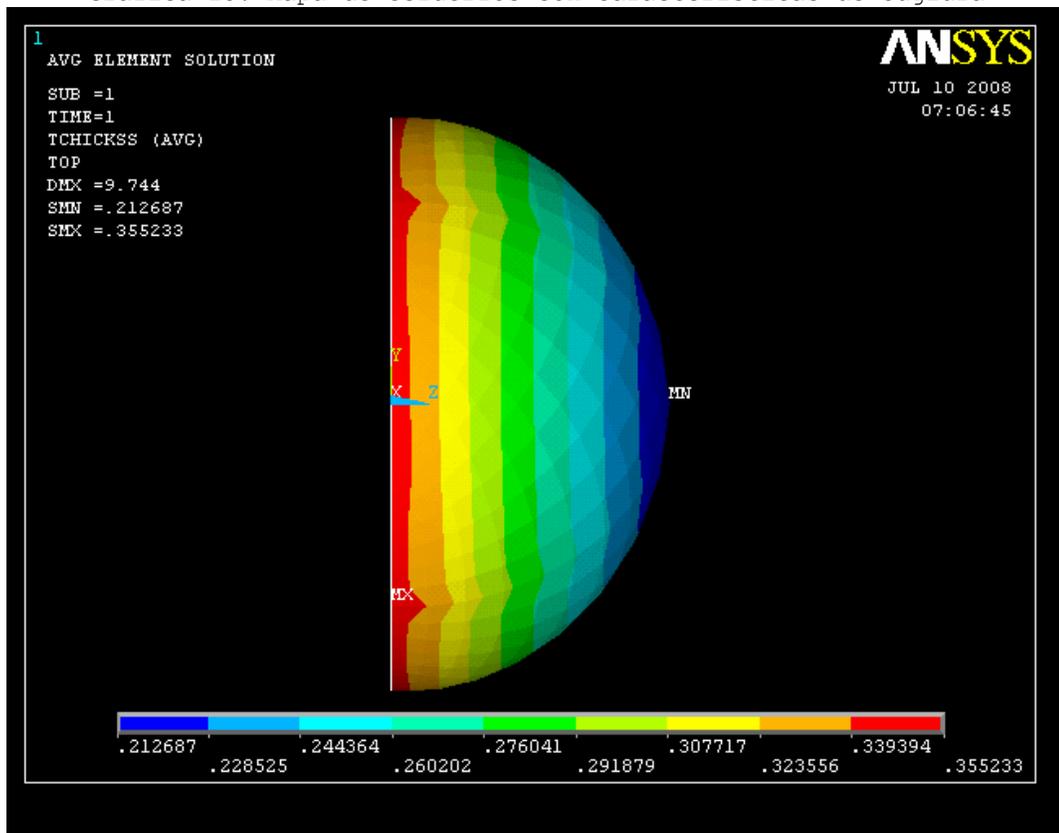
b) Conjunto de puntos.

Se realiza otro análisis en Ansys y Sugiura con características con las que Sugiura propuso su ecuación como:

- Grosor de .03mm
- Diametro de 27mm
- Material silicon.
- Presion de 0.04399 N/mm<sup>2</sup>



Gráfica 13. Mapa de esfuerzos con características de Sugiura



Gráfica 13. Mapa de espesor con características de Sugiura

**Datos**

W= 0.04399 N/mm<sup>2</sup> (Es la presión aplicada a la membrana PDMS)

T= 1.169 N/mm<sup>2</sup> (Es el esfuerzo obtenido del AEF para 0.04399 N/mm<sup>2</sup>)

a= 13.5 mm (El radio de la membrana PDMS)

