



REPUBLICA DE CUBA

MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS

FACULTAD DE INGENIERIA

Título: Análisis por Elementos Finitos de Tensiones en la Placa de Respaldo de la Bomba KARL KROYER MP 2C120 con Variadas Configuraciones de Agujeros.

Autor: Enriko Guerra Pérez

Tutores: MsC. Juan Gabriel Noa Águila

Dr. Yosvany Yosdy García

Curso 2024-2025

Resumen:

En este estudio, se comienza con la teoría de las placas planas y se extiende a la teoría de placas de pequeña curvatura con sección constante, aplicando simplificaciones similares a las de las placas planas. Se desarrollan ecuaciones para calcular el coeficiente de debilitamiento en la sección debido a la presencia de orificios en posiciones radiales y verticales, con espacios variables entre ellos. Los diámetros de los orificios pueden variar entre las diferentes circunferencias de la placa. Estas ecuaciones se emplearán para evaluar las tensiones en el Placa de Apoyo de la Bomba Máster MP 2C120 de la Planta Glucosa de Cienfuegos, considerando configuraciones con orificios radiales, verticales y sin orificios. El objetivo es analizar analíticamente las tensiones que aparecen en la placa bajo una carga uniforme. Se llevó a cabo una modelación por elementos finitos de la placa bajo una carga de presión uniforme y se realizó una simulación en condiciones reales de carga utilizando el software ANSYS.

Palabras Clave: Bomba de diafragma, Plato de respaldo, Elementos finitos, Diafragma.

Abstract:

In this study, we begin with the theory of flat plates and extend to the theory of small curvature plates with constant section, applying simplifications similar to those of flat plates. Equations are developed to calculate the weakening coefficient in the section due to the presence of holes in radial and vertical positions, with variable spacing between them. The diameters of the holes can vary among the different circumferences of the plate. These equations will be used to evaluate the stresses in the Support Plate of the Master Pump MP 2C120 at the Cienfuegos Glucose Plant, considering configurations with radial holes, vertical holes, and without holes. The objective is to analytically analyze the stresses that appear in the plate under a uniform load. A finite element modeling of the plate was carried out under a uniform pressure load, and a simulation was performed under real loading conditions using ANSYS software.

Key Words: Diaphragm pump, Backing plate, Finite elements, Diaphragm.

Índice

RESUMEN:

Introducción	1
Problema:	2
Hipótesis:	2
Objetivo General:	2
Objetivos Específicos:	2
CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA:	3
1.1) Bombas de Diafragmas:	3
1.1.1) Bombas de Diafragma: Principios y Funcionamiento.....	5
1.1.2) Acción y Aplicaciones:	5
1.1.3) Extremos de Líquido en Bombas de Diafragma:	6
1.1.4) Diafragmas en Bombas de Diafragma:	8
1.2) Bombas de Diafragma de Discos:	8
1.3) Bombas con Diafragma Tubular:	10
1.3.1) Funcionamiento y Diseño:	10
1.3.2) Ventajas y Aplicaciones:	10
1.3.3) Otras Configuraciones de Diafragmas:	10
1.4) Principales tipos de válvulas en las bombas de diafragmas:	11
1.4.1) Válvula de Desahogo de Presión:	11
1.4.2) Válvula Compensadora de Vacío:	11
1.4.3) Válvulas de Purga (Sangrado):	12
1.4.4) Válvulas de Retención:	12
1.4.5) Válvula de Bola o de No Retorno:	12

1.5)	Selección de Bombas de Diafragma:	12
1.5.1)	Evitar Fugas o Contaminación Cruzada:	12
1.5.2)	Flujo Constante Independiente de la Presión de Descarga:	13
1.5.3)	Exactitud en el Control de la Capacidad de Salida:	13
1.5.4)	Cámara de Bombeo Separada del Resto de la Bomba:	13
1.6)	Materiales para la Fabricación de Bombas de Diafragma	14
1.6.1)	Consideraciones para el Extremo de Líquido	14
1.6.2)	Resistencia a la Corrosión:	15
1.6.3)	Componentes en Contacto con el Líquido:	15
1.6.4)	Diafragmas:	15
1.7)	Bombas de diafragmas usadas mundialmente:	16
1.7.1)	Bombas de Diafragmas Wilden:	16
1.8)	Bombas de Diafragma ABEL: Gama HM y HMT:	20
1.8.1)	Gama HM:	20
1.8.2)	Gama HMT:	21
1.8.3)	Áreas de Aplicación de las Bombas de Diafragma ABEL:	23
1.9)	Bomba Maestra KARL KROYER MP 2C120:	24
1.9.1)	Descripción y Modo de Operación:	24
1.9.2)	Parámetros fundamentales:	26
1.9.3)	Placa Perforado de Respaldo al Diafragma	27
1.10)	Principales Modelaciones por el Método de Elementos Finitos en Placas Perforadas.....	29
	Conclusiones del Capítulo I.....	31
	 CAPÍTULO II: SIMULACIÓN DEL DIAFRAGMA Y PLACA DE RESPALDO POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.	 32
2.1)	Características del diafragma.....	32

2.2) Determinación experimental de la composición química del material de la placa.....	33
2.3) Modelación de la placa perforada con diferentes configuraciones de agujeros empleando el método de elementos finitos en el software ANSYS 18.1	37
2.3.1) Asignación de Material.....	39
2.3.2) Condiciones de Trabajo	39
2.3.3) Generación de Malla	40
2.4) Simulación del diafragma en el programa ANSYS	41
2.4.1) Tensiones y deformaciones en el diafragma.	42
2.4.2) Comportamiento de la porción del diafragma en el agujero.....	49
2.5) Modelación de la placa sin contacto con diafragma para diferentes configuraciones de agujeros.....	50
2.5.1) Comportamiento de las tensiones en el exterior de la placa.....	52
2.5.2) Comportamiento de las tensiones en el interior de la placa.....	54
2.5.3) Comportamiento de las tensiones en el interior y exterior de la placa para diferentes configuraciones de agujeros.....	55
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO II	58
CAPÍTULO III: ANÁLISIS COMPARATIVO DE SIMULACIONES	59
3.1) Modelación de la placa en contacto con diafragma para diferentes configuraciones de agujeros.....	59
3.1.1) Comportamiento de las tensiones para el interior de placa para la configuración de 5 mm de diámetro de agujero	59
3.1.2) Comportamiento de las tensiones en el exterior de la placa para la configuración de 5 mm.....	62
3.1.3) Comparación de las tensiones en el exterior y el interior de la placa para la configuración de 5 mm y sus respectivas medidas de pasos:	63

3.2) Análisis comparativo del comportamiento de tensiones en la placa con diafragma y sin el diafragma:	64
3.2.1) Comparación de las tensiones en el interior de la placa diafragma y sin el diafragma	65
3.2.2) Comparación de las tensiones en el exterior de la placa con y sin diafragma:	66
CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO III	68
CONCLUSIONES GENERALES	69
RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	71

Introducción:

La Empresa Glucosa Cienfuegos, subordinada a LABIOFAM y situada en la zona Industrial No 2 del reparto Pueblo Griffo, en la periferia noreste de la ciudad de Cienfuegos, inició sus operaciones en 1978 tras un periodo de inversión de seis años. Utilizando tecnología sueca de Alfa Laval y danesa de DDS Kroyer, es la única fábrica en Cuba dedicada a la producción de glucosa y otros derivados del maíz. Su capacidad de producción diaria incluye 90 toneladas de sirope de glucosa, 9 toneladas de gluten, 7 toneladas de germen, 19 toneladas de licor de remojo, 21.5 toneladas de forraje y más recientemente, Vimang.

La tecnología de la empresa está dividida en tres plantas: producción de almidón, producción de sirope de glucosa y mezclas secas. Además, cuenta con facilidades auxiliares comunes a todas las plantas, como el sistema de generación de vapor, que dispone de dos calderas de tubos de fuego con capacidades de 8 y 12 toneladas de vapor por hora respectivamente. La planta opera con una serie de equipos que mantienen su operatividad, apoyados por un equipo técnico encargado del desarrollo, mantenimiento y recuperación, lo que permite un funcionamiento continuo y eficiente.

Entre estos equipos se encuentra la Bomba Master KARL KROYER MP 2C120, encargada de bombear la leche de almidón acidificada utilizada en la producción de glucosa. Tras un largo período de uso, han surgido fallas en la bomba, específicamente en el diafragma, desde el periodo 2005-2006. Estas fallas causan la ruptura del diafragma, permitiendo que el aceite de los pistones se mezcle con el producto, resultando en la pérdida de materia prima, aceite de la bomba y tiempo debido a la necesaria limpieza de las tuberías contaminadas con aceite.

Esta avería ha provocado significativas pérdidas económicas, ya que la falla del diafragma detiene la producción en esa área, con una pérdida de 10 toneladas en un turno de 8 horas, cada tonelada con un valor de 1.25 USD. Según los especialistas de la planta, la falla se debe al aumento de tensiones en la placa de respaldo, lo que causa rupturas entre los agujeros y sobrecarga el diafragma, llevándolo a la ruptura. Este proyecto surge con el objetivo de esclarecer la causa

de la avería y analizar el comportamiento de las tensiones en el diafragma y la placa de respaldo de la bomba KARL KROYER MP 2C120.

Problema:

Se desconoce el comportamiento de las tensiones en la placa de respaldo de la bomba KARL KROYER MP 2C120, debido a su curvatura, la disposición de los agujeros y las fuerzas ejercidas por el diafragma sobre ella

Hipótesis:

Es posible determinar el comportamiento de las tensiones reales que se generan en el diafragma y en la placa de respaldo de la bomba KARL KROYER MP 2C120 con diferentes configuraciones de agujeros mediante la modelación por elementos finitos.

Objetivo General:

Realizar la Modelación, empleando métodos de elementos finitos, del diafragma y la placa de respaldo de la Bomba Master KARL KROYER MP 2C120 para determinar el comportamiento de las tensiones reales que se generan durante el funcionamiento de la bomba, evaluando diferentes configuraciones de agujeros.

Objetivos Específicos:

- Realizar una búsqueda bibliográfica que permita Caracterizar las generalidades de las bombas reciprocantes en general y en particular de las bombas de diafragma y caracterizar las particularidades de la Bomba Master KARL KROYER MP 2C120, de su placa de apoyo y de las averías que se producen en el mismo.
- Simular mediante ANSYS empleando métodos de elementos finitos el diafragma con diferentes configuraciones de agujeros en la placa en condiciones de operación
- Simular mediante ANSYS empleando métodos de elementos finitos en la placa de respaldo con diferentes configuraciones de agujeros en la placa en condiciones de operación
- Obtener ecuaciones que rigen el comportamiento de las tensiones para cada configuración de agujero propuesto.

Capítulo I Revisión Bibliográfica:

Este capítulo presenta los elementos fundamentales de las bombas de diafragma, describiendo las características principales ofrecidas por dos de los mayores fabricantes de este tipo de bombas. También se detalla la operación de la bomba de diafragma KARL KROYER utilizada en la empresa Glucosa Cienfuegos. Además, se analizan las principales modelaciones de placas con orificios documentadas en la literatura.

Las bombas reciprocantes (alternativas) (ver figura 1.1) se utilizan en numerosas aplicaciones que exceden la capacidad de las bombas centrífugas o rotatorias. Estas bombas son dispositivos de desplazamiento positivo, lo que significa que reciben un volumen fijo de líquido en condiciones casi de succión, lo comprimen a la presión de descarga y lo expulsan por la boquilla de descarga. En estas bombas, el desplazamiento del fluido se logra mediante el movimiento alternativo de un pistón, émbolo o diafragma.

Generalidades de las bombas reciprocantes. Bombas de diafragma:

Una bomba reciprocante no es cinética como la centrífuga y no requiere velocidad para producir presión, lo que permite obtener altas presiones a bajas velocidades. Esta característica es particularmente ventajosa para manejar pastas aguadas abrasivas y líquidos muy viscosos. La justificación para seleccionar una bomba reciprocante, en lugar de una centrífuga o rotatoria, debe considerar el costo total, no solo el inicial, sino también los costos de energía y mantenimiento.

Las bombas reciprocantes son conocidas por su alta eficiencia, que suele estar entre el 85% y el 94%. La pérdida del 10% incluye todas las pérdidas que ocurren en las bandas, engranajes, cojinetes, empaquetaduras y válvulas. Otra característica destacable de la bomba reciprocante es que su capacidad está en función de la velocidad y es más o menos independiente de la presión de descarga.

1.1) Bombas de Diafragmas:

Las bombas de diafragmas son un tipo específico de bomba reciprocante que utiliza un diafragma flexible en lugar de un pistón o émbolo. Estas bombas son

ampliamente utilizadas en aplicaciones donde se manejan fluidos corrosivos, abrasivos o viscosos. Sus principales características son:

Diafragma Flexible: El diafragma es un componente clave que se flexiona para crear una acción de bombeo, desplazando el fluido.

Aislamiento del Fluido: El diseño del diafragma permite aislar completamente el fluido bombeado de los componentes mecánicos, reduciendo el riesgo de contaminación y desgaste.

Versatilidad en el Manejo de Fluidos: Son adecuadas para una amplia gama de fluidos, incluidos aquellos que son corrosivos, abrasivos o que contienen sólidos en suspensión.

Operación Segura: Dado que no tienen sellos dinámicos que entren en contacto con el fluido, las bombas de diafragma son menos propensas a fugas y ofrecen una operación segura en aplicaciones exigentes.

Las bombas de diafragmas son utilizadas en diversas industrias, incluyendo la química, farmacéutica, alimentaria y tratamiento de aguas, debido a su capacidad para manejar fluidos difíciles y su fiabilidad en entornos desafiantes.



Figura 1.1: Bombas reciprocantes; Fuente: (López, 2010)

1.1.1) Bombas de Diafragma: Principios y Funcionamiento

Una bomba de diafragma, también conocida como bomba de membrana, es un tipo de bomba reciprocante que se caracteriza por su capacidad para manejar fluidos corrosivos, viscosos o sensibles al cizallamiento. Sus principales características y funcionamiento se detallan a continuación:

- **Desplazamiento Positivo y Control de Volumen:**

Las bombas de diafragma son de desplazamiento positivo, lo que significa que desplazan un volumen fijo de líquido por cada ciclo de bombeo. Esto las hace ideales para aplicaciones donde se requiere una dosificación precisa de fluidos.

- **Diafragma Flexible:**

El corazón de la bomba es un diafragma flexible que separa la cámara de bombeo del fluido de proceso. Este diafragma se mueve hacia adelante y hacia atrás, impulsado por un mecanismo externo, ya sea eléctrico (electrobomba) o neumático (bomba neumática). (Pérez E. A., 2012)

- **Configuraciones y Operación:**

Las bombas de diafragma pueden tener configuraciones simples o múltiples:

- Simple Diafragma: Utiliza un solo diafragma para desplazar el líquido.
- Múltiples Diafragmas: Incorpora varios diafragmas en múltiples cámaras, operando bajo el mismo principio de desplazamiento positivo. Este diseño permite un funcionamiento continuo y uniforme.

- **Componentes Principales:**

Extremos de Líquido: Entradas y salidas que controlan el flujo del líquido bombeado.

Válvulas: Controlan el flujo dentro de la bomba, asegurando una operación sin fugas y precisión en el ajuste del flujo.

Mecanismos de Ajuste de Carrera: Permiten controlar la cantidad de líquido bombeado por ciclo, ofreciendo gran precisión en el ajuste del caudal.

1.1.2) Acción y Aplicaciones:

Las bombas de diafragma pueden ser:

- **Eléctricas:** Impulsadas por un motor eléctrico, proporcionando una acción constante y controlada.
- **Neumáticas:** Operadas por aire comprimido, lo que las hace adecuadas para entornos donde no se puede usar electricidad, o donde se requiere una operación segura en áreas peligrosas. (Vieira, 2019)

Estas características hacen que las bombas de diafragma sean adecuadas para una amplia gama de aplicaciones industriales y comerciales, donde la precisión en el manejo de fluidos y la seguridad operativa son críticas.

Para transportar ácidos corrosivos o contaminantes donde las fugas no son permitidas, una opción más costosa son las bombas dosificadoras de diafragma (Nelik, 2012) En estas bombas, el diafragma actúa como la conexión entre el émbolo y el líquido de proceso. El émbolo se desplaza dentro de un cilindro, pero en lugar de mover directamente el líquido, acciona un diafragma que transmite la energía. En el lado opuesto del diafragma, se succiona una cantidad proporcional del líquido del proceso hacia la cámara de bombeo y se descarga en cada ciclo del émbolo.

Los diafragmas pueden ser de accionamiento mecánico, con conexión directa al émbolo, o de accionamiento hidráulico. En este último caso, están equilibrados entre dos líquidos para reducir el esfuerzo en el diafragma y permitir mayores presiones de descarga. Para garantizar la precisión del bombeo con accionamiento hidráulico, es crucial mantener el volumen adecuado de líquido en la cámara hidráulica. Usualmente se instala un sistema de tres válvulas para evitar la entrada de aire o gases en el líquido hidráulico y proteger contra presiones excesivas tanto en los líquidos hidráulicos como en los de proceso (Nelik, 2012); (Merle, 2002).

1.1.3) Extremos de Líquido en Bombas de Diafragma:

Los extremos de líquido en las bombas de diafragma, también conocidos como cabezales o extremos mojados, son componentes críticos que están en contacto directo con el líquido bombeado. Su configuración varía según el tipo de accionamiento del diafragma:

- **Bomba con Diafragma de Accionamiento Mecánico**

En este tipo de bomba (Figura 1.2a), el extremo de líquido incluye:

- Diafragma: El componente flexible que separa la cámara de bombeo del fluido de proceso.
- Cámara de Desplazamiento del Diafragma: Donde se produce el movimiento del diafragma para desplazar el líquido.
- Válvulas de Retención: Situadas en las líneas de succión y descarga para controlar el flujo del líquido.

- **Bomba con Diafragma de Accionamiento Hidráulico**

En este tipo de bomba (Figuras 1.2b, c, d), el extremo de líquido incluye:

- Diafragmas: Pueden ser uno o más, dependiendo del diseño de la bomba.
- Cámara de Desplazamiento del Diafragma: Similar al caso de accionamiento mecánico, esta cámara es donde ocurre el movimiento del diafragma.
- Válvulas de Retención: Esenciales para el control del flujo durante la succión y descarga del líquido.
- Líquido Intermedio: En algunos casos, se utiliza un líquido intermedio para equilibrar las presiones y reducir el esfuerzo en el diafragma, especialmente en bombas de alta presión.

