



Consejo Nacional de  
Ciencia y Tecnología

www.conacyt.gob.mx



## **“DISEÑO DE RECIPIENTE HERMÉTICO PARA PRUEBAS EXPERIMENTALES”.**



**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
“MAESTRO EN CIENCIAS”**

**PRESENTA:  
ING. JESÚS GUTIÉRREZ LARRAÑAGA**

**DIRIGE:  
DR. ISRAEL SAUCEDA MEZA**

**MEXICALI, BAJA CALIFORNIA; DICIEMBRE DEL 2009**

## **DEDICATORIAS**

Este trabajo esta dedicado especialmente a Dios, a mis padres, a mi hermano Juan Carlos, y a mi Hija Ana Denisse, que con su incansable apoyo y motivación, han permitido que mi búsqueda por la superación se mantenga vigente día a día a pesar de los obstáculos y las contrariedades de la vida.

Mil gracias a todos los que me apoyaron y motivaron para cursar mi maestría y poder elaborar este proyecto de tesis.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco de manera particular a mi asesor de tesis y a mis maestros:

- Dr. Israel Saucedá Meza
- Dr. Álvaro González Ángeles.
- M.C. Rigoberto Zamora Alarcón.
- Dr. Víctor Nuño Moreno.
- Dr. Jesús Márquez González.

A quien les debo respeto y admiración, por su apoyo y consejo para no desistir en el desarrollo de este proyecto y de la realización de la maestría.

Agradezco de manera general a todos y cada uno de los servidores que integran:

- La Universidad Autónoma de Baja California, especialmente al Sr. Rector: Dr. Gabriel Estrella Valenzuela.
- La Facultad de Ingeniería de la UABC Campus Mexicali que dirige dignamente el Sr. Director: M.C Miguel Ángel Martínez Romero.
- El equipo de servicios Escolares de la UABC Campus Mexicali,
- El equipo de tecnologías de información y biblioteca de la UABC Mexicali.
- Al Lic. Felipe Calderón Hinojosa y su equipo de trabajo en la Presidencia de la República, por la comunicación, seguimiento, apoyo moral y económico (en beca) que se me brindó durante estos cuatro semestres en que cursé esta maestría en Ciencias; Esto por medio del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) que dirige el M.C. Juan Carlos Romero Hicks y su extraordinario y profesional equipo de trabajo, a quien agradezco igualmente, su apoyo total y atenciones.

A todos le reitero un millón de gracias y Dios les multiplique su buena voluntad para seguir forjando docentes para nuestro país.

## INDICE

- Objetivo del proyecto de Tesis .....	7
- Hipótesis .....	8
- Resumen .....	9
- Abstract .....	10
- Introducción.....	11

### Capítulo I. Antecedentes generales.

1.1 Evolución del diseño Mecánico.....	13
1.1.1 Edad Antigua.....	13
1.1.2 Edad Media Y Renacimiento.....	14
1.1.3 Siglo XVIII.....	15
1.1.4 Siglo XIX.....	16
1.1.5 Siglo XX hasta la actualidad.....	18
1.2 Antecedentes del método del elemento finito.....	19
1.3 Antecedentes históricos del acero.....	21
1.3.1.Historia de la siderurgia.....	21
1.3.2.El acero a lo largo de la historia.....	23
1.4 Generalidades de las Autoclaves.....	24

### Capítulo II. Fundamentos teóricos sobre resistencia de materiales, fatiga y corrosión.

2.1 Propiedades mecánicas de los materiales.....	26
2.2 Corrosión.....	27
2.2.1 Conceptos Básicos de la Corrosión.....	27
2.2.1.1 La Herrumbe.....	28
2.2.1.2 Puntos de iniciación.....	28
2.2.1.3 La oxidación del hierro.....	28
2.2.2. Clasificación de los procesos de Corrosión.....	29
2.2.2.1 La Corrosión en Mojado.....	29
2.3 Corrosión atmosférica del hierro y otros metales.....	29
2.3.1 Clases de Atmósferas.....	30
2.4 Curva esfuerzo-deformación.....	31
2.4.1 Límite de proporcionalidad.....	31
2.4.2 Límite Elástico.....	32
2.4.3 Zona Elástica.....	32
2.4.4 Zona Plástica.....	32
2.4.5 Límite Elástico aparente o de fluencia.....	32
2.4.6 Relación de Poisson.....	32

2.4.7	Ley de Hooke.....	32
2.5	Teoría de esfuerzos en recipientes cilíndricos.....	33
2.5.1	Tensiones en un anillo circular y en un cilindro de pared Gruesa.....	33
2.5.2	Dilatación de recipientes a presión.....	34
2.5.3	Cilindro de pared gruesa.....	35
2.5.4	Cilindros.....	37
2.5.5	Deformación de un cilindro de pared gruesa.....	40

### **Capítulo III. Consideraciones técnicas de diseño para la fabricación del recipiente hermético o autoclave.**

3.1	Normas Oficiales Mexicanas relacionadas.....	41
3.1.1	Norma Oficial Mexicana NOM-050-SCFI-1994.....	41
3.1.1.1	Objetivo de la Norma.....	41
3.1.1.2	Campo de aplicación.....	41
3.1.1.3	Requisitos Generales.....	41
3.1.1.4	Concordancia con Normas Internacionales.....	42
3.1.2	Norma Oficial Mexicana NOM-005-STPS-1998.....	43
3.1.2.1	Objetivo de la Norma.....	43
3.1.2.2	Campo de Aplicación.....	43
3.1.2.3	Requisitos Generales.....	43
3.2	Normas Internacionales que regulan las pruebas a fatiga y el manejo de fluidos corrosivos.....	45
3.2.1	Norma ASTM-647-91.....	45
3.2.1.1	Aspectos Generales.....	45
3.2.1.2	Resumen del Método de la Norma.....	45
3.2.1.3	Precisión de los Resultados.....	46
3.2.2	Norma ITC MIE-APQ-6.....	46
3.2.2.1	Generalidades.....	46

### **Capítulo IV. Cálculos de Diseño para la fabricación del Recipiente Hermético o Autoclave.**

4.1	Generalidades del proyecto.....	57
4.1.1	Requerimientos básicos.....	57
4.1.2	Clasificación de los Sistemas involucrados.....	59
4.1.2.1	Sistema Autoclave.....	59
4.1.2.2	Sistema de Mordazas Internas.....	60
4.1.2.3	Otros Sistemas Opcionales.....	61
4.2	Cálculos preliminares.....	62
4.2.1	Acero seleccionado.....	62
4.2.2	Material seleccionado para sellos.....	62
4.2.3	Cálculo del esfuerzo normal al que estarán sometidas las flechas que sujetarán las mordazas internas.....	64
4.2.3.1	Determinación del diámetro más conveniente para las flechas que tensarán las mordazas internas.....	64

4.2.4	Cálculo del esfuerzo cortante al que estarán sometidos los pernos que sujetaran los especímenes.....	67
4.2.4.1	Determinación espesor mínimo para el perno.....	68
4.2.5	Cálculo del esfuerzo tangencial.....	70
4.2.5.1	Determinación del espesor mínimo para construir el recipiente.....	71
4.2.5.2	Determinación de la presión máxima para la autoclave .....	72
4.2.6	Cálculo el esfuerzo longitudinal. ....	74
4.2.7	Selección de Pernos .....	77
4.2.8	Determinación del número mínimo de pernos.....	78

## **Capítulo V. Análisis, Interpretación y Evaluación de Resultados**

5.1	Interpretación de resultados.....	81
5.2	Análisis de Resultados .....	84
5.2.1	Objetivo del análisis .....	84
5.3	Evaluación de Resultados.....	85
5.3.1	Análisis preliminares del Elemento Finito.....	85
5.3.2	Análisis de resultados del elemento en 3 dimensiones.....	87
	Conclusiones.....	90
	Recomendaciones para futuros diseños.....	91
	Comentarios Adicionales.....	92
	Referencias Bibliográficas.....	93
	Anexo “A” .....	96

## **OBJETIVO DEL PROYECTO DE TESIS**

**“Desarrollar un diseño mecánico de un cilindro de pruebas experimental por medio del método del elemento finito, donde puedan efectuar análisis de fractura de materiales en materiales expuestos en soluciones corrosivas a temperatura controlada”.**

## **HIPÓTESIS**

Con el diseño del recipiente hermético se analizará el fenómeno del agrietamiento en tuberías de revestimiento API-L-80 sometidas a condiciones de corrosión – fatiga.

## **RESUMEN**

El objetivo de esta tesis es desarrollar un diseño mecánico de un cilindro como el recipiente hermético para pruebas experimentales, usando el método del elemento finito. Un prototipo de este diseño servirá para hacer las pruebas de la fractura (norma ASTM E647 91) a los especímenes de algunos metales sumergidas en soluciones corrosivas diferentes y condiciones de la operación como los aceros de los agujeros del vapor en la planta geotérmico de CFE en Cerro Prieto, Baja Norte de California.

Una justificación de este diseño es hecha, considerando que la comunidad no tiene un marco teórico bien fundado en pruebas experimentales para permitir que definamos conductas ocasionadas por la fatiga-corrosión en componentes mecánicos sumergidos en sustancias corrosivas como es el caso de las Tuberías CFE.

Basado en normas nacionales e internacionales, un diseño preliminar fue creado desarrollando un esquema matemático, donde los resultados fueron obtenidos usando gráficos de MATLAB para seleccionar medidas y materiales para componentes.

Un análisis asistido por la computadora (ANSYS) validó la factibilidad de este diseño preliminar. Algunas Fotos sobre un prototipo similar fabricado, están en las páginas del anexo de esta tesis.

## **ABSTRACT**

The objective of this thesis is to develop a mechanical design of a cylinder like hermetic recipient for experimental tests, using the method of finite element. A prototype of this design will serve to make fracture's tests (Norm ASTM E647 91) to some metals' specimens submerged into different corrosive solutions and operation's conditions like the steels of vapor's holes at plant geothermal from CFE at Cerro Prieto, Baja California Norte.

A justification of this design is done, considering the community haven't a theoretical framework well-founded under experimental tests to allow us to define occasioned departments by corrosion-fatigue in mechanical components submerged in corrosive substances like is the case of the CFE Pipelines.

Based in national and international norms, a preliminary design was created developing a mathematical scheme, where the results were obtained using MATLAB graphs to select measurements and materials for components.

An analysis assisted through computer (ANSYS) validated the practicality of this design preliminary. Some Photos about a manufactured similar prototype, are in annex's pages of this thesis.

## INTRODUCCIÓN

Si a principios del siglo XX alguien hubiese hablado de la presencia del hombre en la Luna, evidentemente lo hubiéramos catalogado de Orate. De igual forma hace un lustro atrás ¿quién podía imaginarse la producción de bienes materiales mediante robots, utilizando máquinas herramientas computarizadas, las que suplen el trabajo de miles de hombres y abarata el proceso de producción?

Resulta evidente que este desarrollo tecnológico obedece al propio desarrollo de la ciencia y la técnica acumulado a lo largo del propio desarrollo del hombre y con una estrecha vinculación con las distintas ciencias, entre ellas la Física. Por otra parte, este desarrollo industrial ha estado en correspondencia con el propio desarrollo del Diseño Mecánico.

Es obvio que el avance de la ingeniería, como la de cualquier ciencia, está ligado al propio desarrollo de la humanidad, por lo que resulta importante comenzar este análisis desde la edad antigua hasta nuestros días, sobre la base conceptual del objeto de estudio. Es por ello que se debe comprender: ¿Qué es ingeniería?, ¿Qué se define como diseño mecánico?, ¿Qué se entiende por diseño en la ingeniería?, ¿Qué es tecnología?, ¿Qué estudia la Física?

**Ingeniería:** Es el término aplicado a la profesión en la que el conocimiento de las Matemáticas y la Física, alcanzado con estudio, experiencia y práctica, se aplica a la utilización eficaz de los materiales y las fuerzas de la naturaleza. El término ingeniero alude a la persona que ha recibido preparación profesional en ciencias puras y aplicadas; sin embargo, otras personas como técnicos, inspectores o proyectistas también aplican técnicas científicas y de ingeniería para solventar problemas técnicos [5].

**Mecánica:** Pertenece o relativo a la mecánica. Principios mecánicos. Ejecutado por un mecanismo o máquina [5].

**Mecanismo:** Conjunto de las partes de una máquina en su disposición adecuada [5].

**Tecnología:** 1. Conjunto de teorías y de técnicas que permiten el aprovechamiento práctico del conocimiento científico. 2. Tratado de los términos técnicos. 3. Lenguaje propio de una ciencia o de un arte. 4. Conjunto de los instrumentos y procedimientos industriales de un determinado sector o producto [5].

**Física:** Ciencia que se ocupa de los componentes fundamentales del Universo, de las fuerzas que éstos ejercen entre sí y de los efectos de dichas fuerzas. En ocasiones la física moderna incorpora elementos de los tres aspectos mencionados, como ocurre con las leyes de simetría y conservación de la energía, el momento, la carga o la paridad. La Física está estrechamente relacionada con las demás ciencias naturales, y en cierto modo las engloba a todas. [5].

Se comparte el mismo criterio de *Shigley* [2] al considerar que diseñar es formular un plan para satisfacer una demanda humana; por lo que esta necesidad particular a satisfacer puede estar bien definida, por lo general, desde el principio. En todo diseño hay un propósito determinado: la obtención de un resultado final en función de una necesidad social, al que se llega mediante una acción determinada o por la creación de algo que tiene realidad física.

El Diseño Mecánico es el diseño de objetos y sistemas de naturaleza mecánica: máquinas, aparatos, estructuras, dispositivos e instrumentos [1]. Para su consecución, el diseñador o ingeniero hace uso de las ciencias puras: Matemática, Física, Química -cuando se trabaja los tratamientos térmicos termoquímicos de los distintos materiales a considerar en el mismo-, la ciencia de los materiales y la ciencia de la mecánica aplicada, entre la que se encuentra la Resistencia de Materiales, entre otras.

El diseño en la ingeniería mecánica incluye el Diseño Mecánico, con el Dibujo Técnico como lenguaje gráfico, pero en un estado de mayor amplitud, que abarca todas las disciplinas de la Ingeniería Mecánica, la Física, Matemática y las Ciencias Técnicas y de los Fluidos, entre otras. En el mismo se emplean técnicas alcanzadas con estudio, experiencia y práctica, en las que se aplican la utilización eficaz de los materiales y las fuerzas de la naturaleza, con una optimización de los recursos materiales y financieros para llevar a cabo, en función de resolver un problema planteado. Por lo que el diseño en la ingeniería mecánica se apoya en el Diseño Mecánico.

Una vez definidos los distintos conceptos que sustentan este trabajo, el lector está en condiciones de comprender mejor la interrelación entre el Diseño Mecánico con algunas de las ramas de la ciencia consideradas en esta tesis, lo que ha permitido procesar esta información científica para poder generar la tecnología diseñada en esta obra.

# CAPÍTULO I

## ANTECEDENTES GENERALES.

### 1.1 EVOLUCIÓN DEL DISEÑO MECÁNICO.

#### 1.1.1 EDAD ANTIGUA

Se comparte el mismo criterio de *Stadelman* [3] al considerar que las mayores conquistas en el terreno de la ciencia, la técnica y del arte de la humanidad, desde el descubrimiento de la escritura hasta los avances de la Medicina, tuvieron lugar en el primer milenio antes de nuestra era. Conquistas que se fueron perfeccionando y tomando cuerpo científico, en la medida que se fue profundizando, argumentando e incorporando la práctica a ésta.

En la antigüedad existieron obras arquitectónicas e ingenios para poder construir las mismas para levantar, transportar y acarrear, esos colosales bloques de piedra que la conformaron. Obras que son consideradas maravillas del intelecto humano (ver las siete maravillas del mundo antiguo) y de las cuales, en la actualidad, dan fe de ellas las pirámides de Egipto, en específico las de Gizeh (2550 a. C.) [4] y más antigua aún, la escalonada de Djoser (2700 a. C.) [4]. Figura 1.1

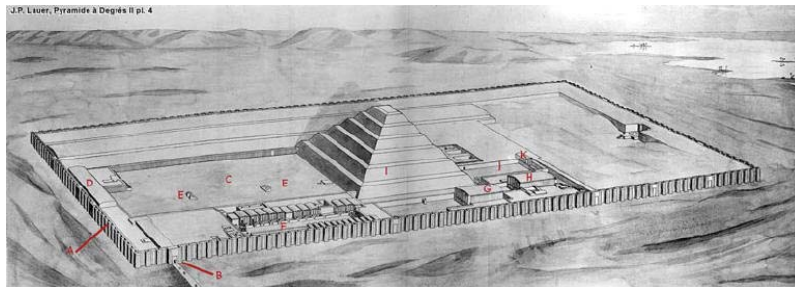


Figura 1.1 La Escalonada de Djoser (2700 a. C.)

Aunque las ideas sobre el mundo físico se remontan a la antigüedad, la Física no surgió como un campo de estudio bien definido hasta principios del siglo XIX [1], pero siempre sus principios estuvieron presentes en la práctica del quehacer científico de aquella época. De aquí que para poder llevar a cabo el diseño y construcción de estas obras, los ingenieros de aquel entonces tuvieron que estudiar nuevas técnicas de construcción, nuevos materiales, emplear nuevas máquinas y herramientas a partir del principio ensayo-error.

Evidencias arqueológicas y estudios realizados por egiptólogos y hombres de ciencia, en general dan fe de que los ingenieros y arquitectos de aquella época, entre los más connotados: Imhotep, ministro y arquitecto del **Rey Djoser** (2630-2611 a. C) [4], se valía mucho de planos o proyectos ingenieriles para poder llevar a cabo la construcción de estas monumentales obras.

Varios siglos después, **Arquímedes** (287-212 a.C.) [4], notable matemático e inventor griego, que escribió importantes obras sobre geometría plana y del espacio, aritmética y mecánica. Definió la ley de la palanca y se le reconoce como el inventor de la polea compuesta. Durante su estancia en Egipto inventó el ‘tornillo sin fin’ para elevar el agua de un nivel. Fig. 1.2

Arquímedes es conocido, sobre todo por el descubrimiento de la ley de la hidrostática, el llamado principio de Arquímedes, que establece que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta una pérdida de peso igual al peso del volumen del fluido que desaloja. Entre la maquinaria de guerra cuya invención se le atribuye está la catapulta.

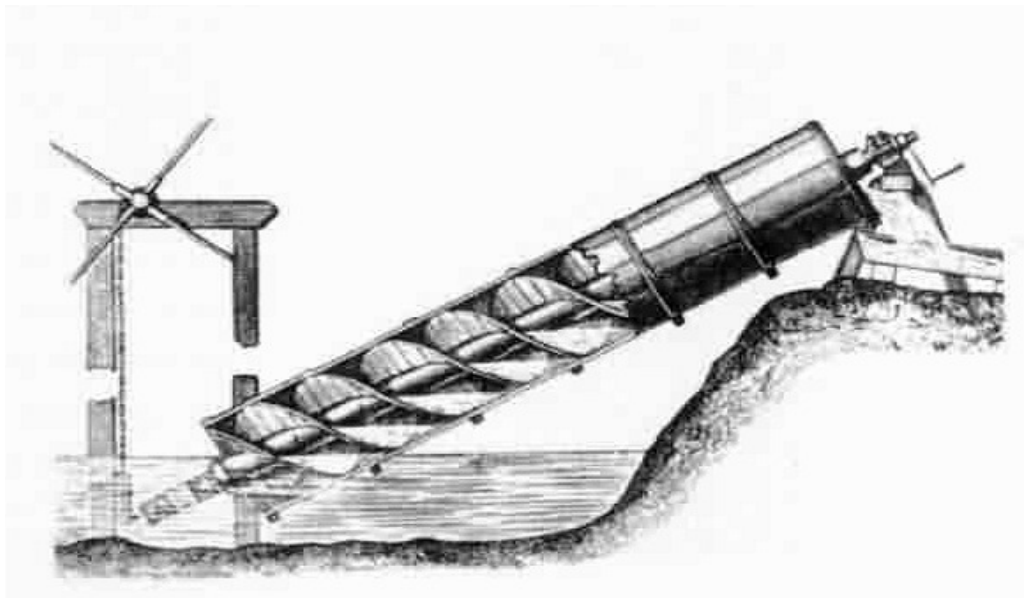


Figura 1.2 Ilustración del Tornillo sin fin de Arquímedes

En esta etapa histórica, los principios físicos de lo que es hoy la ciencia Física, en particular la Mecánica, nació de la práctica como una necesidad social y estuvo íntimamente relacionada con el diseño y construcción de estas grandes obras, en la que la palanca, las cuñas y las poleas constituyeron las herramientas fundamentales de los diseñadores de aquella época.

### 1.1.2. EDAD MEDIA Y RENACIMIENTO

Se considera Edad Media al término utilizado para referirse a un periodo de la historia europea que transcurrió desde la desintegración del Imperio Romano de Occidente, en el siglo V, hasta el siglo XV; aunque se aclara que es un concepto que no puede ser tomado de una forma absoluta. El Renacimiento comenzó en Italia en el siglo XIV y se difundió por el resto de Europa durante los siglos XV y XVI. A partir de documentos históricos estudiados, se considera a **Florentino Leonardo Da Vinci** (1452-1519) [1], uno de los científicos, ingenieros y arquitectos más connotados de este período histórico; quién estudió, diseñó y construyó mecanismos de engranajes simples. Es uno de los inventores de la hidráulica y probablemente descubrió el hidrómetro; su programa para la canalización de los ríos todavía posee valor práctico.

Inventó un gran número de máquinas ingeniosas, entre ellas un traje de buzo y especialmente sus máquinas voladoras, que, aunque sin aplicación práctica inmediata, establecieron algunos principios de la aerodinámica [1]. Además se considera el pionero del Dibujo Técnico, por los croquis que ideó de mecanismos y máquinas, entre otros.

Otro italiano que es considerado el padre de la Resistencia de los Materiales, fue **Galileo Galilei** (1564-1672) [7]; profesor de Matemática de Padua, -se hace notar que al igual que en la antigüedad, la Matemática estaba estrechamente vinculada a la Física-, quien fue el primero que estudió la resistencia de las vigas [4].

El científico inglés **Robert Hooke** (1635-1703) [5], realizó importantes aportes en el campo de la Física y de la ingeniería, al formular la teoría de la elasticidad, la cual plantea que un cuerpo elástico se estira proporcionalmente a la fuerza que actúa sobre él; conocida actualmente como ley de Hooke y sobre la que se fundamenta el estudio de la rigidez y la elasticidad de los cuerpos, las que ambas constituyeron elementos necesarios para el desarrollo de la disciplina Resistencia de los Materiales; además, fue el primero en utilizar el resorte espiral para la regulación de los relojes y desarrolló mejoras en los relojes de péndulo.

Más tarde; **Isaac Newton** (1642-1727) [5], matemático y físico británico, considerado uno de los más grandes científicos de la historia, el cual realizó importantes aportes en muchos campos de la ciencia, fundamentalmente a la Mecánica, con sus tres leyes fundamentales. Sus descubrimientos y teorías sirvieron de base a la mayor parte de los avances científicos desarrollados desde su época.

En esta etapa del Renacimiento se fabricaron, desde el punto de vista del diseño mecánico las ruedas de dientes helicoidales con ejes entrecruzados, cojinetes de rodamientos, cadenas articuladas y diversas máquinas, entre otras [5].

### 1.1.3 SIGLO XVIII

En 1774, el gran matemático sueco de este siglo **Leonhard Euler** [5], aportó ideas fundamentales y resolvió el problema de la estabilidad de las barras esbeltas cargadas por compresión axial (perpendicular) e introdujo el concepto de momento de inercia, tan empleado en Física (Mecánica) como en la ingeniería.

En ese mismo año, **Daniel Bernoulli** (1700-1782) [5], científico suizo nacido en Holanda, descubrió los principios básicos del comportamiento de los fluidos (Figura 1.3) y dedujo la ecuación de la curva elástica ampliamente empleada en ingeniería.

El físico francés **Charles de Coulomb** (1736-1806) [5], pionero en la teoría eléctrica, estudió los problemas de flexión y torsión e introdujo la noción de tensión tangencial, y más tarde (1776) formuló la hipótesis del cambio de forma debido a las tensiones tangenciales. Teorías muy importantes para la Resistencia de Materiales y el Diseño para la Ingeniería Mecánica.

En este siglo, el científico e ingeniero francés **Louis Navier** (1785-1836) [5], resolvió el problema de la flexión de las barras rectas y formuló la hipótesis que las secciones transversales de una viga permanecen planas después de la deformación, principio e hipótesis que lo identifican entre los fundadores de la ciencia teórica.

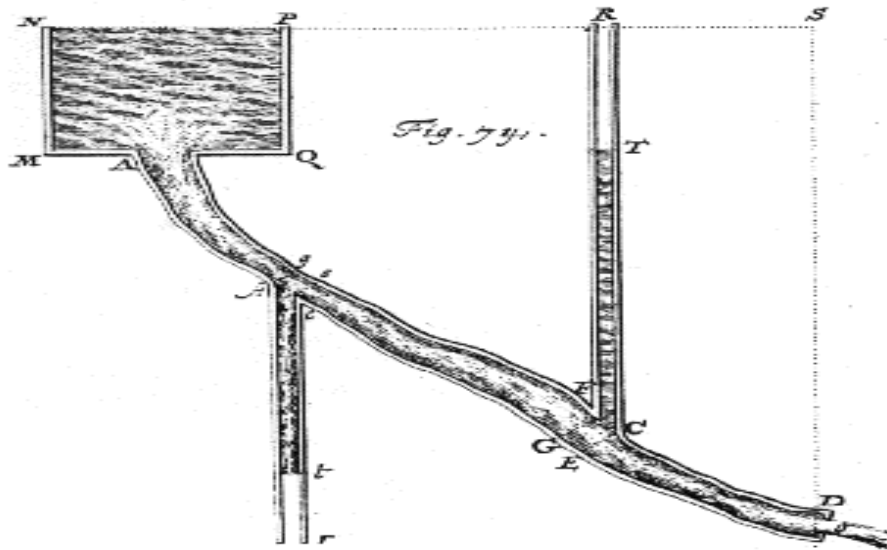


Figura 1.3 Principio Básico del comportamiento de los fluidos de Daniel Bernoulli

Es importante acotar, como a partir del Renacimiento, las obras científico-técnicas de Da Vinci, se van reforzando y profundizando en la fundamentación científica de leyes e hipótesis de la Mecánica, la Física y la Resistencia de los Materiales, las cuales conjuntamente con la invención de la máquina de vapor, a finales del siglo XVIII, revolucionaron las formas de producción industrial, que coadyuvaron al enriquecimiento teórico-práctico del Diseño Mecánico, supeditaba únicamente a la práctica en la antigüedad.

#### 1.1.4 SIGLO XIX

Al inicio de este siglo, se incorporan al quehacer científico de la humanidad tres científicos, los cuales establecieron los fundamentos de la teoría matemática de la Resistencia de los Materiales: **Simeón Denis Poisson** (1781-1842) [5], físico-matemático francés. Se le conoce, sobre todo, por sus contribuciones teóricas a la electricidad y al magnetismo, profundizó en los estudios realizados por Hooke, analizó y fundamentó el fenómeno de la deformación transversal: "Siempre que se produce un alargamiento a lo largo de un eje de un cuerpo, se produce un acortamiento de las dimensiones transversales de éste y varía en función del tipo de material, por lo que es una característica inherente a cada material"; a la relación entre la tensión aplicada y la deformación que ésta produce en cada material se le denomina en la actualidad coeficiente de Poisson. Este principio es fundamental en los diseños actuales de: edificaciones, puentes, aeronaves espaciales, maquinaria en general y en la conformación de los metales.

El otro científico francés fue **Augustin Louis Cauchy** (1789-1857) [5], matemático francés, considerado uno de los impulsores del análisis en el siglo XIX. Nació en París y estudió en la Escuela Politécnica de esa ciudad. Fue profesor simultáneamente en el Colegio de Francia, en la Escuela Politécnica y en la Universidad de París. En el campo de la Física se interesó por la propagación de la luz, la teoría de la elasticidad y a él se le atribuye los conceptos de tensión, tensión principal y equilibrio del elemento, entre otros trabajos.

El tercer científico del que se hace referencia es el ruso **Ostrogradsky** (1801-1861) [5], miembro de la academia rusa y fue fundador de las escuelas de Mecánica Teórica de Moscú y San Petersburgo de aquella época.

Acerca de la flexión y torsión hay que destacar los trabajos de **Barré De Saint Venn** (1797-1886) [5]; **Clayperon** (1799-1864) [5], **Stokes** (1814-1903) [5] y **Green** (1793-1841) [5], que fundamentaron sus trabajos en los cálculos fundamentales en el trabajo de la deformación; **Heinrich Hertz** (1857-1894) [5], físico alemán, quien además de hacer estudios sobre las ondas magnéticas, éste fundamentó las tensiones de contacto.

En 1840, **Joseph Whitworth** (1803-1887) [5], ingeniero mecánico británico, célebre por los grandes progresos en la precisión y normalización que introdujo en la fabricación de máquinas herramientas, ideó un sistema de roscas para tornillos (figura 1.4), que sirvió de base para la normalización en la construcción de máquinas en los diseños que se emplean en la actualidad.

A finales de este siglo surge un fenómeno social que revolucionó al mundo y fue la llamada Revolución Industrial, que condujo la sociedad de una economía agrícola tradicional hasta otra caracterizada por procesos de producción mecanizados para fabricar bienes a gran escala, que evidentemente, la causa fundamental de estos cambios se deben, en gran medida, al desarrollo de la máquina de vapor.

Es bueno mencionar, que en este período ya se había inventado la imprenta (1450), la máquina de vapor por **Dennis Papin** (1647-1714) [5] y perfeccionada o mejorada por **Jaime Watt** (1764) [5] y el invento de un telar mecánico accionado por una máquina de vapor (1785), por el británico **Richard Arkwrigh** [5]: Tres elementos, que evidentemente sustentaban las bases tecnológicas para el desarrollo de los medios de producción que devino en la Revolución Industrial, lo que a su vez sirvió de base a la ciencias para su desarrollo.

En esta etapa se observa que los fundamentos de la Física y la Mecánica no se limitaba únicamente a estudiar las leyes del movimiento físico, sino que se comenzó a desarrollar los estudios de lo que ocurría internamente en los materiales, o lo que es lo mismo, el estudio intermolecular de la materia.