gra\_sugiura=Table[(r, (((W)/4T))\*(a<sup>2</sup> - r<sup>2</sup>))], {r,-14,14}

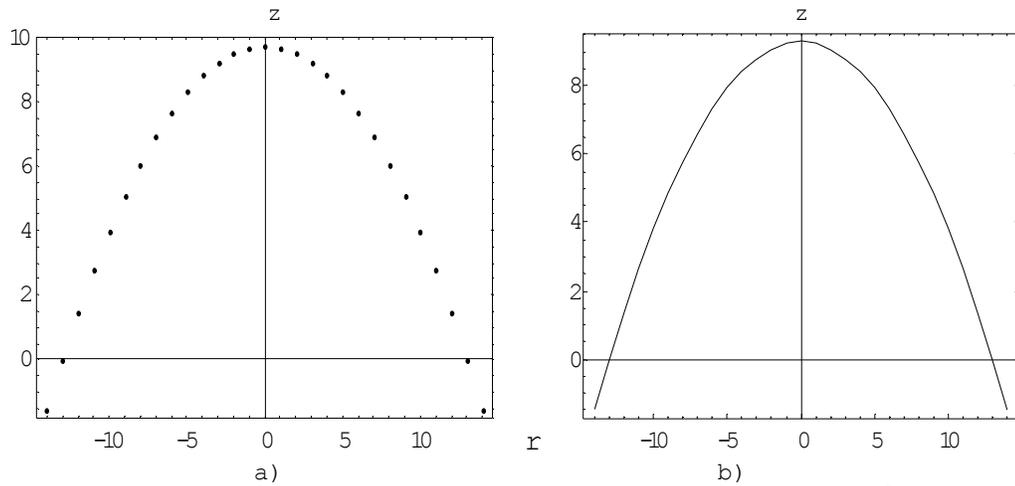
r es el punto de análisis [-13.5,13.5]

z la profundidad en el punto r.

Tabla 9. Puntos de la ecuación Sugiura con 0.04522 N/mm<sup>2</sup>.

{r, z}
{-13,5,0},
{-12,1.44179},
{-11,2.76823},
{-10,3.97933},
{-9,5.07509},
{-8,6.0555},
{-7,6.92057},
{-6,7.6703},
{-5,8.30469},
{-4,8.82373},
{-3,9.22743},
{-2,9.51579},
{-1,9.6888},
{0,9.7439},
{1,9.6888},
{2,9.51579},
{3,9.22743},
{4,8.82373},
{5,8.30469},
{6,7.6703},
{7,6.92057},
{8,6.0555},
{9,5.07509},
{10,3.97933},
{11,2.76823},
{12,1.44179}
{13.5,0}

Se grafican los puntos de la Tabla 9 para observar la forma que toma la membrana PDMS.



Gráfica 13. Ecuación Sugiura para 0.04399 N/mm<sup>2</sup> a) puntos b) Conjunto de puntos.

#### 4.3 Comparación de resultados del modelado de AEF y modelo de Sugiura.

Los desplazamientos obtenidos por Ansys y por el modelo matemático de Sugiura se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9. Comparación de desplazamientos en e AEF mediante Ansys y Sugiura.

	Desplazamiento máximo (mm) Ansys	Desplazamiento máximo (mm) Sugiura	Desviación estándar de los análisis.
0.00666 N/mm <sup>2</sup>	4,269	4,25541	0.01359
0.02666 N/mm <sup>2</sup>	6,096	6,0045	0.0915
0.04533 N/mm <sup>2</sup>	10,306	10,3879	0.0819
0.04399 N/mm <sup>2</sup>	9.744	9.7439	.0001

La desviación en ambos casos es menor de 0.1mm por lo tanto se comprueba que los resultados que arroja el análisis mediante la HEF y el modelo matemático Sugiura son comparables. Los resultados no son exactos y se atribuyen al grosor de la membrana PDMS que es de .5mm y para el análisis matemático de Sugiura el espesor es despreciable. Se puede observar que para el caso específico de las condiciones de Sugiura con .03mm de grosor la desviación es de .0001, se concluye que HEF es una aproximación ya que por el proceso iterativo que realiza para llegar a la convergencia va truncando por el número de cifras significativas que tiene. Se puede decir que las desviaciones son mínimas y se pueden despreciar.

## Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros

### 5.1 Conclusiones

La desviación que muestran los desplazamientos obtenidos mediante el modelado con una HEF y el que arroja el modelo teórico de Sugiera son iguales.

Como se pudo apreciar en ambos métodos los esfuerzos máximos se encuentran en el centro de la membrana y son los mismos.

La posible justificación de la desviación es que el método iterativo para llegar a la convergencia es largo y que además tiene un rango de cifras significativas, también se justifica por el grosor de la membrana que para el caso de Sugiura es de .03mm y para el caso de estudio de las membranas PDMS es de .5mm.

Una ventaja del método de HEF es que arroja información valiosa que no se puede obtener con el modelo teórico de Sugiura, la cual predice que el espesor de la membrana cambia con la presión aplicada y que éste decrece del borde al centro de la membrana. Con lo anterior, se obtuvo una expresión matemática para el grosor central de la membrana en función de la presión aplicada.

CAE a través del AEF demostró que el software de Ansys a través del Elemento Finito Shell 181 proporciona el análisis del comportamiento no lineal del espesor, característica que lo diferencia de otros procedimientos para el análisis de esfuerzos.

Además el AEF en Ansys permitió obtener la ubicación de los nodos iniciales y finales de la deformación, otra ventaja a diferencia del modelo Sugiura.