Estos componentes forman parte integral del sistema de bombeo de las bombas de diafragma, asegurando un funcionamiento eficiente y sin fugas, crucial para el manejo de líquidos corrosivos y sensibles. (Pérez D. L., 2020)

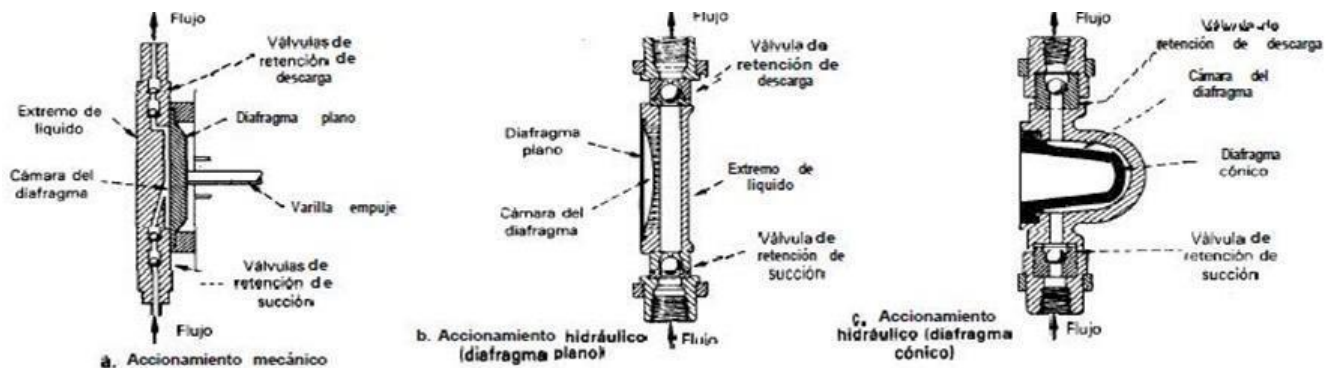


Figura 1.2: Bombas con accionamiento mecánico e hidráulico. Fuente (Borges, 2014)

1.1.4) Diafragmas en Bombas de Diafragma:

Los diafragmas en las bombas de diafragma desempeñan un papel fundamental al transmitir el movimiento hidráulico de manera eficiente y segura, según se detalla en la literatura especializada (Wilden, 2012). Estos componentes están diseñados para soportar flexiones máximas con esfuerzos por debajo de su límite de resistencia, independientemente de la longitud de la carrera, asegurando así la integridad estructural y evitando la penetración del líquido.

En las bombas con diafragma de accionamiento hidráulico, se observan esfuerzos más uniformes y reducidos en comparación con los diafragmas de accionamiento mecánico. Un diseño común es el diafragma doble, donde se crea una cámara intermedia llena de líquido que facilita la transmisión de movimiento entre los extremos de bombeo y potencia. Este enfoque no solo mejora la eficiencia del sistema, sino que también garantiza la compatibilidad del líquido intermedio con los fluidos del proceso y los líquidos hidráulicos utilizados (G. C. Mekalke, 2012)

En entornos críticos, como aquellos con temperaturas extremas o alta contaminación, se emplean diafragmas dobles montados de manera remota para mitigar riesgos adicionales y optimizar la seguridad operativa. Además, algunos diafragmas están equipados con placas cóncavas para prevenir flexiones excesivas durante la operación, lo cual es crucial para mantener la fiabilidad y durabilidad del sistema en aplicaciones industriales exigentes.

1.2) Bombas de Diafragma de Discos:

Las bombas de diafragma de discos utilizan diafragmas de tetrafluoretileno (TFE) que se flexionan entre dos placas de soporte cóncavas, conocidas como placas de contornos. Estas placas están diseñadas con agujeros para permitir la circulación y retener el diafragma, evitando su desgarramiento bajo altas presiones. La Figura 1.3 ilustra una bomba con diafragma de disco de accionamiento hidráulico.

Este diseño elimina los problemas asociados con las fugas de fluido a través de sellos de émbolo, haciéndolo especialmente eficaz para bombear líquidos altamente corrosivos, como ácidos, en aplicaciones donde cualquier fuga está estrictamente prohibida (Rayner, 1995)

Sin embargo, las bombas de diafragma de discos pueden enfrentar desafíos al manejar fluidos viscosos o pastas aguadas. La presencia de fluidos viscosos puede provocar una notable caída de presión en los agujeros de flujo de las placas cóncavas, lo que a menudo conduce a la cavitación en la succión. La cavitación genera burbujas de gas en el fluido, reduciendo la precisión de la bomba a niveles no aceptables para ciertas aplicaciones (G. C. Mekalke, 2012)

Las bombas de diafragma de discos son ideales para entornos donde se requiere un bombeo sin fugas de líquidos corrosivos, pero deben utilizarse con precaución en aplicaciones con fluidos viscosos debido a los posibles problemas de cavitación.

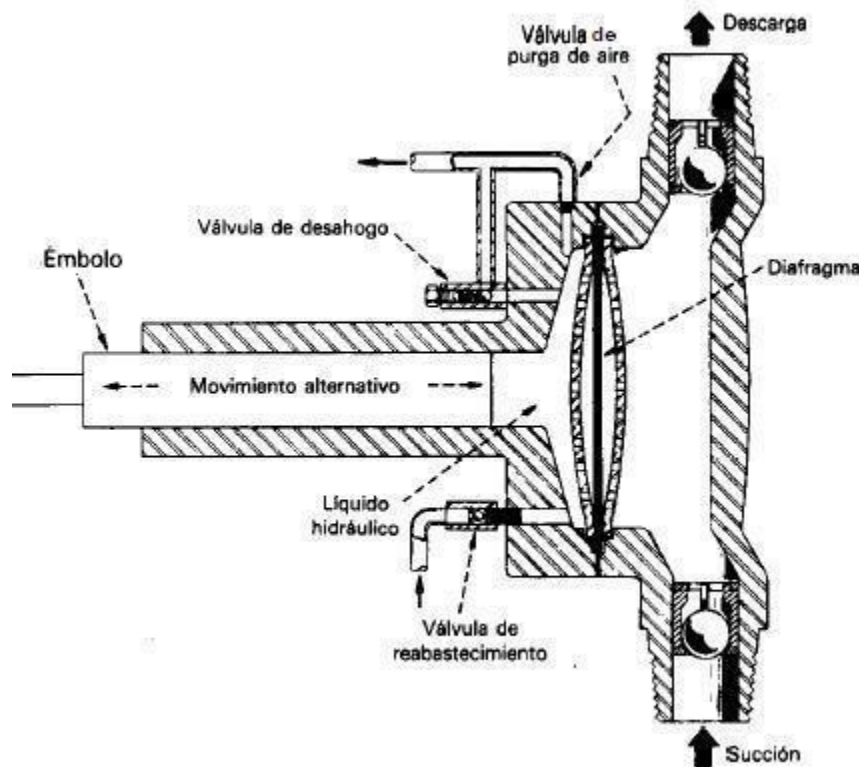


Figura 1.3: Bomba con diafragma de disco con accionamiento hidráulico. Fuente: (Vieira, 2019)

1.3) Bombas con Diafragma Tubular:

Las bombas con diafragma tubular utilizan un diafragma tubular de elastómero en lugar de los diafragmas planos típicos. Este diafragma tubular se dilata o contrae según la presión ejercida por el fluido hidráulico, en lugar de depender de un movimiento mecánico directo del émbolo. Esta característica proporciona varias ventajas significativas en comparación con otros tipos de bombas de diafragma.

1.3.1) Funcionamiento y Diseño:

El diafragma tubular de elastómero se adapta dinámicamente a la presión del fluido hidráulico. Cuando se ejerce presión, el diafragma se dilata, y cuando la presión disminuye, se contrae. Esta acción se combina con las válvulas de retención de succión y descarga para enviar impulsos dosificados de líquido a través de la bomba.

Al eliminar las placas cóncavas en el lado del proceso del diafragma, se reducen significativamente los problemas de cavitación. Esto mejora la eficiencia y la confiabilidad de la bomba, especialmente en aplicaciones donde la cavitación puede ser un problema serio (Sumbramaya, 2013)

1.3.2) Ventajas y Aplicaciones:

- **Reducción de Cavitación:** La ausencia de placas cóncavas minimiza la posibilidad de cavitación, lo cual es beneficioso para el bombeo de líquidos viscosos o con sólidos en suspensión.
- **Dosificación Precisa:** La capacidad de dosificación precisa del fluido es una ventaja clave de las bombas con diafragma tubular, adecuada para aplicaciones que requieren un control preciso del flujo.
- **Compatibilidad con Fluidos Sensibles:** El uso de elastómeros en el diafragma tubular permite la manipulación segura de líquidos corrosivos o químicamente sensibles, sin riesgo de contaminación cruzada o reacciones adversas.

1.3.3) Otras Configuraciones de Diafragmas:

Una alternativa es el diafragma doble de disco fabricado en TFE. Este diseño, que aprovecha la robustez inherente del diafragma doble, es especialmente adecuado

para manejar disolventes y productos químicos que pueden corroer materiales elastoméricos. Sin embargo, una desventaja significativa es el potencial costo elevado de las piezas metálicas utilizadas en su construcción.

Estos tipos de diafragmas encuentran aplicación en una variedad de servicios dentro de las industrias de procesos químicos. La elección del tipo adecuado para cualquier aplicación específica depende de las propiedades del fluido manejado, la tolerancia al mantenimiento requerido, consideraciones de seguridad y el presupuesto disponible para el sistema deseado. Además de los diversos tipos de mecanismos de bombeo, se desarrollan numerosos sistemas de accionamiento para transmitir la energía motriz de manera eficiente según las necesidades de cada aplicación (G. C. Mekalke, 2012)

1.4) Principales tipos de válvulas en las bombas de diafragmas:

1.4.1) Válvula de Desahogo de Presión:

Función y operación: Suele estar incluida en el sistema hidráulico. Protege la bomba y el motor contra una presión hidráulica excesiva que se podría producir si se cierra una válvula corriente abajo. Además, descarga el sobrante de aceite que podría entrar al sistema hidráulico, especialmente si hay agotamiento de aceite en el sistema de succión.

1.4.2) Válvula Compensadora de Vacío:

Función y operación: A veces se incluye en el sistema hidráulico para mantener el volumen correcto de aceite entre el émbolo o el pistón y el diafragma. Esta válvula reemplaza el aceite hidráulico que se pierde por el émbolo o pistón, debido a cambios de temperatura o por cualquier válvula de purga (sangría). Si es del tipo correcto y está bien ajustada, permite que la bomba logre la máxima altura de aspiración. Si está graduada para una presión de apertura muy baja, el aire disuelto en el aceite hidráulico puede desprenderse y producir una menor capacidad y un funcionamiento errático de la bomba.

1.4.3) Válvulas de Purga (Sangrado):

Función y operación: Suelen estar en el sistema hidráulico para eliminar el aire o vapores que se puedan acumular. Estas válvulas pueden ser de accionamiento manual o automático cuando funciona la bomba.

1.4.4) Válvulas de Retención:

Función y operación: Se necesitan en los tubos de succión y descarga de la bomba dosificadora. Una válvula deja entrar el líquido al extremo de líquido desde el recipiente, en la carrera de succión del pistón; la segunda válvula deja pasar el líquido del extremo de líquido al sistema de descarga durante la carrera de descarga del pistón. Las condiciones difíciles de operación pueden, a veces, requerir el empleo de dos o más válvulas en los lados de succión y descarga del extremo de líquido.

1.4.5) Válvula de Bola o de No Retorno:

Función y operación: Una bola de libre movimiento o baja carga de resorte descansa sobre un asiento anular de modo que la velocidad y la presión diferencial del líquido que pasa por el asiento levante la bola, permitiendo el paso en un solo sentido. La bola está guiada por las paredes del cuerpo de la válvula.

1.5) Selección de Bombas de Diafragma:

Las bombas de diafragma se seleccionan para aplicaciones específicas que requieren ciertas características críticas. Las consideraciones principales para su selección basada en las características mencionadas:

1.5.1) Evitar Fugas o Contaminación Cruzada:

Consideración: Estas bombas son ideales cuando es crucial evitar las fugas o la contaminación cruzada entre el líquido bombeado y otros fluidos.

Aplicación: Se usan comúnmente en industrias donde la pureza del líquido es esencial, como en la industria farmacéutica, alimentaria y química, ya que el diseño del diafragma actúa como una barrera efectiva, evitando el contacto entre el líquido bombeado y los componentes de la bomba.

1.5.2) Flujo Constante Independiente de la Presión de Descarga:

Consideración: La capacidad de mantener un flujo constante a pesar de las variaciones en la presión de descarga es crucial.

Aplicación: Estas bombas son adecuadas para procesos donde las condiciones de presión pueden variar, pero se necesita un flujo preciso y estable, como en la dosificación de reactivos químicos en procesos industriales.

1.5.3) Exactitud en el Control de la Capacidad de Salida:

Consideración: Se requiere una gran exactitud para controlar la capacidad de salida.

Aplicación: Las bombas dosificadoras de diafragma son utilizadas en aplicaciones que demandan alta precisión en la dosificación, como en el tratamiento de aguas, donde se necesita una dosificación exacta de productos químicos para asegurar la calidad del agua tratada.

1.5.4) Cámara de Bombeo Separada del Resto de la Bomba:

Consideración: La cámara de bombeo debe estar separada del resto de la bomba.

Aplicación: Esto es importante en aplicaciones donde es necesario aislar el líquido bombeado para evitar contaminación o reacciones no deseadas con otras partes de la bomba. Este diseño también facilita el mantenimiento y la limpieza de la cámara de bombeo sin afectar el resto del sistema.

Las bombas de diafragma se seleccionan principalmente por su capacidad de evitar fugas y contaminación cruzada, mantener un flujo constante independiente de la presión de descarga, proporcionar una dosificación precisa, y tener una cámara de bombeo separada del resto de la bomba. Estas características las hacen adecuadas para una amplia gama de aplicaciones industriales y científicas donde la precisión, la seguridad y la integridad del proceso son esenciales.

1.6) Materiales para la Fabricación de Bombas de Diafragma

Debido a su diseño a prueba de fugas, las bombas de diafragma son frecuentemente seleccionadas para manejar líquidos corrosivos o abrasivos. Los componentes de la bombas que no están en contacto directo con el líquido se fabrican comúnmente con hierro fundido, acero, aluminio, bronce o plástico. Estos materiales se selecciona para absorber las cargas y minimizar las tensiones y deformaciones, asegurando así la exactitud en la dosificación y la resistencia a condiciones de trabajo severas.

1.6.1) Consideraciones para el Extremo de Líquido

El extremo de líquido de la bomba presenta un desafío distinto. Los factores a considerar incluyen:

- **Experiencia en la Operación:** La durabilidad y rendimiento del material basado en experiencias previas.
- **Uso Temporal o Prolongado:** Dependiendo de la duración del uso, se eligen materiales que puedan soportar las condiciones por el tiempo requerido.
- **Costo:** Los materiales deben ser coste-efectivos.
- **Características del Líquido:** La temperatura, concentración de sólidos o gases arrastrados y el grado de protección necesario contra corrosión y abrasión.

1.6.2) Resistencia a la Corrosión:

Los fabricantes de bombas proporcionan datos sobre la resistencia a la corrosión de diversos materiales. Estos datos se basan en la experiencia del fabricante, así como en pruebas realizadas por usuarios y proveedores de materiales. Sin embargo, debido a la complejidad del mecanismo de la corrosión y las variables condiciones operativas, no se suelen hacer recomendaciones definitivas sobre la resistencia a la corrosión. La elección final de los materiales debería recaer en el usuario, quien tiene un conocimiento detallado de los productos químicos y las condiciones de operación específicas.

1.6.3) Componentes en Contacto con el Líquido:

Las partes de la bomba en contacto con el líquido bombeado, como el extremo de líquido, cubiertas y topes de válvulas, asientos y juntas, deben ser maquinadas con precisión para asegurar un sellado hermético. La corrosión o erosión de estas superficies puede comprometer el sellado y, por ende, el rendimiento de la bomba.

1.6.4) Diafragmas:

Los diafragmas son componentes críticos, ya que suelen ser delgados y no toleran la corrosión. Funcionan bajo altos esfuerzos, por lo que es esencial seleccionar

materiales de la más alta calidad. La selección de materiales para otras piezas, como el extremo de líquido, cubiertas y topes de válvulas, puede ser menos crítica y permitir el uso de materiales menos resistentes (Wilden, 2012)

Es importante considerar que la elección de los materiales no solo influye en la durabilidad y eficiencia de la bomba, sino también en la seguridad y el mantenimiento. Materiales inadecuados pueden provocar fallos prematuros, contaminaciones no deseadas y costos elevados de mantenimiento. Por ello, en aplicaciones críticas, se recomienda realizar pruebas piloto y consultar con expertos en materiales para asegurar la selección más adecuada según las condiciones operativas específicas. Además, mantener un programa de mantenimiento regular puede extender la vida útil de la bomba y asegurar un rendimiento óptimo.

1.7) Bombas de diafragmas usadas mundialmente:

1.7.1) Bombas de Diafragmas Wilden:

Wilden es reconocida como una de los principales fabricantes de bombas, destacándose por la calidad y eficiencia de sus productos en comparación con otros competidores. La fabricación de bombas de diafragma es una de sus áreas prioritarias, respondiendo al creciente uso y demanda en numerosos procesos industriales. (Wilden, 2012)

Principio de Operación:

El funcionamiento de las bombas de diafragma se fundamenta en la interacción de cuatro elementos esenciales (ver Figura 1.4):

- Diafragmas Gemelos: Dos diafragmas que operan en sincronización.
- Eje de Conexión: Une los diafragmas para coordinar su movimiento.
- Válvula de Control de Aire: Regula el suministro de aire comprimido a los diafragmas.
- Cuatro Válvulas de Esfera: Controlan el flujo de líquido a través de la bomba.

El movimiento alternativo de los diafragmas genera tanto la succión como la impulsión del producto a través de las válvulas. Este movimiento es activado por aire comprimido, el cual es distribuido a los diafragmas mediante la válvula de control de aire.



Figura 1.4: Bomba de diafragma. Fuente: (Wilden, 2012)

Clasificación de las Bombas de Diafragma Wilden:

Las bombas de diafragma Wilden se destacan por su versatilidad y eficacia en una amplia gama de procesos industriales, y son frecuentemente elegidas tanto como sustitutas de otras bombas como por las características únicas de los fluidos que manejan. Entre las particularidades clave se encuentran:

- **Tipos de Bombas:**
 - **Bombas de Doble Membrana:** Garantizan seguridad máxima en aplicaciones industriales, funcionando con aire comprimido o líquido hidráulico.
 - **Bombas con Dispositivo Electromecánico:** Utilizan un mecanismo para doblar la membrana, con un lado expuesto al aire.
 - **Bombas con Membranas Sin Sellar:** Emplean una o más membranas sin sellado, permitiendo el bombeo de líquidos en ambos lados.

- **Capacidad de Manejo:**
 - **Materiales Críticos:** Capacidad para manejar materiales como lodos, melazas y otros de alta viscosidad de manera confiable y segura.
 - **Funcionamiento en Seco:** Trabajan sin necesidad de lubricación adicional.
 - **Regulación de Caudal y Presión:** Flexibilidad para ajustar el caudal, la altura de elevación, la velocidad y la presión según las necesidades del proceso.
- **Ventajas Operativas:**
 - **Mantenimiento Simplificado:** Característica crucial que reduce los costos de reparación y optimiza el tiempo de operación efectiva.
 - **Fiabilidad:** Ofrecen un rendimiento consistente y seguro, cumpliendo con los estándares exigentes de diversas aplicaciones industriales.

Las bombas de diafragma Wilden son una elección preferida en numerosos sectores industriales debido a su capacidad para manejar una amplia variedad de fluidos de manera segura y eficiente, combinada con su facilidad de mantenimiento y regulación flexible. Esto las convierte en una solución integral para aplicaciones donde la fiabilidad y el control preciso del bombeo son fundamentales.