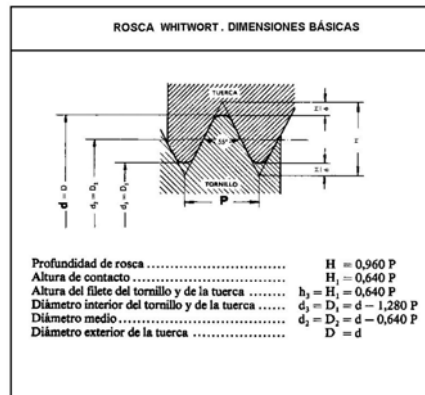


Figura 1.4. Dimensiones Básicas de la Rosca Whitworth

### 1.1.5 SIGLO XX HASTA LA ACTUALIDAD

Sería interminable la lista de científicos, ingenieros, físicos y personal técnico que han contribuido al desarrollo del Diseño Mecánico y de la manufactura en este período histórico analizado, por lo que sólo limitaremos a enunciar por su relevancia algunos hechos y trabajos en esta etapa.

Se considera que uno de las personalidades que revolucionó el siglo XX en el diseño y manufactura ingenieril, fue el industrial estadounidense **Henry Ford** (1863-1947) [5].

Trabajó como mecánico de 1888 a 1899, y después jefe de éstos en la Edison Illuminating Company. En 1893, tras experimentar un tiempo en sus ratos libres, logró construir su primer automóvil, y en 1903 creó la Ford Motor Company. (Figura 1.5)

A él se le conoce por sus innovadores métodos en la industria de los vehículos a motor, es considerado el introductor de la fabricación en serie o mediante cadena de montaje y el pionero en la utilización del principio de ínter cambiabilidad de las piezas de sus autos. Principios altamente empleados en las actuales industrias.

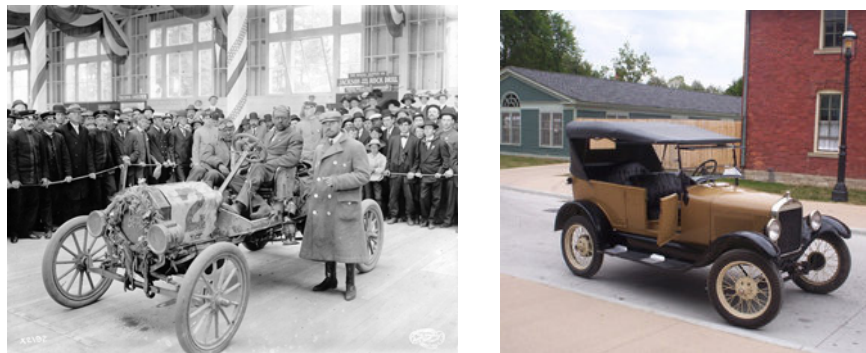


Figura 1.5 primer diseño de auto Ford (Imagen Izquierda) y primer automóvil Ford modelo "T" (Imagen Derecha)

Lo más significativo en esta etapa es que conjuntamente con el desarrollo de la electricidad y la Electrónica, el Diseño Mecánico está a un nivel altamente calificado, mediante el empleo de la Ingeniería Concurrente (la Ingeniería Concurrente es la aproximación sistemática a la integración, del diseño racional de productos y procesos relacionados, que tiene en cuenta, su fabricación y suministro), que incluye los sistemas computarizados de CAD-CAM (Diseño Asistido por Computadoras- Manufactura Asistido por Computadoras), conjuntamente con los paquetes ingenieriles que permiten el cálculo de variables finitas, el diseño óptimo de estructuras y la selección adecuada de material, con un ahorro sustancial en su elaboración, entre otros.

## 1.2 ANTECEDENTES DEL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO.

El principio básico del método del elemento finito ha sido usado durante siglos en diferentes aplicaciones. Todas ellas tienen la característica similar de reemplazar un problema real por uno más sencillo, empleando los llamados elementos finitos. Si el problema simplificado puede resolverse y la solución buscada representa una solución verdadera para el problema real y con una precisión satisfactoria, entonces este método pasa a ser una herramienta poderosa y muy útil. A pesar de que el desarrollo actual del método del elemento finito lo hace ser bastante más sofisticado que los conocidos en la antigüedad, el esquema básico de sustituir un problema real mediante uno simplificado sigue siendo el mismo.

Los primeros datos que se tienen de la aplicación del método del elemento finito se remontan a mucho más de dos mil años, en la antigua Grecia, cuando se aplicó este método a la geometría. Los matemáticos de aquella época aproximaron el número trascendente  $\pi$ , substituyendo un círculo por un polígono regular de muchos lados y obteniendo de este modo resultados sorprendentemente precisos. En la actualidad, se determina este número de una manera más precisa, empleando para ello el cálculo diferencial e integral.

Registros aún más antiguos muestran vestigios de la aplicación del método a la solución de problemas geométricos. Así, por ejemplo, el papiro de Ahmes refiere que por el año 1 500 a. de J. C. los egipcios empleaban el valor de  $10^{1/2}$  (3.16); Otro papiro de mayor antigüedad indica que en Egipto se conocían las fórmulas para calcular el volumen de una pirámide y el área de una esfera por el año de 1 800 a. de J. C. Un libro chino escrito en los inicios de la era cristiana reveló que en China se conocían algunos de los teoremas geométricos empleados por los griegos. El ingeniero chino *Tsu Chung Chik*, [5] utilizando algunos teoremas, determinó que el valor de  $\pi$  estaba entre los valores 3.1415926 y 3.1415927 por el año 450 d. de J. C.

Arquímedes, uno de los más grandes matemáticos de la antigüedad, usó elementos finitos para determinar volúmenes de sólidos, él nombró a su procedimiento “Método exhaustivo”. Este método lo llevó al umbral del cálculo, dos mil años antes de que Newton y Leibniz lo desarrollaran plenamente.

El desarrollo del método del elemento finito, tal como lo conocemos en la actualidad, inició en la década de los años 40's.

En 1941, **Hrenikoff** [8] y **Mc Henry** [9] publicaron trabajos donde aplicaban el método a problemas de elasticidad en estructuras. En 1943, **Courant** [10] sugirió el uso de polinomios de interpolación pieza por pieza en subregiones triangulares, como método para obtener soluciones numéricas aproximadas. El trabajo de Courant es particularmente importante debido a que extendió el concepto del método del elemento finito a otros campos y no se limitó al de la mecánica estructural.

Ninguno de los trabajos precedentes se aplicó a la solución de problemas prácticos, porque no se contaba en esa época con computadoras digitales. En 1947, **Levy** [11] aplicó el método del elemento finito a la aeronáutica, un campo que captó la atención de muchos investigadores y que fue objeto de múltiples estudios. La formulación general del método de la teoría matricial de estructuras, basado en los principios energéticos fundamentales de la elasticidad (el principio de los trabajos virtuales de D'Alembert), se debió a **Argyris y Kelsey** [12].

En 1953, Levy [13] introdujo la formulación del método basándose en la matriz de rigidez. Levy aplicó esta formulación para estudiar el comportamiento elástico de las alas tipo Delta en aeronaves, resolviendo las ecuaciones planteadas con computadoras digitales. En esta época M. J. Turner formó un pequeño grupo dentro de la compañía Boeing con el fin de desarrollar un método de análisis para aplicar la formulación de la matriz de rigidez de cálculos dinámicos de estructuras. Como resultado, en 1956, **Turner, Clough, Martin y Topp** publicaron un artículo [14] considerando como la contribución clave en el proceso del método del elemento finito. Este trabajo y el presentado por **Argyris y Kelsey** [12] dieron origen a que el método tuviera un desarrollo explosivo y que fuera aplicado extensamente en la ingeniería.

Otra contribución teórica importante fue hecha por **Melosh** [15] El término “método del elemento finito” fue propuesto por **Clough** [16] en 1960, en una publicación referente a problemas de elasticidad plana. El problema de la flexión de placas fue tratado en primera instancia por **Melosh** [17] y por **Adini y Clough** [18], ambos trabajos fueron publicados en 1961 y emplearon elementos finitos rectangulares.

En 1963, **Grafton y Strome** [19] publicaron un trabajo concerniente al estudio de conchas delgadas, empleando un elemento finito cónico. Este trabajo introdujo el análisis axisimétrico para su aplicación en conchas delgadas y recipientes sometidos a presión. Melosh, en 1963, estableció las bases matemáticas para fundamentar el método del elemento finito, convirtiéndolo en un área de estudio interesante para los académicos. Melosh reconoció que el método del elemento finito es una variante del método de Rayleigh-Ritz y lo confirmó con una técnica de uso general para manejar problemas continuos de elasticidad. **Zienkewicz** [20] y **Cheung** [21] interpretaron el método del elemento finito de una manera más amplia, presentando la formulación variacional del método. Hasta 1967, los matemáticos e ingenieros trabajaron con el método del elemento finito separados unos de los otros. Hoy en día ambos campos tienen conocimiento uno del otro, no obstante, los matemáticos raras veces se interesan en los problemas de ingeniería y los ingenieros pocas veces tienen la capacidad total para comprender a los matemáticos.

Investigadores como *Szabo y Lee en 1969* [22] y *Zienkewicz en 1971* [23], mostraron que las ecuaciones de los elementos relacionadas a mecánica estructural, transferencia de calor, mecánica de fluidos podían también ser derivadas usando un procedimiento de minimización.

Actualmente, el método del elemento finito ha sido aplicado a un sinnúmero de campos de la ingeniería y la física, teniendo un desarrollo espectacular en las últimas décadas; prueba de ello es la gran cantidad de publicaciones hechas a partir de 1961, en dicho año fueron publicados 10 artículos, 134 en 1966 y 844 en 1971 [24]. Para 1976 habían sido publicados más de 7 000 artículos concernientes al método del elemento finito [25].

### **1.3 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL ACERO.**

#### **1.3.1. HISTORIA DE LA SIDERURGIA**

Como el hierro se corroe fácilmente, no se conservan piezas muy antiguas que sirvan para localizar a los primeros fundidores que supieron explotar los primeros minerales ferrosos. Los minerales ferrosos son mucho más abundantes en la Tierra que el hierro meteórico; sin embargo las técnicas para aprovecharlos son mucho más complicadas.

Para aprovechar el hierro meteórico (procedente de aerolitos) solamente hay que conformarlo a base de martillazos; incluso en algunos casos no hay necesidad de calentarlo. Los minerales ferrosos, por el contrario, son una mezcla de óxidos de hierro (mena) y una cantidad variable de otros compuestos (ganga), generalmente sin interés, de donde la separación del hierro no es nada fácil. Es probable que de manera accidental los antiguos fundidores descubrieran pequeños trozos de hierro en residuos de fogatas donde se quemó leña en abundancia en contacto con rocas de alto contenido férrico. Esto es concebible porque el hierro es el elemento que ocupa el cuarto lugar en abundancia en la corteza terrestre después del oxígeno, el silicio y el aluminio.

La acción del monóxido de carbono producido durante la combustión de la leña pudo haber servido para retirar el oxígeno de los óxidos de hierro. Por este mecanismo, las rocas se convertirían en piezas de hierro poroso, lo que actualmente se conoce como hierro esponja.

Cuando el hierro esponja se encuentra al rojo vivo en contacto con las brasas, en los poros se acumula una escoria líquida que los antiguos eliminaban martillando al hierro esponja en un yunque (forja). Como producto se obtenía un hierro forjado bastante puro. Se conocen piezas muy antiguas cuyo contenido aleante era inferior al 0,1% y con menos del 3% de escoria atrapada en los poros.

Hasta aquí los antiguos fundidores tenían hierro, pero no acero. Hay indicios de que alrededor del año 1200 a.C. ya se sabía como convertir la superficie del hierro forjado en acero; una vez conformada un hacha de hierro forjado, por ejemplo, se empacaba en medio de carbón de leña molida. El conjunto se mantenía en un recipiente al rojo vivo durante varias horas para que el carbono de la leña se difundiera hacia el interior del hacha, evidentemente, si el hierro en los minerales está oxidado, debe eliminarse el oxígeno que contiene.

Y que mejor que el monóxido de carbono (CO), el cual presenta gran afinidad por el oxígeno debido a su estado semioxidado (lo que le confiere un carácter reductor) para convertirse en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Sin embargo, para los antiguos fundidores, que no sabían de la existencia del oxígeno ni entendían el concepto de elementos o reacciones químicas, el asunto resultaba mágico.

¿Como localizar un mineral de hierro? Hoy en día, desde los satélites, se pueden rastrear a gran velocidad los recursos minerales de países enteros. Existen equipos de análisis que detectan los elementos presentes en las rocas, con precisión y velocidad sorprendentes. En ausencia de los equipos modernos, y de muchos que los precedieron, los antiguos fundidores estaban a merced del apoyo divino. Al mineral se le asociaba un comportamiento del animal, que se mueve, se esconde y siente atracción por algunos humanos y repulsión por otros, y se creía que el herrero estaba dotado de poderes mágicos que le permitían ir a la caza de minerales.

El hierro tuvo que librar una batalla importante antes de sustituir al bronce como material para la fabricación de herramientas y armas. Durante cerca de dos milenios, cerca del año 1200 a.C., las aleaciones basadas en el cobre, entre ellas el bronce, eran preferidas en lugar del hierro; de hecho, el bronce tenía propiedades superiores. Este inicialmente se producía aleando cobre con arsénico, porque muchos minerales contenían estos dos elementos a la vez. El arsénico se agregaba al cobre, dando lugar a un material de resistencia superior que se ha caracterizado como "bronce natural". Más adelante, en lugar de arsénico se empleó el estaño para producir el bronce.

El bronce es bastante más duro que el hierro esponja, de modo que por mucho tiempo este último fue poco atractivo. Además el bronce se podía fundir y vaciar en moldes a temperaturas relativamente accesibles (alrededor de los 1000° C). Esto era imposible con el hierro esponja, que funde a 1537° C.

Algunos investigadores creen que el hierro sustituyó al bronce no debido a un avance en el proceso tecnológico, sino porque por alguna razón el bronce escaseó. Es concebible que el suministro europeo de estaño se haya interrumpido. De hecho, el cobre y el estaño son mucho menos abundantes en la corteza terrestre que el hierro y el carbono.

El proceso de "aceración" del hierro surgió por la necesidad de contar con un material tan fuerte como el bronce. El efecto del carbono en el endurecimiento del acero se compara con el efecto del estaño en el cobre en la figura (1.6). Para tener una ventaja notoria sobre el bronce, los herreros tuvieron que ingeniárselas para introducir un 0,4% de carbono en el hierro, proceso nada fácil.

Como ya se dijo antes, los herreros antiguos o antiguos fundidores, empacaban los objetos de hierro en polvo de carbón de leña y los metían en un horno para que el carbono se difundiera en el hierro. A temperaturas de 950° C se requerían nueve horas para formar una corteza de acero (con 0,5% de carbono) de 1,5 mm. de espesor alrededor de la pieza de hierro; este proceso, con algunas variantes, todavía se emplea en la actualidad y se conoce como el tratamiento termoquímico de Cementación.

Al emerger la civilización de la Edad Media, todavía la Cementación era el método más generalizado para convertir la superficie del hierro forjado en acero. Para introducir las capas de acero en el interior de una espada, por ejemplo, se tomaba una barra de hierro y se cementaba; luego se martilleaba hasta alcanzar el doble de su longitud inicial; se doblaba de modo que una mitad quedara encima de la otra y se martilleaba al rojo vivo hasta que soldaran las dos mitades, quedando en el interior una capa de acero.

El proceso se repetía las veces deseadas. En sables japoneses se han encontrado varios miles de capas. Esto no quiere decir que el proceso anterior se tenga que repetir miles de veces: como las capas se multiplican exponencialmente al aumentar el número de dobleces, bastan 12 dobleces para lograr más de 4000 capas. Pero 12 dobleces cuestan mucho trabajo y energía. Cada Cementación puede tomar una jornada de trabajo y grandes cantidades de carbón de leña. Los herreros europeos hacían solamente una o dos dobleces. No fue sino hasta 1740 que el mundo occidental redescubrió el método del crisol para producir acero.

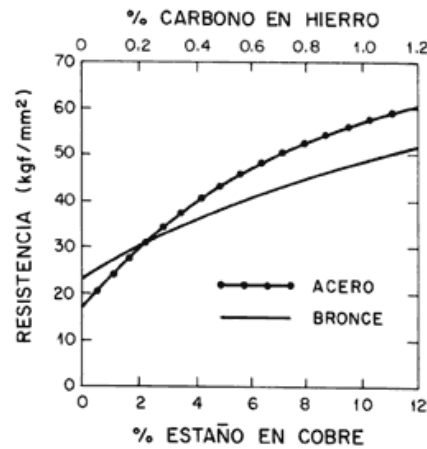


Figura 1.6. Curvas de resistencia mecánica del bronce y el acero.

Lo que entorpecía el avance de la tecnología en el acero era la oscuridad en la que se encontraba. En el siglo XVIII se desconocía el motivo por el cual el hierro forjado, el acero y el Arrabio eran distintos. No fue sino 1820 cuando *Kersten* [5] planteó que era el contenido de carbono la razón de sus diferencias. El primer método para determinar con precisión el contenido de carbono en el acero fue desarrollado en 1831 por *Liebig* [5].

### 1.3.2. EL ACERO A LO LARGO DE LA HISTORIA

Hasta el siglo XIX, la producción de acero iba unida a la presencia de mineral de hierro, y los productores importaban leña como combustible, en una escala que llegó a deforestar grandes superficies boscosas de Europa. A partir de entonces, la producción Hullera británica, con la capitalización consiguiente, atrajo el mineral de hierro del Atlántico Europeo. Ya en el siglo XX, EE.UU. en primer lugar, y sucesivamente Alemania, la URSS y el Japón han dado al traste con aquella hegemonía inicial, y es previsible el acceso de Francia y de China a niveles similares.

Aunque en algunos casos (Suecia, Luxemburgo, Francia, España) el mineral de hierro haya atraído el carbón, generalmente el transporte ha seguido un sentido inverso, hasta el punto que ningún productor importante de hulla coquizable carece de industria siderúrgica, mientras que productores importantes de mineral de hierro (Malasia, Liberia, Canadá, Venezuela o Chile) no la tienen. Únicamente la fabricación de aceros especiales o a base de chatarra, que suele utilizar la electricidad como fuente de energía, puede localizarse en zonas carentes de carbón y de hierro (Escandinavia, Italia, Barcelona o Santander).

Puede darse el caso de que, agotadas las minas, la industria persista aprovechando los capitales, técnicos y mano de obra especializada (Birmingham, tendencia de Vizcaya). La concentración de capitales y la competencia es tan grande en la industria del acero (nexo imprescindible entre el mineral de hierro y la variadísima gama de las manufacturas mecánicas), que la primera unión económica de importancia mundial, el Mercado común Europeo, empezó como CECA (Comunidad Europea del carbón y del Acero).

#### **1.4 GENERALIDADES DE LAS AUTOCLAVES.**

Dentro de los antecedentes históricos de los recipientes herméticos, se encuentra lo que es un autoclave [5], el cual es un dispositivo de laboratorio, que utiliza normalmente vapor de fluido a alta presión y temperatura, evitando con las altas presiones que el fluido en su interior llegue a ebullición a pesar de su alta temperatura.

Las autoclaves funcionan permitiendo la entrada o generación de vapor de un fluido en su interior pero restringiendo su salida del recipiente, hasta obtener una presión interna por lo normal de 103 kPa, lo cual provoca que el vapor alcance una temperatura aproximada de 121 grados centígrados.

Las autoclaves más modernas permiten realizar procesos a mayores temperaturas y presiones, con ciclos estándares a 134 °C a 200 kPa durante 5 min. en aplicaciones para esterilizar material metálico; llegando incluso a realizar ciclos de vacío para acelerar el secado del material esterilizado.

El hecho de contener fluido a alta presión implica que las autoclaves deben ser de manufactura sólida, usualmente en metal, y que se procure construir las totalmente herméticas.

Las autoclaves son ampliamente utilizadas en laboratorios para pruebas experimentales y en instituciones médicas, como una medida elemental de esterilización de material. Aunque cabe notar que debido a que el proceso involucra vapor de fluido a alta temperatura, ciertos materiales no pueden ser colocados en el interior del autoclave, como el papel y muchos plásticos (a excepción del polipropileno).

Existen 3 tipos de autoclaves más comunes [27], y son utilizadas para la esterilización en los hospitales y laboratorios.

### **Gravitatorio:**

En el que las soluciones, fluidos o vapor de agua van desplazando al aire conforme la cámara se va llenando.

### **Prevacio:**

Previamente se hace un vacío en la cámara antes de introducir las soluciones, fluidos ó vapor de agua.

### **Vacio Fraccionado:**

Se realizan varios vacíos alternando con inyecciones de soluciones, fluidos o vapor de agua, Esto al inicio de cada ciclo de operación.

En países socialistas como Cuba se ha hecho adaptaciones recientes de autoclaves de laboratorio para fines científicos relacionados a tecnología.

Los cubanos *Carlos Arancibia del Risco [28]*, *Rolando Rodríguez Macías [28]*, *Elsa Hernández [28]* y *Juan Fuentes Betancourt [28]*; del Instituto de materiales y reactivos para la electrónica, en la Universidad de la Habana, Cuba.

Diseñaron y construyeron un variante de autoclave para hacer crecer mono cristales por efecto hidrotermal. Esta variante de autoclave era capaz de cumplir su objetivo, soportando altas temperaturas y presiones, las cuales fueron reguladas por un sistema de control computarizado.

El diseño y construcción de esta variante de autoclave gravitatoria en mención con tecnología cubana, fue efectuada bajo los criterios de normas nacionales e internaciones para el manejo de recipientes a presión.

Por lo que con esta referencia se puede justificar que un diseño de un recipiente hermético para pruebas experimentales puede llevarse a cabo, haciendo una variante de las aplicaciones convencionales de las autoclaves de laboratorio y hospitales, que normalmente son usadas para esterilización.

## **CAPÍTULO II**

### **FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE RESISTENCIA DE MATERIALES, FATIGA Y CORROSIÓN.**

#### **2.1 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES**

En ingeniería se necesita saber cómo responden los materiales sólidos a fuerzas externas como la tensión, la compresión, la torsión, la flexión o la cizalladura. Los materiales sólidos responden a dichas fuerzas con una deformación elástica (en la que el material vuelve a su tamaño y forma originales cuando se elimina la fuerza externa). Los efectos de una fuerza externa dependientes del tiempo dan origen a la deformación plástica y la fatiga, que se definen más adelante.

#### **TENSIÓN**

Es una fuerza que tira; Bajo tensión, un material suele estirarse, y recupera su longitud original si la fuerza no supera el límite elástico del material. Bajo tensiones mayores, el material no vuelve completamente a su situación original, y cuando la fuerza es aún mayor, se produce la ruptura del material. [7]

#### **COMPRESIÓN**

Es una presión que tiende a causar una reducción de volumen. Cuando se somete un material a una fuerza de flexión, cizalladura o torsión, actúan simultáneamente fuerzas de tensión y de compresión. [29]

#### **DEFORMACIÓN PLÁSTICA**

Es una deformación permanente gradual causada por una fuerza continuada sobre un material. Los materiales sometidos a altas temperaturas son especialmente vulnerables a esta deformación. En muchos casos, esta deformación cesa porque la fuerza que la produce desaparece a causa de la propia deformación. Cuando la deformación plástica se prolonga durante mucho tiempo, el material acaba rompiéndose. [7]

#### **MATERIAL HOMOGÉNEO:**

Tiene las mismas propiedades elásticas (E) en todos los puntos del cuerpo. [5]

#### **MATERIAL ISÓTROPO:**

Tiene las mismas propiedades elásticas en todas las direcciones en cada punto del cuerpo. No todos los materiales son isótopos. Si un material no tiene ninguna clase de simetría elástica se llama anisótropo. Si el material tiene dos planos de simetría elástica perpendiculares entre sí se dice que es ortotrópico. [5]

## **MATERIALES DÚCTILES Y FRÁGILES:**

Los materiales metálicos usados en la ingeniería se clasifican generalmente en dúctiles y frágiles. Un material dúctil es el que tiene un alargamiento a tracción relativamente grande hasta llegar al punto de rotura, mientras que un material frágil tiene una deformación relativamente pequeña hasta el mismo punto. Frecuentemente se toma como línea divisoria entre las dos clases de materiales un alargamiento arbitrario de 0.05 cm. [5]

## **FATIGA**

Puede definirse como una fractura progresiva. Se produce cuando una pieza mecánica está sometida a un esfuerzo repetido o cíclico, por ejemplo una vibración. Aunque el esfuerzo máximo nunca supere el límite elástico, el material puede romperse incluso después de poco tiempo. En algunos metales, como las aleaciones de titanio, puede evitarse la fatiga manteniendo la fuerza cíclica por debajo de un nivel determinado. En la fatiga no se observa ninguna deformación aparente, pero se desarrollan pequeñas grietas localizadas que se propagan por el material hasta que el factor de intensidad de esfuerzos rebasa la tenacidad de la fractura del material. [5]

## **2.2 CORROSIÓN**

La corrosión se define como el deterioro que sufren los metales cuando interactúan en el medio en que trabajan. La corrosión es la disolución o deterioro de un metal en un medio determinado. Los átomos del metal se disuelven en forma de iones. Un modelo simple es la corrosión acuosa.

Es por ello que pensamos que es necesario incluir en este trabajo, teoría sobre corrosión, como una forma de poder controlar todos los procesos acuosos que se van a realizar en el cilindro de pruebas a diseñar. [5]

### **2.2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE CORROSIÓN**

La corrosión es un ataque destructivo de los metales que puede ser de naturaleza química o electroquímica. La corrosión química directa sólo se verifica en condiciones extraordinarias que comprenden un ambiente altamente corrosivo o una elevada temperatura o ambas cosas.

Por ejemplo los metales en contacto con ácidos o álcalis concentradas y la formación de óxido de hierro por disociación del agua. Sin embargo, la mayoría de los fenómenos que comprenden la corrosión de metales que contienen agua o están sumergidos en ella, o su corrosión en la atmósfera por películas de humedad, son de naturaleza electroquímica. [5]

### 2.2.1.1. LA HERRUMBE

La herrumbre u óxido de hierro (ver figura 2.1) es formada bajo condiciones húmedas por partículas de óxido, y las manchas que se forman son esparcidas superficialmente de forma irregular hasta que se reúnen, después con el tiempo la coleta muy pequeña y muy delgada de oxidación permanece claramente constante, Algunas veces el óxido se expande, no como una mancha expandida sino como un camino estrecho. [29]

Estos caminos son comparativamente rectos, pero cambian de dirección cuando se aproximan mutuamente y nunca se cruzan. Esta línea muy delgada con estrías termina en una corrosión que tiene forma o apariencia de hilo y es ilustrada a continuación:

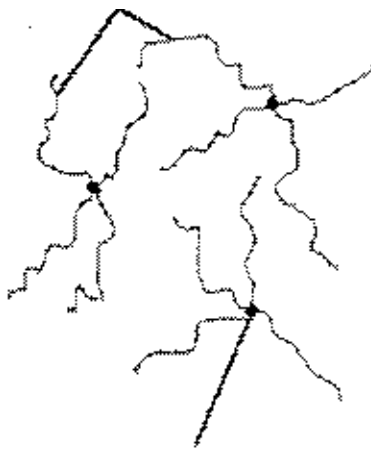


Figura 2.1 Líneas de herrumbre

### 2.2.1.2 PUNTOS DE INICIACIÓN

El punto original absorbe agua y después que el óxido es precipitado, el lugar es cubierto con una membrana de óxido férrico hidratado. Esta se romperá en algún punto, tal vez debido al incremento de volumen dentro de la membrana, y ocurrirá un nuevo ataque. Como el álcali se acumula alrededor del otro lado por un largo periodo de tiempo, más que en la parte delantera, el ataque prosigue en una dirección aproximadamente recta. [29]

### 2.2.1.3 LA OXIDACIÓN DEL HIERRO

La oxidación del hierro se complica por la formación de tres capas de distintos óxidos de hierro cuyas proporciones cambian con la temperatura y presión parcial del  $O_2$ . Estas tres capas son como una cascarilla para temperaturas menores de  $400\text{ }^\circ\text{C}$ .

Algunos resultados indican, que puede consistir en su mayor parte de  $Fe_3O_4$  (óxido ferroso-férrico, ya que se le pueden considerar como un óxido mixto compuesto por  $FeO$ .  $Fe_2O_3$ ) con también algo de  $Fe_2O_3$  alfa.

El mérito de una aleación determinada para resistir a la oxidación en ambientes a temperatura elevada, en especial durante exposiciones largas, no depende sólo de las propiedades de barrera de difusión de las cascarillas formadas por los productos de reacción sino también de la continuidad y de la adherencia de dichas cascarillas sobre el metal. Las cascarillas protectoras se desprenden (fenómeno conocido como descascarillado) durante los ciclos de enfriamiento y calentamiento debido a que su coeficiente de expansión difiere del que posee el metal. [5]

## **2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE CORROSIÓN:**

Una clasificación lógica y científica del proceso de corrosión, aunque deseable, es de ninguna forma simple, debido a la enorme variedad de ambientes corrosivos y a la diversidad de reacciones de corrosión, pero la clasificación general en “mojado” o “seco” es ahora generalmente aceptado, y ambos términos son hoy en día de uso común. El término “mojado” incluye todas las reacciones en las cuales una solución acuosa es envuelta en el mecanismo de reacción. En el término “seco”, está implícita la ausencia de agua o de una solución acuosa.[29]

### **2.2.2.1 LA CORROSION EN MOJADO**

En la corrosión en mojado, la oxidación del metal y la reducción de una especie en solución (agente oxidante) ocurre en diferentes áreas de la superficie metálica, en donde ocurre una transferencia de electrones a través del metal desde el ánodo (metal oxidado) hasta el cátodo (el que acepta electrones). Las fases termodinámicamente estables formadas en la interfase metal/solución, pueden ser componentes sólidos ó iones hidratados (cationes o aniones), los cuales pueden ser transportados fuera de la interfase por procesos tales como migración, difusión y convección (natural o forzada). Bajo estas circunstancias, los reactantes no serán separados por una barrera, y de esta forma el mecanismo de oxidación tenderá a ser lineal. Las reacciones subsiguientes con la solución pueden resultar en la formación de una fase sólida estable, pero como esta se forma fuera de la interfase, la misma no servirá de protección para la superficie metálica. El óxido termodinámicamente estable puede afectar la cinética de la reacción solamente si esta forma una capa o precipitado sobre la superficie metálica. [29]

## **2.3 CORROSIÓN ATMOSFÉRICA DEL HIERRO Y OTROS METALES**

El hierro expuesto a la atmósfera en ausencia de humedad se corroe a una velocidad despreciable. Por ejemplo, piezas de acero abandonadas en el desierto permanecen durante largos periodos de tiempo brillantes y sin siquiera empañarse. Como se ha indicado antes, para que se establezca el proceso de corrosión es necesaria la presencia de un electrolito, de aquí que en climas con temperaturas inferiores al punto de congelación del agua o superiores a las de la condensación acuosa sobre las superficies metálicas, la oxidación sea despreciable. El hielo es un mal conductor electrolítico.