Así mismo se concluye que los esfuerzos máximos son proporcionales al desplazamiento en ciertos niveles de presión y se encuentran en el centro de la membrana PDMS.

Las deformaciones y/o esfuerzos en membranas de PDMS Sylgar 184 con un diámetro de 20mm, a presiones menores a 45.7KPa son útiles tanto el modelado en ANSYS como el modelo de Sugiera.

Los datos del desplazamiento, esfuerzo y espesor se ajustan de manera satisfactoria a un polinomio cúbico, con una desviación estándar pequeña, como se presentaron en el capítulo de análisis.

Con lo anterior se comprueban las hipótesis planteadas inicialmente en este trabajo de tesis.

## 5.2 Trabajos futuros

Realizar el análisis en Ansys incrementado las variables de diseño como las características físicas, propiedades mecánicas, propiedades ópticas y propiedades químicas de las membranas para generalizar este análisis.

Implementar el modelado Ansys para todo el sistema donde se implementen las membranas PDMS, como el medio entre estas, los materiales de las monturas que la sujetan, etc.

Partir de los requerimientos de equipos que empleen lentes y ver si estas membranas PDMS se pueden adaptar.

Llevar acabo la experimentación de las membranas PDMS, a través de la Fotoelasticidad que nos proporciona un mapa de esfuerzos.

Finalmente, los resultados obtenidos en esta tesis permitirán realizar una mejor descripción del funcionamiento óptico de la lente formada con las propiedades mencionadas.

### 5.3 Publicaciones

Este trabajo de tesis suscito a dos publicaciones:

- Agustín Santiago Alvarado, Sergio Vázquez Montiel, Jorge González García, Álvaro Jesús Mendoza Jasso, Alma Lilia Moreno Rios (2008). *Simulación de esfuerzos en membranas empleadas en lentes líquidas con longitud focal variable*. Universidad Tecnológica de la Mixteca México, Zacatecas: II Congreso Latinoamericano de Física.
- Jorge González García, Agustín Santiago Alvarado, Álvaro Jesús Mendoza Jasso, Sergio Vázquez Montiel, Moisés Emmanuel Ramírez Guzmán, Alma Lilia Moreno Rios (2008). *Mechanical-optical análisis of adaptative liquid lenses considering thickness of elastic membranes*. Universidad Tecnológica de la Mixteca. México, Zacatecas: II Congreso Latinoamericano de Física.

## Bibliografía

- A.I. Oliva; D.C. Valdés, E. Ley-Koo y H.G. Riveros** (12 de marzo de 2003). *¿Qué forma adquiere una membrana elástica circular al aplicarle una diferencia de presión?*. *Revista mexicana de física*, 49(4), 391-396.
- ANSYS Inc**, (Enero, 2008). *ANSYS Theory Reference*. (11 ed.). Estados Unidos: Oxford University Press.
- Boon, G.K.; Mercado, A.** (2006) *Automatización Flexible en la Industria* ; México: Ed. LIMUSA-Noriega.
- Carrascal Morillo, A. Alonso López, J.T. Castell, M.A. Rodríguez Canovas.** (2007). Modelización de las mallas quirúrgicas y de la pared Abdominal mediante modelos de material no lineales. *Congreso iberoamericano de ingeniería mecánica*, Octubre 23-25, Madrid: Dpto. Mecánica E.T.S.I. e Industriales.UNED.
- Creswell, J.** (2005). *Educational research: Planning, conducting, and evaluating quantitative and qualitative research*. (2ª. ed.) Upper Saddle River: Pearson Education Inc.
- Educaplus** (30 de Enero, 2008). Imagen disponible en: <http://www.educaplus.org/luz/lentel.html>
- Escalona Ivan.** (2006) *Ingeniería Industrial UPIICSA - IPN Definición en glosario*. México: IPN
- Flores Cruz , Diana Ofelia** (14 de Octubre de 2004). *Ciencia de los materiales*. Publicación disponible en: <http://www.mailxmail.com/curso/vida/cienciamateriales>.
- Gere, James M., Timoshenko Stephen P.** (2005). *Mecánica de materiales*. México: Grupo Editorial Iberoamerica.
- Guerrero, Martha; Valderrábano, Sergio; Campos, Rolando, Ainhoa, Miren** (1999). Aplicación del método de elemento finito al análisis nodal. *Ingenierías*. Enero-Abril, Vol II. No.3, 49-55.
- Hecht, Eugene** (2000). *Óptica*. (3 ed.). Madrid: Addison Wesley Iberoamericana.
- Hernández Sampieri, Roberto; Fernández Collado, Carlos & Baptista Lucio, Pilar** (2003). *Metodología de la Investigación*. Mexico: Mcgraw-Hill Interamericana.
- Hibbeler, X Russell C.** (1997) *Análisis Estructural*. México: Ed. Prentice Hall Hispanoamericana.
- Huebner K.H.; E.A. Thornton. y T.G. Byron,** (1995) *The finite Element Method for Engineers*, E.U.: John Wiley Sond.
- Iturbide Jiménez, Fernando; Verónica Amela Tarongi; Javier Cepria Bernal**