Partes de una bomba de diafragma

1. Cambiador automático coaxial
2. Cuerpo bomba
3. Diafragma
4. Colector
5. Esfera
6. Diafragma

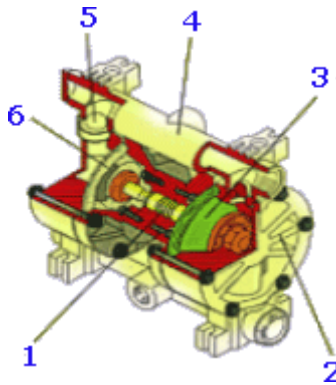


Figura 1.5: Partes de una bomba de diafragma. Fuente: **(Wilden, 2012)**

Principales Ventajas de las Bombas de Diafragma Wilden:

Las bombas de diafragma Wilden presentan una serie de ventajas que las hacen altamente eficaces y versátiles en diversas aplicaciones industriales:

- **Operación sin Motor Eléctrico:** Funcionan exclusivamente con aire comprimido, eliminando la necesidad de motores eléctricos.
- **Ausencia de Sellos Mecánicos y Partes Rotatorias:** Esto reduce significativamente el desgaste y el mantenimiento requerido.
- **Diseño Sencillo y Robusto:** Su construcción simple y duradera asegura una larga vida útil y fiabilidad.
- **Fácil Operación:** No necesitan controles complejos, facilitando su uso y mantenimiento.
- **Compatibilidad de Materiales:** Pueden ser fabricadas en una variedad de materiales para garantizar la compatibilidad química y térmica con los productos a bombear.
- **Transporte Cuidadoso de Líquidos:** Son ideales para manejar líquidos y productos viscosos con delicadeza.
- **Funcionamiento en Presencia de Válvulas Cerradas:** Si se cierran las válvulas en la impulsión, la bomba simplemente se detiene, lo cual es beneficioso en aplicaciones como máquinas llenadoras.
- **Auto - aspirante:** Pueden iniciar el bombeo sin necesidad de cebado previo, simplificando su uso en diversas condiciones operativas.

1.8) Bombas de Diafragma ABEL: Gama HM y HMT:

Las bombas de diafragma de ABEL son reconocidas por su gran prestigio en el mercado, gracias a las destacadas características de sus diseños. En particular, existen dos principales gamas de estas bombas: la Gama HM y la Gama HMT (Abel, 2012)

1.8.1) Gama HM:

La gama HM de bombas de pistón-membrana de ABEL ha sido desarrollada específicamente para operaciones que requieren altos caudales y presiones de trabajo elevadas (Pérez E. A., 2012)(Figura 1.6).

- **Modelos Disponibles:** Efecto simple y doble.
- **Prestaciones:** Garantizan un funcionamiento fiable y costes de explotación y mantenimiento reducidos.
- **Capacidad:** Pueden manejar caudales de hasta 100 m³/h y presiones de trabajo de hasta 10,0 MPa.
- **Diseño:** Equipadas con membranas preformadas que aseguran estabilidad durante toda la operación de bombeo.
- **Materiales:** Partes en contacto con el medio bombeado hechas de fundición nodular, polipropileno, fundición de acero o acero inoxidable.
- **Aplicaciones:** Ideales para procesos críticos como la alimentación a secadores por atomización y el transporte de lodos muy abrasivos. También se utilizan como bombas de alimentación de filtros prensa con control mediante sensor de presión, destacándose por su eficiencia energética, durabilidad y alta disponibilidad.



Figura 1.6: Bomba de Diafragma ABEL Gama HM. Fuente: (Wilden, 2012)

1.8.2) Gama HMT:

La gama HMT de bombas de pistón-membrana de ABEL se caracteriza por su principio de funcionamiento sencillo y operación a baja velocidad, lo que las hace muy seguras, incluso cuando operan en seco, y pueden manejar caudales de hasta 500 m³/h (Figura 1.7). Estas bombas están diseñadas para minimizar las irregularidades en el caudal, especialmente en aplicaciones con altas presiones de trabajo, donde las pulsaciones pueden transferirse a la base de la bomba y a las tuberías de conexión.

Ventajas Operativas:

- **Reducción de Pulsaciones:** Las bombas HMT de ABEL utilizan un reductor tríplex con un cigüeñal conectado a tres pistones con un desfase de 120°, lo que produce un flujo optimizado y más uniforme comparado con las unidades de construcción simple. Esto reduce significativamente las pulsaciones, evitando daños en la cimentación de la bomba y en el sistema de tuberías, incrementando así la seguridad operativa de la planta.
- **Altas Prestaciones y Presiones:** Estas bombas pueden trabajar a presiones de hasta 25,0 MPa, garantizando un rendimiento fiable y eficiente incluso en condiciones extremas.
- **Membranas Preformadas:** Equipadas con membranas preformadas que mantienen su estabilidad a lo largo de toda la operación de bombeo, estas

bombas aseguran una larga vida útil sin problemas de tensión excesiva o contracción.

Construcción y Materiales:

- **Válvulas Cónicas API:** Disponibles en versiones de flujo invertido, ideales para el transporte de lodos no estables con tendencia a la sedimentación.
- **Materiales de Construcción:** Las partes en contacto con el medio bombeado están construidas en fundición nodular, fundición de acero o acero inoxidable, garantizando durabilidad y resistencia en condiciones exigentes.

Aplicaciones Típicas:

Las bombas HMT de ABEL son típicamente empleadas en aplicaciones con altas presiones y requisitos de transporte exigentes, tales como:

- **Transporte por Tubería:** Excelente para mover fluidos a largas distancias.
- **Alimentación de Autoclaves y Reactores:** Perfectas para suministrar materiales a sistemas de alta presión.
- **Alimentación de Secadores por Atomización:** Utilizadas en procesos que requieren un control preciso del flujo y la presión.

La gama HMT de bombas de diafragma ABEL establece nuevos estándares en tecnología de bombeo, siendo consideradas líderes del mercado por muchas industrias a nivel mundial. Su diseño robusto, eficiencia energética, y la capacidad de manejar aplicaciones exigentes las hacen una opción ideal para procesos industriales críticos.



Figura 1.7: Bomba de Diafragma ABEL Gama HMT. Fuente: (Abel, 2012)

1.8.3) Áreas de Aplicación de las Bombas de Diafragma ABEL:

Las bombas de diafragma ABEL, incluyendo las gamas HM y HMT, se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones industriales debido a su alta eficiencia, durabilidad y capacidad para manejar condiciones exigentes. A continuación, se detallan algunas de las principales áreas de aplicación:

- **Transporte de Lodos:** Ideales para el manejo de lodos abrasivos con granulometrías heterogéneas, asegurando un flujo constante y fiable.
- **Alimentación de Reactores:** Utilizadas para suministrar reactivos y otros materiales a los reactores, garantizando un control preciso y seguro del proceso.
- **Industria Minera:** Empleadas en operaciones mineras para el transporte de materiales y residuos, soportando ambientes duros y materiales abrasivos.
- **Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales:** Cruciales para el bombeo de lodos y otros materiales en plantas de tratamiento, ayudando a mantener la eficiencia y la fiabilidad del proceso de tratamiento.
- **Industria Química y Cerámica:** Utilizadas para el manejo de productos químicos y materiales cerámicos, donde se requiere una alta resistencia a la corrosión y una operación sin fugas.

Las bombas de diafragma ABEL son una opción preferida en múltiples sectores industriales debido a su capacidad para manejar materiales difíciles y sus características de alta eficiencia y bajo mantenimiento. Esto las convierte en una herramienta esencial para mejorar la productividad y la seguridad en diversos procesos industriales.

1.9) Bomba Maestra KARL KROYER MP 2C120:

La bomba maestra KARL KROYER MP 2C120, de la empresa Glucosa Cienfuegos, se utiliza para bombear leche de almidón acidificada y luego precalentada, a través del convertidor, manteniendo un flujo constante a chorro pulsante de 7,2 m³/h con una presión de 30 kgf/cm² (430 psi).

1.9.1) Descripción y Modo de Operación:

Esta bomba emplea dos bombas de diafragma accionadas hidráulicamente con válvulas que avanzan la leche de almidón cuando el diafragma de goma se mueve hacia adelante y hacia atrás dentro de las dos cámaras del diafragma (Figura 1.8). Este diseño evita que la leche de almidón, corrosiva y deteriorante, entre en contacto con las partes móviles de la bomba, como superficies deslizantes y prensaestopas. Todas las partes que tocan la leche de almidón están fabricadas con materiales resistentes a la corrosión.

Movimiento del Diafragma:

El movimiento del diafragma se produce hidráulicamente mediante aceite, transmitiendo las carreras del émbolo al diafragma. El émbolo está accionado por un cigüeñal, que a su vez es impulsado por una bomba de motor a través de una transmisión de rueda dentada y una correa en V.

Control de Aire en Cámaras

Es crucial que no haya acumulaciones de aire en las cámaras de aceite y de leche de almidón, ya que esto reduciría la capacidad de la bomba. La bomba está

diseñada para liberar automáticamente las acumulaciones de aire bajo condiciones normales. Si es necesario, se puede ventilar manualmente mediante grifos debajo de los manómetros, que están equipados con un barreno en forma de T para esta operación.

Cambio de Capacidad:

La capacidad de la bomba maestra y, por ende, la de la instalación de conversión puede ajustarse. Las variaciones de velocidad dependen principalmente del convertidor y del producto que se desea fabricar. El cambio de capacidad generalmente se realiza reemplazando la polea del motor por una más grande o más pequeña, cambiando así el número de revoluciones. Para cambios frecuentes en la capacidad, se recomienda insertar un cambio por engranes entre el motor y la transmisión de polea.

Mantenimiento:

Además de la lubricación, el cambio de aceite y la limpieza, el mantenimiento de la bomba se centra en la inspección regular de las válvulas de almidón, incluyendo los discos, asientos, conos y guías de las válvulas. Si estas piezas muestran desgaste o corrosión, deben ser reemplazadas. El diafragma debe cambiarse cada seis meses.

Puntos de Lubricación:

1. Cojinete de la Biela.
2. Caja de velocidades y cojinetes para el cigüeñal.
3. Sistema de bombeo hidráulico a base de aceite.

La bomba maestra KARL KROYER MP 2C120 es una solución robusta y eficiente para el bombeo de leche de almidón en condiciones exigentes, ofreciendo un diseño que minimiza el contacto con componentes corrosivos y garantiza un flujo constante y fiable.

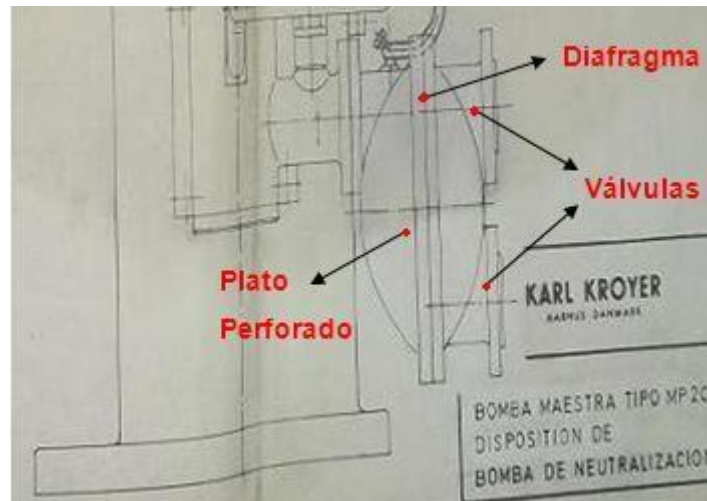


Figura 1.8: Bomba Maestra KARL KROYER MP 2C120. (Noa, Quiza, & Montelier, 2023)

1.9.2) Parámetros fundamentales:

Como ya se mencionó anteriormente la Bomba Maestra tiene una capacidad de 7,2 m³/h y una presión de 30 Kg/cm². La tabla 1.1 recoge los principales parámetros de trabajo del motor:

Tabla 1.1: Principales parámetros del motor M 160 L-6.

Motor:	Tipo: M 160 L-6 (MK 213 020-BB)
Fabricante	ASEA
Voltaje	Trifásico 440 V
Amperaje	24 A
Potencia	12,5 kW
Revoluciones de trabajo	1150 rpm
Factor de Potencia	0.75
Protecciones en el arranque	IP 54 IM 3001

Fuente: (Noa, Quiza, & Montelier, 2023)

El cigüeñal de la bomba maestra está accionado por la bomba del motor sobre una transmisión a rueda de engranes y una transmisión por correa en "V". Se emplean 6 correas de tipos trapezoidales ZPZ cuyos diámetros son: (Figura 1.9)

d1: 170 mm

d2: 450 mm

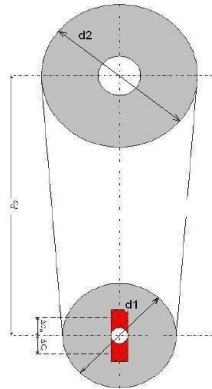


Figura 1.9: Correas trapezoidales de la transmisión. Fuente: (Vieira, 2019)

1.9.3) Placa Perforado de Respaldo al Diafragma

Situado adyacente al diafragma se encuentra la placa perforada, que sirve de apoyo crucial para el diafragma. A través de los orificios de la placa perforada circula la materia prima utilizada en la producción. Toda la presión ejercida sobre el diafragma se transfiere a la placa perforada, lo que provoca roturas frecuentes de este componente vital dentro del conjunto completo de la bomba.

Las placas originales están fabricadas con Bronce AMPCO, un material reconocido por su resistencia y durabilidad en condiciones de alta presión y contacto con materiales corrosivos o abrasivos. Cuya composición nominal es la que se muestra a continuación:

Tabla 1.2: Composición nominal del Bronce AMPCO.	
Aluminio (Al)	10.5 %

Hierro (Fe)	3.5 %
Otros	Max 0.5 %
Cobre (Cu)	resto

Fuente: Catálogo Bronce AMPCO.

Algunas de sus propiedades mecánicas se recogen en la Tabla 1.3

Tabla 1.3: Propiedades del Bronce AMPCO.

Propiedades mecánicas	Unidades	Valor nominal
Resistencia a la Tracción	MPa	758
Límite elástico	MPa	386
Elongación	%	16
Resistencia a la compresión.	MPa	1034
Módulo de Elasticidad E	GPa	110

Fuente: (Alloys, 2013)

Este tipo de bronce es de gran resistencia con buenas propiedades de deslizamiento y excepcional resistencia al desgaste. Su particular límite elástico le da una gran resistencia a la distorsión. (Alloys, 2013). En estos momentos se encuentran situadas en la bomba placas de acero comercial. La Figura 1.11 refleja los cordones de soldadura aplicados cuando fallan durante su funcionamiento y al mismo tiempo en esta Figura se aprecian los lugares donde ocurren las grietas, precisamente donde están depositados los cordones.



Figura 1.11 Placa perforado Bomba Master MP 2C120 y posición de las grietas y los cordones de soldadura durante su reparación. Fuente: (Noa, Quiza, & Montelie, 2023)

1.10) Principales Modelaciones por el Método de Elementos Finitos en Placas Perforadas

Numerosos estudios han examinado la distribución de tensiones en secciones con discontinuidades geométricas, utilizando el método de elementos finitos para analizar la relación con el factor teórico de concentración de estrés. Estas investigaciones han abordado temas como la influencia de la longitud de las piezas en el factor de concentración en placas ortotrópicas rectangulares, el comportamiento del factor de concentración de tensión en ejes cortos con cambios de sección bajo cargas de flexión, y la estimación del factor de concentración de tensión en placas planas sometidas a tensión con ranuras en "U". También se ha explorado la distribución de estrés en placas con dos orificios sometidos a cargas de tensión, comparando los resultados de la teoría de la elasticidad, análisis de elementos finitos y técnicas experimentales.

El tamaño de las muestras circulares afecta la resistencia de la estructura, disminuyendo a medida que aumenta el radio del agujero. Pruebas con discos

brasileños en materiales frágiles como Polimetilmetacrilato (PMMA) y Poliestireno de uso general (GPPS) han demostrado cómo distintos radios de muesca influyen en la tensión y el factor de intensidad de tensión. El método de mecánica de fractura finita acoplada (FFM) se ha utilizado para capturar tensiones de falla, ofreciendo una descripción completa de los efectos de tamaño experimentales. En situaciones donde el radio más pequeño crea geometrías locales negativas, se discute la estabilidad de la propagación de grietas en placas con muescas circulares bajo cargas biaxiales genéricas (Abdulrazaq, 2016)

El método de elementos finitos (FEM) es crucial para analizar tensiones en elementos con irregularidades geométricas, ya que permite resolver problemas complejos de ingeniería, principalmente en los campos mecánico, civil y aeronáutico. Se utiliza también en análisis térmicos, eléctricos y de dinámica de fluidos. Aleaciones de magnesio y polímeros de etileno, debido a sus propiedades ligeras y resistentes, tienen aplicaciones variadas, desde la industria automotriz y aeronáutica hasta empaques y aislamientos (Arora., 2015); (Brahmbhatt, 2015).

Investigaciones han abordado cómo la concentración de tensiones alrededor de orificios en placas rectangulares puede llevar a fallas. Soluciones para reducir esta concentración incluyen muescas de alivio y orificios auxiliares. Diferentes estudios han analizado el comportamiento de las tensiones y deflexiones en placas con orificios circulares y elípticos, observando que el SCF (Stress Concentration Factor) aumenta con ciertas proporciones geométricas, mientras que la tensión de von Mises puede disminuir (Shivlingesh, 2016)

La concentración de tensiones es un factor crítico en el diseño de componentes estructurales. La mayoría de las grietas de servicio ocurren en áreas de alta concentración de tensión, especialmente en los bordes de agujeros, subrayando la necesidad de una cuidadosa evaluación y diseño de estos elementos

Conclusiones del Capítulo I

1. Se ha detallado exhaustivamente la Bomba Máster MP 2C120, destacando sus características constructivas, principio de funcionamiento, partes constitutivas y materiales utilizados.
2. El estudio se centró en la placa de apoyo adyacente al diafragma, esencial dentro del conjunto de la bomba. Se discutieron los materiales empleados, las averías frecuentes que afectan este componente crítico.
3. Se ha revisado en profundidad los principales métodos utilizados para modelar placas perforadas utilizando el método de elementos finitos. Este análisis abarca desde la distribución de tensiones hasta la estimación del factor de concentración de tensión en diferentes configuraciones de placas.

CAPÍTULO II: Simulación del diafragma y placa de respaldo por el método de los elementos finitos.

La bomba utiliza dos bombas de diafragma accionadas hidráulicamente, que funcionan con válvulas diseñadas para avanzar la leche de almidón. El mecanismo se basa en el movimiento hacia adelante y hacia atrás de un diafragma de goma dentro de dos cámaras de diafragma (Figura 1.8). Este diseño es especialmente efectivo porque evita que la leche de almidón, que es corrosiva y deteriorante, entre en contacto con las partes móviles de la bomba, como las superficies deslizantes y los prensaestopas.

Para garantizar una operación duradera y fiable, todas las partes que entran en contacto con la leche de almidón están fabricadas con materiales resistentes a la corrosión. Esto no solo prolonga la vida útil de la bomba, sino que también reduce el mantenimiento necesario y el riesgo de fallos prematuros debido a la corrosión.

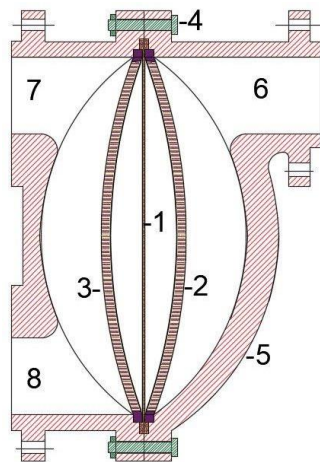


Figura 2.1: Diagrama del cuerpo de la bomba y sus componentes principales. 1- Diafragma, 2-Placa respaldo zona aceite, 3- Placa respaldo zona almidón, 4- Pernos del soporte, 5- Cuerpo de la

2.1) Características del diafragma.