Sin embargo, la incidencia de la corrosión por la atmósfera depende no sólo del contenido de humedad sino también del contenido de polvo y otras impurezas, algunas de las cuales favorecen la condensación de la humedad sobre las superficies metálicas.[29]

### 2.3.1 CLASES DE ATMÓSFERAS

La atmósfera puede variar mucho con respecto a la humedad, temperatura y contaminantes, por lo que las velocidades de la corrosión atmosférica varían considerablemente de unas partes a otras.

A medida que nos acercamos a la costa, el aire está cargado con crecientes cantidades de sales, en particular de NaCl (cloruro de sodio). En las zonas industriales se encuentran cantidades apreciables de SO<sub>2</sub>, que se convierte en ácido sulfúrico y cantidades menores de SH<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y diversas sales en suspensión.

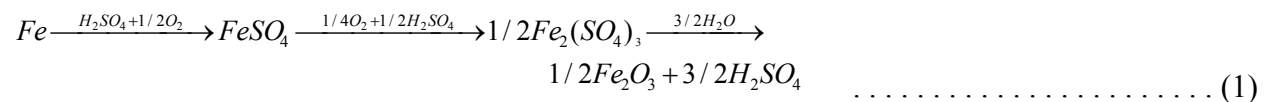
Un metal resistente en una atmósfera determinada puede perder efectividad en otro lugar, debido a que las características relativas de los metales pueden cambiar con la atmósfera, por ejemplo el hierro galvanizado se comporta bien en atmósferas rurales, pero en atmósferas industriales es bastante menos resistente.

El reconocimiento de las marcadas diferencias en la corrosividad ha aconsejado clasificar las atmósferas en diferentes tipos, los principales son: marino, industrial, tropical, ártico, urbano y rural, existiendo grandes diferencias en la velocidad de corrosión en muestras expuestas a atmósferas marinas según la proximidad al mar.

El acero cuando es expuesto a una atmósfera industrial, reacciona para formar el óxido, de composición aproximada Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> • H<sub>2</sub>O, el cual siendo aparentemente adhesivo, no forma una barrera protectora que aísla el metal del ambiente; la reacción de esta manera prosigue a una rata aproximadamente lineal hasta que el metal es completamente consumido.

Las capas de herrumbre que se forman en la atmósfera tienden a ser protectoras, es decir, la velocidad de corrosión decrece con el tiempo. La velocidad de corrosión alcanza en el transcurso del tiempo un régimen estable y por lo general cambia poco durante la exposición posterior.

Las superficies metálicas situadas donde se humedezcan o retengan humedad, pero fuera del alcance de la lluvia y por lo tanto no se laven, se corroen con mayor rapidez que las muestras totalmente expuestas. La razón de esto es que el ácido sulfúrico, por ejemplo, absorbido por el óxido continuará acelerando la corrosión, a través de un ciclo que puede ser de la siguiente manera (resulta muy difícil poder predecir el ciclo exacto que sigue el proceso de oxidación, ya que intervienen muchos factores que son desconocidos):



En donde el FeSO<sub>4</sub> es aquel polvo que se puede apreciar sobre la superficie metálica que es de color amarillo.

La película de herrumbre contaminada de esta manera cataliza la formación de más herrumbre. Por tanto, la exposición directa de un metal a la lluvia puede ser beneficiosa comparada con la exposición protegida parcialmente. Probablemente esta ventaja no se da en las atmósferas no contaminadas. [29]

## 2.4 CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN

Cuando se aumenta gradualmente la carga axial por incrementos de carga, se mide el alargamiento de la longitud patrón para cada incremento, continuando de este modo hasta que se produce la rotura de la probeta. Conociendo el área original de la sección transversal de la probeta puede obtenerse la tensión normal, representada por ( $\sigma$ ), para cada valor de la carga axial, simplemente utilizando la relación:

$$\sigma = P / A$$

Con varios pares de valores de la tensión normal “ $\sigma$ ” y de la deformación normal se pueden representar gráficamente los datos experimentales tomando estas cantidades como ordenadas y abscisas, respectivamente. Así se obtiene un diagrama esfuerzo-deformación del material para este tipo de carga. Donde: “P” representa la carga axial en kilogramos y “A” el área de la sección transversal.

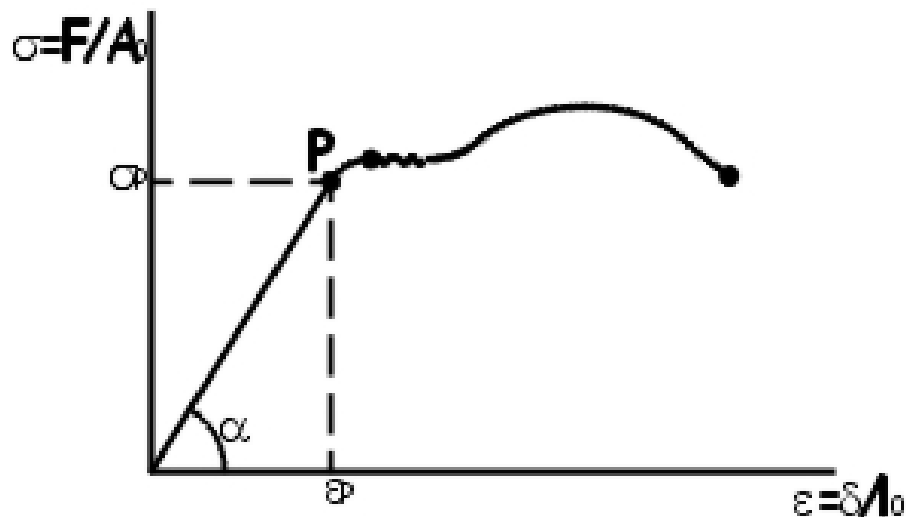


Figura 2.2 curva Esfuerzo-deformación

La curva esfuerzo-deformación [30] se puede usar para determinar varias características de resistencia del material. Estas son:

### 2.4.1 LÍMITE DE PROPORCIONALIDAD:

A la ordenada del punto “P” de la figura 2.2 se le conoce por límite de proporcionalidad, esto es, la máxima tensión que se puede producir durante un ensayo de tracción simple de modo que la tensión sea función lineal de la deformación.[30]

### **2.4.2 LÍMITE ELÁSTICO:**

La ordenada de un punto que casi coincide con “P” se conoce por límite elástico, esto es, la tensión máxima que puede producirse durante un ensayo de tracción simple de muchos materiales son casi idénticos los valores numéricos del límite elástico y del límite de proporcionalidad, por lo que a veces se consideran sinónimos. En los casos en que es notoria la diferencia, el límite elástico es casi siempre mayor que el de proporcionalidad. [30]

### **2.4.3 ZONA ELÁSTICA:**

Es la región de la curva esfuerzo-deformación de la figura 2.2 que va desde el origen hasta el límite de proporcionalidad. [30]

### **2.4.4 ZONA PLÁSTICA:**

Es la región de la curva esfuerzo-deformación de la figura 2.2 que va desde el límite de proporcionalidad hasta el punto de rotura. [30]

### **2.4.5 LÍMITE ELÁSTICO APARENTE O DE FLUENCIA:**

A la ordenada del punto Y de la figura 2.2 en la que se produce un aumento de deformación sin aumento de tensión se le conoce por límite elástico aparente o límite de fluencia del material. Cuando la carga ha aumentado hasta el punto Y, se dice que se produce fluencia. Algunos materiales presentan en la curva esfuerzo-deformación dos puntos en los que hay aumento de deformación sin que aumente la tensión. Se les conoce por límites de fluencia superior e inferior.[30]

### **2.4.6 RELACIÓN DE POISSON:**

Cuando una barra esta sometida a una carga de tracción simple se produce en ella un aumento de longitud en la dirección de la carga, así como una disminución de las dimensiones laterales perpendiculares a esta. La relación entre la deformación en la dirección lateral y la de la dirección axial se define como relación de Poisson. La representaremos por la letra griega  $\mu$ . Para la mayoría de los metales esta entre 0.25 y 0.35. [6]

### **2.4.7 LEY DE HOOKE:**

Es la relación lineal entre el alargamiento y la fuerza axial que lo produce fue observada por primera vez por Robert Hooke en 1678 [5] y lleva el nombre de ley de Hooke. Por tanto, para describir esta zona inicial del comportamiento del material, se describe como:

$$\sigma = E \varepsilon \dots\dots\dots (2)$$

Donde: “ $\sigma$ ” representa el esfuerzo aplicado,

“ $\varepsilon$ ” representa la deformación unitaria

“E” representa la pendiente de la parte recta de la curva tensión-deformación.

## 2.5 TEORIA DE ESFUERZO EN RECIPIENTES CILÍNDRICOS

### 2.5.1. TENSIONES EN UN ANILLO CIRCULAR Y EN UN CILINDRO DE PARED GRUESA

Al someter un cilindro de pared delgada a fuerzas radiales uniformemente distribuidas a lo largo de su circunferencia, se producirán fuerzas a lo largo de su espesor que actuarán tangencialmente. Si las fuerzas que actúan son radiales hacia fuera se producirá un engrandecimiento uniforme del cilindro, mientras que si son radiales hacia dentro se producirá una contracción uniforme.[30]

La fuerza  $F$  sobre el cilindro de pared delgada puede determinarse seccionando el cilindro por una sección diametral horizontal, obteniendo el cuerpo mostrado en la Fig. 2.3

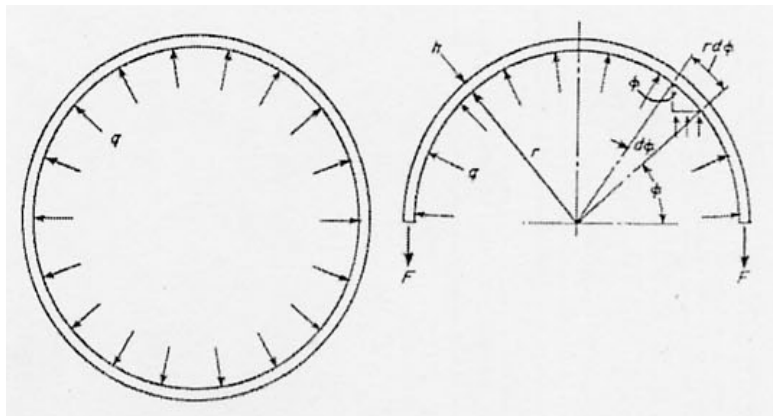


Fig. 2.3. Tensiones radiales y anulares en un anillo delgado.

Si la fuerza por unidad de longitud de circunferencia es ( $q$ ), y el radio del anillo es ( $r$ ), la fuerza que actuaría en el cilindro de pared delgada sería igual a ( $qrd\phi$ ).

Realizando sumatoria de fuerzas verticales que actúan sobre el cilindro semicircular obtenemos la ecuación de equilibrio.

$$2F = 2 \int_0^{\pi/2} qr \sin \phi d\phi = 2qr$$

$$F = qr \dots \dots \dots (3)$$

La tensión unitaria en la sección del cilindro puede obtenerse dividiendo la fuerza  $F$  por el área  $A$  de la sección recta.

$$\sigma_2 = \frac{qr}{A} \dots \dots \dots (4)$$

Si se considera que la sección analizada del cilindro es una sección de longitud constante de un recipiente cilíndrico de espesor ( $h$ ) sujeto a una presión interna ( $p$ ), se tiene que en la ecuación anterior  $q=p$  y  $A=h$ , y que la tensión anular en el recipiente cilíndrico es

$$\sigma_2 = \frac{pr}{h} \dots\dots\dots (5)$$

El esfuerzo longitudinal puede entonces calcularse igualando la presión total ejercida contra el extremo del cilindro, con las fuerzas longitudinales que actúan en una sección transversal de la siguiente manera:

$$\sigma_1 h 2\pi r = p \pi r^2 \rightarrow \sigma_1 = \frac{pr}{2h} \dots\dots\dots (6)$$

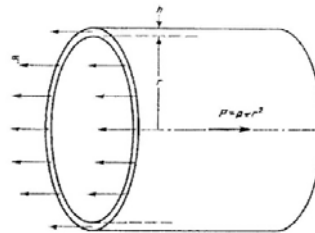


Fig. 2.4 Corte seccional del cilindro

### 2.5.2 DILATACIÓN DE RECIPIENTES A PRESIÓN

La dilatación de un recipiente a presión puede calcularse integrando el alargamiento anular desde un eje que pasa por el centro de rotación y es paralelo al radio. [30] Así,

$$\delta = \int_0^{\pi/2} e_2 r \cos \phi d\phi = e_2 r \dots\dots\dots (7)$$

Sustituyendo el valor de  $e_2$  y los valores de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  se tiene:

$$\delta = r \left( \frac{\sigma_2}{E} - \frac{\mu \sigma_1}{E} \right) \quad \delta = \frac{pr^2}{2hE} (2 - \mu) \dots\dots\dots (8)$$

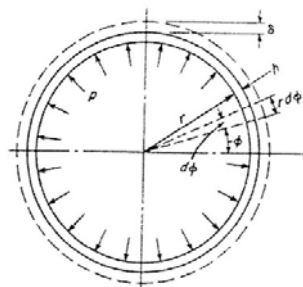


Fig. 2.5 Análisis de fuerzas en el cilindro

### 2.5.3 CILINDRO DE PARED GRUESA

Se consideran cilindros de paredes gruesas [6, 30] a aquellos que el espesor de su pared es mayor que una décima parte (1/10) de su radio medio. En estas condiciones las variaciones de tensión entre la superficie interior y exterior se hacen apreciables, y las fórmulas ordinarias de tensión media ya no son aplicables.

Analizando un cilindro de paredes gruesas con una presión interior ( $p_i$ ) y una presión exterior ( $p_o$ ), Se puede apreciar que debido a la simetría axial del cilindro y de las cargas, las tensiones y deformaciones en este, serán también simétricas con respecto a su eje.

Separando mediante dos secciones perpendiculares al eje del cilindro, un anillo de longitud unitaria se le corta un elemento ( $mm1n1$ ) por medio de dos planos que pasan a través del cilindro y que forman entre sí un ángulo ( $d\phi$ ) y dos superficies cilíndricas de radios ( $r$ ) y ( $r+dr$ ).

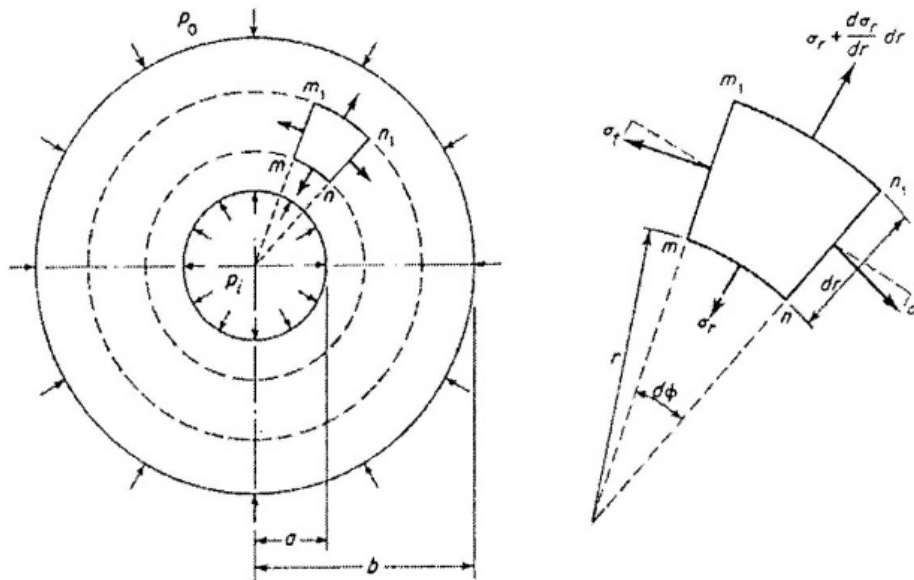


Fig. 2.6 Corte del elemento  $mm1n1$

Por las caras de ese elemento actuarán las tensiones radiales ( $\sigma_r$ ) y tangenciales ( $\sigma_t$ ) que sustituyen la acción de la parte eliminada del cilindro y satisfacen las condiciones de equilibrio del elemento, clasificando a ( $\sigma_r$ ) y ( $\sigma_t$ ) como las tensiones principales.

La tensión radial normal a la cara “ $mn$ ” es ( $\sigma_r$ ) y varía con el radio a lo largo de una distancia ( $dr$ ) una cantidad  $(d\sigma_r/dr)dr$ . De donde puede deducirse la siguiente expresión sobre la tensión radial en la cara “ $m1n1$ ”

$$\sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr \dots\dots\dots (9)$$

La ecuación de equilibrio para el elemento se puede obtener sumando las fuerzas en la dirección de la bisectriz del ángulo ( $d\phi$ ), entendiendo que para ángulos pequeños el seno y el ángulo en radianes son iguales.

$$\sigma_r r d\phi + \sigma_t dr d\phi - \left(\sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr\right)(r + dr)d\phi = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

Desarrollando la expresión anterior se tiene la siguiente ecuación:

$$\sigma_r r d\phi + \sigma_t dr d\phi - \sigma_r r d\phi - \sigma_r dr d\phi - r \frac{d\sigma_r}{dr} dr d\phi - \frac{d\sigma_r}{dr} dr^2 d\phi = 0 \quad \dots\dots (11)$$

Despreciando los infinitésimos de segundo orden y simplificando la expresión se puede presentar como una ecuación que da una relación entre ambos tipos de esfuerzos:

$$\sigma_t - \sigma_r - r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

De acuerdo a lo investigado, se pudo constatar sobre una segunda relación de la deformación del cilindro y de suponer que la deformación longitudinal de todas las fibras es igual, la deformación del cilindro es simétrica respecto del eje. Esta segunda relación de la deformación del cilindro consiste en un desplazamiento radial de todos los puntos de la pared y se deduce bajo las siguientes condiciones:

Este desplazamiento es constante en la dirección circunferencial, pero varía con la distancia a lo largo del radio. Si ( $u$ ) denota el desplazamiento radial de una superficie cilíndrica de radio ( $r$ ), el desplazamiento radial de la superficie de radio ( $r+dr$ ) es:

$$u + \frac{du}{dr} dr \quad \dots\dots\dots (13)$$

De ahí que un elemento “ $mnmlnl$ ” sufre una elongación total en la dirección radial de  $(du/dr)dr$ , o una elongación unitaria de

$$e_r = \left(\frac{du}{dr}\right) \frac{dr}{dr} = \frac{du}{dr} \quad \dots\dots\dots (14)$$

En la dirección circunferencial, la elongación unitaria del mismo elemento es igual a la elongación unitaria del correspondiente radio:

$$e_t = \frac{u}{r} \quad \dots\dots\dots (15)$$

De este modo, si sustituimos estas expresiones de la elongación unitaria en las siguientes ecuaciones podríamos calcular las tensiones en términos de elongación o elongaciones:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} \left( \frac{du}{dr} + \mu \frac{u}{r} \right)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\mu^2} \left( \frac{u}{r} + \mu \frac{du}{dr} \right) \dots\dots\dots (16)$$

Y a su vez conjugar estas para crear una ecuación diferencial acerca de los desplazamientos:

$$\frac{du^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0 \dots\dots\dots (17)$$

Cuya solución general es:

$$u = C_1 r + \frac{C_2}{r} \dots\dots\dots (18)$$

La cual es derivable con respecto a (r):

$$\frac{du}{dr} = C_1 - \frac{C_2}{r^2} \dots\dots\dots (19)$$

Por lo que sustituyendo esta derivada en las fórmulas antes obtenidas para determinar los esfuerzos radiales y tangenciales, tendríamos:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} \left[ C_1(1+\mu) - C_2 \frac{1-\mu}{r^2} \right]$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\mu^2} \left[ C_1(1+\mu) + C_2 \frac{1-\mu}{r^2} \right] \dots\dots\dots (20)$$

Las constantes de integración  $C_1$  y  $C_2$  se determinan con las condiciones de contorno en las superficies interior y exterior del cilindro:  $-ra$  i  $\sigma = p$  y  $-rb$  o  $\sigma = p$ . El signo negativo denota que la tensión es de compresión.

$$C_1 = \frac{1-\mu}{E} \left[ \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2} \right] \quad C_2 = \frac{1+\mu}{E} \left[ \frac{a^2 b^2 (p_i - p_o)}{b^2 - a^2} \right] \dots\dots\dots (21)$$

Introduciendo el valor de las constantes en las ecuaciones de esfuerzos radial y tangencial se pueden obtener, las que pueden ser consideradas fórmulas generales para determinar las tensiones en cilindros de pared gruesa:

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2} - \frac{(p_i - p_o) a^2 b^2}{r^2 (b^2 - a^2)}$$

$$\sigma_t = \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2} + \frac{(p_i - p_o) a^2 b^2}{r^2 (b^2 - a^2)} \dots \dots \dots (22)$$

Estas fórmulas se conocen como las fórmulas de Lamé y de aquí se puede deducir que el valor máximo de “σ<sub>t</sub>” se da en la superficie interior, y el “σ<sub>r</sub>” máximo siempre será la mayor de las dos presiones (p<sub>i</sub> y p<sub>o</sub>).

También se deduce que la suma de las 2 tensiones se mantiene constante:  $r \sigma_r + \sigma_t = cte$ . Es decir, que las secciones transversales del cilindro durante la deformación siguen siendo planas después de la deformación, y la deformación de todos los elementos en la dirección axial es la misma.

Se ha investigado que las fórmulas de Lamé son justas para un cilindro infinitamente largo y para la utilización en las secciones del cilindro bastante alejadas de los fondos, si estos existen.

Cuando hay fondos, en las paredes del cilindro aparecen tensiones axiales debidas a las cargas axiales N:

$$\sigma_z = \frac{N}{\pi(b^2 - a^2)} \dots \dots \dots (23)$$

La tensión cortante máxima en cualquier punto del cilindro es igual a la mitad de la diferencia algebraica de las tensiones principales máximas y mínimas en ese punto. Como la tensión longitudinal (axial) es un valor intermedio entre σ<sub>r</sub> y σ<sub>t</sub>:

$$\tau = \frac{\sigma_t - \sigma_r}{2} = \frac{p_i - p_o}{b^2 - a^2} \frac{a^2 b^2}{r^2} \dots \dots \dots (24)$$

### 2.5.4 CILINDROS

Como  $p_o = 0$ , las fórmulas de Lamé se reducen a:

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_t = \frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{b^2}{r^2} \right)$$

..... (25)

Y expresan:

- 1.-Que ambas tensiones son máximas en la superficie interior, donde ( $r$ ) tiene valor mínimo.
- 2.-Que  $\sigma_r$  siempre es una tensión de compresión, y menor que  $\sigma_t$ ,
- 3.-Que  $\sigma_t$  siempre es una tensión de tracción cuyo valor máximo (que se da en la superficie interior) es igual a:

$$\sigma_{tmax} = \frac{p_i (a^2 + b^2)}{b^2 - a^2}$$

..... (26)

De la última ecuación se agencia que “ $\sigma_{tmax}$ ” siempre es numéricamente mayor que la presión interior, pero se aproxima a medida que  $b$  aumenta.

La Fig. 2.28 ilustra la variación de la tensión tangencial  $\sigma_t$  a lo largo de la pared de un cilindro de pared gruesa, cuya relación entre radio exterior e interior es 2 ( $K=b/a=2$ ). Al comparar la tensión máxima obtenida por las fórmulas de Lamé y las fórmulas de tensión media para cilindros delgados se puede deducir que para paredes delgadas ( $K \sim 1$ ) los valores obtenidos mediante una o mediante otra son similares, mientras que para  $K$  alejados de 1 se diferencian notablemente.

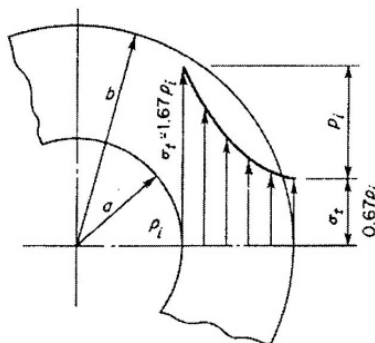


Fig. 2.7 Variación de la tensión tangencial a través de la pared un cilindro Grueso

Por lo que al diseñar cilindros para presiones muy elevadas aparece la necesidad de utilizar materiales con un punto de fluencia muy elevado, o utilizar métodos de diseño y construcción que creen una tensión residual inicial de compresión en la superficie interior, para que soporte las elevadas tensiones aplicadas en este punto. Como la tensión cortante es máxima en la superficie interior para  $r = a$ , se obtiene:

$$\tau = \frac{\rho_i b^2}{b^2 - a^2} \dots\dots\dots(27)$$

**2.5.5 DEFORMACIÓN DE UN CILINDRO DE PARED GRUESA [6,30]:**

Al sustituir los valores de las Contantes C1 y C2 en la formula general sobre el desplazamiento radial para cualquier punto en la pared del cilindro puede deducirse la siguiente expresión:

$$u = \frac{1 - \mu}{E} \left[ \frac{a^2 \rho_i - b^2 \rho_o}{b^2 - a^2} r \right] + \frac{1 + \mu}{E} \left[ \frac{(\rho_i - \rho_o) a^2 b^2}{r (b^2 - a^2)} \right] \dots\dots\dots(28)$$

Para aplicaciones prácticas en un cilindro sometido únicamente a presión interior, el desplazamiento radial de la superficie interior ( $r = a$ ) y en la superficie exterior ( $r = b$ ) son:

$$u_a = \frac{\rho_i a}{E} \left( \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \mu \right) \dots\dots\dots(29)$$

$$u_b = \frac{2 \rho_i a^2 b}{E (b^2 - a^2)} \dots\dots\dots(30)$$

## **CAPÍTULO III**

### **CONSIDERACIONES TÉCNICAS DE DISEÑO PARA LA FABRICACIÓN DE RECIPIENTE HERMÉTICO.**

#### **3.1 NORMAS OFICIALES MEXICANAS RELACIONADAS.**

Como a este proyecto de diseño, se le quiera dar la mayor formalidad posible en lo referente a requisitos necesarios para una posible patente, es necesario conocer aspectos generales sobre Normas Oficiales Mexicanas a este respecto, de ahí que se presentan algunos fragmentos de estas normas:

##### **3.1.1 NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-050-SCFI-1994 (INFORMACIÓN COMERCIAL-DISPOSICIONES GENERALES PARA PRODUCTOS). [31]**

###### **3.1.1.1 OBJETIVO DE LA NORMA**

Tiene por objeto establecer la información que deben contener los productos en general para ser fabricados y comercializados en México.

###### **3.1.1.2 CAMPO DE APLICACIÓN**

Esta Norma es aplicable a todos los productos entre los que se encuentra la maquinaria y equipo, que sean de fabricación nacional o extranjera y que estén destinados a los consumidores o usuarios en territorio nacional.

###### **3.1.1.3 REQUISITOS GENERALES**

**A)** La información acerca de los productos debe ser veraz y describirse y presentarse de forma tal que no induzca a error al consumidor o usuario con respecto a la naturaleza y características.

**B)** La información que se ostente en las etiquetas de los productos debe:

- Expresarse en idioma español, sin perjuicio de que se exprese también en otros idiomas.
- Expresarse en términos comprensibles y legibles.
- Cumplir con lo que establecen las normas oficiales mexicanas en lo referente a otros sistemas de unidades.
- Presentarse en etiqueta fijada de manera tal que permanezca disponible hasta el momento de su uso.

**C)** Los instructivos, manuales de operación y garantías deben expresarse en idioma español y de acuerdo al Sistema General de Unidades de Medida, sin perjuicio de que además se expresen en otros idiomas y sistemas de unidades.

**D)** Los instructivos y manuales de operación que se le tienen que adjuntar con el producto o equipo, deben de indicar:

- Nombre, denominación o razón social del productor nacional, o importador, domicilio fiscal y teléfono de servicio en territorio nacional.
- Identificación del producto al que corresponde.
- Precauciones para el usuario o consumidor.
- Cuando proceda, las indicaciones para su instalación, conexión, ensamble o mantenimiento para su adecuado funcionamiento.

**E)** Se deben ofrecer garantías por los proveedores, éstas deben expedirse en los términos y forma establecidos en la Ley Federal de Protección al Consumidor e indicar y cumplir con lo siguiente:

- Nombre, denominación o razón social y domicilio fiscal del productor nacional o importador del producto y teléfonos de servicio en territorio nacional.
- Identificación del producto al que corresponde la garantía.
- Nombre y domicilio de los establecimientos en la República Mexicana donde puede hacerse efectiva la garantía, así como aquellos donde el consumidor pueda adquirir partes y refacciones.
- Duración de la garantía.
- Conceptos que cubre la garantía y limitaciones o excepciones.
- Procedimiento para hacer efectiva la garantía.
- Precisar la fecha en que el consumidor recibió el producto o indicar los documentos de referencia donde ésta se señale. Es responsabilidad del comerciante asegurarse que esta información esté presente al momento de la venta del producto al consumidor, de no hacerlo así, el comerciante deberá cumplir con los términos de la garantía directamente.
- Para hacer efectiva la garantía no podrán exigirse otros requisitos que la presentación del producto, la póliza vigente y comprobante de venta.

**F)** Los instructivos, manuales de operación y garantías para el consumidor o usuario final del producto o equipo, deben entregarse al mismo tiempo.

#### **3.1.1.4 CONCORDANCIA CON NORMAS INTERNACIONALES**

-ISO. Guide 14 Product Information for consumers. First edition 1977-03-01.

Concordancia parcial.

-ISO. Guide 37 Instructions for use of products of consumer interest. First edition 1983-05-01.

Concordancia parcial.

-ISO. Guide 41 Standards for packaging- Consumer requirements.

First edition 1984-04-15.

### **3.1.2 NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-005-STPS-1998 (RELATIVA A LAS CONDICIONES DE SEGURIDAD E HIGIENE EN LOS CENTROS DE TRABAJO PARA EL MANEJO, TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE SUSTANCIAS QUIMICAS PELIGROSAS). [32]**

#### **3.1.2.1. OBJETIVO DE LA NORMA**

Establecer las condiciones de seguridad para el manejo, transporte y almacenamiento de sustancias químicas peligrosas.

#### **3.1.2.2. CAMPO DE APLICACIÓN**

La presente Norma rige en todo el territorio nacional y aplica en todos los centros de trabajo donde se manejen, transporten o almacenen sustancias químicas peligrosas.

#### **3.1.2.3. REQUISITOS GENERALES**

**A)** En base al estudio para analizar el riesgo potencial al estar en un ambiente donde hay la presencia o manejo de residuos tóxicos, o corrosivos o peligrosos, se deben colocar las señales, avisos, colores e identificación de fluidos conducidos en tuberías.