& Carlos Navarro Rubert. (Julio, 2008) *Herramientas de Ingeniería Asistida Por Ordenador*. Presentación presentada en la Universitat Jaume, España.

**Kassimali** Islam (2001), *Análisis Estructural*, Ed. Thompson Learning, 2ª Edición, México 2001.

**Knollman** G. C., J.L.S. Bellin, J.L. Weaver (1970). Variable focus liquid-filled hydroacoustic lens *J. Acoust. Soc.*, 49,253-261.

**Kuehl** O., Robert (2003). *Diseño de experimentos: principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. México: Thomson Learning.

**Larousse**, 2008. *Diccionario Enciclopédico Larousse*. México: Trillas.

**Lázaro**, Claudio (2007). Incorporación de nuevos sistemas CAD/CAM/CAE *Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bahía Blanca*, 16,8-11.

**Malacara** Daniel (2004). *Óptica Básica*. (2 Ed.). México: Fondo de Cultura Económica.

**Méndez Ramírez**, Ignacio & Marquez Landa Julio A. (2002). *Las hipótesis que se prueban en modelos lineales con dos criterios de clasificación* México: Unam, Iimas.

**Mendoza**, Alvaro. Entrevista, 30/Mayo/2008.

**Montgomery**, Douglas C. (2006). *Diseño y análisis de experimentos*. (2ª Ed.). México: Limusa.

**Odian**, George (2001). *Principles of Polymerization*. (3ª ed.). New York: J. Wiley.

**Piovan** Tulio, Marcelo (2008). Elementos de Máquina. *Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad Regional Bahía Blanca*.16, 50-55.

**Prieto** López, R. (1998). *Análisis y Optimización de componentes Magnéticos mediante Técnicas de Elementos Finitos*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, España.

**Resnick**, Robert & Eisberg, Robert (2004). *Física cuántica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas*. México : Limusa / Noriega editores.

**Ródenas** M., Escribano (2005). *Modelado Térmico de Componentes Magnéticos en Electrónica de Potencia de Alta Frecuencia mediante Técnicas Analíticas y de Análisis por Elementos Finitos*. Tesis Doctoral. 2005. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, España.

**Rodríguez Avial**, Mariano y Anza, Juan J. (Marzo, 1982). *Análisis Experimental de tensiones por el método fotoelástico*. España: Universidad Politécnica de Madrid.

- Rodríguez**, Fernando y Azcunaga, Arial. (1977). *Resistencia de Materiales*, España: Esc. Tec. Superior de Ingenieros Ind. De Madrid.
- Sabino** Carlos A. (1996). *El proceso de la investigación*. 2ª Ed. Argentina: Lumen & Hvmánitas.
- Santiago-Alvarado**, J. González-García, A.Fernández-Moreno, T.I. Castillo-Diego (7 de Septiembre, 2006). *Lente deformables y sus aplicaciones*. México: Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- Santiago-Alvarado**, S. Vazquez-Montiel, B.I.G. Liconá Moran, M.L. Arroyo-Carrasco, R.Rodríguez-Vera, J.A. Rayas-Álvarez y J. Gonzalez-García (2008). *Fabrication and Characterization of Elastic Membranes PDMS to Tunable Focus Liquid Filled Length Lens*. México: Universidad Tecnológica de la Mixteca (inédito).
- Samsung**, Heavy. (1998, enero). *Las Industrias seleccionan el software de ANSYS para sus necesidades de ingeniería de simulación*. Ponencia presentada en encuentro industrial. Japón.
- Yoo**, J.C., Moon, M. C., Choi, Y. J., Kang, C/ J. and Kim Y. S., (2006). A high performance microfluidic system integrated with the micropump and microvalve on the same substrate. *Microelectronic engineering*, 83 1684-1687.
- Valentino**, James V. and Joseph Goldenberg (2006). *Introduction to CAE* México: Limusa.
- Vimal**, R. L. P., Pokorny, J., Smith, V. C., & Shevell, S. K. (2008). *Foveal cone thresholds*. *Visión Res*, 29, 61- 78.