El diafragma construido de POLITETRAFLUOROETILENO (PTFE) (Figura 2.2), debido a que es uno de los compuestos más químicamente inertes disponibles, PTFE se puede utilizar con una gama muy amplia de líquidos. También conocido

como Teflón ®, PTFE es excelente para fluidos altamente agresivos, tales como hidrocarburos aromáticos o clorados, ácidos, cáusticos, cetonas y acetatos.

Sus propiedades ofrecen una excelente resistencia a la flexión y a la abrasión moderada. Adicionalmente, PTFE cumple con la FDA 21 CFR 177 y normas USP Clase VI para la alimentación, aplicaciones de bebidas y farmacéuticas.



Figura 2.2: Diafragma de PTEF empleado en la bomba máster. Fuente: Elaboración propia.

2.2) Determinación experimental de la composición química del material de la placa.

Para la determinación de la composición química del material de la placa se empleó un Espectrómetro de emisión óptica portátil PMI Máster PRO perteneciente a la Central Termoeléctrica de Cienfuegos, “Carlos Manuel de Céspedes”.

El PMI Máster PRO es un espectrómetro de emisión óptica portátil robusto diseñado para establecer rápidamente la composición de los metales. La medición es iniciada presionando el gatillo de la pistola y no requiere una amplia capacitación para su uso. El grado de material o la composición química aparece en segundos en la pantalla plana integrada y se puede imprimir con una impresora externa.

Se realizaron cinco mediciones por dos métodos diferentes, con argón (gas inerte) y sin argón, empleando en cada caso una pistola de medición diferente

De las 5 mediciones realizadas una de ella se desecha al ser de calibración según plantea manual del equipo. En la tabla 2.1 se muestran los resultados obtenidos para las mediciones sin argón.

Tabla 2.1: Propiedades químicas del metal de la placa perforado, experimento sin argón.

PMI MasterPro13P0189Optiknr. 13P0189							
Sample: PlacaRespaldo.AcInox.							
Alloy: FE_930Mode:PA1/20/202010:43:47AM							
	Fe	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al
1	69.7	0.369	1.88	19	0.296	7.88	< 0.01
2	68.8	0.343	1.83	19.3	0.233	8.63	0.0247
3	69.1	0.402	1.93	19.5	0.305	7.93	0.0113
4	68.1	0.401	1.95	19.3	0.264	9.09	< 0.01
Average	68.9	0.379	1.9	19.3	0.274	8.38	0.0136
	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	
1	0.0898	0.332	0.0216	< 0.1	0.202	0.0858	
2	0.0857	0.289	0.0208	< 0.1	0.23	0.0884	
3	0.0818	0.306	0.0262	< 0.1	0.217	0.0917	
4	0.0988	0.341	0.0238	0.1	0.209	0.104	
Average	0.089	0.317	0.0231	< 0.1	0.215	0.0925	

Para este caso el software da coincidencia con acero inoxidable austenítico del tipo 1.4301 x5CrNi18-10 como se muestra en la figura 2.3:

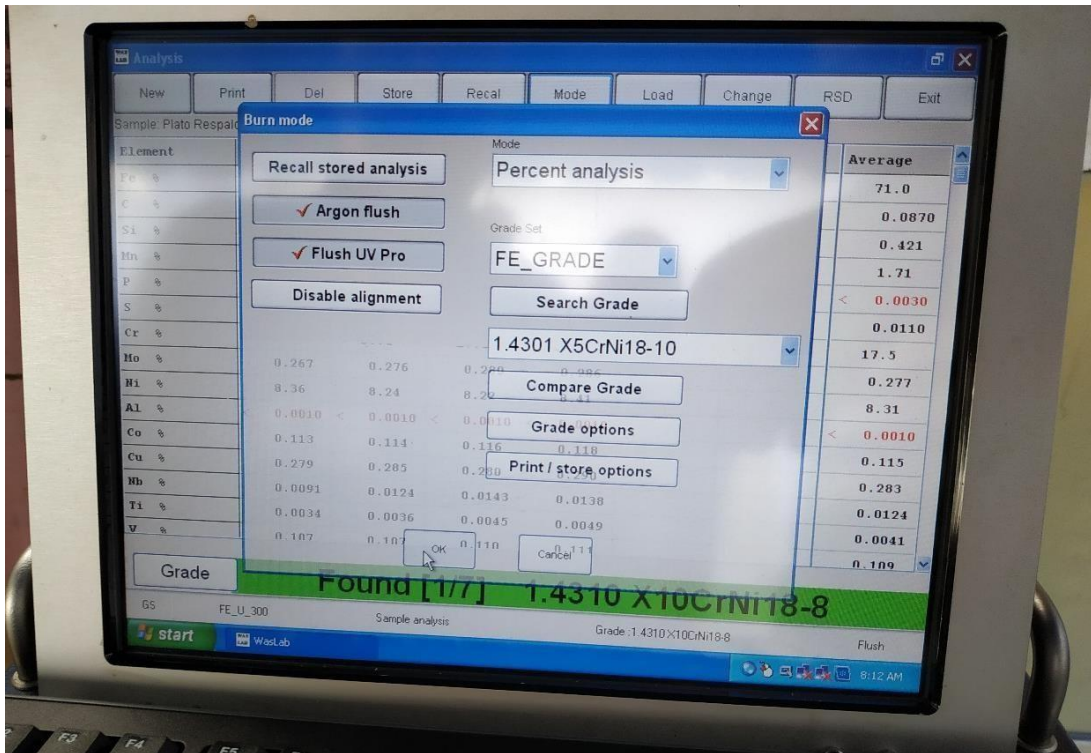


Figura 2.3: Valores obtenidos en el display del equipo para medición sin argón.

Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera se realizan 5 mediciones con argón, desechando la de calibración. En la tabla 2.2 se muestran los resultados obtenidos para las mediciones con argón.

Tabla 2.2: Propiedades químicas del metal de la placa perforado, experimento con argón. Fuente: Elaboración propia.

PMIMasterPro 13P0189Optiknr.							
13P0189							
Sample: Placa Respaldo AcInox.Argón							
Alloy: FE_U_300Grade:1.4310X10CrNi18-8							
Mode:GS1/20/20209:10:26AM							
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
1	70.9	0.0926	0.417	1.71	<0.003	0.0049	17.6
2	71.2	0.0853	0.405	1.71	<0.003	0.0123	17.4

3	71.2	0.0831	0.457	1.68	<0.003	0.0149	17.4
4	70.8	0.0869	0.405	1.72	<0.003	0.0117	17.6
Average	71	0.087	0.421	1.71	<0.003	0.011	17.5
	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti
1	0.267	8.36	<0.001	0.113	0.279	0.0091	0.0034
2	0.276	8.24	<0.001	0.114	0.285	0.0124	0.0036
3	0.28	8.22	<0.001	0.116	0.28	0.0143	0.0045
4	0.286	8.41	<0.001	0.118	0.29	0.0138	0.0049
Average	0.277	8.31	<0.001	0.115	0.283	0.0124	0.0041
	V	W	Pb				
1	0.107	0.045	<0.01				
2	0.107	0.0567	<0.01				
3	0.11	0.0646	<0.01				
4	0.111	0.067	<0.01				
Average	0.109	0.0583	<0.01				

Para este caso el software da coincidencia con acero inoxidable austenítico del tipo 1.4301 x5CrNi18-10 con un mayor nivel de precisión que el experimento anterior como se muestra en la figura 2.4:

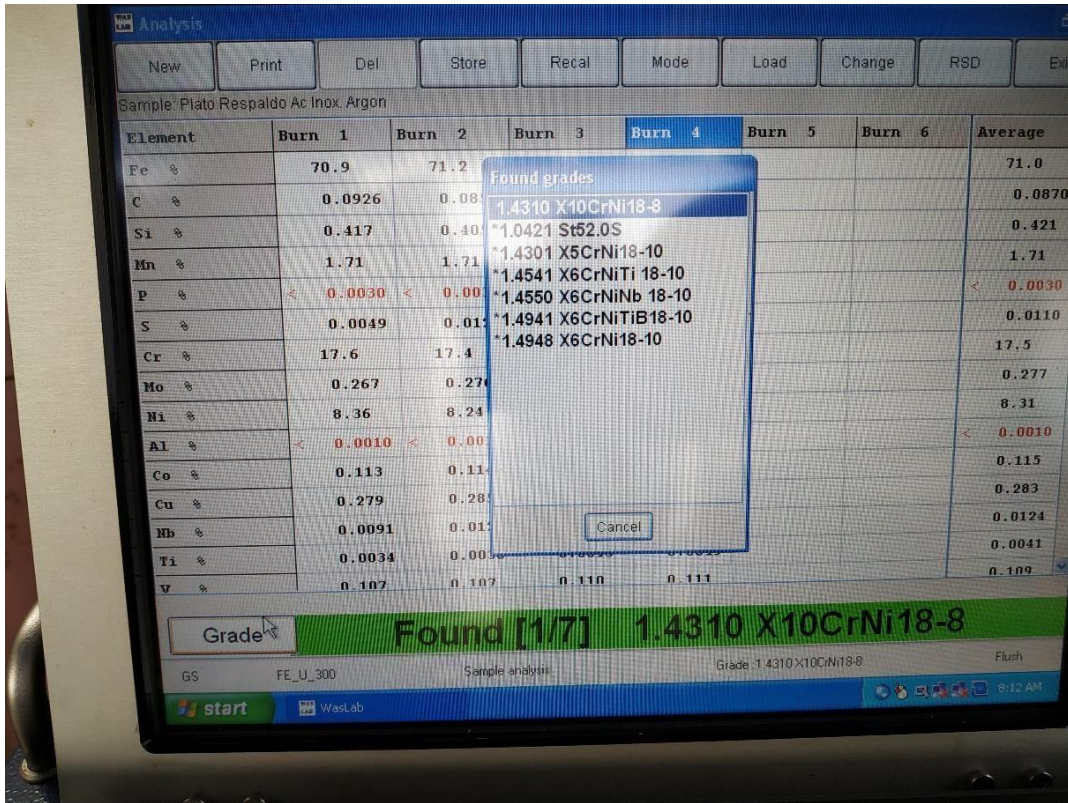


Figura 2.4: Valores obtenidos en el display del equipo para medición con argón.

Fuente: Elaboración propia.

Este acero se empleará en las simulaciones posteriores.

2.3) Modelación de la placa perforada con diferentes configuraciones de agujeros empleando el método de elementos finitos en el software ANSYS

18.1

Este caso se llevará a cabo utilizando como Métodos de Análisis: Numérico: Empleando software de elementos finitos (ANSYS 18.0) para simular, con diferentes configuraciones de agujeros bajo una carga uniforme de 30 atm. Se tomarán valores de tensiones desde el borde hasta el centro de la placa, tanto en el exterior (convexidad) como en el interior de la misma (concavidad). En la figura 2.5 se muestra un corte por el plano medio de la placa donde se representan la zona cóncava y la convexa de la placa, así como la distribución de agujeros de forma perpendicular en ese plano.

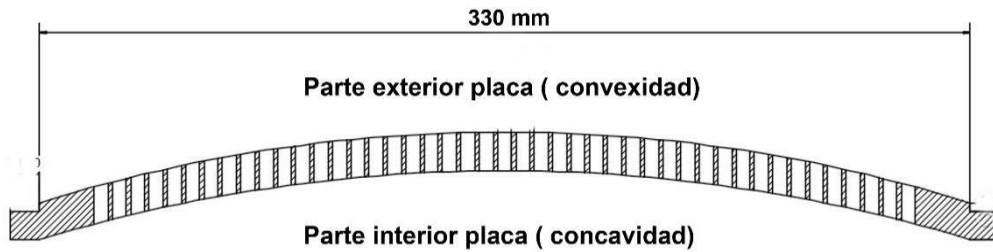


Figura 2.5: Vista encorte de la placa, Parte interior (cóncava) parte exterior (convexa). Fuente: Elaboración propia

Para la posterior simulación de la placa en el software ANSYS, se dibuja la placa con las características de diseño reales, características que permiten la realización de la simulación, este se dibuja en el software SOLIDWORKS 2016, tal como se puede ver en la figura 2.6



Figura 2.6: Diseño de la placa. Fuente: Elaboración Propia

Luego de haber concluido con esta primera etapa se pasa a exportarlo al software ANSYS 18.1, donde se realizará el siguiente análisis: Estatic estructural. Para la simulación del análisis se necesita realizar un grupo de pasos los cuales son inviolables una vez que se tenga bien definida la problemática a resolver. Después de finalizar esta primera fase, se procede a exportar el modelo al software ANSYS 18.1, donde se llevará a cabo el análisis estructural estático.

Para la simulación, es necesario seguir una serie de pasos imprescindibles una vez que se haya definido claramente el problema a resolver.

2.3.1) Asignación de Material

Es crucial asignar las propiedades reales del material utilizado en la pieza. Esto incluye características como la densidad, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y resistencia a la tracción.

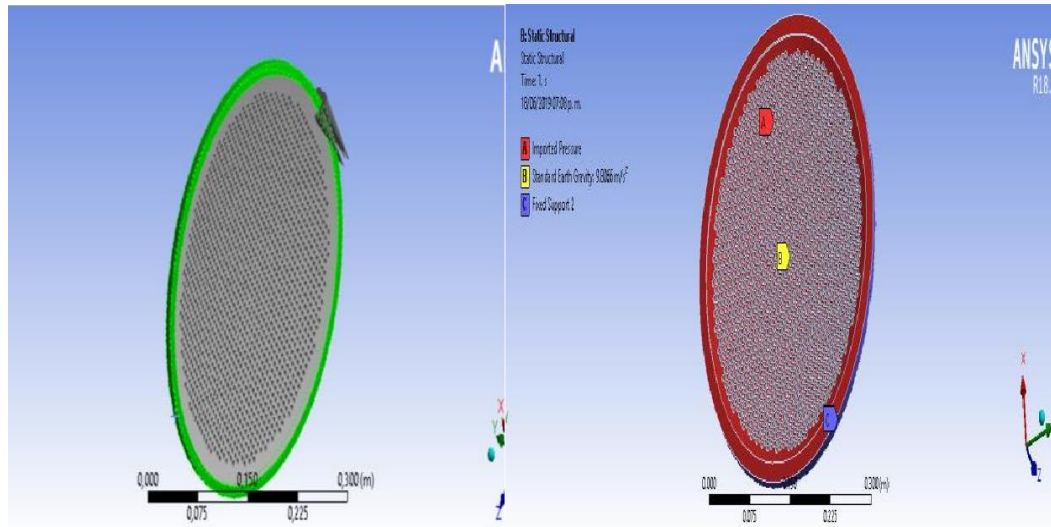
Para la designación del material de la placa, es aplicado el acero ASIS 301, el cual es material de estudio como se muestra en la figura 2.7.

Property	Value	Unit
Density	7850	kg ...
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Alternating Stress Mean Stress	T...	
Strain-Life Parameters		
Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa
Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa
Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa

Figura 2.7 Tabla del material exportado desde el ANSYS. Fuente: elaboración propia.

2.3.2) Condiciones de Trabajo

Para establecer las condiciones de carga y restricciones que afectarán la pieza. Esto puede incluir cargas aplicadas, temperaturas, presiones y fuerzas externas. Para el caso de la placa, se aplica una restricción de empotramiento en todo el escalón superior donde todo los grados de libertad son eliminados tanto para los giros como para los desplazamientos lineales, como se puede apreciar en la Figura 2.8 a) este tipo de apoyo fijo es señalado de color azul y designado con la letra A, por otra parte la aplicación de la presión correspondiente a la fuerza se designa con la letra B de color rojo, la misma es aplicada siguiendo un componente normal en toda la superficie interior de la placa respondiendo a las condiciones reales de trabajo.



a)

b)

Figura 2.8: a) Presión exportada; b) Restricciones y esfuerzos. Fuente: Elaboración propia.

2.3.3) Generación de Malla

La malla (o discretización) es la representación numérica de la geometría de la pieza. Creamos una malla de elementos finitos para dividir la pieza en pequeños elementos para el análisis.

Para el mallado de la placa de respaldo de la bomba, se opta por utilizar un elemento tetraédrico con ajuste curvo (Figura 2.8). Esta elección se debe a que dicho elemento facilita altos niveles de arreglo al modelar sólidos con geometrías irregulares, permitiendo un mejor ajuste a la curvatura de la geometría y obteniendo resultados más precisos durante la discretización. Otro de los aspectos importante son los controles de mallas aplicado al modelo los cuales se situaron en los lugares donde existían fuertes Tensiones, todo esto con el objetivo de lograr resultados más exactos y sin tener que elevar excesivamente el costo computacional

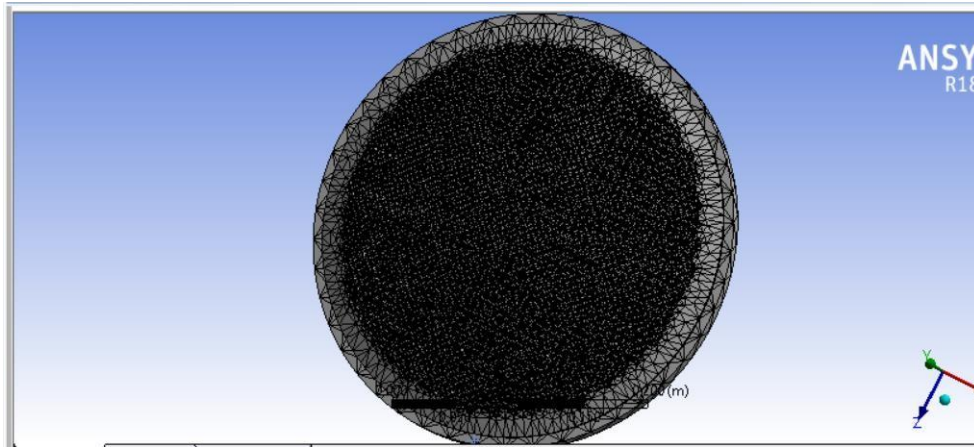


Figura 2.8 Mallado de la placa de respaldo. Fuente: Elaboración propia.

Para la obtención de los resultados se realizarán mediciones en el interior y exterior de la placa, obtenidas de dos puntos fundamentales como se muestra en la Figura 2.9. El punto 1 en el centro de la cruceta formada por los agujeros y el punto (2) en el borde del agujero.

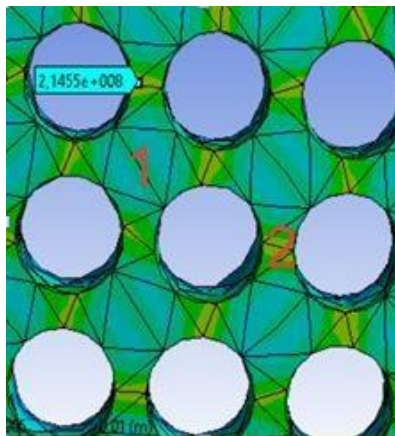


Figura 2.9: Puntos de medición de tensiones. Fuente: Elaboración propia.

2.4) Simulación del diafragma en el programa ANSYS

Para determinar el diámetro máximo de agujero que puede tener la placa se realiza la simulación con un único agujero en el programa ANSYS. Para mayor exactitud en los resultados de la simulación se modelaron las piezas en su conjunto, o sea placa y diafragma ensamblados, Figura (2.10) utilizando la presión real con que trabaja la bomba, variando el diseño de la placa (se varía el diámetro del agujero),

de esta forma se puede llegar a saber que distribución de agujeros se le debe asignar al mismo. Posteriormente se analizan los resultados para cada pieza de forma separada, de esta manera facilitaría la visualización de los valores de tensión y desplazamiento de cada uno al utilizar la escala de colores que proporciona el software.