**B)** El llenado de los recipientes que contengan sustancias químicas peligrosas en estado líquido a presión atmosférica, debe hacerse máximo hasta el noventa por ciento de su capacidad, para lo cual se debe contar con un dispositivo de lectura del nivel de llenado.

**C)** Los recipientes portátiles sujetos a presión que contengan sustancias químicas peligrosas deben:

- Contar con válvulas y manómetros; la lectura de la presión de operación en el manómetro debe
- Estar por debajo de la presión máxima de trabajo,
- Tener indicada la presión máxima de trabajo.

**D)** Los recipientes fijos de almacenamiento de sustancias químicas peligrosas deben contar con cimentaciones a prueba de fuego.

**E)** Las tuberías y recipientes fijos que contengan sustancias químicas peligrosas deben contar con sistemas que permitan interrumpir el flujo de dichas sustancias.

**F)** Se debe contar con zonas específicas para el almacenamiento de las sustancias químicas peligrosas.

**G)** Se deben identificar los recipientes que contengan sustancias químicas peligrosas.

**H)** Los recipientes con sustancias químicas peligrosas deben permanecer cerrados mientras no estén en uso.

**I)** En las áreas donde por el tipo de actividad no exista exposición frecuente a sustancias químicas peligrosas, se debe vigilar que la concentración de éstas en el medio ambiente no generen una atmósfera explosiva.

**J)** Para trabajos en espacios confinados, se debe cumplir con lo siguiente:

1. Llevar a cabo el bloqueo de energía, maquinaria y equipo relacionado con el espacio confinado donde se hará el trabajo, y colocar tarjetas de seguridad que indiquen la prohibición de usarlos mientras se lleva a cabo el trabajo;

2. Se debe monitorear constantemente el interior para verificar que la atmósfera cumpla con las condiciones siguientes:

- Que el contenido de oxígeno esté entre 19.5% y 23.5%; en caso contrario se deben tomar las medidas pertinentes, tanto para el uso de equipo de protección respiratoria con suministro de aire, como para la realización de actividades en atmósferas no respirables;
- La concentración de gases o vapores inflamables no debe ser superior en ningún momento al 20% del valor del límite inferior de inflamabilidad; Ejemplo: El ácido fórmico tiene un límite inferior de inflamabilidad de 18 en una relación volumen/volumen, por lo que 3.6 es el valor que no debe ser superado.
- La concentración de sustancias químicas peligrosas no debe exceder los límites máximos permisibles de exposición establecidos en la NOM-010-STPS-1993, de lo contrario se deben aplicar las medidas de control establecidas en esa norma,
- Las lámparas que se utilicen para iluminar un espacio confinado, deben ser de uso rudo, a prueba de explosión.

3. Siempre se trabaje en un espacio confinado, deberá ser estrechamente vigilado por el responsable del área o por una persona capacitada para esta función, además debe utilizar un arnés y cuerda resistente a las sustancias químicas que se encuentren en el espacio confinado, con longitud suficiente para poder maniobrar dentro del área y ser utilizada para rescatarlo en caso de ser necesario.

**K)** Cuando se cuente con un sistema de ventilación artificial, éste debe operarse bajo un programa de mantenimiento y supervisión de funcionamiento.

**L)** En las áreas del centro de trabajo donde se manejen, transporten o almacenen estas sustancias; las paredes, pisos, techos, instalaciones y cimentaciones deben ser de materiales resistentes al fuego.

**M)** Se prohíbe el uso de herramientas, ropa, zapatos y objetos personales que puedan generar chispa, flama abierta o temperaturas que puedan provocar ignición.

**N)** El trasvase de sustancias inflamables o combustibles debe realizarse con la ventilación o aislamiento del proceso suficiente para evitar la presencia de atmósferas explosivas.

Ñ) Las áreas destinadas para este fin deben estar aisladas de cualquier fuente de calor o ignición.

O) Los recipientes fijos donde se almacenen estas sustancias deben contar con dispositivos de relevo de presión y arrestador de flama.

P) Los sistemas de tuberías que conduzcan estas sustancias y que estén expuestos a que el tránsito normal de trabajadores o equipo los pueda dañar, deben contar con protección para evitar que sean dañados. Esta protección no debe impedir la revisión y el mantenimiento de dichos sistemas de tuberías.

### **3.2 NORMAS INTERNACIONALES QUE REGULAN LAS PRUEBAS A FATIGA Y EL MANEJO DE FLUIDOS CORROSIVOS.**

En las anteriores normas oficiales mexicanas descritas se tratan aspectos de manera generalizada, por lo que se procedió a investigar sobre normas internacionales que pueden enriquecer la lista de factores y criterios que tienen que ser considerados para diseñar un modelo o prototipo, de ahí que se obtuvo la siguiente información.

#### **3.2.1 NORMA ASTM E-647-91**

Esta Norma ASTM [33] brinda aspectos generales y una metodología sugerida de prueba estándar para la medición de las tasas de crecimiento de agrietamiento por fatiga.

##### **3.2.1.1 Aspectos Generales:**

De acuerdo a lo investigado, para este tipo de ensayos la determinación de las tasas de crecimiento de agrietamiento por fatiga de cerca del umbral <sup>máximo</sup> deben de llevar a cabo con una K controlada ante la inestabilidad.

Los materiales que pueden ser probados no deben estar limitados por el grosor o por la fuerza, siempre y cuando los especímenes sean de suficiente espesor para evitar pandeo y con superficie plana suficiente para que siga siendo predominantemente elásticos durante las pruebas.

##### **3.2.1.2 Resumen del Método de la Norma**

Este método de ensayo se divide en dos partes principales.

- La primera parte ofrece información general sobre las recomendaciones y requisitos para la prueba de la tasa de crecimiento de la grieta por fatiga.
- La segunda parte se compone de los anexos que describen los requisitos especiales para diversas configuraciones de muestra, los requisitos especiales para las pruebas en entornos acuosos, y los procedimientos para la determinación no-visual del tamaño de la grieta.

### **3.2.1.3 Precisión de los Resultados**

Los detalles de los distintos especímenes y configuraciones de prueba se pueden comparar con la información de los anexos.

Las distintas configuraciones de estas pruebas pueden utilizarse siempre que se establezca el factor de intensidad de estrés, calibraciones disponibles y que los especímenes sean de suficiente tamaño.

El estrés residual puede afectar significativamente los datos de la tasa de crecimiento de grieta por fatiga, en particular en factores de baja intensidad de esfuerzos y coeficientes de baja tensión, aunque tales variables no están incorporadas en el cálculo de  $K D$ .

Los valores de los resultados se deben indicarse en unidades SI y deben expresarse en términos de grieta-estrés ( $K D$ ), definido por la teoría de la elasticidad lineal. Los valores que se señalen entre paréntesis deben usarse sólo a título informativo.

## **3.2.2 NORMA ITC MIE-APQ-6 (AVALADA POR LA UNIÓN EUROPEA PARA EL “MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE LÍQUIDOS CORROSIVOS). [34]**

### **3.2.2.1 GENERALIDADES**

#### **A) Acerca del almacenamiento.**

Los almacenamientos podrán situarse en el exterior o interior de edificios, tanto sobre o bajo el nivel del suelo. En cualquier caso, se mantendrá accesible toda la superficie lateral exterior de los tanques y depósitos.

Los recipientes para almacenamiento de líquidos corrosivos podrán ser de los tipos siguientes:

1. Tanques atmosféricos.
2. Tanques a baja presión.
3. Recipiente a presión.

Los recipientes a presión podrán utilizarse como tanques a baja presión y ambos como tanques atmosféricos.

## B) Diseño y construcción de recipientes y tuberías.

1. **Materiales.** Los tanques y depósitos, así como los sistemas de tuberías, se diseñarán y fabricarán con materiales que, cumpliendo con las exigencias mecánicas de los equipos, permitan una vida útil razonable. Ésta se determinará de acuerdo con la previsión de su renovación y/o sustitución. Para la determinación de la vida útil de dichos materiales deberá tenerse en cuenta no sólo las velocidades de corrosión cuando se trate de materiales homogéneos, sino también en caso de materiales no homogéneos o recubrimientos superficiales, la pérdida de características físico-químicas tales como: adherencia, endurecimiento, fragilidad, envejecimiento, porosidad, etc.
2. **Normas de diseño.** Los recipientes estarán diseñados de acuerdo con las reglamentaciones técnicas vigentes sobre la materia y, en su ausencia, con códigos o normas de reconocida solvencia. Cuando sea de aplicación, deberán ser conformes a lo establecido en la reglamentación sobre aparatos a presión. Las acciones a tener en cuenta en el diseño serán las señaladas en el código o procedimiento de diseño, y como mínimo serán las siguientes:
  - a. Peso total lleno de agua o de líquido a contener cuando la densidad de éste sea superior a la del agua.
  - b. Sobrecarga de uso.
  - c. Sobrecarga de viento y nieve.
  - d. Acciones sísmicas.
  - e. Efectos de la lluvia.
  - f. Temperatura del producto y por efecto de la acción solar.
  - g. Efectos de la corrosión interior y exterior.
  - h. Efectos de las dilataciones y contracciones sobre los soportes.

Cuando en la selección del material de construcción se haya adoptado un material que esté sujeto a corrosión, se proveerá un sobreespesor para éste, en función de la vida útil prevista y la velocidad de corrosión en las condiciones más desfavorables que en la operación puedan producirse.

Los sobreespesores de corrosión, así como los espesores de recubrimiento, no se considerarán en los cálculos de espesor de los recipientes y tuberías a efectos de su resistencia mecánica.

3. **Fabricación.** Los recipientes podrán ser de cualquier forma o tipo y durante la fabricación se seguirán las inspecciones y pruebas establecidas en las reglamentaciones técnicas vigentes sobre la materia y, en su ausencia, en el código o norma elegido.

Cuando no exista código aplicable, el técnico que redacte el proyecto justificará debidamente el procedimiento seguido y establecerá las inspecciones y pruebas a que deberá someterse el recipiente.

Las conexiones a un recipiente por las que el líquido pueda circular normalmente llevarán una válvula manual externa situada lo más próxima a la pared del recipiente. Se permite la adición de válvulas automáticas, internas o externas.

Las conexiones por debajo del nivel del líquido, a través de las cuales éste normalmente no circula, llevarán un cierre estanco. Este cierre puede ser una válvula sellada y precintada, tapón o brida ciega o una combinación de éstos.

### **C) Sistemas de venteo y alivio de presión.**

Todo recipiente deberá disponer de sistemas de venteo o alivio de presión para prevenir la formación de vacío o presión interna, de tal modo que se evite la deformación del techo o de las paredes como consecuencia de las variaciones de presión producidas por efecto de los llenados, vaciados o cambios de temperatura. Las salidas de dicho sistema estarán alejadas de los puntos de operación y vías de circulación en donde las personas puedan verse expuestas, o se protegerán adecuadamente para evitar las proyecciones de líquidos y vapores.

Los venteos normales de un tanque atmosférico se dimensionarán de acuerdo con códigos de reconocida solvencia o, como mínimo, tendrán un tamaño igual al mayor de las tuberías de llenado o vaciado y, en ningún caso, inferior a 35 milímetros de diámetro interior.

Si cualquier recipiente tiene más de una conexión de llenado o vaciado, la dimensión del sistema de venteo o alivio de presión se basará en el flujo máximo posible.

Cuando un producto, por efecto de la acción de la humedad del aire, aumente su acción corrosiva, se tendrá en cuenta este efecto para disponer de un sistema que lo evite o corrija, salvo que se haya previsto tal posibilidad en el diseño.

Igualmente deberá evitarse en lo posible la emisión a la atmósfera de vapores perjudiciales de líquidos corrosivos y, en todo caso, controlar sus efectos.

Para recipientes a presión o tanque a baja presión el cálculo del sistema de alivio de presión se hará de acuerdo con el código de diseño adoptado.

### **D) Sistemas de tuberías.**

El diseño, materiales, fabricación, ensamblaje, pruebas e inspecciones de los sistemas de tuberías conteniendo líquidos corrosivos, serán adecuados a la velocidad de corrosión, presión, pérdida de carga y temperatura de trabajo esperadas, para el producto a contener y para los máximos esfuerzos combinados debido a presiones, dilataciones u otras semejantes en las condiciones normales de servicio, transitorias de puesta en marcha, situaciones anormales y de emergencia.

Cuando pueda quedar líquido confinado entre equipos o secciones de tuberías y haya la posibilidad de que este líquido se dilate o vaporice, deberá instalarse un sistema que impida alcanzar presiones superiores a las de diseño del equipo o tubería siempre que la cantidad retenida exceda a 250 litros.

Asimismo, la instalación estará dotada de las necesarias válvulas de purga, con el fin de evitar una retención de líquidos en las tuberías cuando deba intervenir o desmontarse las tuberías o recipientes.

Aquellos puntos del sistema de tuberías en los que exista la posibilidad de proyección de líquido (por ejemplo, bridas) y se encuentren próximos a los puntos de operación en donde las personas puedan verse expuestas, o vías de circulación, deberán protegerse mediante apantallamientos u otros sistemas adecuados. Sólo se instalarán tuberías enterradas en casos excepcionales debidamente justificados.

#### **E) Instalaciones de recipientes dentro de edificios.**

El almacenamiento en recipientes fijos dentro de edificios o estructuras cerradas será permitido solamente si la instalación de recipientes en el exterior no es recomendable debido a exigencias locales o consideraciones tales como: temperatura, viscosidad, pureza, estabilidad, higroscopicidad; lo cual debe justificarse en el proyecto.

El acceso a la zona de almacenamiento se restringirá, por medios eficaces, a las personas autorizadas.

1. Características de los edificios. Las características del edificio que albergue este tipo de recipientes serán tales que garanticen una resistencia al líquido corrosivo almacenado de tal forma que no pueda dañarse ni la estructura ni las cimentaciones del mismo o contiguos, así como la imposibilidad de que el líquido derramado invada otras dependencias y tenga un sistema de drenaje a lugar seguro.
2. Se dispondrá necesariamente de ventilación adecuada para evitar que se superen las concentraciones máximas admisibles en las condiciones normales de trabajo. Esta ventilación se expulsará al exterior mediante conductos exclusivos para tal fin.
3. Sistemas de venteo y alivio de presión. Los sistemas de venteo y alivio de presión de recipientes de superficie situados dentro de edificios cumplirán con lo establecido en el artículo 8 de la presente ITC.

#### **E) Sistemas de protección contra la corrosión medioambiental.**

Las paredes del recipiente y sus tuberías se protegerán contra la corrosión exterior. A título enunciativo podrá utilizarse alguno de los métodos siguientes:

- a. Uso de pinturas o recubrimientos.
- b. Protección catódica.
- c. Empleo de materiales resistentes a la corrosión.

## **F) Distancias entre instalaciones.**

No existen requerimientos especiales de distancias entre instalaciones de líquidos corrosivos entre sí, ni respecto a otras instalaciones de la planta o fábrica, excepto los siguientes:

La pared interior de los cubetos distará, como mínimo, 1,5 metros del vallado exterior de la planta. El resto de las instalaciones del almacenamiento distarán al menos 3 metros de dicho vallado. Las instalaciones de líquidos corrosivos, especialmente los recipientes y tuberías, deberán protegerse de los efectos de siniestros procedentes de otras instalaciones que presenten riesgos de incendio o explosión, en particular recipientes de inflamables y combustibles, cuando dichos efectos puedan afectar gravemente a la estabilidad de los materiales de construcción o a la peligrosidad de los productos contenidos (emisión de vapores tóxicos al calentarse, etc.).

## **G) Distancias entre recipientes.**

- a. La separación entre dos recipientes de líquidos corrosivos contiguos debe ser la suficiente para garantizar un buen acceso a los mismos, con un mínimo de 1 metro.
- b. Los líquidos corrosivos que, además, sean inflamables o combustibles podrán almacenarse junto con otros líquidos inflamables o combustibles.
- c. Los líquidos corrosivos que no sean inflamables ni combustibles podrán almacenarse dentro de cubetos de líquidos inflamables y combustibles, siempre que los materiales, protecciones (excepto la protección con cámara de espuma), disposición y tipo de recipientes sean los adecuados.

Si los líquidos corrosivos están en cubeto propio, deberán estar separados de los recipientes de líquidos inflamables y combustibles.

## **H) Cimentaciones.**

Consideraciones para su diseño. El diseño de las cimentaciones para recipientes y equipos incluidos en áreas de almacenamiento deberá ajustarse a la normativa vigente para este tipo de instalación.

La diversidad de condiciones existentes en los distintos suelos, climas y ambientes hace que la determinación de la carga y asentamiento admisibles deba realizarse particularmente en cada instalación. En cualquier caso el interesado debe especificar la metodología empleada en el cálculo de las cimentaciones. En lo posible se evitará la construcción de cimentaciones de recipientes en condiciones como las indicadas a continuación que, de ser inevitables, deben merecer consideración especial:

- Lugares en los que una parte de la cimentación quede sobre roca o terreno natural y otra parte sobre relleno, o con profundidades variables de relleno, o donde haya sido precisa una preconsolidación del terreno.
- Lugares pantanosos o con material compresible en el subsuelo.

- Lugares de dudosa estabilidad del suelo, como consecuencia de la proximidad de cursos de agua, excavaciones profundas o grandes cargas, o en fuerte pendiente.
  - Lugares en que los recipientes queden expuestos a posibles inundaciones que originarían su flotación, desplazamiento o socavado.
1. **Cimentaciones típicas de los recipientes.**-En el caso de tanques con fondo plano la superficie sobre la que descansa el fondo del tanque deberá quedar a 30 cm, como mínimo, por encima del suelo y deberá ser impermeable al producto a contener, de forma que las posibles fugas por el fondo salgan al exterior.

En el almacenamiento de líquidos criogénicos, deben adoptarse precauciones especiales para evitar la congelación, y subsiguiente variación del volumen del subsuelo.

2. **Influencia de la prueba hidráulica.**-Al realizar la primera prueba hidráulica se deben tomar precauciones especiales por si fallara la cimentación. El primer tanque que se pruebe en un determinado emplazamiento se controlará especialmente y se registrarán los asentamientos en función de las cargas.

Un procedimiento consiste en marcar en la periferia de los tanques cuatro puntos simétricos (8 si el tanque tiene más de 25 m de diámetro), que se usarán como referencia de niveles.

Cuando el terreno sea adecuado se puede llenar el tanque hasta la mitad rápidamente; se comprobarán entonces los niveles y si no se han producido asentamientos diferenciales, se puede llenar el tanque hasta las tres cuartas partes de su capacidad, repitiendo entonces la lectura. Si el tanque sigue nivelado se termina el llenado, repitiendo las lecturas. Se deja el tanque lleno durante cuarenta y ocho horas y si los niveles se mantienen ya constantes se puede vaciar el tanque, teniendo la precaución de abrir una entrada de aire suficiente para evitar la deformación del mismo por vacío. Si se han instalado tanques similares en terreno semejante en las pruebas de aquellos se pueden omitir las paradas en la mitad y tres cuartos del llenado.

En terrenos blandos, en los que se prevén asentamientos de más de 300 mm, conviene llenar lentamente. Se añadirá el agua de forma que suba cada día 0,6 m hasta una altura de 3 m. Seguidamente se detiene el llenado, y se registran en días sucesivos, los niveles de referencia, que se anotan en una escala en función del tiempo, para establecer la curva de asentamiento.

Cuando el asentamiento diario comience a disminuir, se añade agua al tanque con incrementos de alturas cada vez menores.

Cuando la carga de agua esté próxima a la capacidad del tanque, se añade el agua a la hora de la salida del sol, en pequeña cantidad, a fin de hacer lecturas durante el día, y descargando el tanque si se observan asentamientos indebidos. En suelos blandos estas pruebas se deben hacer a lo largo de amplios períodos de tiempo de acuerdo con la buena práctica.

Los datos sobre resistencia al esfuerzo cortante del suelo y sobre espesor de los estratos permiten establecer alturas seguras para el llenado inicial.

Para realizar dicho procedimiento de prueba se debe disponer de un sistema adecuado para llenado y vaciado. Se debe evitar la descarga junto a la propia cimentación, para no dar lugar a la erosión y el reblandecimiento del terreno circundante.

### **I) Vasija (Cubeto) para retención.**

1. Los recipientes fijos para almacenamiento de líquidos corrosivos exteriores o dentro de edificios deberán disponer de un cubeto de retención, que podrá ser común a varios recipientes.
2. No deberán estar en el mismo cubeto recipientes con productos que presenten reacciones peligrosas o que puedan reducir por debajo de los mínimos las exigencias mecánicas de diseño del resto de las instalaciones.
3. La distancia mínima horizontal entre la pared mojada del recipiente y el borde interior de la coronación del cubeto, será igual o superior a 1 m.
4. El fondo del cubeto tendrá una pendiente mínima del 1 por 100, de forma que todo el producto derramado escurra rápidamente hacia el punto de recogida y posterior tratamiento de efluentes.
5. Recipiente de doble pared.-Cuando un recipiente tenga doble pared, ésta podrá ser considerada como cubeto si se cumplen las siguientes condiciones:
  - a. Misma presión de diseño y material adecuado para el producto.
  - b. Sistema de detección de fugas con alarma.
  - c. Tubuladuras del recipiente interior sólo en la parte superior y con dispositivo automático de cierre.
  - d. Losa con bordillo, de 10 cm de altura mínima, para recogida de derrames de las tuberías, con pendiente hacia la red de drenajes.
6. Capacidad del cubeto.-La capacidad útil del cubeto será, como mínimo, igual a la capacidad del recipiente mayor.

Cuando un cubeto contiene un solo recipiente, su capacidad se mide considerando que tal recipiente no existe, es decir, será el volumen del líquido que pueda quedar retenido dentro del cubeto, incluyendo el del recipiente hasta el nivel del líquido en el cubeto.

Cuando el cubeto contiene dos o más recipientes, su capacidad se mide considerando que no existe el recipiente mayor, pero sí los demás, es decir, descontando del volumen total del cubeto vacío el volumen de la parte de cada recipiente que quedaría sumergido bajo el nivel del líquido, excepto el del mayor.

7. Cubetos alejados de los recipientes.-Si las disposiciones adoptadas permiten al cubeto cumplir complementariamente su misión de retención de productos en caso de fuga accidental sin que los recipientes estén en el interior del cubeto, estos cubetos podrán estar más o menos alejados de los recipientes, de manera que lleven los derrames a una zona que presente menos riesgos, siempre que se cumplan las condiciones siguientes:
  - a. La disposición y la pendiente del suelo alrededor del tanque deben ser tales que en caso de fuga los productos discurran únicamente hacia el cubeto de recogida de derrames.
  - b. El trayecto recorrido por los derrames accidentales entre los recipientes y el cubeto de retención no deben atravesar zonas de riesgo ni cortar vías de acceso a éstas.
8. Construcción y disposición de cubetos.
  - a. Las paredes y fondos de los cubetos deberán ser de un material que asegure la estanquidad de los productos almacenados durante el tiempo necesario previsto para su evacuación, con un tiempo mínimo de cuarenta y ocho horas, debiendo ser diseñadas para poder resistir la presión hidrostática debida a la altura total del líquido a cubeto lleno.
  - b. En los cubetos deberán existir accesos normales y de emergencia, señalizados, con un mínimo de dos en total y en número tal que no haya que recorrer una distancia superior a 25 metros hasta alcanzar un acceso desde cualquier punto del interior del cubeto. Se dispondrá de accesos directos a zonas de operación frecuente.
  - c. Como mínimo, la cuarta parte de la periferia del cubeto debe ser accesible por dos vías diferentes. Estas vías deberán tener una anchura de 2,5 m y una altura libre de 4 m como mínimo para permitir el acceso de vehículos de emergencia. Cuando el almacenamiento tenga lugar dentro de edificios, la anterior condición se entenderá aplicable al menos a una de las fachadas del recinto que contenga el cubeto, debiendo ésta disponer, además, de accesos desde el exterior para el personal de los servicios de emergencia.
  - d. Las tuberías no deben atravesar más cubeto que el del recipiente o recipientes a los cuales estén conectadas.
  - e. El paso de las tuberías a través de las paredes de los cubetos deberá hacerse de forma que su estanquidad quede asegurada.
  - f. La pendiente del fondo del cubeto desde el tanque hasta el sumidero de drenaje será, como mínimo, del 1 por 100.
  - g. Se prohíbe, en el interior de los cubetos, el empleo permanente de mangueras flexibles. Su utilización se limitará a operaciones de corta duración.
  - h. Los canales de evacuación tendrán una sección mínima de 400 centímetros cuadrados, con una pendiente, también mínima, del 1 por 100 hacia el punto de salida.

#### **J) Límites exteriores de las instalaciones: vallado.**

Cuando el almacenamiento esté fuera del recinto vallado de una factoría, se cercará con una valla resistente de 2,5 m de altura como mínimo, con una puerta que deberá abrir hacia fuera.

### **K). Depuración de efluentes líquidos.**

Todos los efluentes líquidos que puedan presentar algún grado de contaminación deberán ser tratados de forma que el vertido final de la planta cumpla con la legislación vigente en materia de vertidos.

### **L) Lodos y residuos sólidos.**

Los lodos y residuos sólidos de carácter contaminante deberán ser eliminados por un procedimiento adecuado que no dé lugar a la contaminación de aguas superficiales o subterráneas por infiltración o escorrentías, ni produzca contaminación atmosférica, o del suelo, por encima de los niveles permitidos en la legislación vigente.

### **M) Emisión de contaminantes a la atmósfera.**

La concentración de contaminantes dentro del recinto del almacenamiento deberá cumplir lo establecido en la legislación vigente para los lugares de trabajo. Los niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera, en el exterior de dicho recinto de almacenamiento, cumplirán lo preceptuado en la legislación aplicable en materia de protección del ambiente atmosférico y sobre la prevención y corrección de la contaminación atmosférica de origen industrial.

### **N) Instalaciones de seguridad.**

1. Señalización. En el almacenamiento y, sobre todo, en áreas de manipulación se colocarán, bien visibles, señales normalizadas, según establece el Real Decreto 485/1997 sobre disposiciones mínimas en materia de seguridad y salud en el trabajo que indiquen claramente la presencia de líquidos corrosivos, además de los que pudieran existir por otro tipo de riesgo.
2. Prevención de derrames. Para evitar proyecciones de líquido corrosivo por rebosamiento, tanto de tanques o depósitos como de cisternas en operaciones de carga y descarga, se adoptarán las siguientes medidas de prevención de derrames:
  - a. En tanques y depósitos. El sistema de protección en tanques y depósitos dependerá del tipo de instalación, de modo que se garantice que no haya sobrellenos de los recipientes por medio de dos elementos de seguridad independientes, por ejemplo, indicadores de nivel y alarma independiente de alto nivel. La válvula de bloqueo podrá ser de accionamiento automático o manual. En instalaciones portuarias se admitirá la observación constante del nivel del depósito por operario conectado por radioteléfono o medio de comunicación eficaz con quien accione la válvula de bloqueo.
  - b. En cisternas. Se utilizará tubo buzo telescópico hasta el fondo de la cisterna o llenado por el fondo de la misma y se tendrán en cuenta las disposiciones al respecto establecidas en la reglamentación sobre carga/descarga de materias peligrosas.
  - c. En mangueras. Se evitará el goteo en los extremos de las mangueras. Caso de producirse, se recogerá adecuadamente.

3. Iluminación. El almacenamiento estará convenientemente iluminado cuando se efectúe manipulación de líquidos corrosivos.
4. Duchas y lavajos. Se instalarán duchas y lavajos en las inmediaciones de los lugares de trabajo, fundamentalmente en áreas de carga y descarga, llenado de bidones, bombas y puntos de toma de muestras. Las duchas y lavajos no distarán más de 10 metros de los puestos de trabajo indicados y estarán libres de obstáculos y debidamente señalizados.
5. Seguridad contra incendios. En el caso de que los productos corrosivos almacenados sean inflamables o combustibles, se protegerán contra incendios.

#### **Ñ) Equipo de protección personal.**

Teniendo en cuenta las características del producto almacenado y el tipo de operación a realizar, el personal del almacenamiento dispondrá para la manipulación de ropa apropiada y de equipos de protección y primeros auxilios para ojos y cara, manos, pies y piernas, etc. Todos los equipos de protección personal cumplirán con la reglamentación vigente que les sea aplicable.

#### **O) Formación del personal.**

Los procedimientos de operación se establecerán por escrito. El personal del almacenamiento, en su plan de formación, recibirá instrucciones específicas del titular del almacenamiento, oralmente y por escrito, sobre:

- a. Propiedades de los líquidos corrosivos que se almacenan.
- b. Función y uso correcto de los elementos e instalaciones de seguridad y del equipo de protección personal.
- c. Consecuencias de un incorrecto funcionamiento o uso de los elementos e instalaciones de seguridad y del equipo de protección personal.
- d. Peligro que pueda derivarse de un derrame o fugas de los líquidos almacenados y acciones a adoptar.

El personal del almacenamiento tendrá acceso a la información relativa a los riesgos de los productos y procedimientos de actuación en caso de emergencia, que se encontrará disponible en letreros bien visibles.

#### **P) Plan de revisiones.**

Cada almacenamiento tendrá un plan de revisiones propias para comprobar la disponibilidad y buen estado

de los elementos e instalaciones de seguridad y equipo de protección personal. Se mantendrá un registro de las revisiones realizadas. El plan comprenderá la revisión periódica de:

- a. Duchas y lavajos. Las duchas y lavajos deberán ser probados como mínimo una vez a la semana, como parte de la rutina operatoria del almacenamiento. Se harán constar todas las deficiencias al titular de la instalación y éste proveerá su inmediata reparación.

- b. Equipos de protección personal. Los equipos de protección personal se revisarán periódicamente siguiendo las instrucciones de sus fabricantes/suministradores.
- c. Equipos y sistemas de protección contra incendios.

#### **Q) Plan de emergencia.**

Cada almacenamiento o conjunto de almacenamientos dentro de una misma propiedad tendrá su plan de emergencia. El plan considerará las emergencias que pueden producirse, la forma precisa de controlarlas por el personal del almacenamiento y la posible actuación de servicios externos.

El personal que deba intervenir conocerá el plan de emergencia y realizará periódicamente ejercicios prácticos de simulación de siniestros como mínimo una vez al año, debiendo dejar constancia de su realización. Se deberá tener equipos adecuados de protección personal para intervención en emergencias.

#### **R) Revisiones periódicas .**

Independientemente de lo establecido en el artículo 4 del Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos, se procederá a la revisión periódica de las instalaciones, conforme se indica a continuación:

Cada año se realizarán, además de las comprobaciones recomendadas por el fabricante, las siguientes operaciones:

- a. Se comprobará visualmente: el correcto estado de los cubetos, cimentaciones de recipientes, vallado, cerramiento, drenajes, bombas, equipos, instalaciones auxiliares, alarmas y enclavamientos, etc.
- b. En los recipientes y tuberías se comprobará el estado de las paredes y medición de espesores si se observase algún deterioro en el momento de la revisión.
- c. Se verificarán los venteos en caso de no existir documento justificativo de haber efectuado pruebas periódicas por el servicio de mantenimiento de la planta.
- d. Comprobación del correcto estado de las mangueras, acoplamientos y brazos de carga.
- e. Comprobación de la protección catódica, si existe.