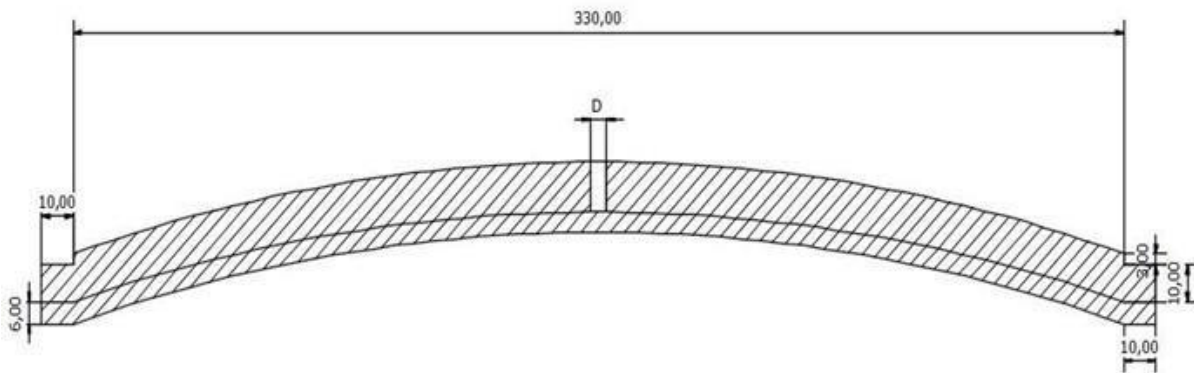
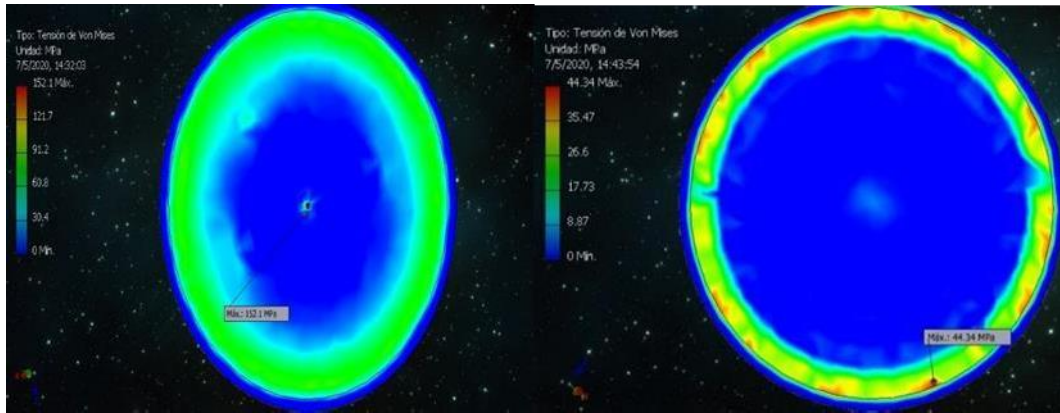


Figura 2.10: Plano del contacto del diafragma con la placa. Fuente:
Elaboración propia.

2.4.1) Tensiones y deformaciones en el diafragma.

En la figura 2.11 se muestra la modelación realizada para la placa de respaldo con agujero de 5mm y su diafragma correspondiente. Los mayores valores de tensión se encuentran en la parte interior (concavidad) en una zona próxima al borde. En el lado exterior (convexidad) las mayores tensiones se encuentran en la parte central de la placa. En el diafragma las mayores tensiones se encuentran por el lado de la concavidad producida por la deformación y próximo del borde exterior.



a)

b)

Figura 2.11: Imagen de la tensión de la placa con un único agujero de 5mm a) y del diafragma correspondiente a dicha placa b). Fuente: Elaboración propia.

Para extender el experimento se realizaron modelaciones similares a la anterior con variación de diámetro desde 5 a 50 mm con un incremento de 5 mm. A partir de los resultados se construyen las gráficas de deformación y tensiones del diafragma a lo largo de su diámetro. Los valores fueron obtenidos punto a punto. En la tabla 2.3 se presenta una muestra de los resultados obtenidos.

Tabla 2.3: Tensiones y desplazamientos del diafragma con placas de un único agujero de 5 mm, 20 mm y 40 mm. Fuente: Elaboración propia.

Placaagujero5 mm			Placaagujero20mm			Placaagujero40mm		
Diámetro	Tensión	Deformación	Diámetro	Tensión	Deformación	Diámetro	Tensión	Deformación
mm	Mpa	mm	mm	Mpa	mm	mm	Mpa	mm
0.000	2.050	0.000	0.000	7.820	0.010	0.000	4.400	0.000
8.919	32.380	0.230	8.049	6.430	0.040	7.021	8.250	0.020
17.838	42.560	1.680	16.098	34.370	0.430	14.043	40.250	0.530
26.757	12.220	4.920	24.146	29.560	3.280	21.064	29.170	3.730
35.676	15.260	8.790	32.195	5.230	7.210	28.085	6.930	7.720
44.595	14.660	11.380	40.244	19.270	10.440	35.106	16.220	11.030
53.514	8.180	13.500	48.293	8.710	12.850	42.128	7.390	13.210

62.432	7.040	15.500	56.341	7.560	14.870	49.149	7.810	15.390
71.351	5.030	16.800	64.390	6.050	16.560	56.170	4.400	17.000
80.270	6.060	18.820	72.439	5.490	18.220	63.191	5.650	18.690
89.189	6.410	20.220	80.488	6.500	19.710	70.213	6.340	20.150
98.108	6.410	21.480	88.537	6.400	20.990	77.234	6.460	21.460
107.027	6.440	22.470	96.585	6.410	22.130	84.255	6.500	22.510
115.946	6.490	23.310	104.634	6.430	22.990	91.277	6.130	23.400
124.865	6.450	23.980	112.683	6.490	23.740	98.298	4.960	24.050
133.784	6.460	24.440	120.732	6.170	24.270	105.319	10.770	24.780
142.703	6.470	24.670	128.780	6.680	24.640	112.340	13.440	25.010
151.622	6.470	24.700	136.829	7.080	24.690	119.362	15.170	25.150
160.541	6.480	24.740	144.878	7.780	24.760	126.383	13.160	25.340
169.459	6.480	24.740	152.927	8.610	24.820	133.404	10.930	25.530
178.378	6.470	24.700	160.976	9.180	24.880	140.426	10.870	25.630
187.297	6.470	24.670	169.024	9.180	24.880	147.447	14.270	25.730
196.216	6.460	24.440	177.073	8.610	24.820	154.468	17.690	25.770
205.135	6.450	23.980	185.122	7.780	24.760	161.489	21.030	25.810
214.054	6.490	23.310	193.171	7.080	24.690	168.511	21.030	25.810
222.973	6.440	22.470	201.220	6.680	24.640	175.532	17.690	25.770
231.892	6.410	21.480	209.268	6.170	24.270	182.553	14.270	25.730
240.811	6.410	20.220	217.317	6.490	23.740	189.574	10.870	25.630
249.730	6.060	18.820	225.366	6.430	22.990	196.596	10.930	25.530
258.649	5.030	16.800	233.415	6.410	22.130	203.617	13.160	25.340
267.568	7.040	15.500	241.463	6.400	20.990	210.638	15.170	25.150
276.486	8.180	13.500	249.512	6.500	19.710	217.660	13.440	25.010
285.405	14.660	11.380	257.561	5.490	18.220	224.681	10.770	24.780
294.324	15.260	8.790	265.610	6.050	16.560	231.702	4.960	24.050
303.243	12.220	4.920	273.659	7.560	14.870	238.723	6.130	23.400
312.162	42.560	1.680	281.707	8.710	12.850	245.745	6.500	22.510
321.081	32.380	0.230	289.756	19.270	10.440	252.766	6.460	21.460
330.000	2.050	0.000	297.805	5.230	7.210	259.787	6.340	20.150
			305.854	29.560	3.280	266.809	5.650	18.690
			313.902	34.370	0.430	273.830	4.400	17.000

			321.951	6.430	0.040	280.851	7.810	15.390
			330.000	7.820	0.010	287.872	7.390	13.210
						294.894	16.220	11.030
						301.915	6.930	7.720
						308.936	29.170	3.730
						315.957	40.250	0.530
						322.979	8.250	0.020
						330.000	4.400	0.000

En la figura 2.12 se muestran valores de deformaciones del diafragma obtenidos en la simulación en conjunto con la placa de agujero único de 5mm medidos desde el extremo izquierdo hasta el extremo derecho del diafragma en la línea de diámetro. Los valores de tensiones igualmente obtenidos, se muestran en la figura 2.13

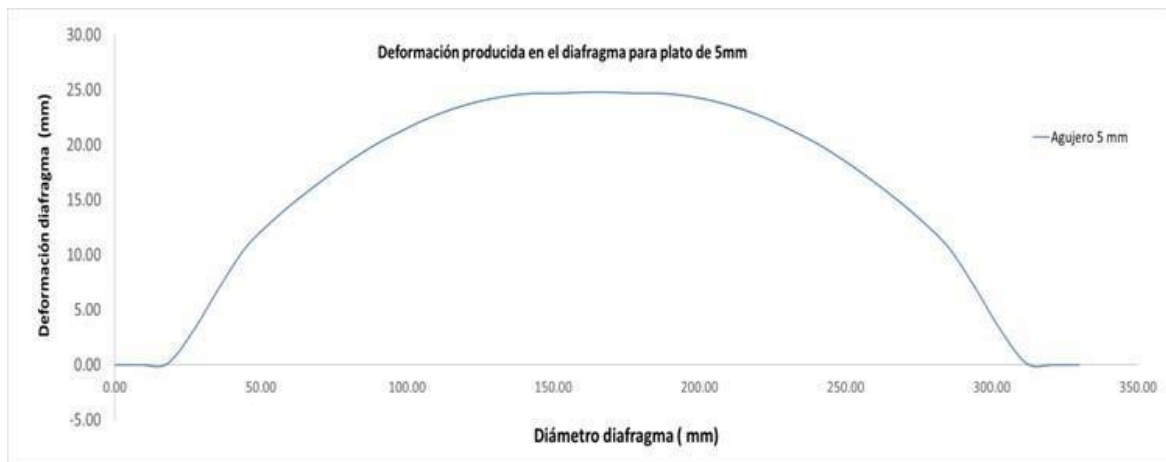


Figura 2.12: Valores de deformaciones del diafragma obtenidos en la simulación en conjunto con la placa de agujero único de 5mm. Fuente:

Elaboración propia.

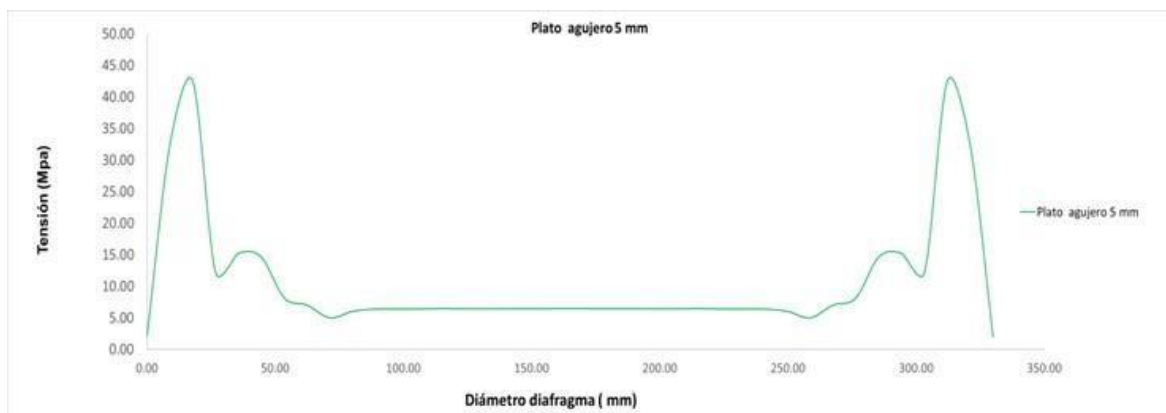


Figura 2.13: Valores de tensiones obtenidos en el diafragma en la simulación realizada en conjunto con la placa correspondiente de 5 mm. Fuente: Elaboración propia.

La simulación es repetida para diversos diámetros de agujeros desde 5 mm hasta 50 mm

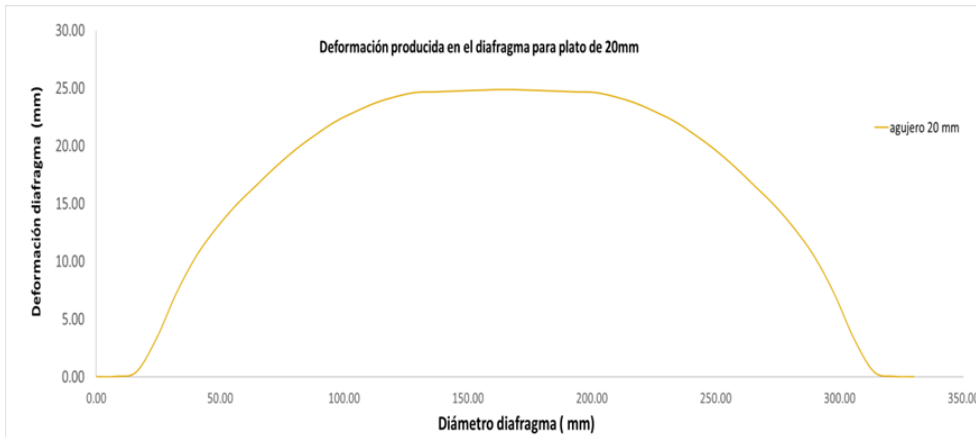


Figura 2.14: Valores de deformaciones del diafragma obtenidos en la simulación en conjunto con la placa de agujero único de 20mm. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.15: Valores de tensiones obtenidos en el diafragma en la simulación realizada en conjunto con la placa correspondiente de 20 mm. Fuente: Elaboración propia.

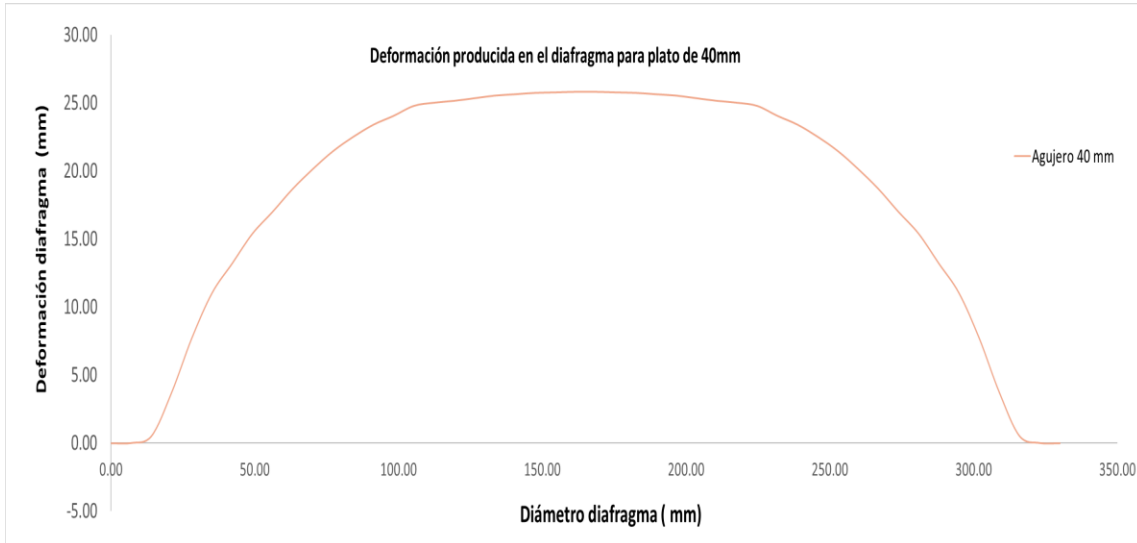


Figura 2.16: Valores de deformaciones del diafragma obtenidos en la simulación en conjunto con la placa de agujero único de 40mm. Fuente: Elaboración propia.

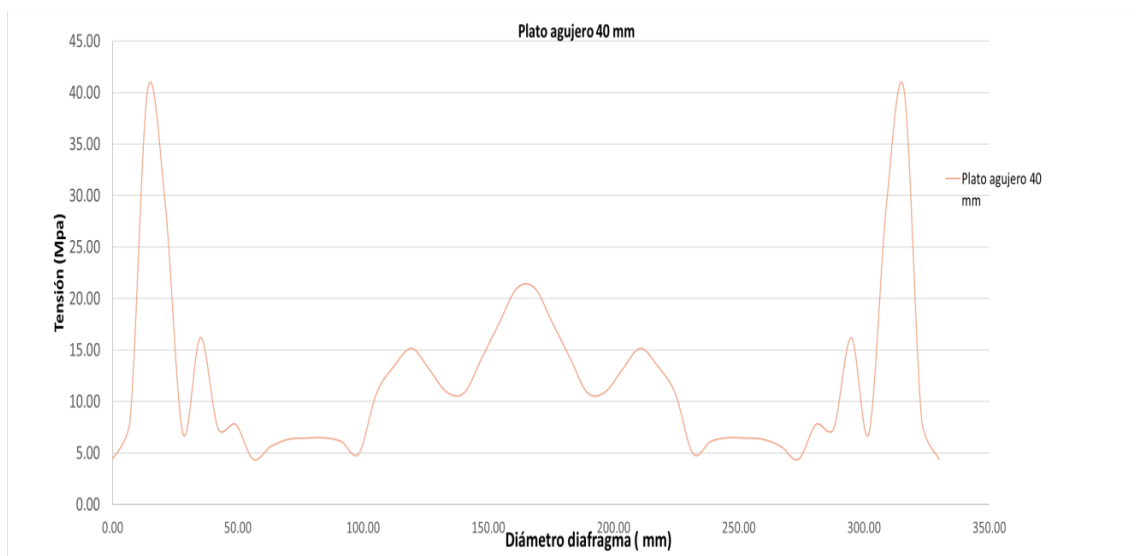


Figura 2.17: Valores de tensiones obtenidos en el diafragma en la simulación realizada en conjunto con la placa correspondiente de 40mm. Fuente: Elaboración propia.

Partiendo de los análisis realizados anteriormente en cada variante, se plotean los valores de tensiones, se muestran en la figura 2.18.

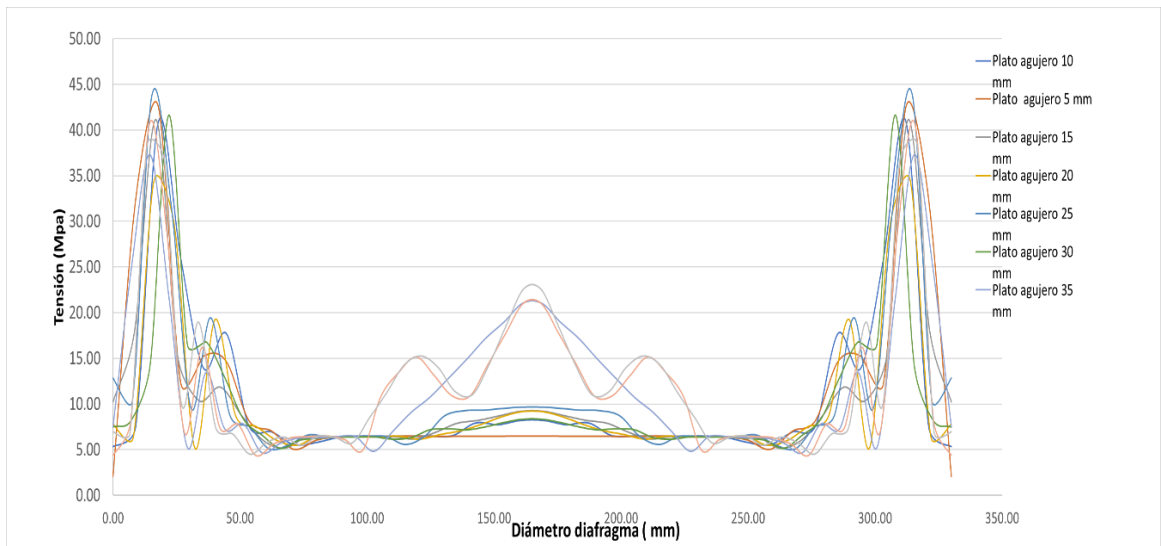


Figura 2.18: Comportamiento de las tensiones en los diafragmas al ir variando el diámetro del agujero. Fuente: Elaboración propia.

Para valores de diámetros mayores de 25 mm las tensiones en el centro del diafragma se incrementan considerablemente.

De igual manera se obtienen los valores de deformaciones que surgen en el diafragma a partir de las simulaciones para cada una de las variantes analizadas como se muestran en la figura 2.19.

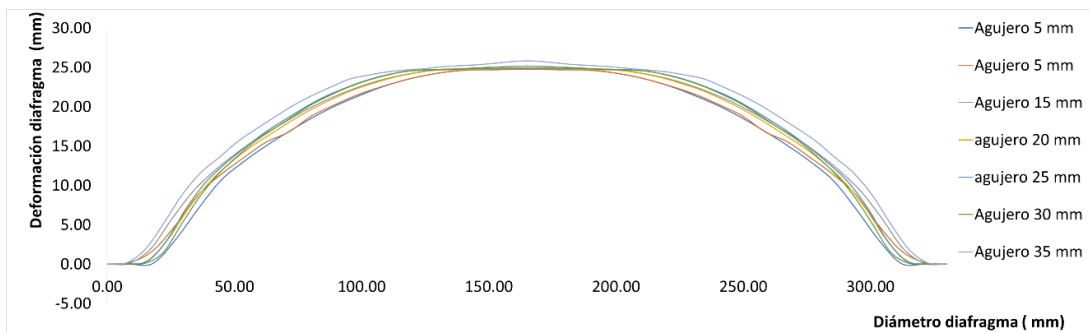


Figura 2.19: Comportamiento de las deformaciones lo largo del diámetro. Fuente: Elaboración propia.

2.4.2) Comportamiento de la porción del diafragma en el agujero.

Debido a la presión que ejerce el líquido sobre el diafragma este se deformará hasta el punto en que entrará en contacto con la placa de respaldo que sirve como muro para evitar que el diafragma sufra una rotura,

En el momento que el líquido ejerce la máxima presión será el momento en el que el diafragma ejercerá la máxima presión sobre la placa, esto provocará que se forme dentro del agujero una especie de burbuja la cual aumentará su tamaño proporcionalmente al diámetro del agujero como se muestra en la figura 2.20.

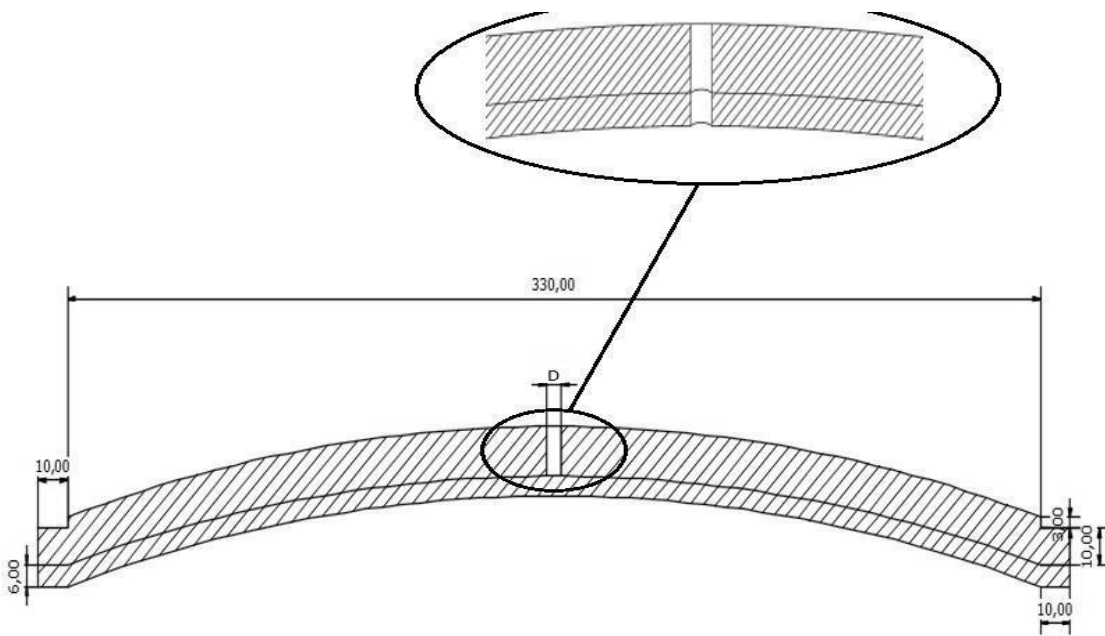


Figura 2.20: Deformación del diafragma en el momento del contacto con la placa ejerciéndose la máxima presión. Fuente: Elaboración propia.

Cada deformación presenta diferentes valores de tensión y desplazamiento, a medida que aumente el diámetro aumentarán también las tensiones y la deformación del diafragma en el área dentro del agujero. En la figura 2.21 se muestra el gráfico de deformaciones del diafragma dentro del agujero para diferentes diámetros de manera más detallada:

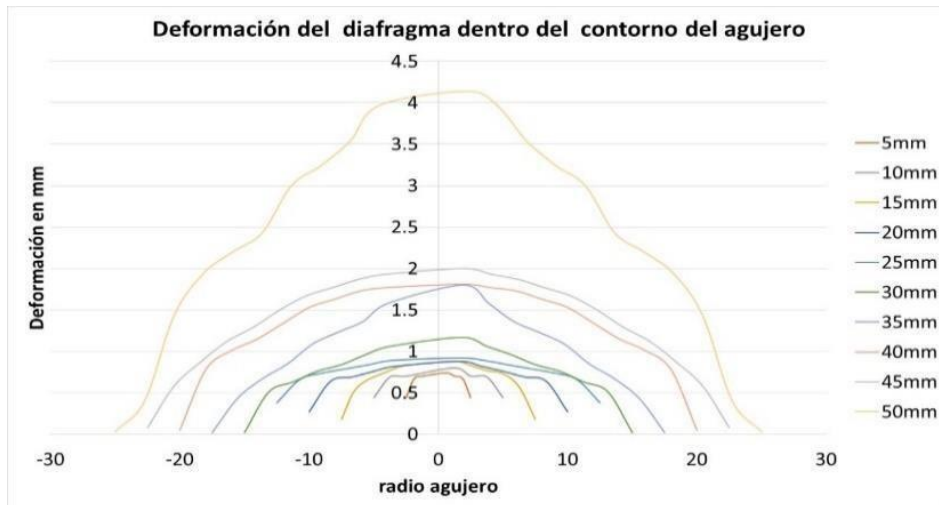


Figura 2.21: Deformación del diafragma dentro del agujero. Fuente: Elaboración propia.

Para agujeros mayores a los 10 mm las deformaciones del diafragma en el interior del mismo superan 1mm. Esta deformación puede provocar roturas y daños al diafragma en cada agujero de manera localizada, limitando la simulación a placas con diámetros de agujeros por debajo de 10 mm

2.5) Modelación de la placa sin contacto con diafragma para diferentes configuraciones de agujeros.

Para realizar la modelación se tomaron diferentes configuraciones de agujeros en la placa, modificando los valores de diámetro de los agujeros y el paso entre ellos. La carga de 3 Mpa se aplica directamente a la placa sin que el diafragma haga contacto con ella. En la tabla 2.4 se muestran los valores empleados.

Tabla 2.4: Configuraciones de agujeros, diámetro y paso. Fuente: Elaboración propia.

Configuración	5x7	5x7,5	6x7	6x7,5	6x8	7x8	7x8,5	7x9
Diámetro	5	5	6	6	6	7	7	7
Paso	7	7,5	7	7,5	8	8	8,5	9
Configuración	8x9,5	8x10	9x10	9x10,5	9x11	10x11	10x11,5	10x12
Diámetro	8	8	9	9	9	10	10	10
Paso	9,5	10	10	10,5	11	11	11,5	12

En la Figura 2.22 Se mostrarán imágenes representativas de las configuraciones para 5 mm, 7 mm y 10 mm donde se aprecia las diferencias en cuanto a los diámetros de agujeros y paso.

Diámetro agujero(mm)	Paso(mm)	Espesor nervio(mm)	Imagen
5	6,5	1,5	
5	7	2	
5	7,5	2,5	
7	8	1	
7	8,5	1,5	
7	9	2	
10	11	1	
10	11,5	1,5	
10	12	2	

Figura 2.22: Configuraciones para 5 mm, 7 mm y 10 mm. Fuente: Elaboración propia.

Los valores de tensiones fueron analizados; para el modelo analítico, se tomaron distintos radios para obtener los resultados, considerando dos casos: placa empotrada y placa articulada Basado en estudios anteriores donde a partir de

ecuaciones matemáticas desarrolladas para placas planas con agujeros fueron ajustadas basándose en la teoría de la membrana para placas con radio de curvaturas y agujeros múltiples (Borges, 2014). En el software ANSYS, se siguió un enfoque similar, analizando las tensiones punto a punto y realizando cuatro mediciones en cada anillo circular correspondiente a un diámetro determinado, tanto por el interior como por el exterior de la placa, en cada configuración analizada.

2.5.1) Comportamiento de las tensiones en el exterior de la placa

Los resultados para el modelo analizado en el software ANSYS 18.1 y en todos los softwares de elementos finitos en general se brindan un grupo de resultados como son: las Tensiones Equivalentes, las Tensiones Principales para los ejes x , y , z , también se pueden obtener los Desplazamientos totales, las Deformaciones, Factores de Seguridad etc.

Para la presentación de los resultados de la placa estudiada se realiza mediante las tensiones de Von Mises. Se puede apreciar detalladamente en el campo de tensiones descrito en el modelo presentado en Figura 2.23 para el diseño de la placa original. La coordenada cero coincide con el centro de la placa circular, realizando las mediciones a lo largo del radio.

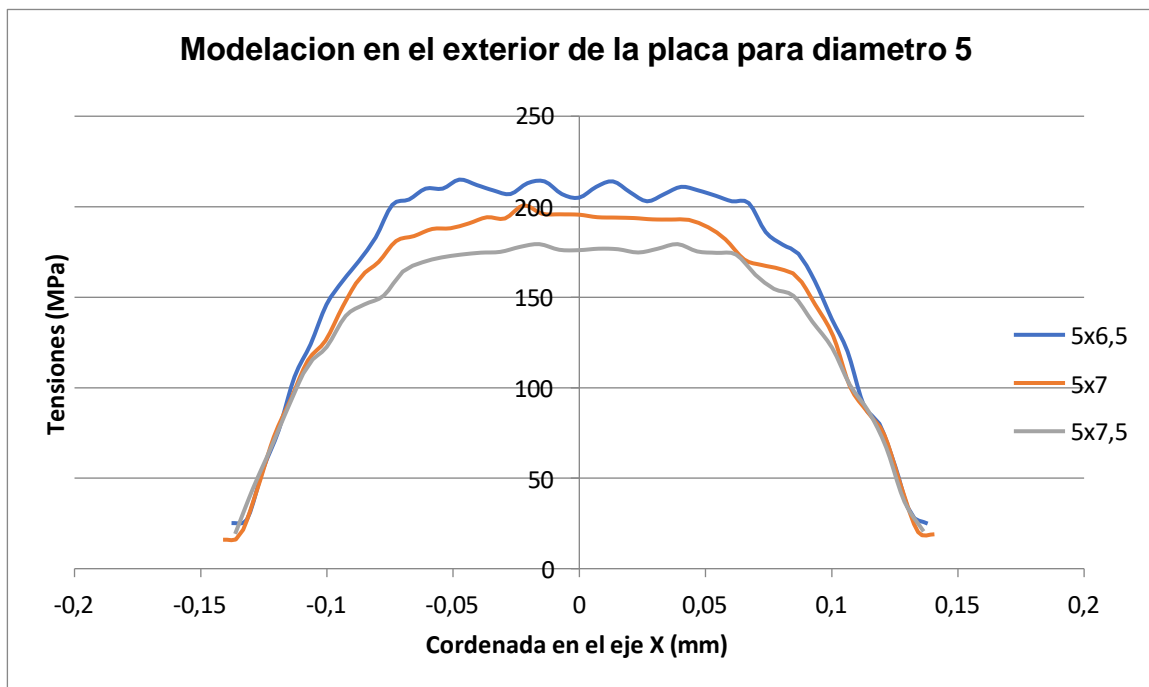


Figura 2.23 Variación de Tensiones de la placa original. Fuente: Elaboración Propia

En la figura 2.23 mostrada, se puede observar que en la simulación realizada con el software ANSYS, la tensión exterior en la placa original alcanza un valor cercano a 200 MPa. Este umbral de tensión garantiza que el material de la placa funcione dentro de sus límites elásticos, previniendo deformaciones permanentes o fallos estructurales. La distribución homogénea de las tensiones también refleja una resistencia adecuada de la placa ante la carga aplicada, asegurando su integridad y funcionalidad bajo condiciones operativas normales.

2.5.1.1) Comportamiento de las tensiones en el exterior de la placa para diferentes configuraciones de agujeros

Partiendo de las mediciones realizadas se construyen curvas que representan la distribución de tensiones en la parte externa para diferentes configuraciones de agujeros como se muestra en la Figura 2.24.

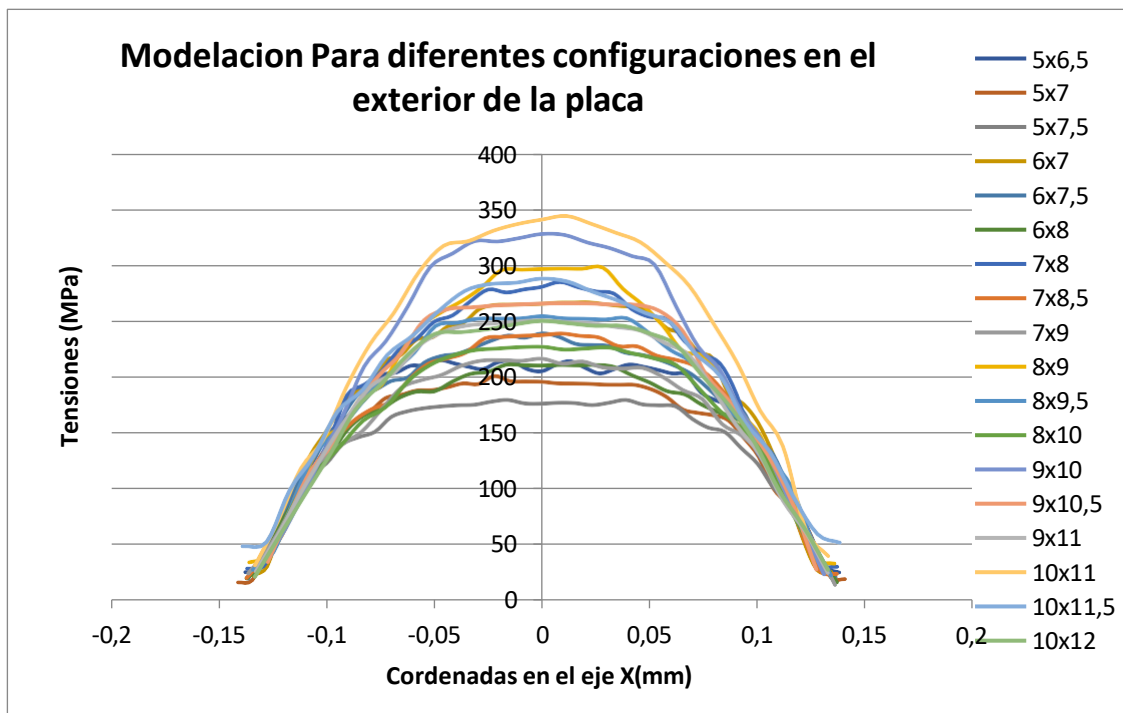


Figura 2.24: Variación de tensiones Para diferentes configuraciones de agujeros. Fuente: Elaboración propia.

2.5.2) Comportamiento de las tensiones en el interior de la placa

De la misma manera se procesaron los valores de tensiones para cada una de las configuraciones antes mencionadas (ver figura 2.26) y para la placa original (ver figura 2.25), pero en la parte interna.

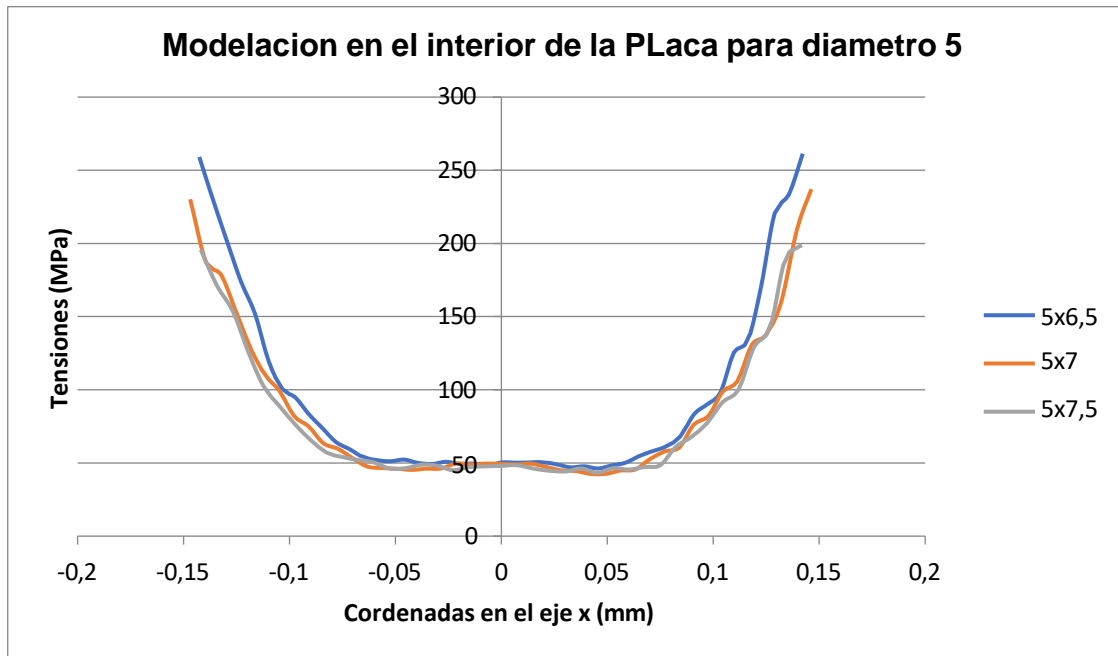


Figura 2.25: Variación de tensiones de la placa original. Fuente: Elaboración Propia.