Cada cinco años se medirán los espesores de los recipientes y tuberías metálicas.

En los recipientes no metálicos, instalados en superficie, cada cinco años se realizará una revisión interior que incluirá la comprobación visual del estado superficial del recipiente así como el control de la estanqueidad del fondo en especial de las soldaduras.

Las revisiones serán realizadas por inspector propio u organismo de control y de su resultado se emitirá el certificado correspondiente.

## CAPÍTULO IV

### CÁLCULOS DE DISEÑO PARA LA FABRICACIÓN DEL RECIPIENTE HERMÉTICO O AUTOCLAVE.

#### 4.1 GENERALIDADES DEL PROYECTO

La incorporación del fluido corrosivo y la variación en que se probarán los especímenes metálicos de estándar ASTM E647 91, son los aspectos más significativos en este proyecto, por que no es común este tipo de ensayos en un laboratorio Universitario de Ingeniería Mecánica en nuestro país.

El fluido en mención que se colocará en el volumen interno de la autoclave, es obtenido de los pozos de vapor de la planta Geotérmica de Cerro Prieto en Baja California.

El fluido con el que se harán los ensayos de fractura dentro de la autoclave, es un vapor que ha sido llevado al estado líquido por condensación y cuyo composición química es: 1.187% CO<sub>2</sub>, 0.039% H<sub>2</sub>S, 0.008% NH<sub>3</sub>, 0.011% CH<sub>4</sub>, 0.002% N<sub>2</sub>, 0.001% H<sub>2</sub>, 0.0001% He, 0.0001%Ar. Por lo que el diseño de recipiente hermético debe ser diseñado y construido tomando en cuenta la corrosión del acero seleccionado ante una segura reacción química por estar en contacto con los elementos químicos mencionados.

Antes de presentar los cálculos que se efectuaron y que son motivo de este capítulo, en la figura 4.1 se describe el algoritmo del proyecto, donde se mencionan cada uno de los pasos lógicos planeados y realizados que formaron parte de las generalidades del proyecto.

#### 4.1.1 REQUERIMIENTOS BÁSICOS

Los requerimientos o características esenciales que debe tener el recipiente a diseñar son los que a continuación se mencionan:

- a) Debe de ser resistente a la corrosión y soportar una temperatura de trabajo de entre 60 y 80 grados centígrados.
- b) Debe ser hermético como se muestra en la Fig. 4.2.
- c) Debe ser robusta sin llegar a excederse de un área de 15 x 15 pulgadas.
- d) Debe apegarse a los principios físicos de los cilindros de pared delgada.
- e) Debe de estar acorde a las normas nacionales e internacionales sobre diseño.
- f) Debe ser armable y desarmable y fácil de fabricar.
- g) Que a futuro se pueda modificar para ser sometida a más alta presión y temperaturas.
- h) Que sea segura para los operarios.
- i) Que tenga espacio para poder adaptarle accesorios electrónicos o electromecánicos.
- j) Que dentro del recipiente se puedan efectuar pruebas de tensión y compresión de probetas de acuerdo a la norma ASTM E647 91.

# ALGORITMO DEL PROYECTO

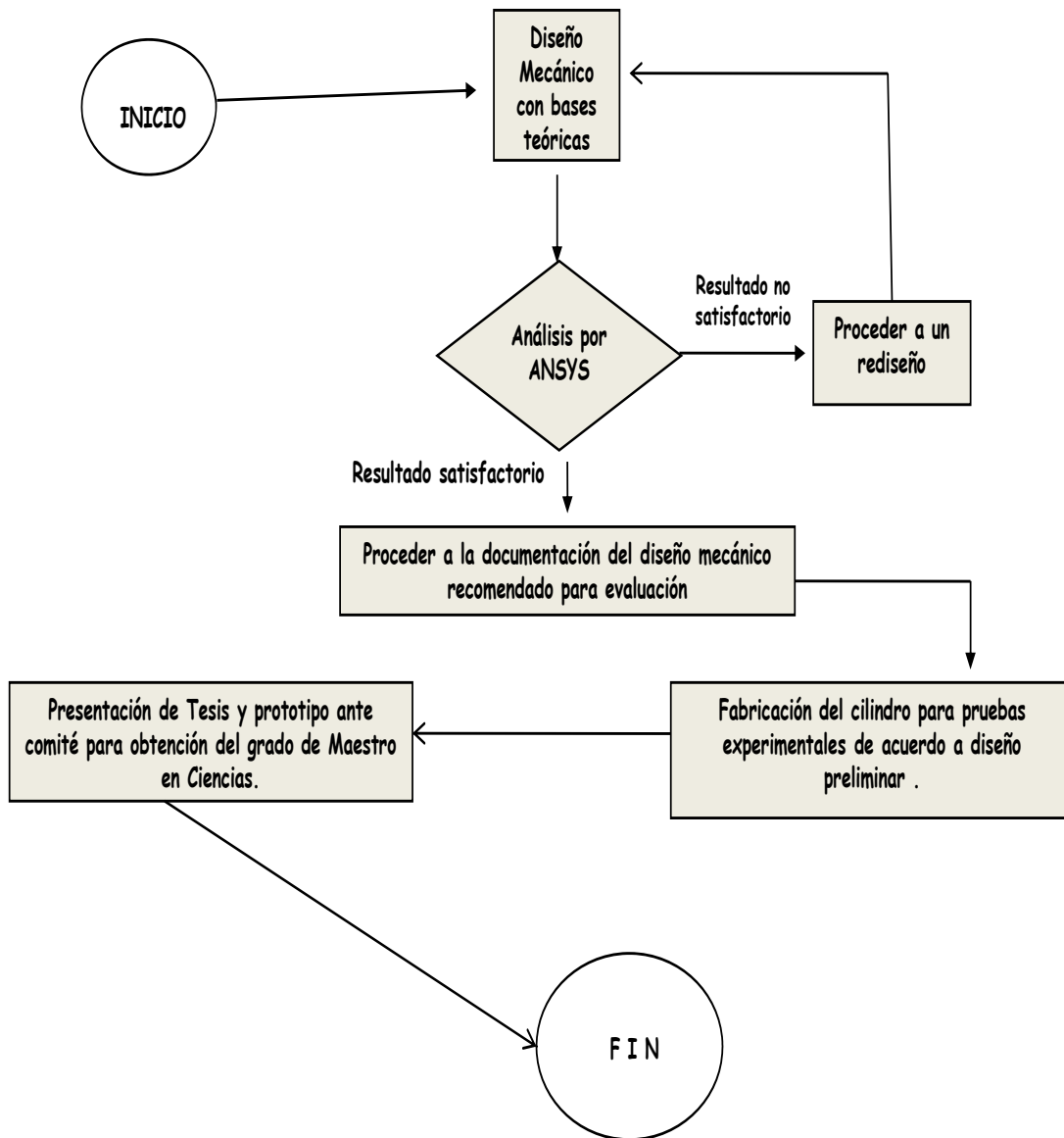


Fig. 4.1 Algoritmo donde se menciona cada uno de los pasos planeados y efectuados en el desarrollo del proyecto.

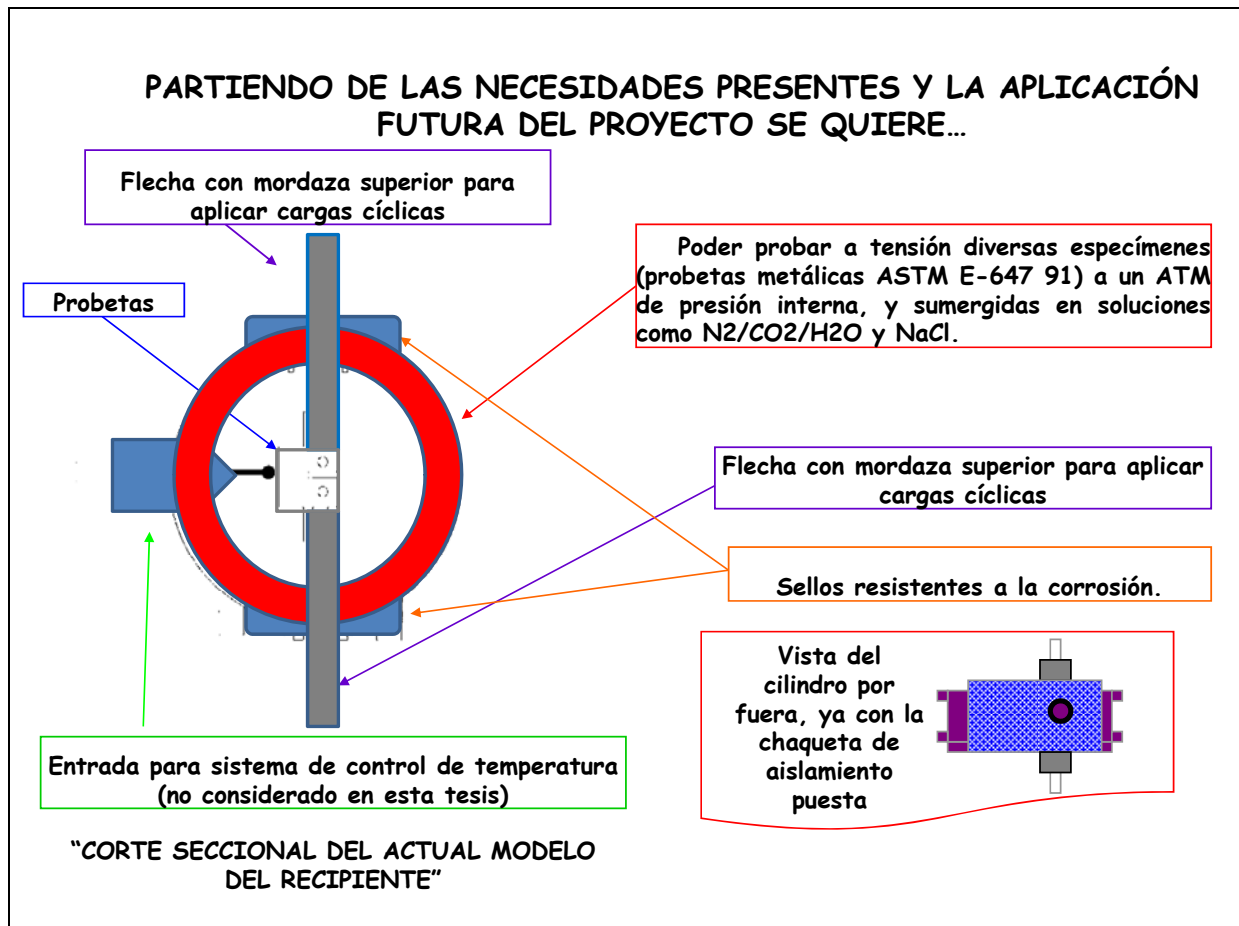


Fig. 4.2 Corte seccional del concepto previsto para el diseño de la autoclave, donde se mencionan los accesorios y componentes periféricos requeridos.

## 4.1.2 CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS INVOLUCRADOS

Un sistema es un lenguaje simbolizado sin contenido material alguno; un lenguaje reducido se expresa mediante formulas que reflejan las relaciones entre los símbolos y las reglas de formación y transformación que permiten construir las formulas del sistema y pasar de una formula a otra. LOS SISTEMAS BÁSICOS de que se compone este diseño son el sistema autoclave y el sistema de mordazas internas.

### 4.1.2.1 SISTEMA AUTOCLAVE

Consiste en un recipiente hermético como el que se muestra en la Fig. 4.3, diseñado para acumular diferentes tipos de fluidos (entre ellos los corrosivos), uno de los objetivos a cubrir con este trabajo. Este sistema parte de los cálculos de los esfuerzos tangencial y circunferencial que puedan generarse en el recipiente al contener fluidos en sus diferentes estados físicos.

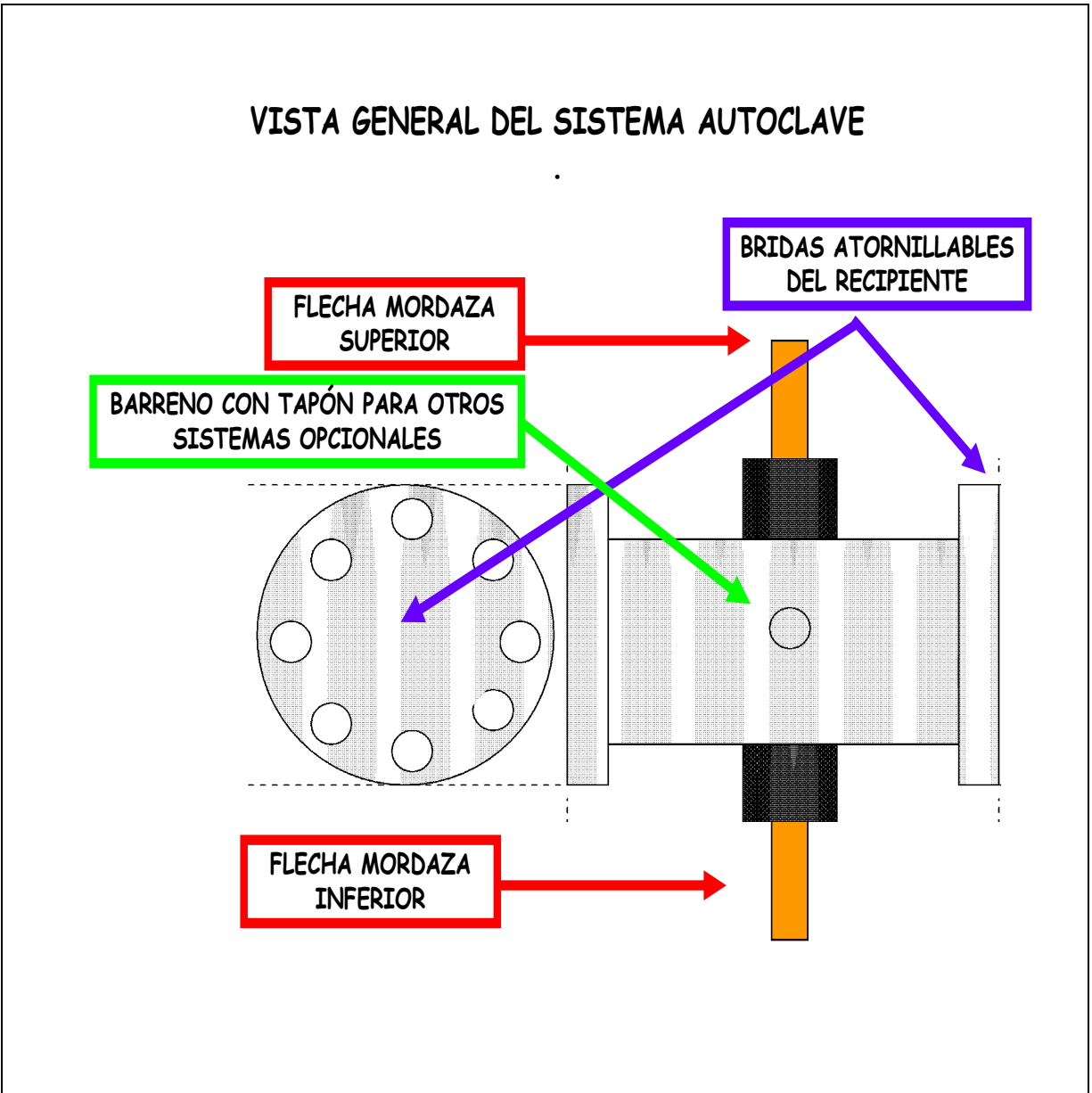


Fig. 4.3 Sistema Autoclave.

#### 4.1.2.2 SISTEMA DE MORDAZAS INTERNAS

Consiste en un par de flechas que tienen la finalidad de realizar pruebas de fatiga dentro de la autoclave. Aunque estas flechas se complementan con sellos que no permiten la fuga del fluido en la autoclave donde se internan, los cálculos prioritarios se centran en los esfuerzos cortantes de las mordazas y los pernos que sujetan los especímenes, como se muestra en Fig. 4.4.

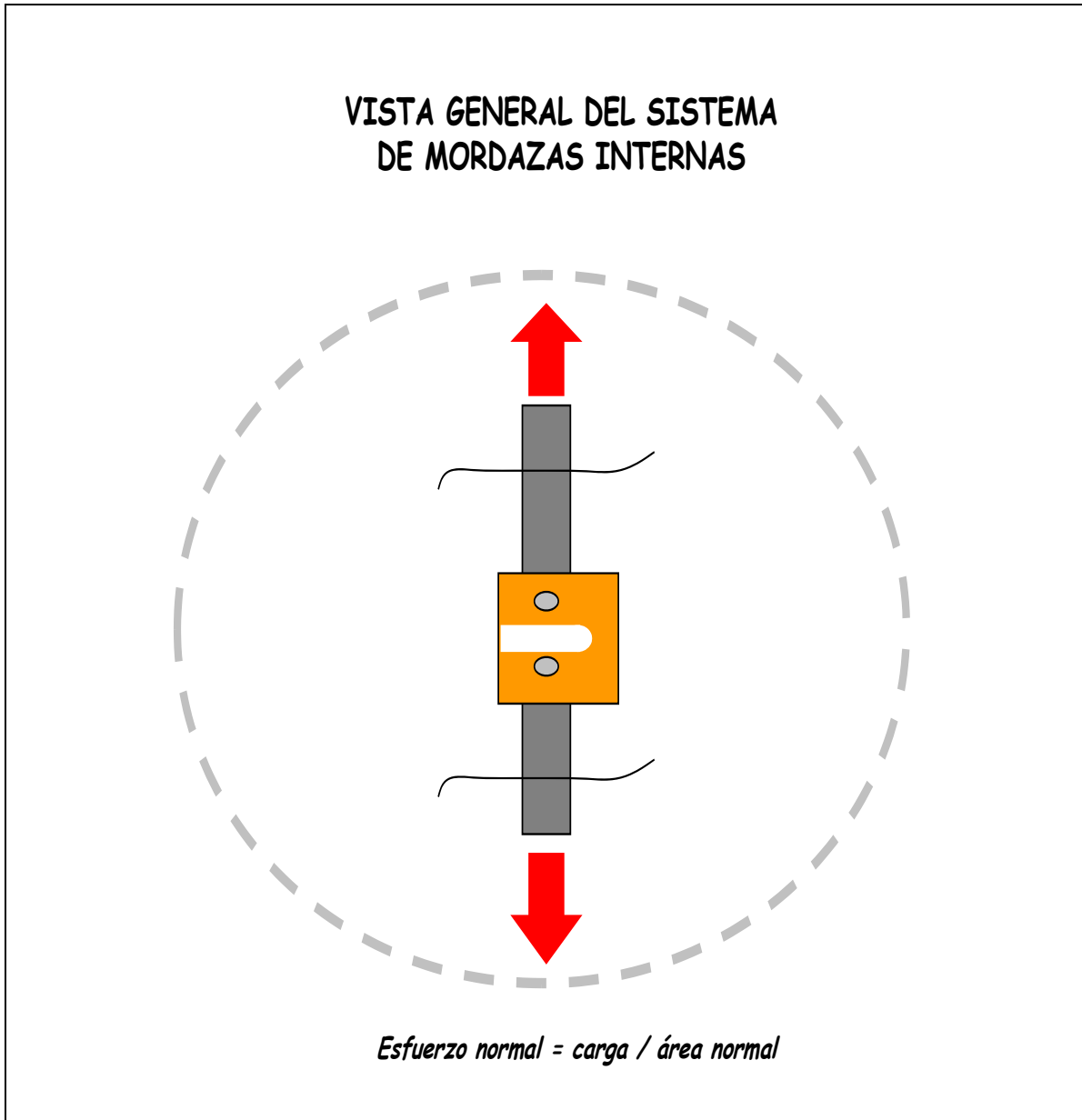


Fig. 4.4 Sistema de mordazas internas.

#### 4.1.2.3 OTROS SISTEMAS OPCIONALES

Aunque la norma ATM E647 91 en que se basa el presente diseño no contempla otras variables como temperatura, presión interna y recirculación de fluidos sobre el espécimen; Otros sistemas opcionales pueden crearse y adaptarse a la autoclave para el control de temperatura, el control de la variación de presión, el monitoreo de PH, y un sistema para la recirculación del fluido interno. Aspectos que no están incluidos en esta tesis.

## 4.2 CÁLCULOS PRELIMINARES.

### 4.2.1 ACERO SELECCIONADO.

Los cálculos preliminares que se efectuaron y que se presentan en este capítulo, se basaron tomando en cuenta el acero inoxidable austenítico 316L, el cual es resistente a las condiciones generales de corrosión, buena resistencia a los sulfatos, fosfatos y otras sales. En la tabla 4.1 se muestra su composición química.

<b>ANÁLISIS QUÍMICO (Típico) %</b>			
<b>C</b>	<b>0.08 máx</b>	<b>Si</b>	<b>1.0 máx</b>
<b>Mn</b>	<b>2.0 máx</b>	<b>S</b>	<b>0.030 máx</b>
<b>Cr</b>	<b>16.0 / 18.0</b>	<b>Mo</b>	<b>2.0 / 3.0</b>
<b>Ni</b>	<b>10.0 / 14.0</b>	<b>P</b>	<b>0.045 máx.</b>

Tabla 4.1 Composición química del acero 316L.

De igual manera en la tabla 4.2 se muestran las propiedades mecánicas de este acero austenítico 316L.

<b>PROPIEDADES MECÁNICAS</b>			
<b>RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI)</b>	<b>LÍMITE ELÁSTICO (PSI)</b>	<b>ELONGACIÓN al<sup>0</sup>%</b>	<b>REDUCCIÓN DE AREA %</b>
<b>90,000 / 75,000</b>	<b>45,000 / 30,000</b>	<b>30 mínimo</b>	<b>40 mínimo</b>

Tabla 4.2 Propiedades mecánicas del acero 316L proporcionada por el fabricante.

### 4.2.2 MATERIAL SELECCIONADO PARA LOS SELLOS

Aunque la elección del tipo de acero es el fundamental para los cálculos preliminares y la posible construcción de un prototipo, se debe tomar en cuenta que las partes en contacto ocupan de una material que selle la unión entre componentes y sistemas involucrados. En la fig. 4.8 se muestra el tipo de material seleccionado para el diseño óptimo de los sellos la autoclave.



Fig. 4.8 Se muestra una imagen del material seleccionado para los sellos.

Ecoflón II, material cuyo color distintivo es el gris, es un plastómero de politetrafluoroetileno comercializado por Jeatseal de México. Esta hecho a base de fibra de vidrio y bisulfuro de molibdeno.

Puede ser usado para anillos U, anillos de deslizamiento, anillos antiextrusión, soportes, guías, juntas especiales, etc. Debido a su especial composición, ECOFLON DOS tiene las mejores propiedades físicas, coeficiente de deslizamiento, resistencia mecánica y resistencia química que se pueden ofrecer en este tipo de sellos.

Además posee las más extensas variedades de aplicaciones de todos los plásticos y cauchos técnicos. Es un material con una gran resistencia química y apta para trabajar a altas temperaturas.

### 4.2.3 CÁLCULO DEL ESFUERZO NORMAL AL QUE ESTARÁN SOMETIDAS LAS FLECHAS QUE SUJETARÁN LAS MORDAZAS INTERNAS.

Para poder tener un mejor criterio referente al cálculo del esfuerzo normal en mención se presenta la figura 4.6, donde se aprecia como se ejercitará la tensión en ambos extremos del espécimen para pruebas.



Fig. 4.6 Especimen para ser probada en el interior en de la autoclave

#### 4.2.3.1 DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO MÁS CONVENIENTE PARA LAS FLECHAS QUE TENSARÁN LAS MORDAZAS INTERNAS.

Conociendo el esfuerzo máximo y aplicando un factor de seguridad de 2.0, se puede sustituir el valor obtenido e introducirlo dentro de la ecuación de esfuerzo normal.

Para generar una relación entre el esfuerzo aplicado y la carga, se selecciona el diámetro mas adecuado para la flecha tomando en cuenta los diámetros comerciales. Para poder apreciar esta relación procederemos a graficarla por medio de MATLAB.

$$\frac{\pi (\text{DIÁMETRO})^2}{4} = \frac{\text{CARGA}}{\text{ESFUERZO NORMAL EN FLECHA}} \dots \dots \dots (31)$$

#### *Programación de MATLAB:*

```
diametro=0:0.000001:2;
pi=3.1416;
esfuerzomax=75000;
fseguridad=2
cargapsi=(esfuerzomax/fseguridad)*(pi*diametro.^2)/4;
plot(diametro,cargapsi);
axis([0 2 0 100000]);
title('ELECCIÓN DIÁMETRO ÓPTIMO DE FLECHA MORDAZA');
grid;
xlabel('DIÁMETRO DE FLECHA MORDAZA EN PULGADAS');
ylabel('CARGA DE TENSIÓN EN PSI');
```

Una definición de variables de esta programación en matlab se muestra en la tabla 4.3.

<b>Variables</b>	<b>Descripción</b>
Diámetro = $\Theta$ de las flechas	Graficando de 0.000001 a 2 pulg.
Pi = $\pi$	3.1416
Esfuerzomax = Esfuerzo Máximo	75,000 psi del límite de fluencia
Fseguridad= factor de seguridad	2
Cargapsi= carga a aplicar en flechas	Sustitución de la fórmula 31.
Plot=término para confrontar valores	Carga aplicada vs. Diámetro
Axis =eje de gráfico	Incrementos de gráfica de 20 a 100,000 psi
Title= título del gráfico	Elección del diámetro óptimo de la flecha
Grid= malla o red	Selección de líneas adicionales en gráfico.
Xlabel	Etiqueta gráfico eje X
Ylabel	Etiqueta gráfico eje Y

Tabla 4.3.- Definición y descripción de las variables consideradas en la programación matlab de la formula 31.

De acuerdo al gráfico 4.1, se aprecia que a mayor diámetro de la flecha se puede contar con una mayor resistencia a la tensión y/o compresión.

Por lo que se procedió a seleccionar un diámetro de flecha de “UNA PULGADA” por lo comercial que es esa medida en lo particular, lo que hace que sea más fácil conseguir esas flechas localmente o en la región.

De ahí que la carga máxima que se le podrá aplicar a la flecha de acero de acuerdo al grafico y al diámetro seleccionado será de 30 KPSI, aceptable para los requerimientos básicos relacionados en las generalidades del proyecto.

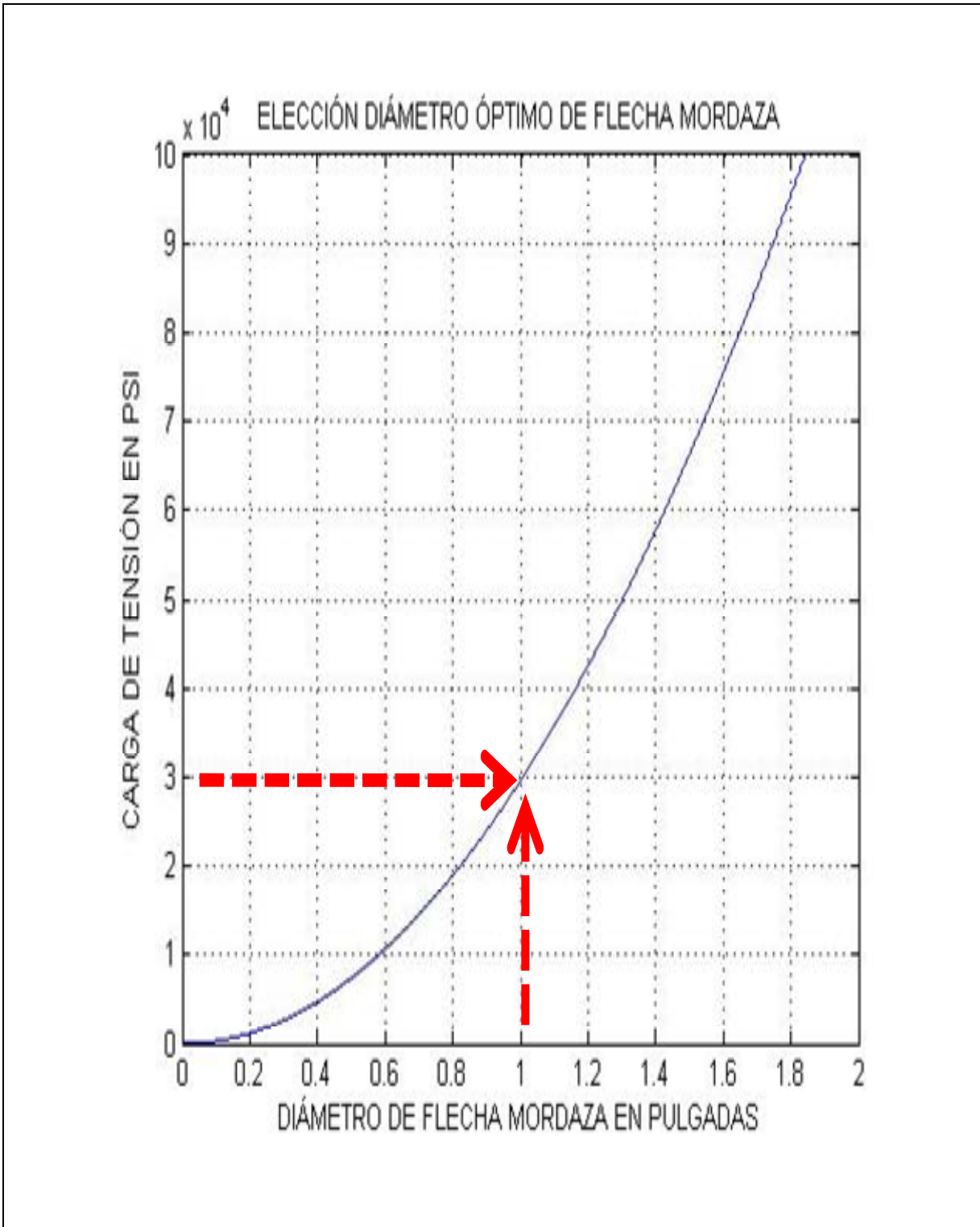


Gráfico 4.1.- Opciones de diámetro de flecha en función de la carga aplicada en PSI

#### 4.2.4 CÁLCULO DEL ESFUERZO CORTANTE AL QUE ESTARÁN SOMETIDOS LOS PERNOS QUE SUJETARÁN LOS ESPECÍMENES.

Para poder tener también un mejor criterio referente a lo que implica la determinación de este modelo matemático en mención, se presenta la figura 4.7.