2.5.2.1) Comportamiento de las tensiones en el interior de la placa para diferentes configuraciones de agujeros.

Comportamiento de dichas tensiones para cada una de las configuraciones, en la figura 2.26 se muestra una representación gráfica de dichas tensiones.

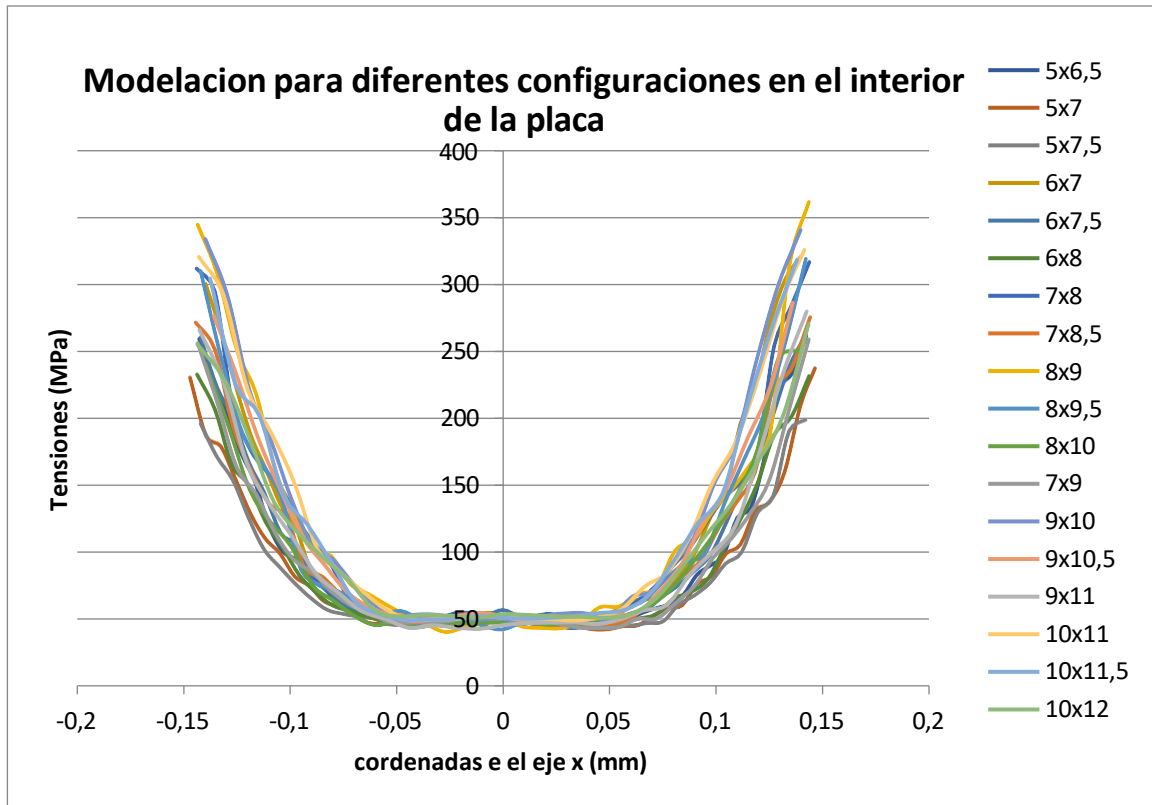


Figura 2.26: Variación de tensiones Para diferentes configuraciones de agujeros. Fuente: Elaboración propia

2.5.3) Comportamiento de las tensiones en el interior y exterior de la placa para diferentes configuraciones de agujeros.

De igual manera analizando la placa en la condición bajo una carga uniforme, se puede ver como varía la distribución de tensiones tanto para la parte interior (cóncava) como exterior (convexa) mostrada en la Figura 2.27.

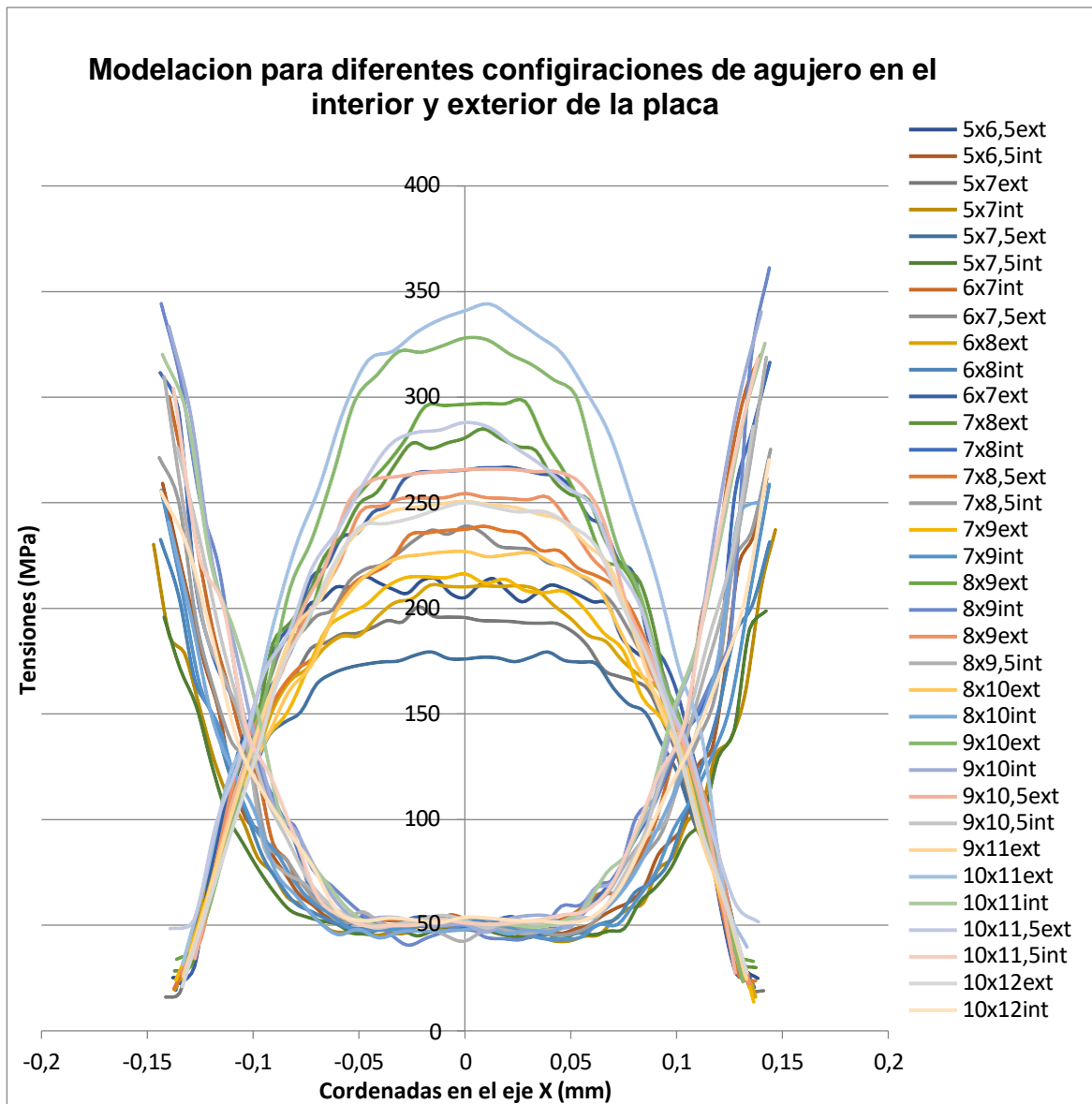


Figura 2.27: Variaciones para diferentes configuraciones de la placa. Fuente: Elaboración propia.

Para una comprensión más detallada y exhaustiva, se analizó minuciosamente el comportamiento de las tensiones en el diseño original de la placa. Tal como se ilustra en la figura 2.27, esta representación muestra cómo las tensiones externas e internas se interceptan, generando un concentrador de tensiones. Este concentrador coincide precisamente con las fallas observadas en la placa real, proporcionando una visión clara de los puntos críticos y las áreas susceptibles a fallos.

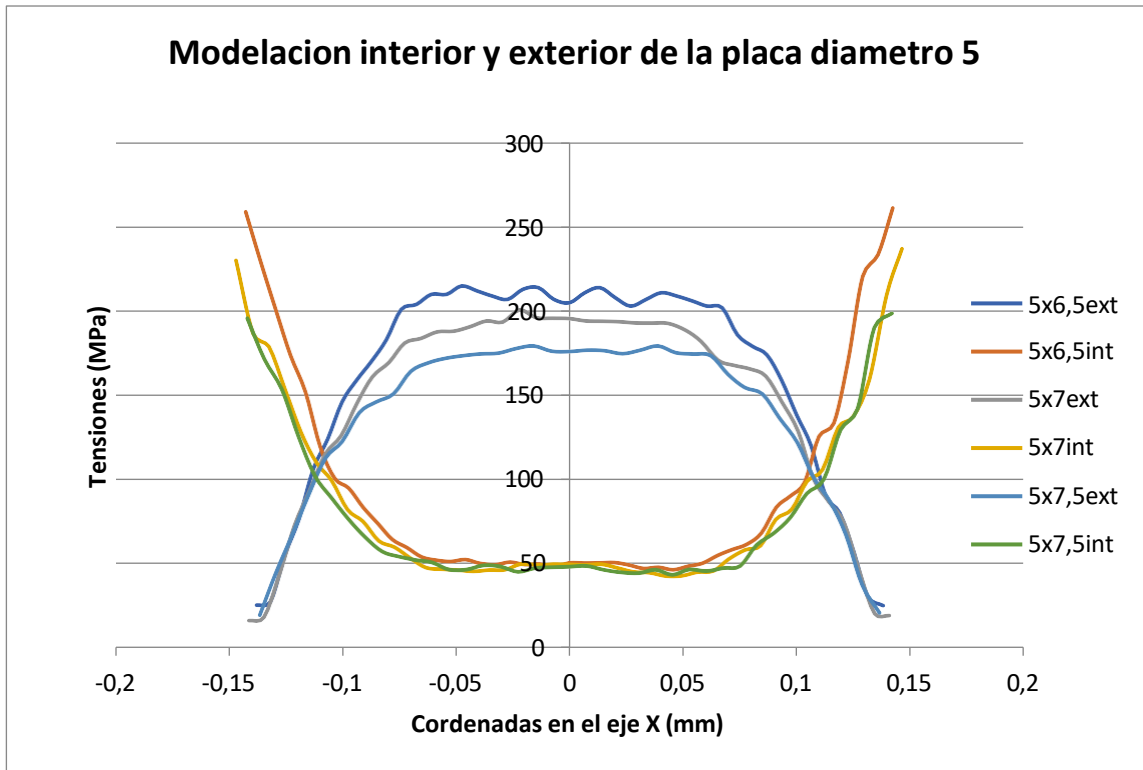


Figura 2.28 Distribución de tensiones en el interior y exterior de la placa. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.28 Placa de Respaldo Bomba Master KARL KROYER MP 2C120.

Fuente: (Noa, Quiza, & Montelier, 2023)

Conclusiones del capítulo II

1. Para agujeros mayores a los 10 mm las deformaciones del diafragma en el interior del mismo superan 1mm. Esta deformación puede provocar roturas y daños al diafragma en cada agujero de manera localizada, limitando la simulación a placas con diámetros de agujeros por debajo de 10 mm
2. Se modelaron diferentes configuraciones de agujeros variando el diámetro y el paso entre ellos. Los resultados mostraron cómo estas configuraciones afectan la distribución de tensiones en la placa.
3. Para las diferentes configuraciones las máximas tensiones en la parte exterior se producen en el centro de la placa para agujeros de 10 mm y un paso de 11 mm, en la parte interior en el borde de la placa para la misma configuración
4. Para las diferentes configuraciones las tensiones mínimas en la parte exterior se producen en el borde de la placa para agujeros de 5 mm y un paso de 7.5 mm y en la parte interior en el centro de la placa para la misma configuración

CAPÍTULO III: Análisis comparativo de simulaciones

3.1) Modelación de la placa en contacto con diafragma para diferentes configuraciones de agujeros

Para realizar la simulación se aplicará una presión sobre el diafragma de 3 Mpa, al deformarse entrará en contacto con la placa perforada y transmitirá parte de la presión. Se tomarán las mismas configuraciones de agujeros que en el capítulo anterior para realizar las simulaciones. De igual manera se realizarán mediciones a lo largo de la línea de diámetro, considerando la coordenada cero como el centro de la placa. Se realizarán mediciones en la parte cóncava y en la convexa para esta nueva condición de carga.

En la figura 3.1 se muestra el perfil de deformación y distribución de tensiones en la placa y en el diafragma obtenido del software ANSYS 18.1

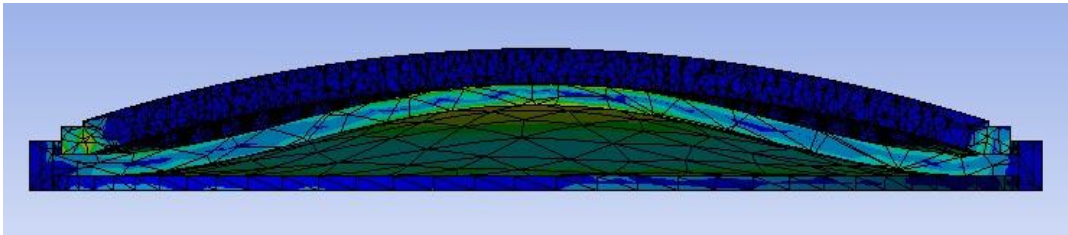


Figura 3.1: Perfil de deformación y distribución de tensiones en la placa y en el diafragma. Fuente: Elaboración propia.

3.1.1) Comportamiento de las tensiones para el interior de placa para la configuración de 5 mm de diámetro de agujero

Para la presentación de los resultados de la placa estudiada se realiza mediante las tensiones de Von Mises. Se puede apreciar detalladamente en el campo de tensiones descrito en el modelo presentado para el diseño de la placa original. En figura 3.2 se muestra la distribución de tensiones en el Interior de la placa con diafragma, diámetro 5 agujero mm, Realizando comparación en el comportamiento para tres pasos representativos

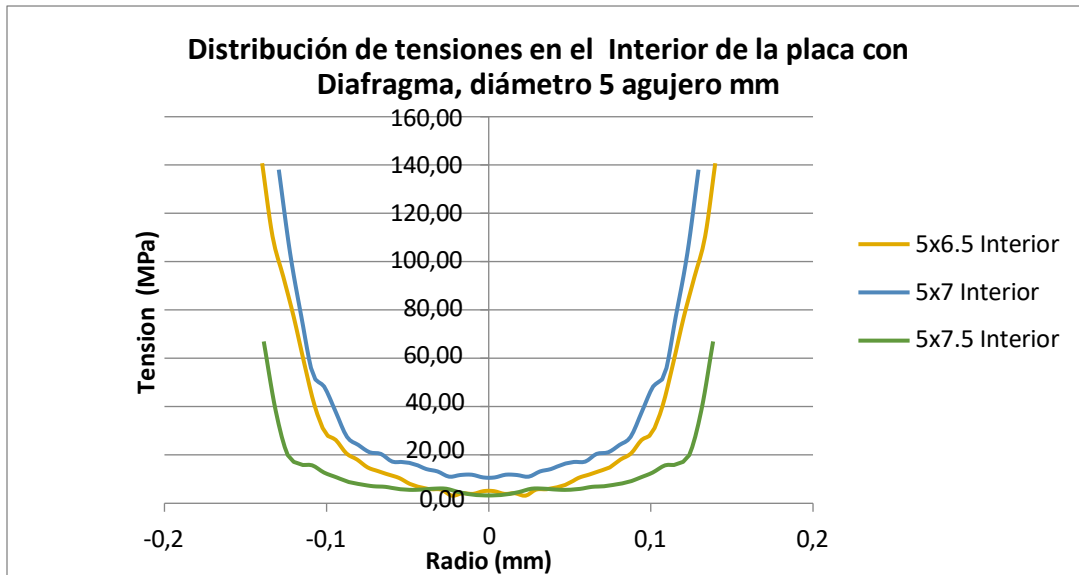


Figura 3.2: Distribución de tensiones para las configuraciones de agujeros de 5 mm en la cara interior de la placa

3.1.1.1) Comportamiento de las tensiones en el interior de la placa para diferentes configuraciones de agujeros

A partir de las simulaciones realizadas en el software ANSYS se construyeron curvas que representan la distribución de las tensiones en el interior de la placa considerando la influencia del diafragma en estas para todas las configuraciones de agujeros. (Figura 3.3)

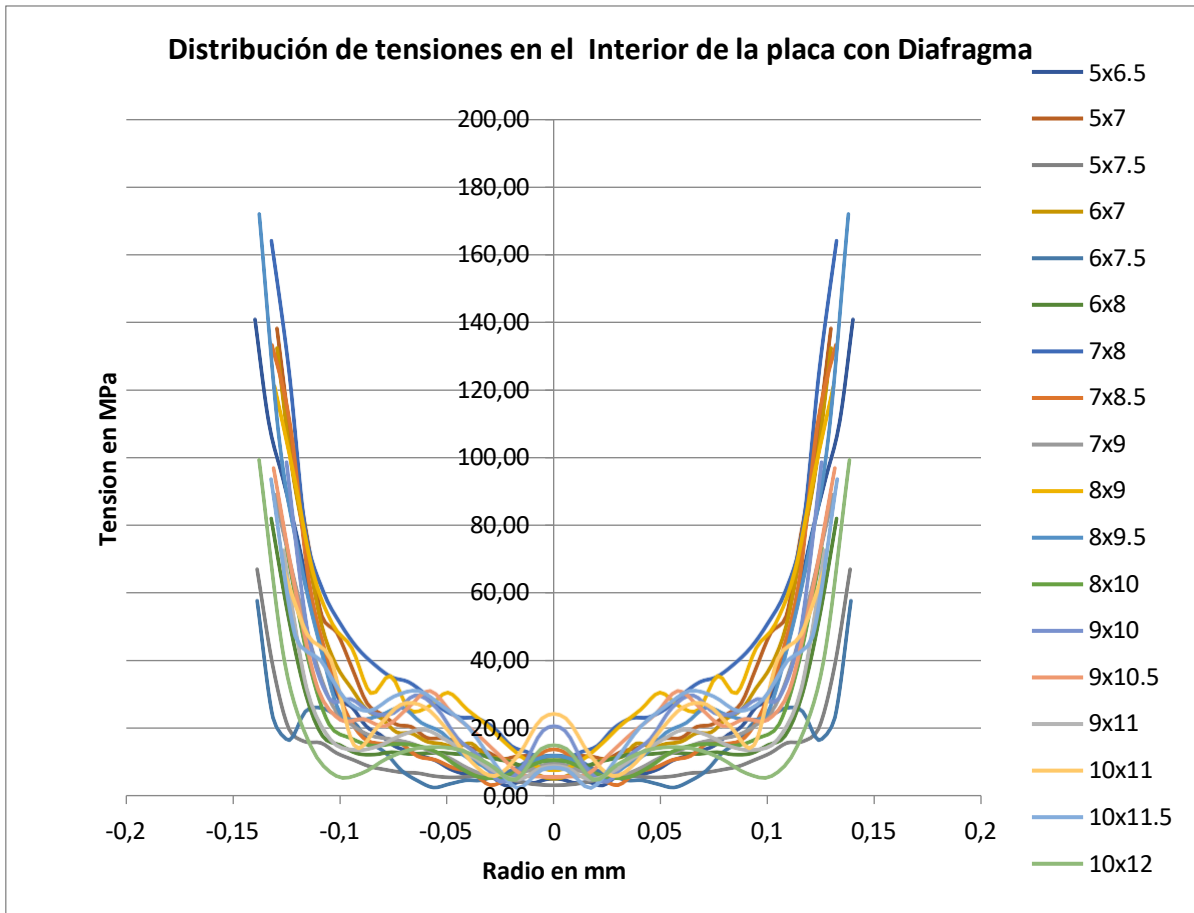


Figura 3.3: Distribución de tensiones para todas las configuraciones de agujeros en la cara interior de la placa. Fuente: Elaboración propia

El comportamiento de distribución de tensiones es similar en todas las variantes analizadas, siendo mayores en los bordes y menor al centro de la placa.