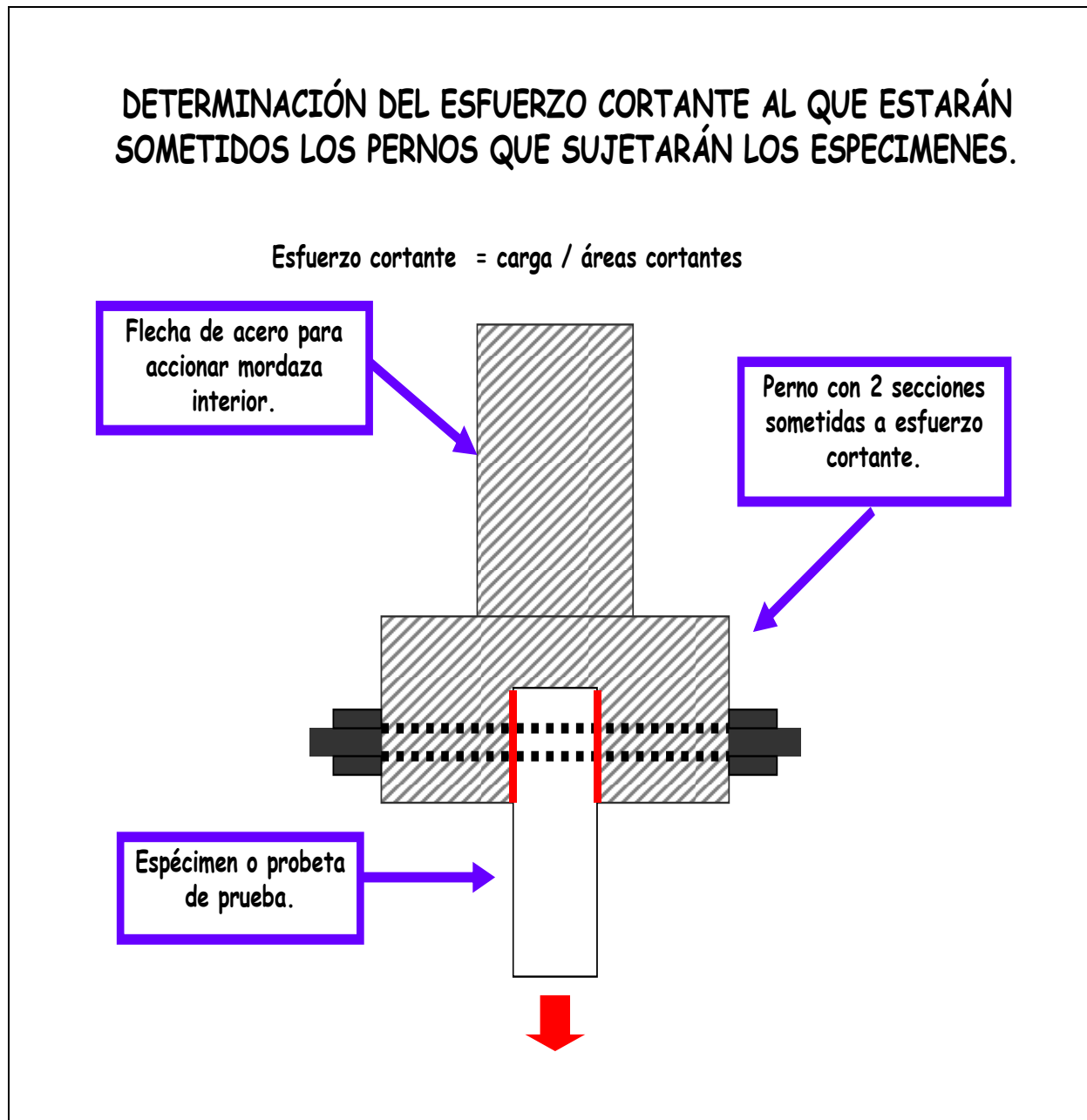


Fig. 4.7 Ilustración de la mordaza superior donde se mencionan los componentes que complementan ese sistema.

#### 4.2.4.1 DETERMINACIÓN DEL ESPESOR MÍNIMO PARA EL PERNO.

Conociendo el esfuerzo máximo y aplicando un factor de seguridad de 2.0, se puede sustituir el valor obtenido e introducirlo dentro de la ecuación de esfuerzo cortante.

Para generar una relación entre el esfuerzo aplicado y la carga, se determina el espesor mínimo (TOMANDO EN CUENTA LAS 2 ÁREAS DE CARA CIRCULAR CON ESFUERZO CORTANTE) requerido para que el perno de la mordaza falle. Para poder apreciar esta relación se procede a graficarla por medio de MATLAB.

$$\frac{2 \pi (\text{DIÁMETRO PERNO})^2}{4} = \frac{\text{ESFUERZO MÁXIMO EN PERNO}}{\text{FACTOR DE SEGURIDAD}} \dots (32)$$

#### Programación MATLAB:

```
cargapsi=0:1:200000; pi=3.1416;
esfuerzomax=75000; kseguridad=2;
diametromin=(cargapsi*kseguridad/(0.5*esfuerzomax*pi)).^0.5;
plot(diametromin,cargapsi); axis([0 1 0 200000]);
title('DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO MÍNIMO'); grid;
xlabel('DIÁMETRO DEL PERNO DE LA MORDAZA');
ylabel('CARGA EN PSI DE CORTANTE SOBRE EL PERNO');
```

Una definición de variables de esta programación en matlab se muestra en la tabla 4.4:

Variables	Descripción
diametromin= $\Theta$ mínimo	Despeje de la variable de diámetro perno, de la formula 32.
Pi = $\pi$	3.1416
Esfuerzomax = Esfuerzo Máximo	75,000 psi del límite de fluencia.
kseguridad= factor de seguridad	2
Cargapsi= carga a aplicar en psi	carga aplicada sobre el perno de 0-20,000 psi.
Plot=término para confrontar valores	Diámetro mínimo vs. carga aplicada en psi.
Axis =eje de gráfico	Graficando el diámetro del perno de 0-1 pulgs. y la carga aplicada sobre el perno de 0-20,000 psi.
Title= título del gráfico	Determinación del diámetro mínimo
Grid= malla o red	Selección de líneas adicionales en gráfico.
Xlabel	Etiqueta gráfico eje X
Ylabel	Etiqueta gráfico eje Y

Tabla 4.4.- Definición y descripción de las variables consideradas en la programación matlab de la formula 32.

De acuerdo al gráfico 4.2 y la relación de esfuerzo cortante de la formula 32, se determina que el diámetro mas adecuado para el perno de la mordaza es de: 7/16" pulgadas. Esta medida de perno es muy comercial, además de que los barrenos en los especímenes son de esa medida.

Si se analiza el gráfico, la carga máxima en psi que se podrá aplicar sobre esos pernos de 7/16" fluctúa entre 10 Kpsi y 15 Kpsi, valores de resistencia aceptables de acuerdo a los requerimientos básicos para la autoclave.

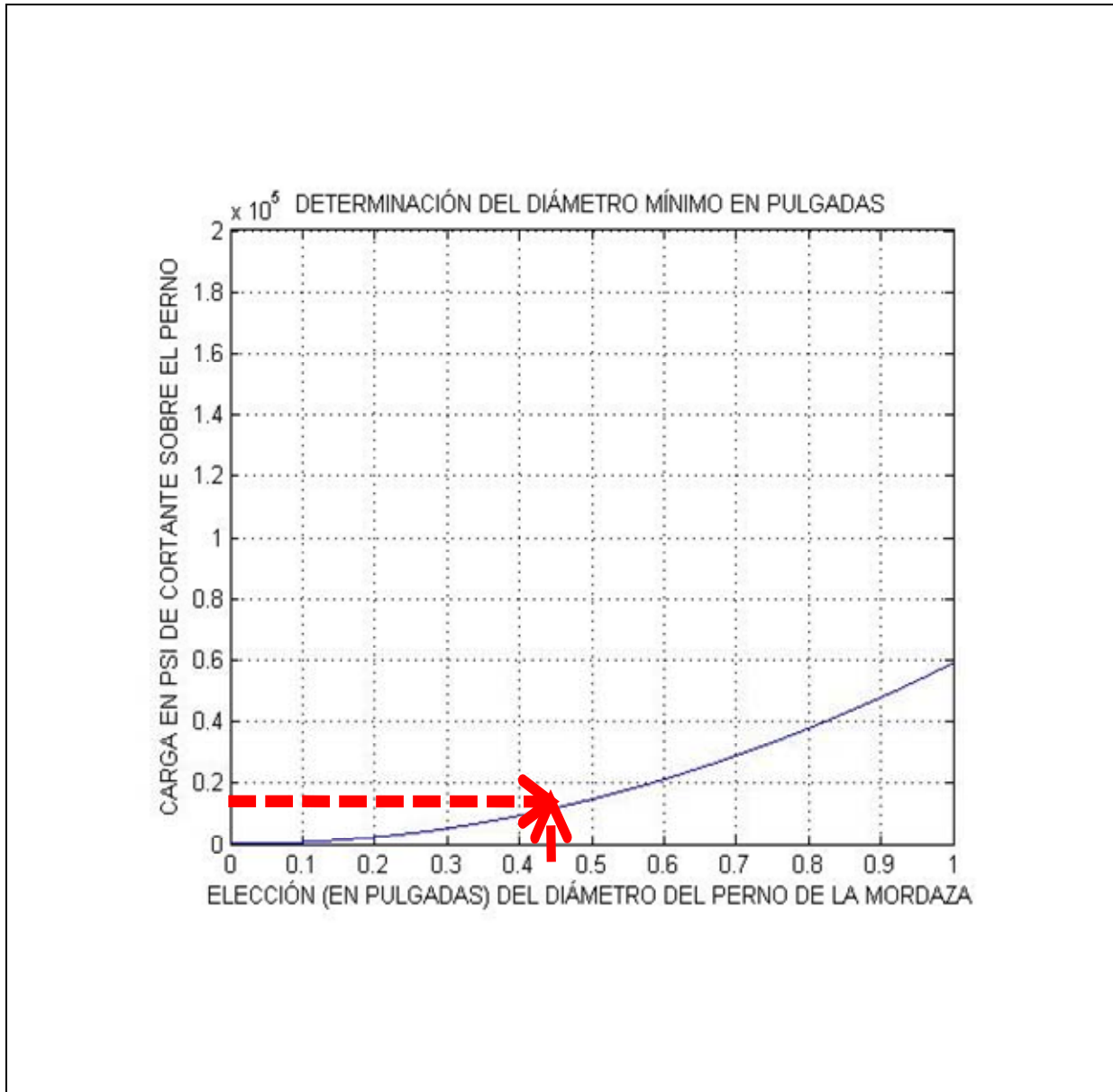


Gráfico 4.2 En este gráfico se muestran las diferentes opciones de diámetro de perno en función de la carga en PSI a aplicar.

#### 4.2.5 CÁLCULO DEL ESFUERZO TANGENCIAL.

Para poder tener un mejor criterio referente a lo que implica el cálculo del esfuerzo tangencial en mención se presenta la figura 4.8

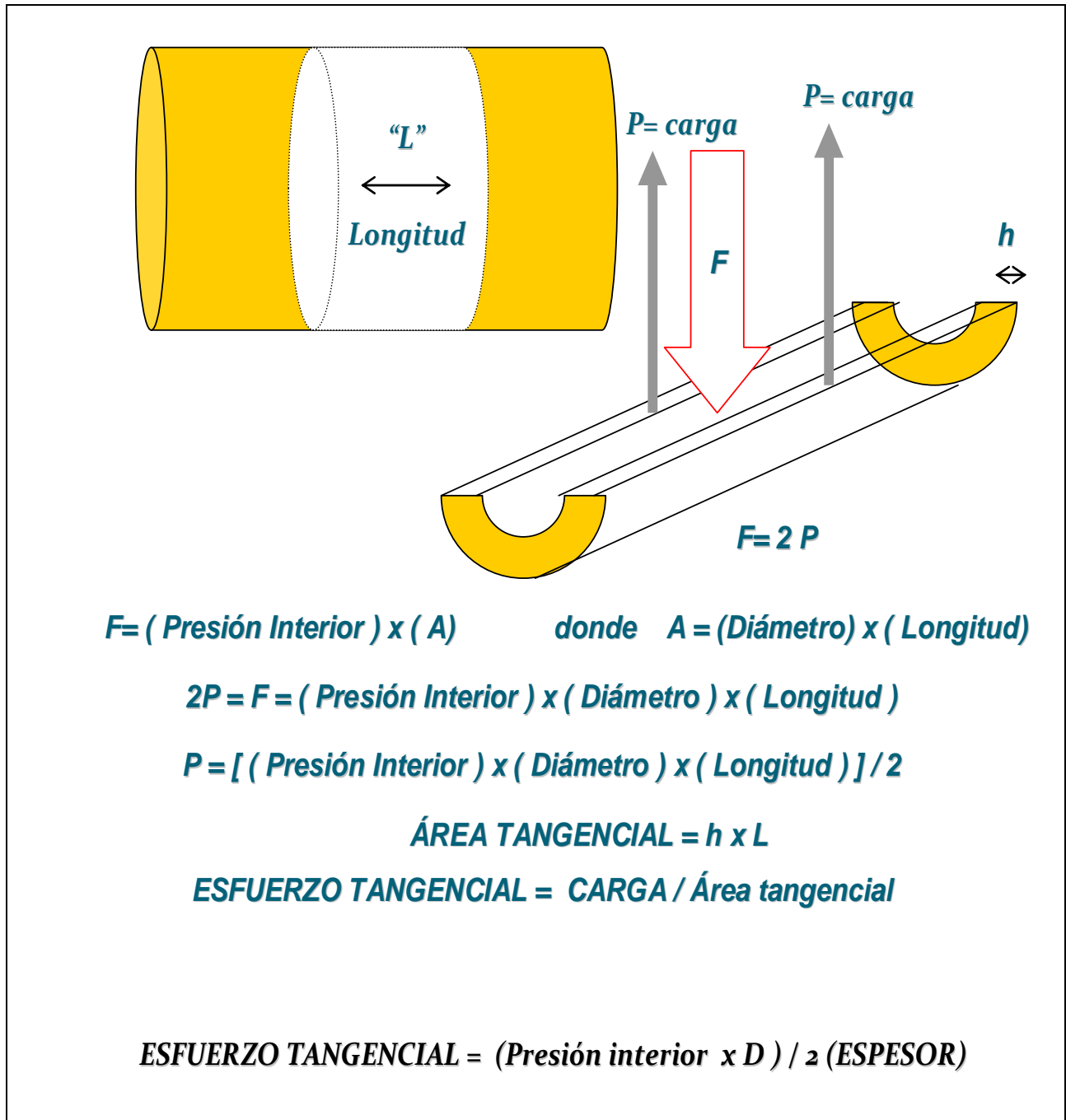


Fig. 4.8 Análisis del Esfuerzo Tangencial en un corte seccional de cilindro de pared delgada.

Al conocer la resistencia del acero inoxidable 316 L, se sustituye este valor aplicando un factor de seguridad de 2.0 como de muestra a continuación...

$$\text{RESIST. ACERO 316L} = (\text{PRESIÓN INTERIOR})(D) / (\text{ESPESOR}) \dots\dots\dots (33)$$

$$(\text{RESIST. ACERO 316L}) / 2 = (\text{PRESIÓN INTERIOR})(D) / (2) (\text{ESPESOR}) \dots\dots\dots (34)$$

$$\text{ESPESOR} = (\text{PRESIÓN INTERIOR})(D) / \text{RESIST. ACERO 316L} \dots\dots\dots (35)$$

$$\text{ESPESOR} = (\text{PRESIÓN INTERIOR}) (6 \text{ pulgadas}) / 75.000 \text{ PSI} \dots\dots\dots (36)$$

El valor de 6 pulgadas de diámetro interior del cilindro es un valor constante que se aplicó de acuerdo al espacio considerado disponible en la máquina de pruebas y de la necesidad de que las mordazas no choquen con las paredes del recipiente cuando fracturen las especímenes de prueba.

#### 4.2.5.1 DETERMINACIÓN DEL ESPESOR MÍNIMO PARA CONSTRUIR EL RECIPIENTE

De la ecuación (36) se tiene una relación entre el espesor del recipiente a diseñar y la presión interna, por lo que para ampliar los criterios de diseño y la mejor elección del espesor comercial ante futuros requerimientos de presión, se procedió a presentar el siguiente gráfico por medio de MATLAB como se muestra a continuación.

##### *Programación de MATLAB*

```

presionpsi=0:0.01:3000;
dia=6;
espesorpulgs=presionpsi*dia/37500;
plot(presionpsi,espesorpulgs);
axis([0 3000 0 2]);title('ELECCIÓN DEL ESPESOR MÍNIMO EN PULGADAS');
grid;
xlabel('PRESIÓN INTERIOR EN PSI');
ylabel('ESPESOR MÍNIMO PARA EL CILINDRO EN PULGADAS');

```

Una definición de variables de esta programación en matlab se muestra en la tabla 4.5:

<b>Variables</b>	<b>Descripción</b>
dia = Ø interior	6 pulgs (valor constante).
Presionpsi = Presión interna	De cero a 3000 libras.
espesorpulgs = espesor mínimo a definir	Sustitución de la fórmula 36.
Plot=término para confrontar valores	Presión vs. Espesor mínimo.
Axis =eje de grafico	Incrementos de gráfica de 0 a 3,000 psi
Title= título del grafico	Elección de espesor mínimo
Grid= malla o red	Selección de líneas adicionales en gráfico.
Xlabel	Etiqueta gráfico eje X
Ylabel	Etiqueta gráfico eje Y

Tabla 4.5.- Definición y descripción de las variables consideradas en la programación matlab de la fórmula 36.

De acuerdo al gráfico 4.3 y tomando en cuenta costos y futuros requerimientos de presión interna en el depósito, se procedió a seleccionar un espesor de pared de cilindro de 1/4 de pulgada; Esto por la facilidad de encontrar tramos de tubo de este espesor en la localidad.

#### **4.2.5.2 DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN MÁXIMA PARA LA AUTOCLAVE**

Para calcular cual es la presión máxima recomendada para el recipiente en modalidad de autoclave, es fundamental señalar el hecho de que el esfuerzo tangencial siempre será mayor que el esfuerzo longitudinal ante una misma presión interna.

Por lo que despejando la formula (36) que relaciona el espesor y el diámetro de la autoclave en pulgadas, así como la resistencia máxima del material en PSI, se tiene el siguiente resultado.

$$\text{MAXIMA PRESION INTERIOR} = [(0.25 \text{ in}) (75,000 \text{ psi}/2)] / (6 \text{ pulgadas}) \dots\dots\dots (37)$$

**La presión interna máxima recomendada para operar la autoclave con un factor de seguridad de 2.0 es de: 1,562.5 PSI**

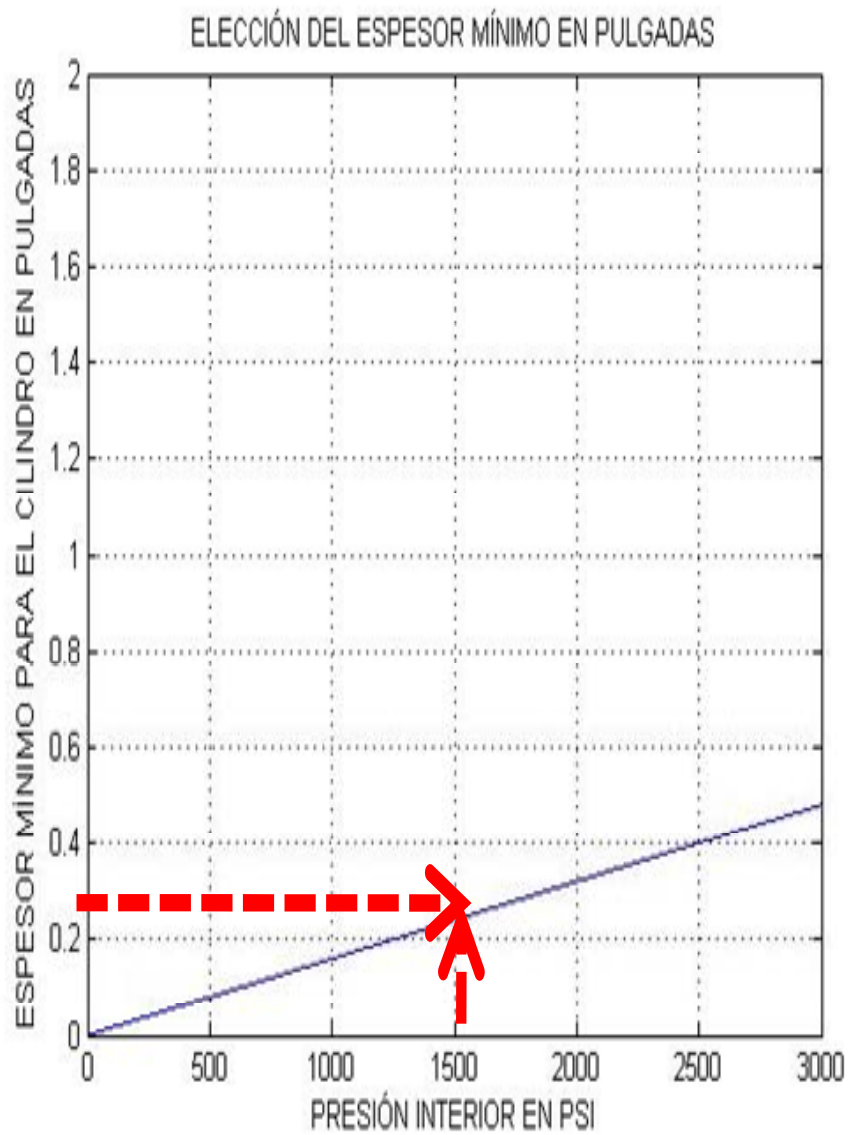


Gráfico 4.3 En el gráfico se mencionan las opciones de espesor de placa de la autoclave en función de la presión interna.

#### 4.2.6 CÁLCULO DEL ESFUERZO LONGITUDINAL

Para poder tener un mejor criterio referente a lo que implica el cálculo del esfuerzo longitudinal en mención se presenta la figura 4.9.

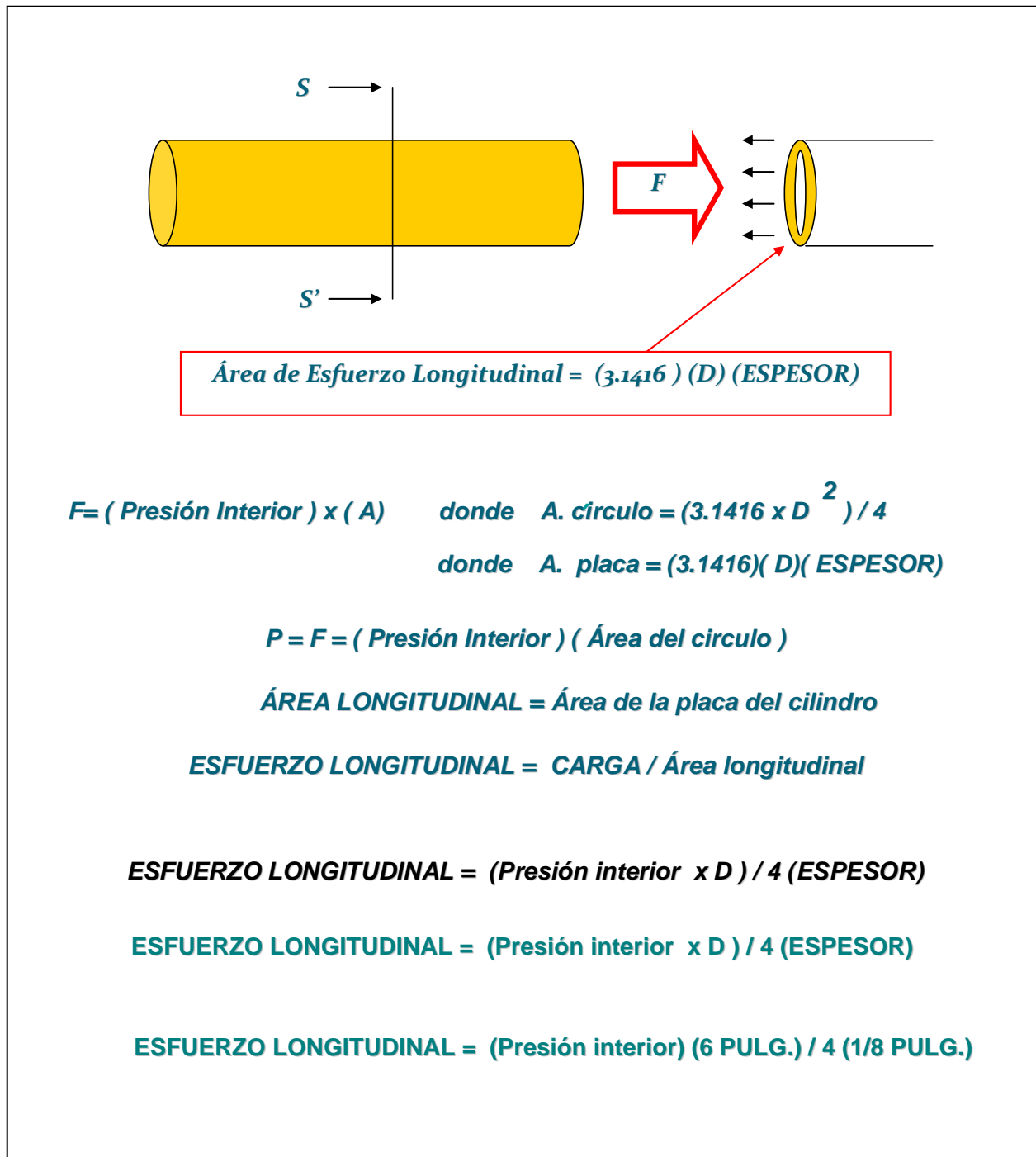


Fig. 4.9.- Análisis del esfuerzo longitudinal

Conociendo el espesor mínimo requerido y el espesor comercial seleccionado; Se puede desarrollar la ecuación obtenida en la figura 4.9 y graficarla para resaltar la relación entre el esfuerzo longitudinal y la presión interna, lo que ayuda a entender la necesidad de colocar un número mínimo de pernos en las bridas que sellarán el recipiente diseñado.

### **Programación MATLAB**

```

presionpsi=0:0.01:3000;
espesor=0.25;
diametroint=6;
esfuerzolongit=(presionpsi*diametroint)/(4*espesor);
plot(presionpsi,esfuerzolongit);
axis([0 3000 0 20000]);
title('CÁLCULO DEL ESFUERZO LONGITUDINAL');
grid;
xlabel('PRESIÓN INTERIOR EN PSI');
ylabel('ESFUERZO LONGITUDINAL EN PSI');

```

Una definición de variables de esta programación en matlab se muestra en la tabla 4.6.

Variables	Descripción
diametroint = Ø interior	Sustitución de fórmula.
presionpsi = Presión interna	De cero a 3000 libras.
espesor: valor seleccionado	0.25 pulgadas.
esfuerzolongit = esfuerzo longitudinal	Sustitución de la fórmula.
Plot=término para confrontar valores	Presión vs. Esfuerzo longitudinal
Axis =eje de gráfico	Presión de 0-3,000 psi y Esfuerzo longitudinal de 0-20,000 psi.
Title= título del gráfico	Cálculo del esfuerzo longitudinal.
Grid= malla o red	Selección de líneas adicionales en gráfico.
Xlabel	Etiqueta gráfico eje X
Ylabel	Etiqueta gráfico eje Y

Tabla 4.6.- Definición y descripción de las variables consideradas en la programación matlab del análisis desarrollado en la fig. 4.9

De acuerdo al gráfico 4.4 y tomando en cuenta que a mayor presión interna mayor será el esfuerzo longitudinal, se deduce que habrá la necesidad de calcular el número mínimo de pernos para cerrar la bridas de los dos extremos del tubo central que incluye la manufactura de este recipiente a construir.

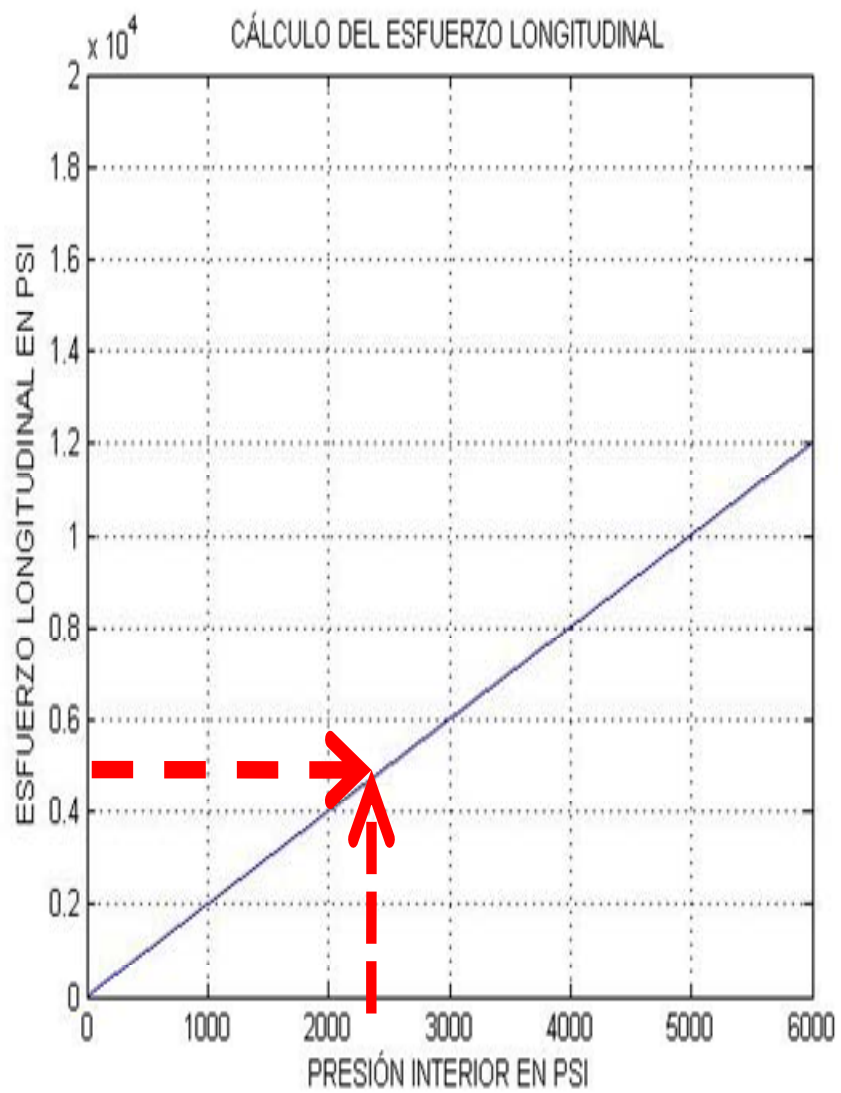


Gráfico 4.4 Cálculo del esfuerzo longitudinal en función de la presión interior

#### 4.2.7 SELECCIÓN DE PERNOS

De acuerdo a la bibliografía [7] el valor aceptable de un esfuerzo de apriete es por lo regular de 55 MPA (7,977.09 PSI) por lo que al seleccionar los pernos adecuados para unir las bridas de la autoclave, debe considerarse una alta resistencia que sea por lo menos del doble de este esfuerzo de apriete y cuya composición química minimice la corrosión remanente que pueda afectar a estos pernos en la práctica o al estar en uso en laboratorio.

Ante esta situación se optó por seleccionar pernos de titanio quirúrgico, ya que una de las mejores propiedades que tiene el titanio es que no es tóxico en contacto con el organismo de las personas, lo cual, unido a sus cualidades mecánicas de dureza, poco peso y resistencia mecánica, han hecho posible una gran cantidad de aplicaciones de gran utilidad como prótesis articulares, implantes dentales, componentes para la fabricación de válvulas cardíacas y marcapasos, clavos o placas de osteo-síntesis para la recuperación de fracturas óseas, además de muchos otros productos.

La aleación de titanio seleccionada contiene aluminio y vanadio según la composición:  $Ti_6Al_4V$ . El aluminio incrementa la temperatura de la transformación entre las fases alfa y beta. El vanadio disminuye esa temperatura.

La aleación puede ser bien soldada y tendrá alta tenacidad. Por lo tanto los pernos de la fig.4.10, de la aleación grado 5-CA - $Ti_6Al_4V$ - es la que cumple con tales exigencias técnicas requeridas en nuestro proyecto prioritariamente por su composición química mas que por su sobrada resistencia a la tensión que fluctúa entre 105 a 120 KPSI.



Fig. 4.10.- Perno 5-CA - $Ti_6Al_4V$  seleccionado

#### 4.2.8 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO MÍNIMO DE PERNOS

Para tener un mejor criterio referente a lo que implica la determinación del número mínimo de pernos necesarios en cada brida, se presenta la figura 4.11.

De la ecuación (40); se tiene una relación que permite determinar el número mínimo de pernos por cada brida en función de la presión interna dentro del recipiente. Por lo que se representa el siguiente gráfico por medio de MATLAB como se muestra a continuación.

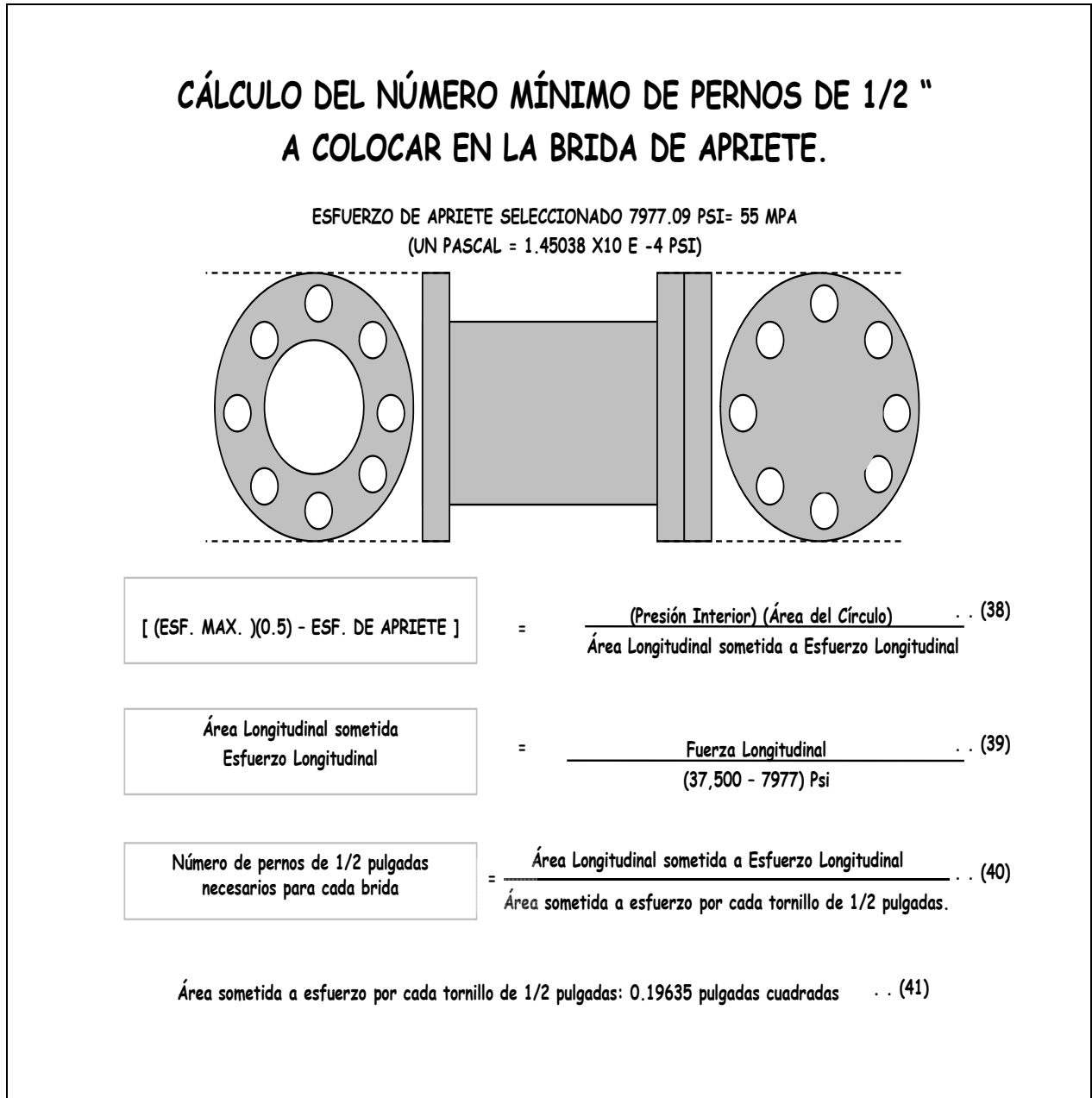


Fig. 4.11 Determinación del número mínimo de pernos para las bridas.

## Programación de MATLAB

```

presionpsi=0:0.01:3000;
esfuerzomax=75000;
diametrointerior=6;
diametroperno=0.5;
Pi=3.1416;
fseguridad=2;
areadeperno=pi*0.25*diametroperno.^2;
esfuerzoadmisibile=esfuerzomax/fseguridad; esfuerzodeapriete=7977.09;
arealongitudinal=((presionpsi*pi*diametrointerior.^2)/4)/(esfuerzoadmisibile-
esfuerzodeapriete); numerodepernos=arealongitudinal/areadeperno;
plot(presionpsi,numerodepernos);axis([0 3000 0 20]);
title('CÁLCULO DEL NÚMERO DE PERNOS PARA BRIDAS');
grid;
xlabel('PRESIÓN INTERIOR EN PSI');
ylabel('NÚMERO DE PERNOS DE 1/2 PULGADA');

```

Una definición de variables de esta programación en Matlab se muestra en la tabla 4.7.

Variables	Descripción
Diámetro = $\Theta$ de las flechas	Graficando de 0.000001 a 2 pulg.
$Pi = \pi$	3.1416
Esfuerzodeapriete	Valor constante asignado de acuerdo a criterios prácticos de resistencia de materiales de Singer. [7]
Esfuerzomax = Esfuerzo Máximo	75,000 psi
Diametroperno	Diámetro del perno (pulg.)
Diametrointerior	Diámetro interior del cilindro (pulg.)
Fseguridad= factor de seguridad	2
Presionpsi= Presión interior.	De 0 a 3000 psi
Areadeperno	Área del perno (pulg. cuadradas) sustitución de formula 41.
Arealongitudinal	Área Longitudinal (pulg. Cuadradas) sustitución de la formula 39.
Numerodepernos	Numero absoluto de pernos, valor obtenido sustituyendo valores en la formula 40.
Plot=término para confrontar valores	Presión interior vs. Número absoluto de pernos
Axis =eje de gráfico	Incrementos de gráfica de 0-3000 psi de presión y de 0 -20 pernos.
Title= título del gráfico	Cálculo del numero de pernos para bridas
Grid= malla o red	Selección de líneas adicionales en gráfico.
Xlabel	Etiqueta gráfico eje X
Ylabel	Etiqueta gráfico eje Y

Tabla 4.7 Definición y descripción de las variables consideradas en la programación matlab de la fórmula 40.

De acuerdo al gráfico 4.5 y tomando en cuenta costos y futuros requerimientos de presión interna en el depósito, se procedió a seleccionar un número definido de pernos, obviamente superior al número mínimo requerido, en este caso se decidió poner 8 pernos de 7/8" de pulgada de diámetro por cada brida.

Esto por que ya se consiguen con proveedores locales, bridas prefabricadas con estas características, lo cual abarata la construcción de la autoclave, con respecto a las bridas sobre medida trabajadas en un torno.

Por lo tanto; si confrontamos en el gráfico 4.5 la línea horizontal con el valor de 8 pernos y trazamos una línea perpendicular al eje de la presión interior, se puede apreciar que la presión interna recomendada a aplicarse en el cilindro sería de 1500 PSI, recordando que para estos cálculos se consideró un factor de seguridad de 2.

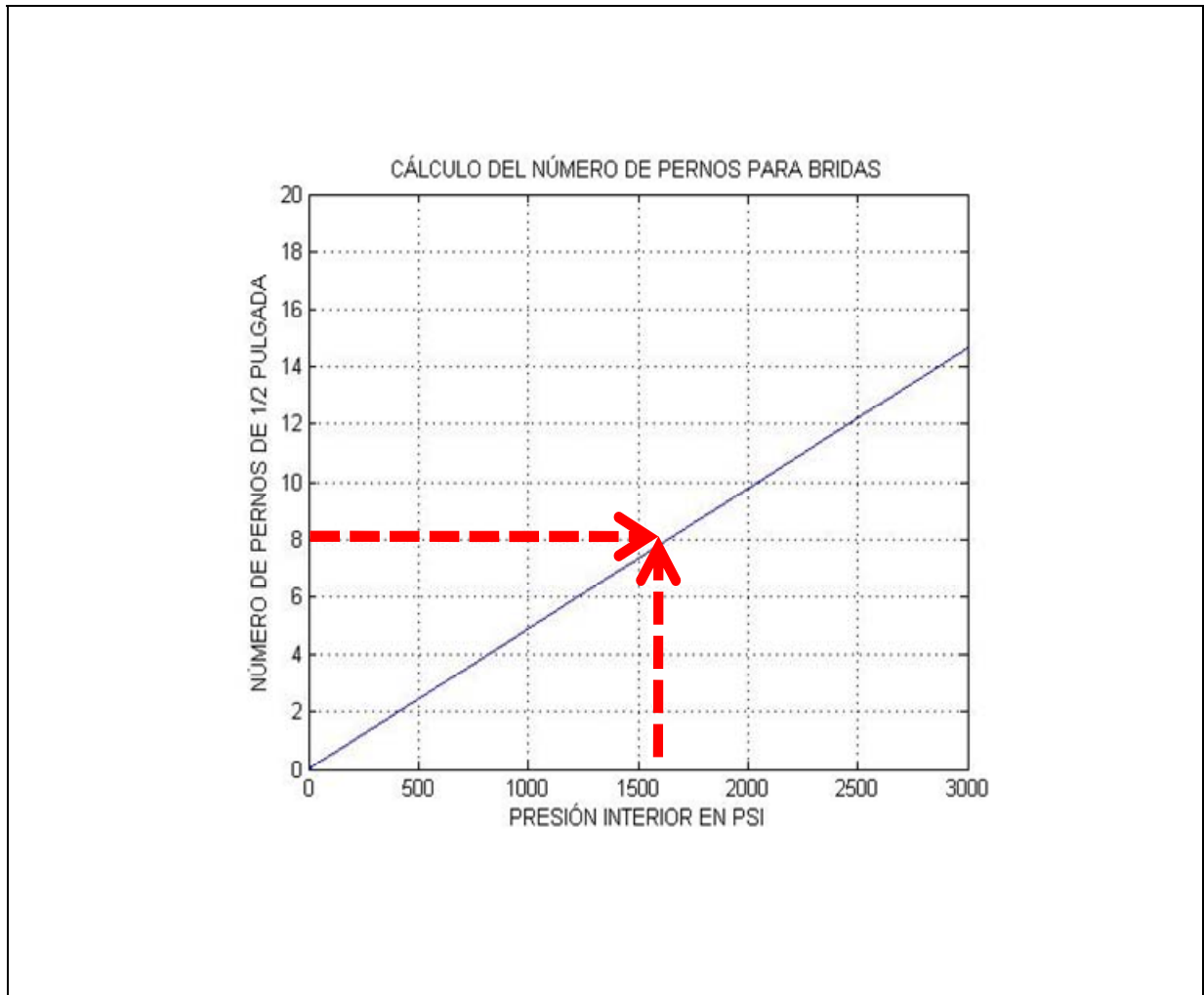


Gráfico 4.5 Cálculo del número de pernos por brida en función de la presión interna en PSI

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

#### 5.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

En base a los cálculos de diseño efectuados en el desarrollo del capítulo IV, se construyó un prototipo o modelo de recipiente hermético para pruebas experimentales en la modalidad de autoclave, fig. 5.1.

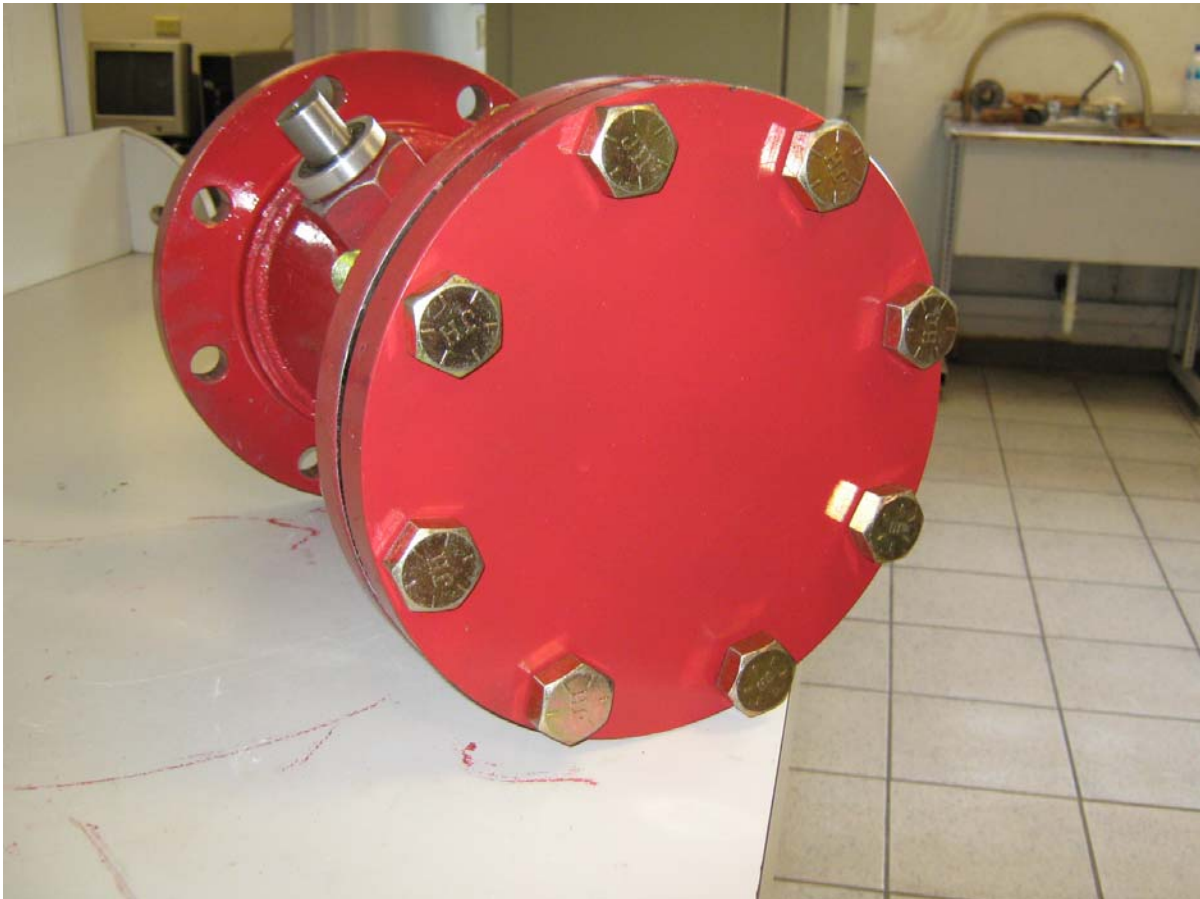


Fig. 5.1 Se muestra un prototipo o modelo de la Autoclave.

En la fig. 5.2 se muestran las medidas de fabricación de la autoclave, considerando los cálculos realizados e interpretados por medio de gráficos de MATLAB:

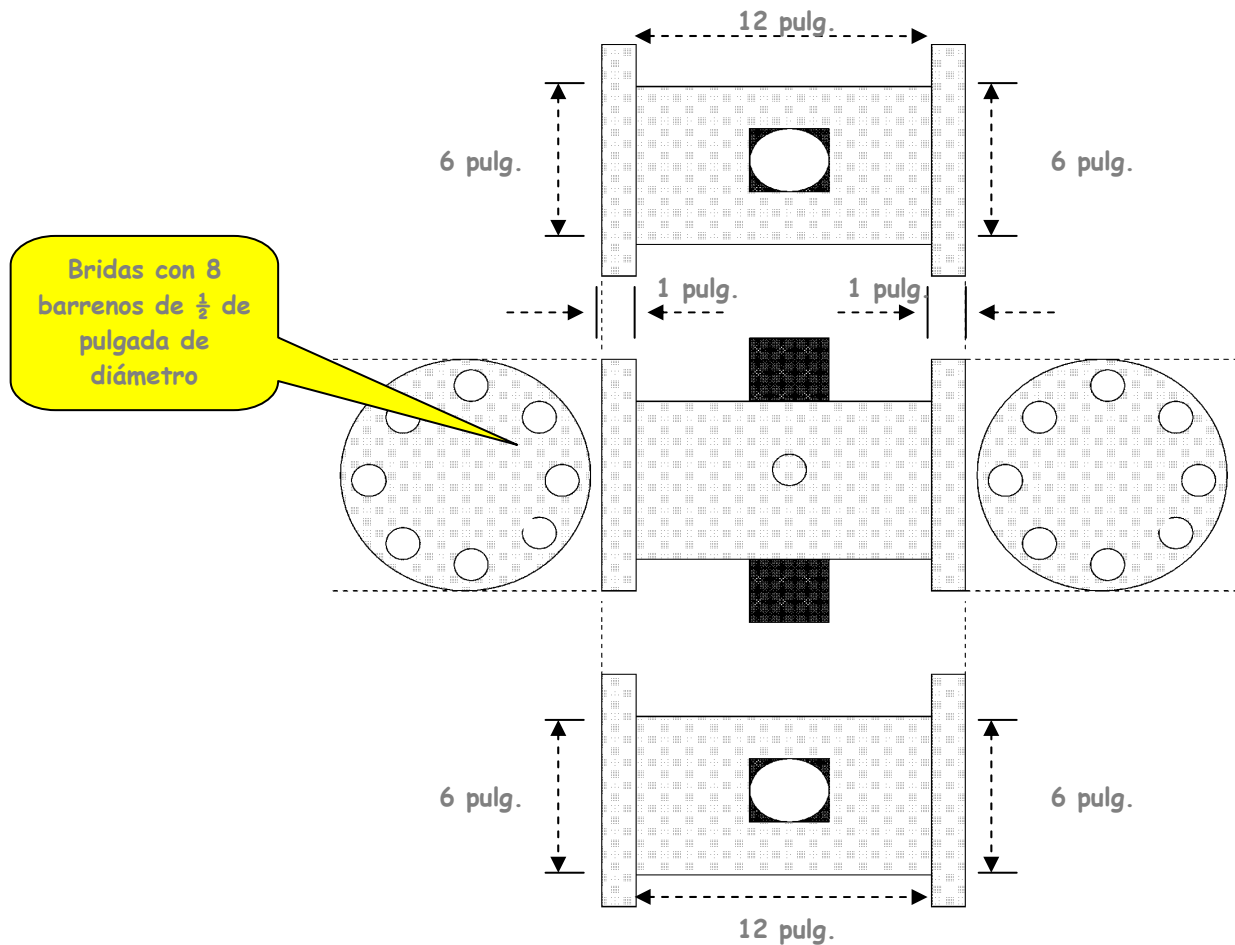


Figura 5.2 Medidas Sugeridas para construir un prototipo o modelo.

En la fig. 5.3, se tienen las dimensiones de los sellos que serán colocados en la autoclave con el fin de mantener la presión interna al momento de aplicar una carga de tensión al espécimen.

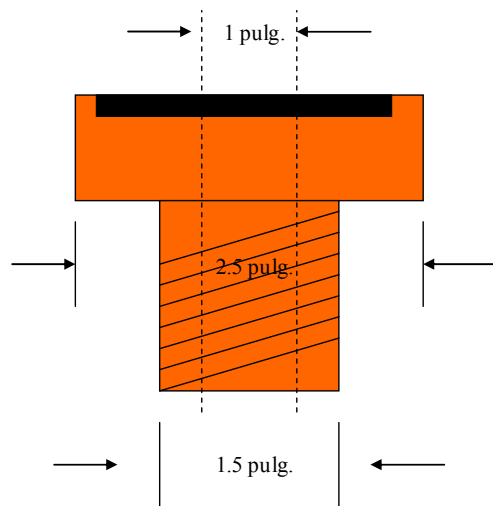


Fig. 5.3 Medidas sugeridas para fabricar los sellos que unen el sistema autoclave y el sistema de mordazas internas.

Asignándole medidas también a las mordazas internas como se muestra en la fig. 5.4 que se muestra a continuación:

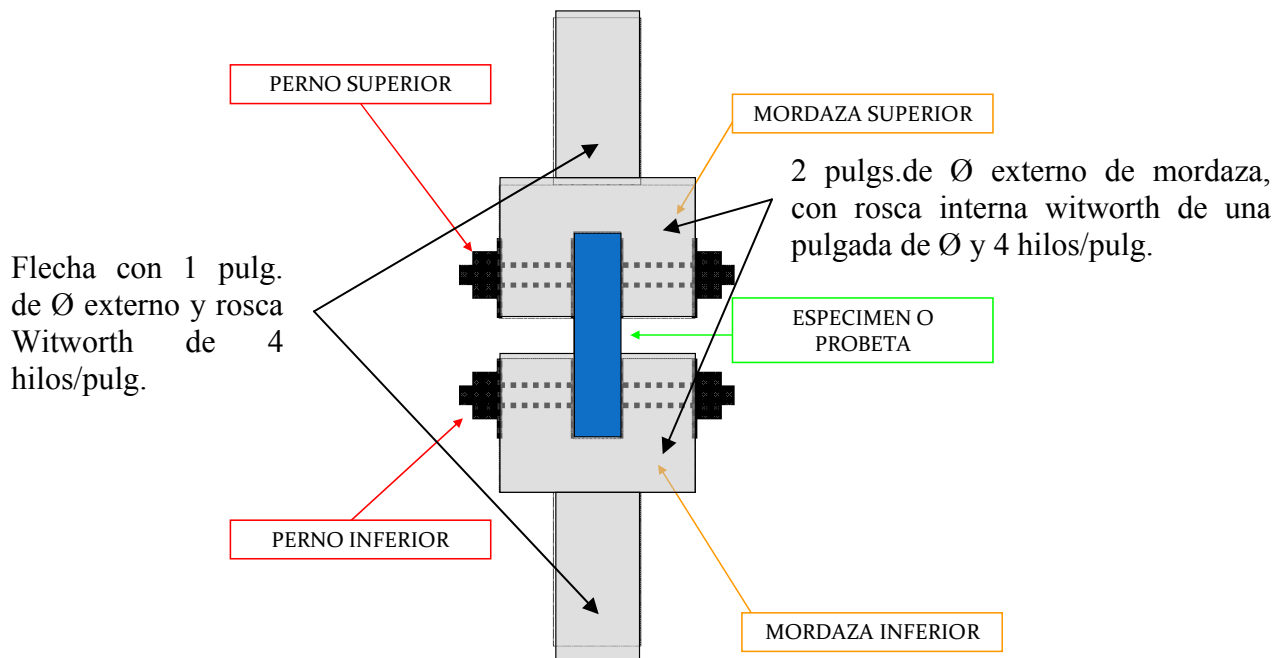


Fig. 5.4 Medidas de las mordazas.

## 5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este análisis de resultados, se ha redactado basado en simulaciones asistidas por computadora en este caso el software ANSYS, donde se aplica la metodología del método del elemento finito para un análisis seccional preliminar y considerando las condiciones de frontera y presión interna mostradas en la Fig. 5.5.

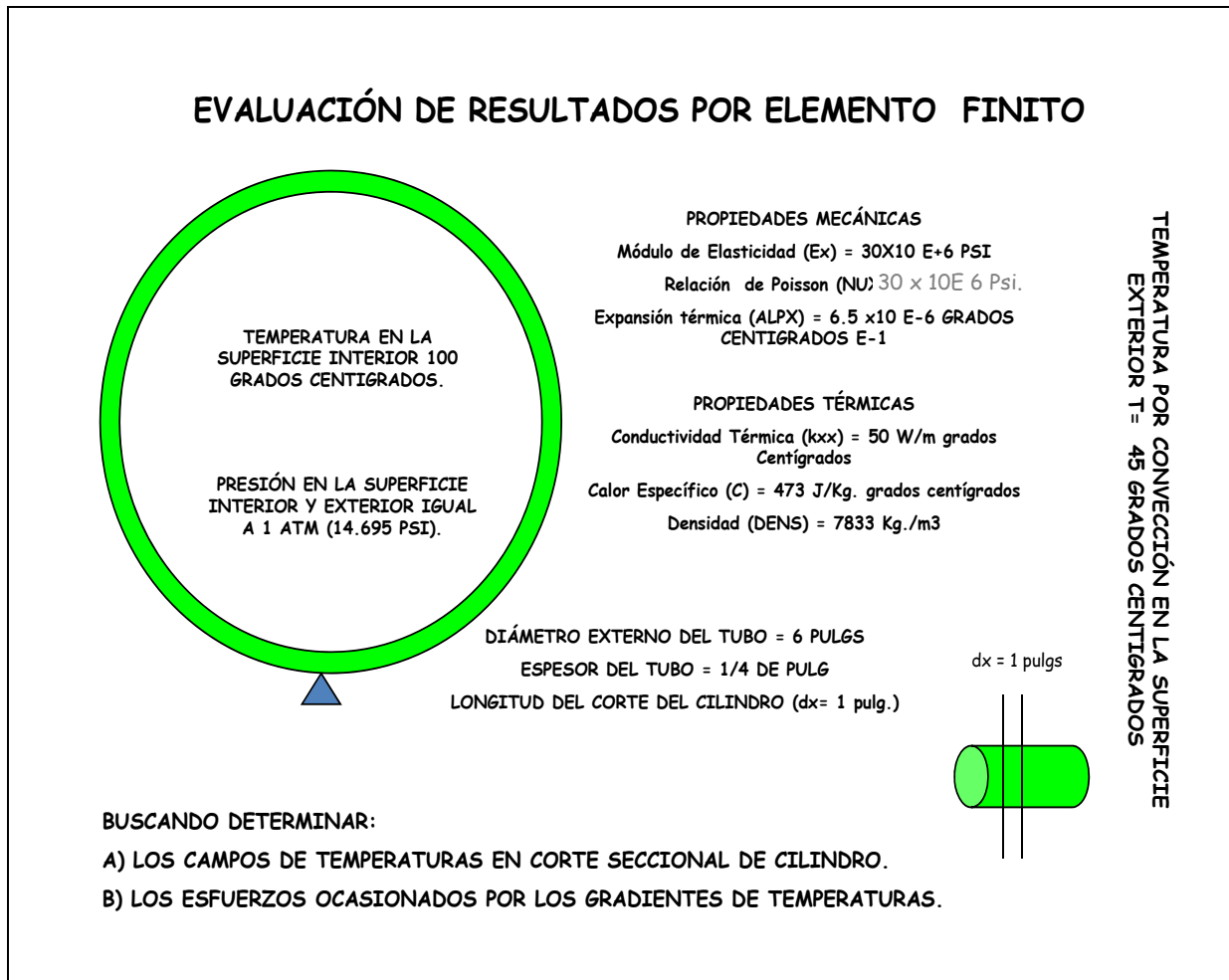


Fig. 5.5 Datos preliminares para el análisis del corte seccional de la autoclave

### 5.2.1 OBJETIVO DEL ANÁLISIS

Los objetivos específicos que se cumplen con el análisis se mencionan a continuación:

- Determinar el punto donde se concentra el esfuerzo principal máximo.
- Confirmar que el esfuerzo principal máximo no exceda el modulo de elasticidad.
- Determinar los alcances de la autoclave en lo referente a presión interna de trabajo.

## 5.3 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

### 5.3.1 ANÁLISIS PRELIMINARES DEL ELEMENTO FINITO.

Como se puede apreciar en la figura 5.6, los esfuerzos mínimo ( $M_n = 10.72$  Psi) y Máximo ( $M_x = 12.67$  Psi) se concentran en la parte tangencial o circunferencial del cilindro, con lo que se valida que los cálculos de diseño a la metodología teórica de la bibliografía [7], además que esta conclusión se obtiene comparando estos valores de esfuerzo máximo ( $M_x < 75,000$  Psi) y esfuerzo mínimo ( $M_n < 75,000$  Psi) con el esfuerzo de fluencia.

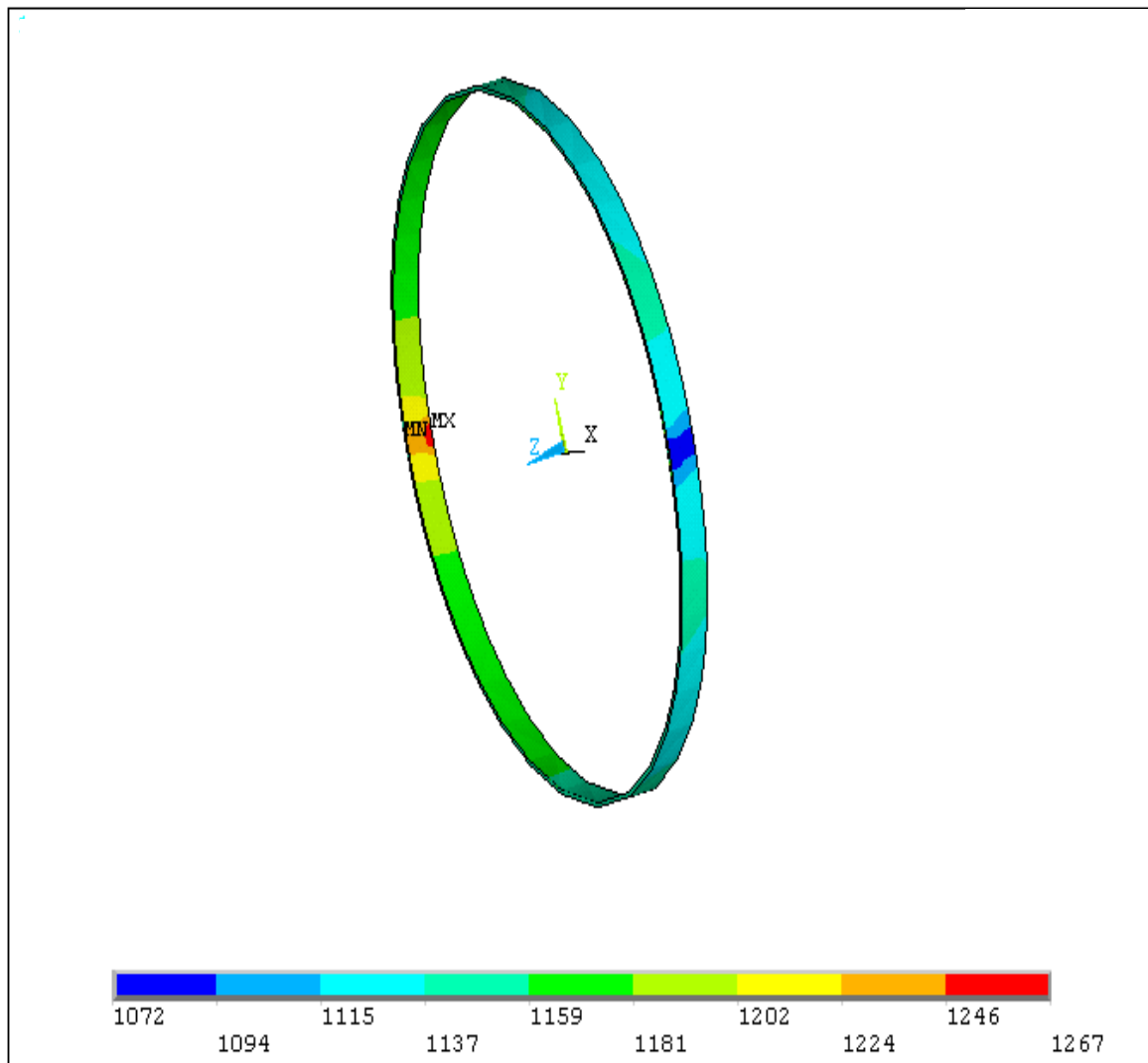


Fig. 5.6 Análisis estructural de un corte de la Autoclave Diseñada.

De lo que se puede deducir que ese esfuerzo máximo esta muy lejos de sobrepasar el límite de fluencia del acero en cuestión, que fluctúa entre 75,000 y 95,000 psi. Un campo de temperaturas simulado puede apreciarse a continuación en la fig. 5.7.

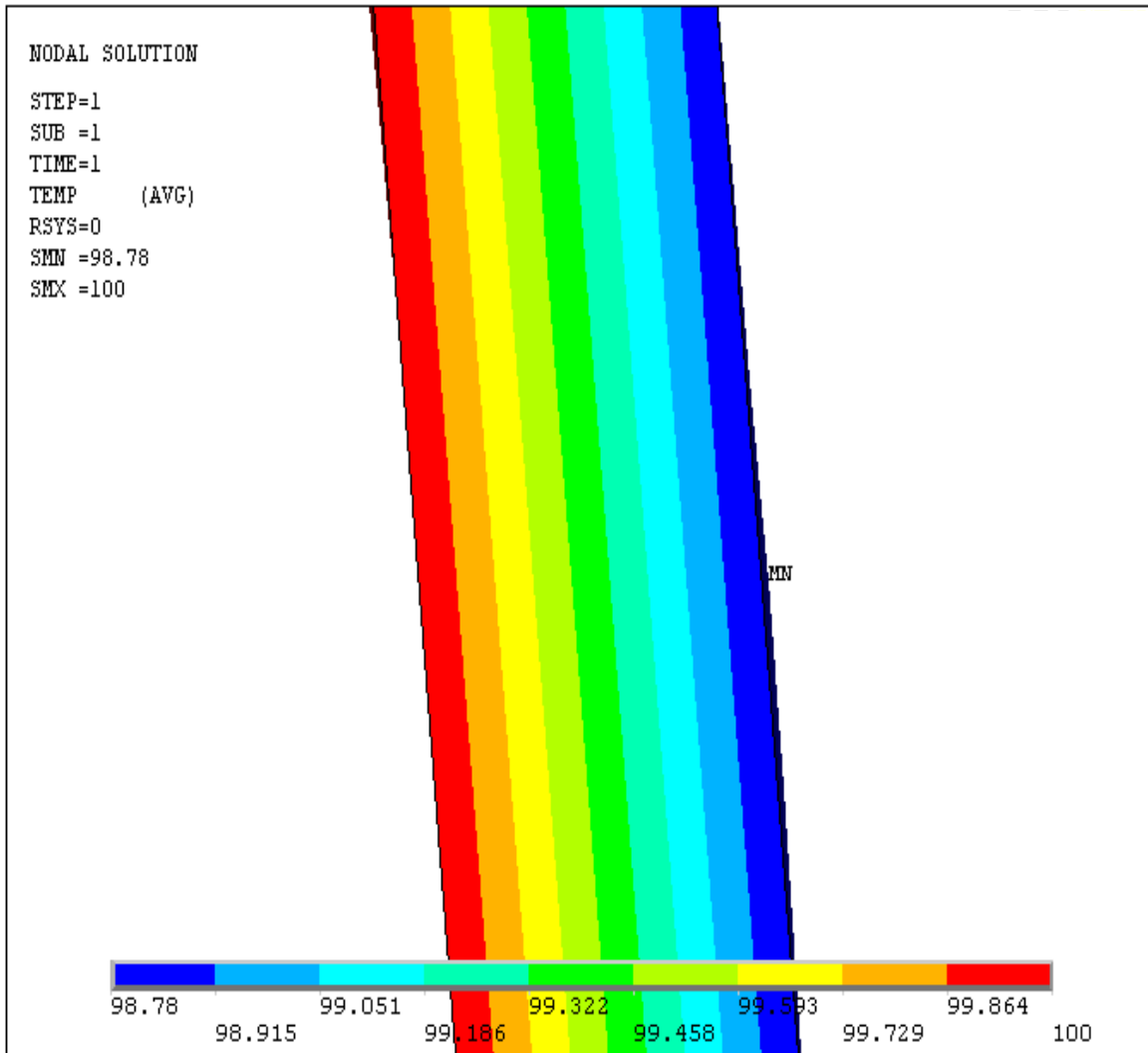


Fig. 5.7 Análisis del Campo de temperaturas en el corte seccional del Autoclave

Como los requerimientos de entrada del proyecto, se especifica que este cilindro trabajará como mínimo a la presión atmosférica, no hay la necesidad de elegir una espesor de cilindro demasiado grueso, por que se incrementaría los costos de fabricación y el peso del cilindro, dificultando su operación y traslado.

Sin embargo, tomando en cuenta los espesores comerciales de tubería inoxidable que puede servir para fabricar la autoclave, se eligió un espesor de 1/4 de pulg. en un tubo sin costuras de 6 pulg. de diámetro total.

### 5.3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ELEMENTO EN 3 DIMENSIONES:

Considerando los mismos datos de entrada para la simulación seccional de la autoclave, se procede a construir virtualmente el elemento en ANSYS, dividiendo en nodos y mallas las diferentes áreas que conforman el recipiente hermético a analizar como un cilindro independiente y que se muestra en la fig. 5.8.

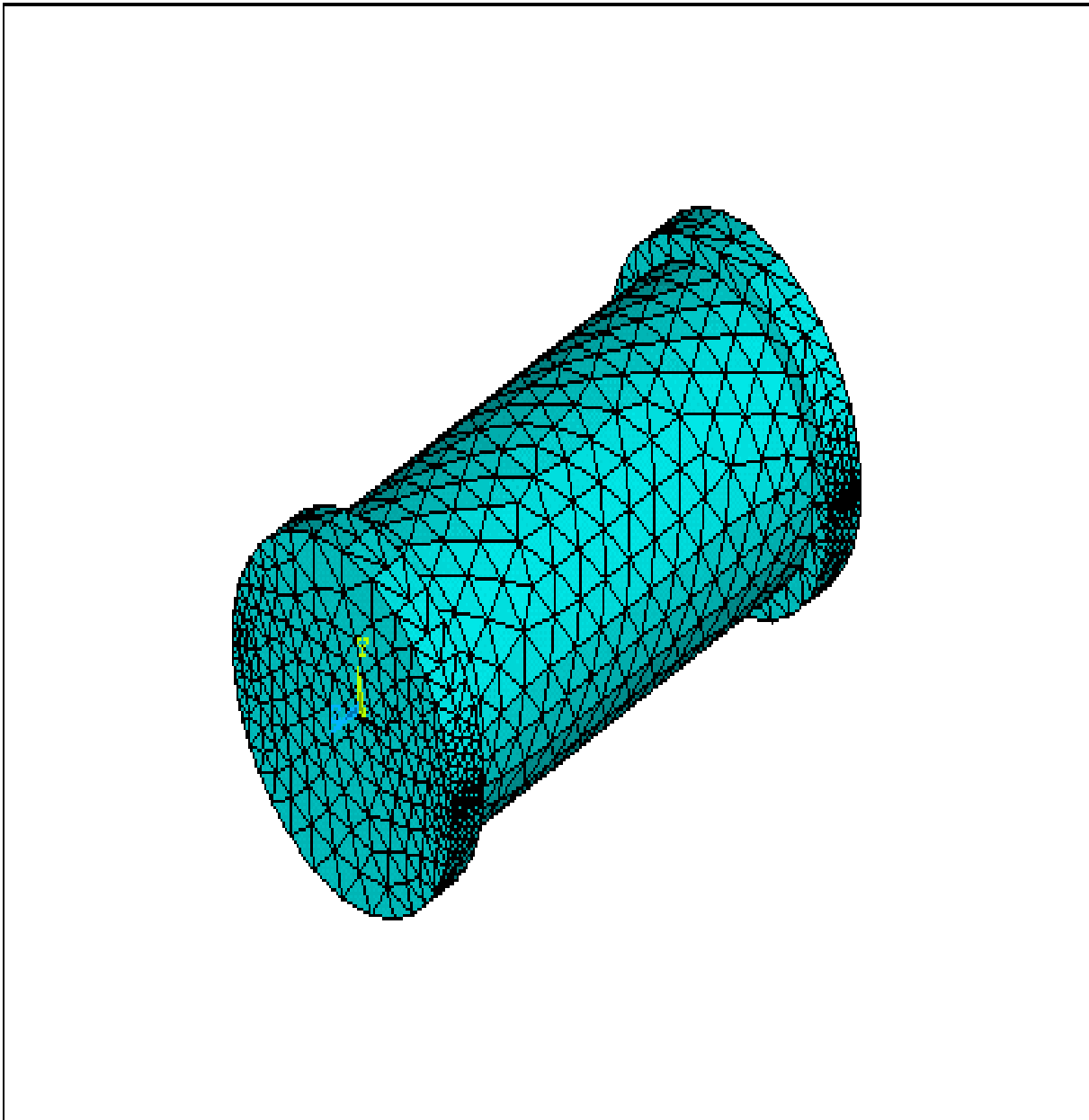


Fig. 5.8.- Construcción virtual del cilindro de la autoclave, dividiendo sus áreas en nodos a través de un mallado.

Aunque las diversas áreas que conforman el cilindro virtual en ANSYS se han pueden apreciar dentro de un mallado.

No todas esas áreas cuyos nodos que la conforman, serán sometidos a la presión interna de una atmosfera. Por lo que para que la simulación sea mas precisa se procedió a seleccionar todos aquellos nodos y áreas que soportaran carga de presión como se puede apreciar en la fig.5.9.

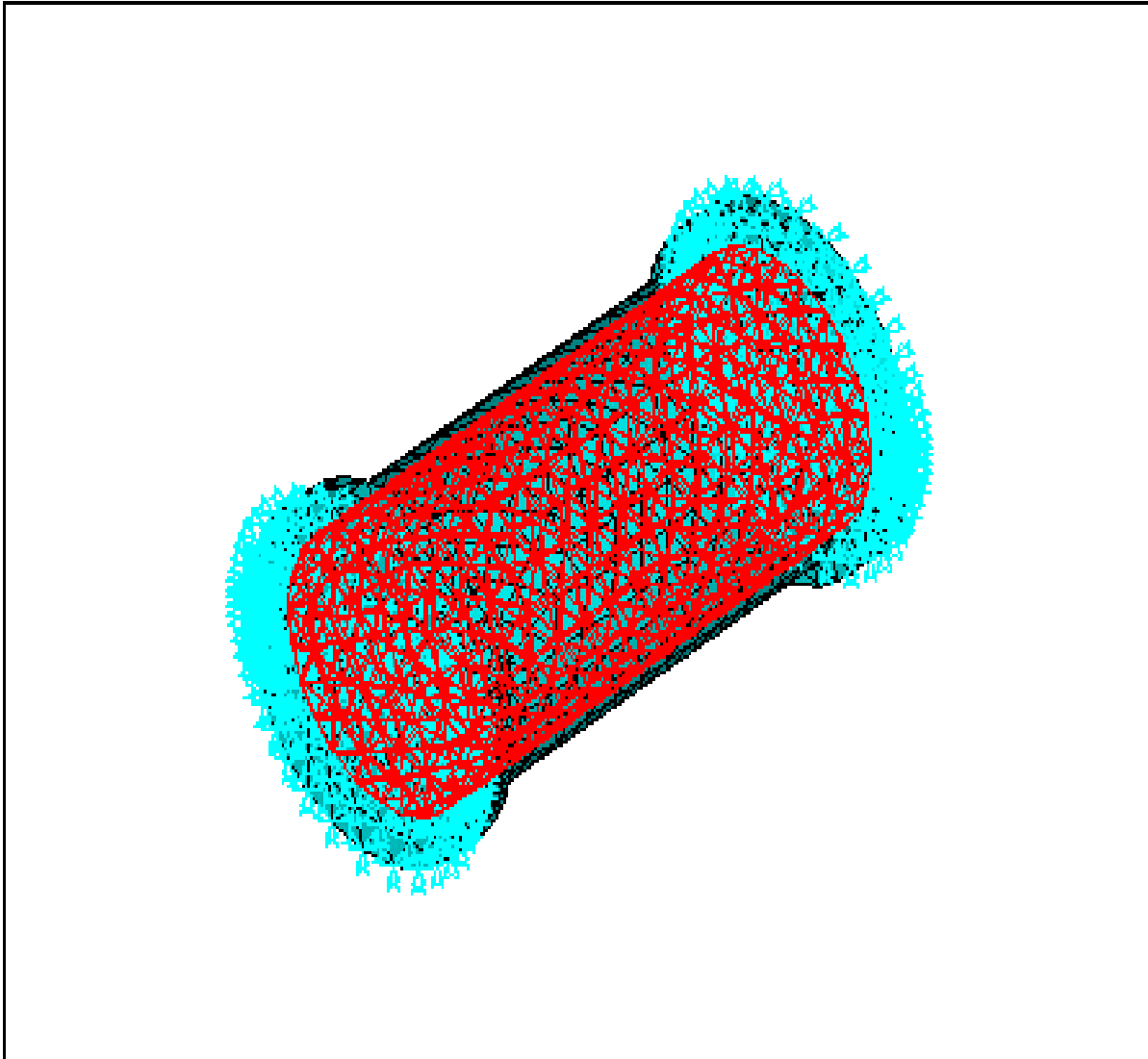


Fig. 5.9.- Selección de los nodos y áreas del cilindro virtual que serán sometidas a presión interna de una atmósfera.

En un ensayo animado se puede apreciar el comportamiento que este cilindro virtual en tres dimensiones, podría alcanzar a soportar hasta 4,500 PSI de presión interna.

Claro que para esto habrá la necesidad de cambiar el tipo de sellos que unirán el sistema autoclave con el sistema de mordazas internas, toda vez que los sellos ecoflón dos considerados para este recipiente hermético fueron contemplados dado que en el interior del recipiente, se iba a considerar una atmosfera de presión como valor de entrada al sistema.

Con una atmosfera de presión interna se puede apreciar en la simulación que realmente no era un valor que pudiera para hacer fallar la autoclave, como se muestra en la fig. 5.10.

En un ensayo animado se puede apreciar el comportamiento que este cilindro virtual en tres dimensiones, podría alcanzar a soportar hasta 4,500 psi de presión interna.

Claro que para esto habrá la necesidad de cambiar el tipo de sellos que unirán el sistema autoclave con el sistema de mordazas internas, toda vez que los sellos ecoflón considerados para este recipiente hermético fueron contemplados dado que en el interior del recipiente, se iba a considerar una atmosfera de presión como valor de entrada al sistema.

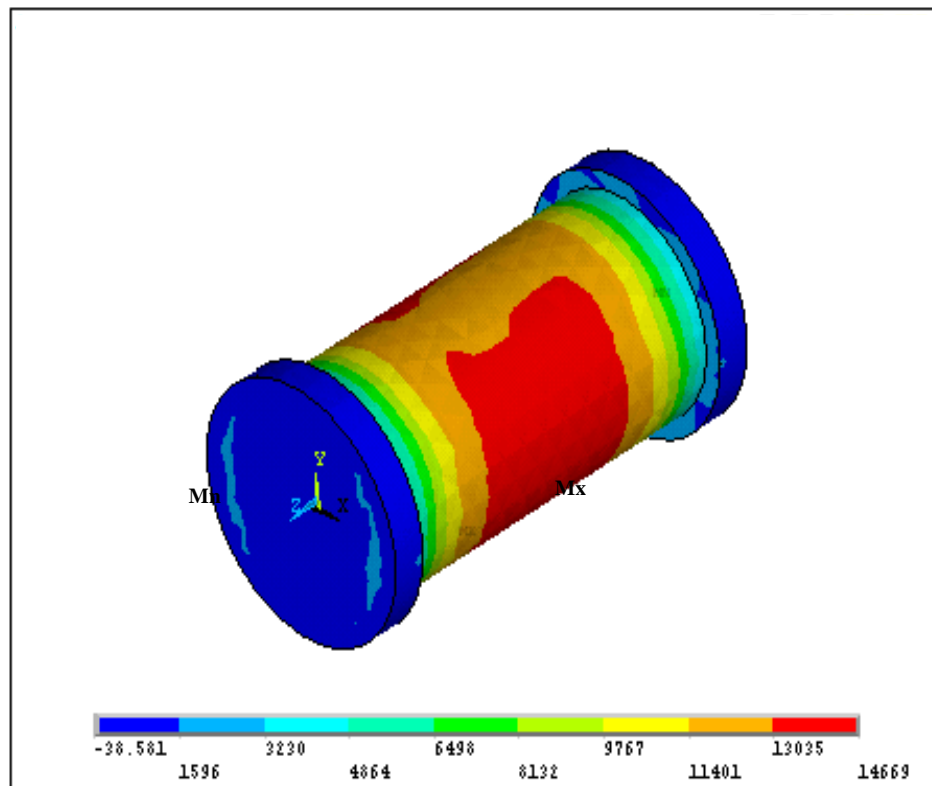


Fig. 5.10 Se muestran con áreas de color rojo, las zonas donde se concentra el esfuerzo máximos y con un signo Mx donde se concentra el Esfuerzo principal máximo.

## CONCLUSIONES

- 1.- La presión interna a la que fallaría la autoclave sería de 4,500 PSI, y reventaría por la circunferencia del cilindro.
- 2.- El rango de presiones internas en las que se recomienda utilizar la autoclave con un factor de seguridad de 2 es de: 1,500 PSI. Aunque con un factor de Seguridad de 1.0 y un par de sellos de alta presión, podría llegar a permitir hasta 3,000 PSI y no se reventaría la autoclave.
- 3.- El espesor de flechas para el sistema de mordazas internas quedo definido en 1 pulgada de espesor.
- 4.- El espesor de cilindro calculado y seleccionado en función de los materiales y los valores de entrada para la operación de la autoclave es de 1/4 de pulgadas de espesor.
- 5.- De acuerdo a la variación del esfuerzo longitudinal y las opciones de bridas comercializables en la región, se determinó usar 8 pernos de ½ pulgada por cada brida.
- 6.- Los pernos inoxidables seleccionados, 5-CA-Ti6AL4V pueden resistir un apriete de 105 a 120 KPSI un valor que asegura que soportará perfectamente el esfuerzo de apriete de 55 MPA y cualquiera de los valores de esfuerzo longitudinal que puedan generarse de acuerdo a el análisis efectuado.
- 7.- Se Analizó el diseño del cilindro por el método del elemento finito (ANSYS) considerando las condiciones de operación y se confirmo como viable.
- 8.- Se elaboró un prototipo de recipiente hermético para pruebas experimentales, el cual se recibió a satisfacción del asesor de tesis.
- 9.- Fotografías de un prototipo construido se muestran en el anexo “A”.
- 10.- Recomendaciones para futuros diseños y comentarios adicionales se a continuación....

## RECOMENDACIONES PARA FUTUROS DISEÑOS

Las recomendaciones relacionadas son a criterio muy personal y es para que el lector de esta tesis, que desee diseñar componentes mecánicos iguales o diferentes; pueda minimizar el tiempo necesario para presentar los cálculos preliminares y darle medidas a un modelo o prototipo.

- ✓ Se recomienda hacer una planeación tomando en cuenta el tiempo disponible con que se cuenta o poniendo plazos para desarrollar y concluir tal o cual actividad, considerando desde las etapas iniciales hasta las etapas finales donde se entregará la documentación completa del diseño y el prototipo final.
- ✓ Se recomienda ampliamente revisar el estado del arte de la tesis, para que el lector pueda entender como evolucionó el concepto de diseño y no diseñe prototipos similares a siglos atrás, si no que vaya en busca de modelos con criterios más modernistas y más acorde a nuestra era.
- ✓ Se recomienda definir previamente cuales serán las variables de entrada en función de las variables de salida, o sea las características finales del diseño o elemento a diseñar.
- ✓ Actualizarse en normas nacionales e internacionales de diseño de productos de acuerdo a su aplicación y elegir materiales y características que puedan asegurar la efectividad del diseño. (Ejemplo: Seguridad Industrial y Ergonomía).
- ✓ Definir previamente cuantos sistemas se involucrarán para conseguir la solución que se requiera en el elemento mecánico o diseño a construir.
- ✓ Una vez definido el número de sistemas involucrados se sugiere analizar la posibilidad de sistemas opcionales que pudieran enriquecer a futuro un primer diseño realizado, como versión estándar 1.0
- ✓ En caso de utilizar fórmulas matemáticas, se sugiere no considerar el resultado fijo que puede arrojar una expresión matemática, si no graficarla mediante software como MATLAB; Esto para analizar el abanico de opciones que puede tener en medidas el elemento en cuestión, y tomar decisiones de medidas de acuerdo a lo comercial en la región.
- ✓ Se sugiere que los cálculos preliminares a realizar se efectúen especificando el nombre del sistema en que pertenece el elemento mecánico en cuestión.
- ✓ Una vez obtenidos los cálculos preliminares se sugiere la construcción de un modelo o prototipo, que puede ser práctico o mediante un dibujo a papel para después analizarlo por medio de una software especializado como (ANSYS) y determinando por medio de análisis en simulador, las posibles fallas de los elementos diseño, identificando perfectamente los puntos donde se concentren esfuerzos máximos o críticos.
- ✓ Se recomienda revisar diferentes opciones de proveedores de materiales para fabricar con componentes prefabricados comerciales o estandarizados, ya que abaratarían la fabricación en serie o la fabricación específica de un prototipo.
- ✓ Para la posible comercialización de un diseño mecánico o de cualquier diseño de ingeniería, se sugiere analizar la información contenida en el capítulo 3 de esta tesis, para ver los estándares y requerimientos necesarios para poder crear un producto que posteriormente se pueda patentar a nivel nacional.

## **COMENTARIOS ADICIONALES**

### **EN LO REFERENTE A ACCIONES PLANEADAS:**

Se estableció un plan de trabajo que consideró actividades y objetivos a cumplir en determinadas fechas de acuerdo al plazo pactado para el desarrollo del proyecto.

### **EN LOS REFERENTE A ACCIONES EJECUTADAS:**

- a) Se establecieron los antecedentes y marco teórico para llevar a cabo el proyecto.
- b) Se consultaron normas nacionales e internacionales.
- c) Se realizaron cálculos preliminares.
- d) Se simularon las condiciones de operación por medio de ANSYS.
- e) Se fabricó un prototipo.

### **COMENTARIOS ACERCA DE LOS RESULTADOS:**

De acuerdo a los análisis asistidos por computadora, el prototipo cumplirá con las condiciones requeridas o variables de entrada.

### **ACERCA DE PUNTOS PROBLEMÁTICOS:**

- 1.- Para incrementar la capacidad y alcance de la autoclave, habrá la necesidad de manejar diferentes dimensiones y otras opciones de materiales, pero respetando el mismo modelo matemático.
- 2. Para poder utilizar la capacidad máxima de la autoclave según los valores teóricos y de simulación (ANSYS), será necesario colocar sellos de aluminio que soporten mayor presión y temperatura.

### **COMENTARIOS SOBRE PROPUESTAS DE SOLUCIÓN:**

- 1.- Se pueden estandarizar las gráficas para elegir las dimensiones si se respetan los materiales seleccionados.
- 2.- Otro tipo de materiales generaría la necesidad de crear nuevas gráficas de diseño.
- 3.- Se puede hacer un programa en Excel o en MATLAB para sistematizar la generación de dimensiones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] RESHETOV, D. Elementos de Máquinas. Edit. Pueblo y Educación. La Habana. 1985.

[2] SHIGLEY, J. E. Diseño en ingeniería mecánica. Quinta Edición. Joseph Edward Shigley y Charles R. Mischke. Edit. Mc Graw Hill. México D. F. 1998. .

[3] STADELMANN, R. Las pirámides, colosales obras de ingeniería. Cómo se desarrollaron ciencias y técnicas junto al Nilo. En El Correo de la UNESCO, sept. 1988,

[4] SILOVSKY, K. Resistencia de Materiales. Tomo I. K. Silovsky y J. Oliva. Instituto Cubano del Libro, La Habana, 1976.

[5] Microsoft ENCARTA 2004.

[6] FITZGERALD. Mecánica de Materiales.

[7] FERDINAND SINGER. Resistencia de Materiales.

[8] A. Hrenikoff (1941), Solutions of problems in Elasticity by the Framework Method.

[9] D. Mc. Henry (1943), A lattice Analogy for the Solution of plane Stress Problems

[10] R. Courant (1943), Variational Methods for the solutions of problems of equilibrium and vibrations.

[11] S. Levy (1970), Computation of Influence Coefficients for Aircraft Structures with Discontinuities and Sweep Back.

[12] J. H. Argyris y S. Kesley (1960), Energy Teorems and Structural Analisis.

[13] S. Levy (1953), Structural Analisis and influence Coefficients for delta Wings.

- [14] M. J. Turner, R. W. Clough, H.C. Martin y L. J. Topp (1956), Stiffness and Deflection Analysis of complex Structures.
- [15] Melosh, R. J. (1965), "Basis for derivation Matrices for the Direct Stiffness Method"
- [16] R. W. Clough (1960), The finite element Method in plane Stress Analysis.
- [17] R. J. Melosh, (1961), A Stiffness matrix for the analysis of thin plates in bending.
- [18] A. Adini y R. W. Clough (1961), Analysis of plate Bending by the finite Element method.
- [19] P. E. Grafton y D. R. Strone (1963), Analysis of Axisymmetric Shells by the Direct Stiffness method.
- [20] O. C. Zienkiewicz y Y. R. Cheung, Y. K. (1965), "Finite in the Solution of fields Problems.
- [21] Wilson, Edward L., and Robert E. Wickell, 1966. "Application of the finite Element method to heat Conduction Analisis".
- [22] O. C. Zienkiewicz y Y. R. Cheung (1967), The finite element method in structural and continuum mechanics,
- [23] Szabo, Barna A., and George C. Lee (1969) "Derivation of Stiffness matrices for problems in plane Elasticity by Gallekin's Method".
- [24] O. C. Zienkiewicz (1971), The finite element method in Engineering Science.
- [25] O. C. Zienkiewicz (1977), The finite element method.
- [26] D. Norrie y G. de Vries (1976), Finite Element Bibliography.

[27] Publicación científica de la Universidad de Valencia, España (2008-2009), Raymunda Montejano Lozoya.

[28] Publicación científica del Instituto de materiales para la electrónica (1991) , de la Habana Cuba.

[29] Publicación Científica “Diseño y construcción de una máquina granalladora para la limpieza externa de tuberías de acero” (1991) Universidad Metropolitana; Caracas, Venezuela.

[30] Problemas resueltos de resistencia de materiales, de la Serie SHAUM (1990). Mc Graw Hill.

[31] Norma oficial Mexicana NOM-050-SCFI-1994 (versión del 9 de abril de 1997 que sustituye a la versión del 28 de agosto de 1996).

[32] Norma oficial Mexicana NOM-005-STPS-1998 de la Secretaría del trabajo y previsión Social. (versión del 2 de febrero de 1999).

[33] Manual of the American Society for testing and material “A.S.T.M. “(1998).

[34] Reglamentos, Normativas y Guías Técnicas (27 de noviembre del 2007) Universidad Politécnica de Valencia, España.

## ANEXO "A"

### IMÁGENES DEL PROTOTIPO DE AUTOCLAVE CONSTRUÍDA POR EL AUTOR DE LA TESIS.

a) Imagen de las bridas ciegas.



b) Imagen de un sello de prueba en aluminio.



c) Imagen del cuerpo de la autoclave.



d) Imagen de las mordazas internas.



e) Imagen de los sellos de prueba para las bridas.



f) Imagen de los especímenes de prueba (sin ranura).



g) Imagen del tipo de perno seleccionado.



h) Imagen de la mordaza Inferior desmontada de su sello.



i) Imágenes del prototipo de la autoclave ya terminada.