3.1.2) Comportamiento de las tensiones en el exterior de la placa para la configuración de 5 mm

Para la determinación de tensiones en la parte exterior convexidad de la placa se aplicará el procedimiento similar del epígrafe anterior para las configuraciones de agujero de 5 mm, En la Figura 3.4 se muestra el comportamiento de las tensiones exterior de la placa para la configuración de 5 mm

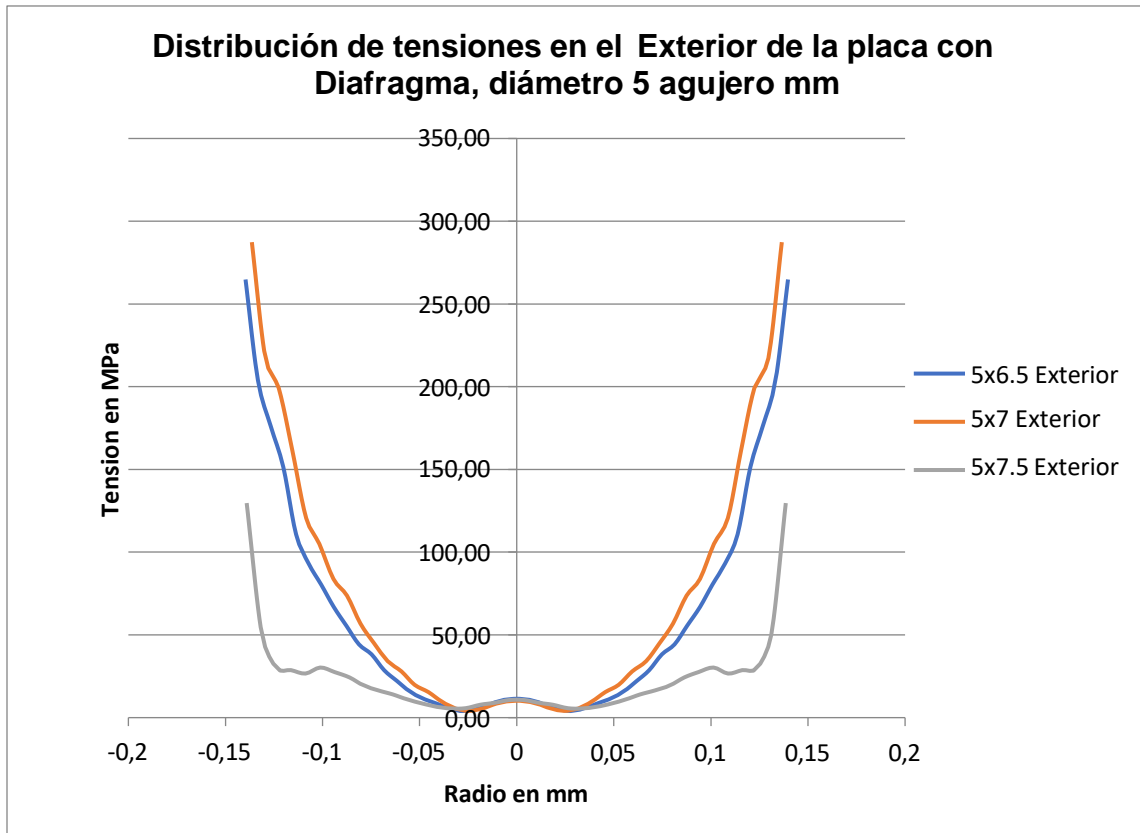


Figura 3.4: Distribución de tensiones para las configuraciones de agujeros de 5 mm en la cara exterior de la placa. Elaboración propia

3.1.2.1) Comportamiento de las tensiones en el exterior de la placa para diferentes configuraciones de agujeros

Se realizó el mismo proceso antes mencionado para los valores de las tensiones para la cara exterior de la placa para todas las configuraciones de agujeros. (Figura 3.4)

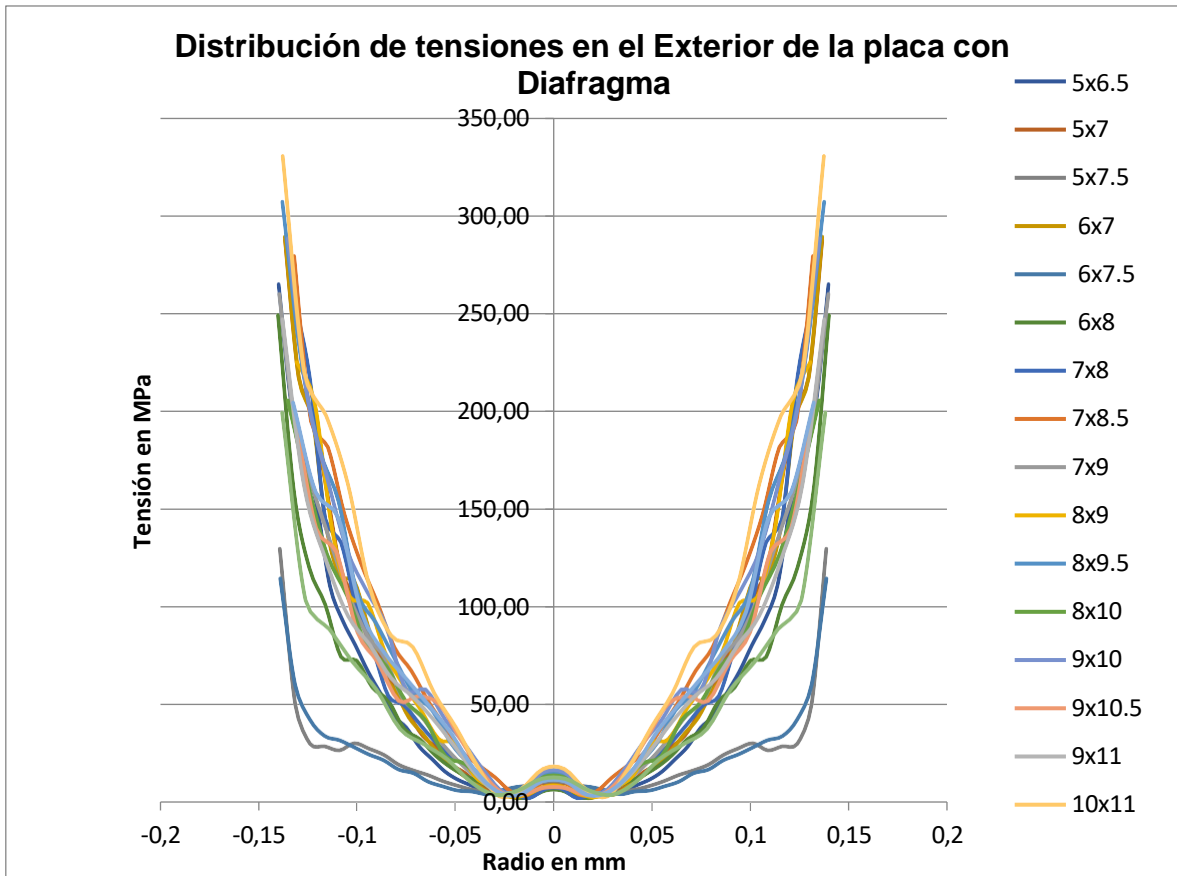


Figura 3.4: Distribución de tensiones para todas las configuraciones de agujeros en la cara exterior de la placa. Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de distribución de tensiones es similar en todas las variantes analizadas, siendo mayores en los bordes y menor al centro de la placa.

3.1.3) Comparación de las tensiones en el exterior y el interior de la placa para la configuración de 5 mm y sus respectivas medidas de pasos:

Para realizar el análisis comparativo de tensiones se tomará como patrón la configuración de diámetro de agujero 5 mm y pasos 6,5 mm, 7 mm y 7,5 mm respectivamente. Las mediciones se realizaron en el interior y en el exterior de la placa. En la figura 3.5 se muestra la distribución de tensiones para la configuración seleccionada.

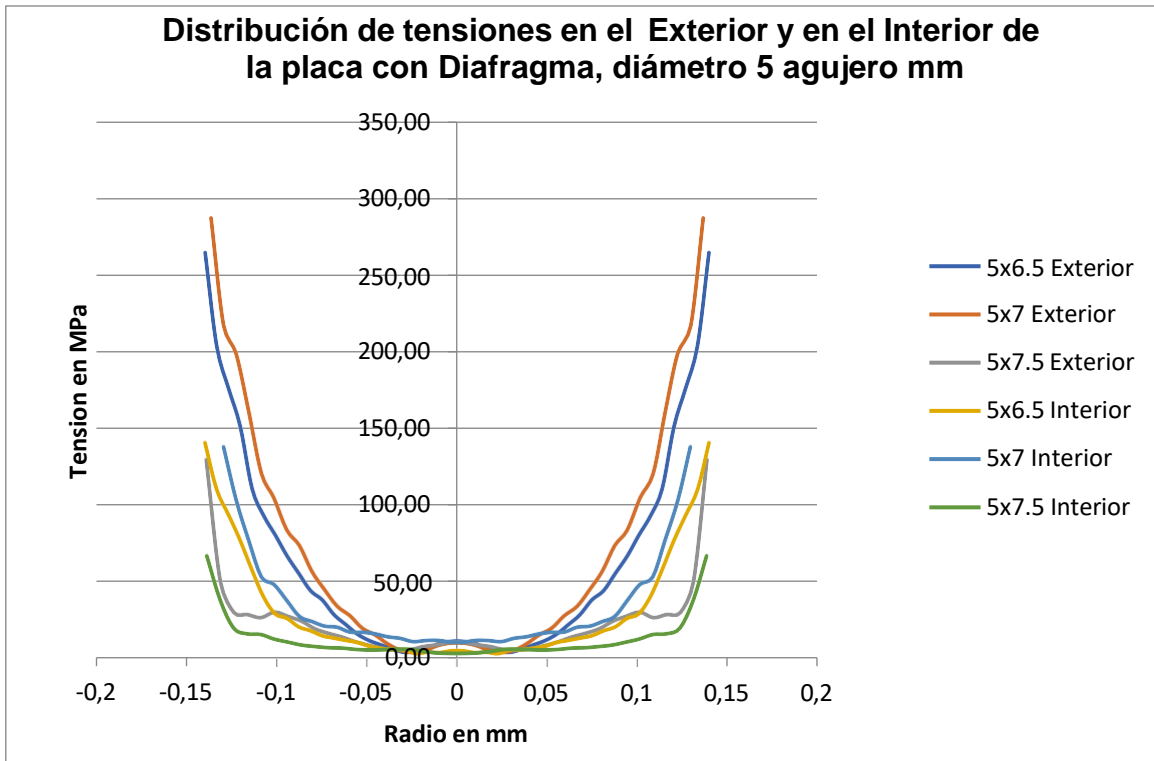


Figura 3.5: Variación de las tensiones en el interior y exterior de la placa. Fuente: Elaboración propia

Los valores de tensiones en el centro de la placa son muy bajos. Este umbral de tensión garantiza que el material de la placa funcione dentro de sus límites elásticos, previniendo deformaciones permanentes o fallos estructurales. La distribución homogénea de las tensiones también refleja una resistencia adecuada de la placa ante la carga aplicada, asegurando su integridad y funcionalidad bajo condiciones operativas normales. El comportamiento de las tensiones está dado por la elasticidad del material del diafragma que se deforma y absorbe parte de la carga de trabajo, en mayor magnitud en el centro que en los bordes.

3.2) Análisis comparativo del comportamiento de tensiones en la placa con diafragma y sin el diafragma:

Para el análisis comparativo se tomarán los resultados obtenidos de las simulaciones de la placa en contacto directo con la carga y de la placa en contacto con el diafragma tanto en el interior de la misma como en el exterior.

3.2.1) Comparación de las tensiones en el interior de la placa diafragma y sin el diafragma

Para el análisis comparativo se tomarán los resultados obtenidos de las simulaciones de la placa en contacto directo con la carga y de la placa en contacto con el diafragma. En la figura 3.6 se muestran los resultados comparativos para la parte interior y exterior, una configuración de diámetro 5 mm y pasos de 6,5 mm, 7 mm y 7,5 mm respectivamente.

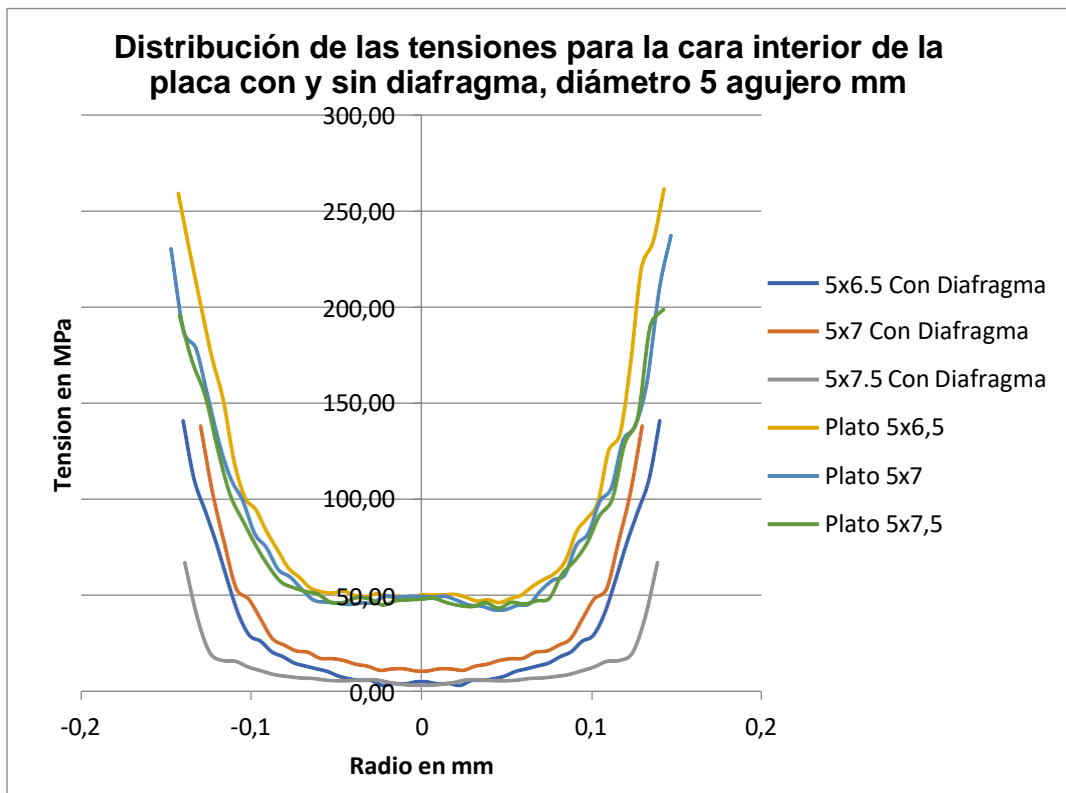


Figura 3.6: distribución de las tensiones para la cara interior de la placa con y sin diafragma.

En este caso se puede ver que la distribución de las tensiones de la placa simulado con el diafragma es menor que sin diafragma, evidenciando que el elemento elástico reduce significativamente las tensiones en la placa aumentando la resistencia y la distribución homogénea de las tensiones aplicadas en la placa.

3.2.2) Comparación de las tensiones en el exterior de la placa con y sin diafragma:

Se realizó el mismo proceso antes mencionado para mostrar los valores de las tensiones de la placa para todas las configuraciones de agujeros para la superficie exterior simulado con diafragma y sin diafragma. (Figura 3.7)

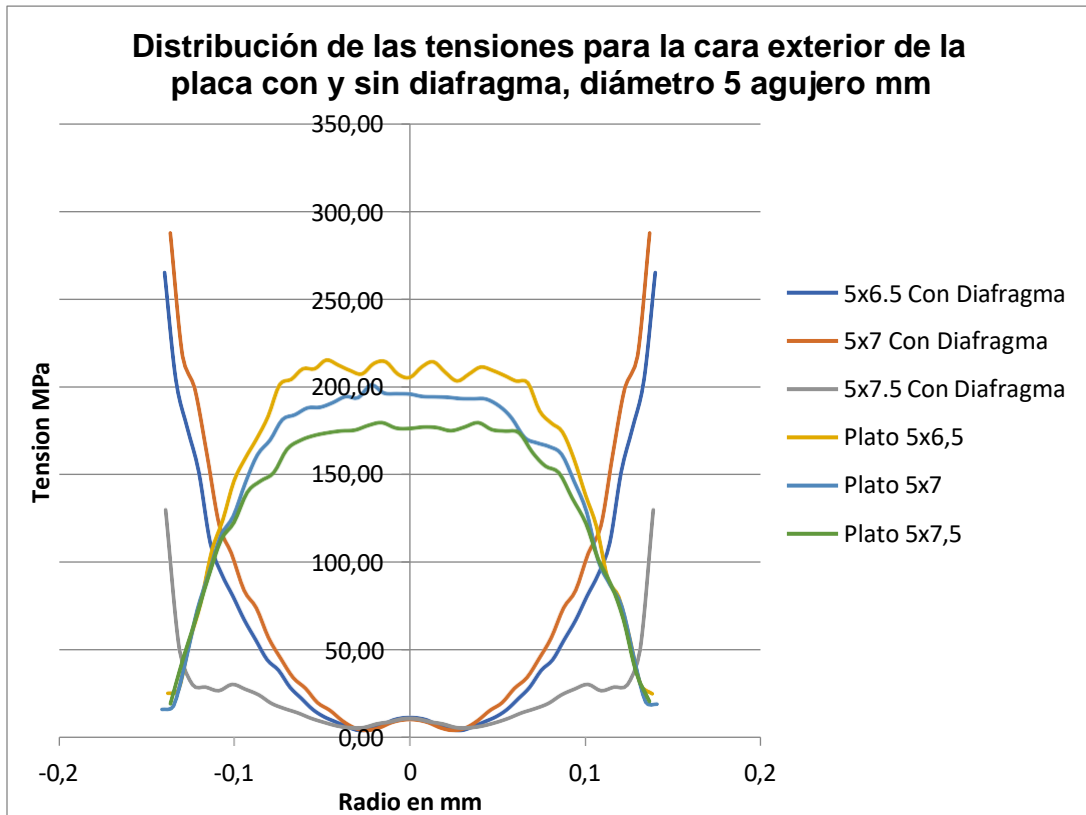


Figura 3.7: distribución de las tensiones para la cara exterior de la placa con y sin diafragma. Fuente: Elaboración propia.

Del análisis anteriormente realizado se puede ver que en el comportamiento de las tensiones en la parte exterior de la placa con contacto al diafragma y sin contacto con diafragma, no existen coincidencias en la distribución de estas. Se evidencia que para la placa simulada sin contacto con diafragma los mayores valores de tensiones se encuentran en el centro de la misma. En los extremos son mayores para el caso de contacto con el elemento elástico.

En la figura 3.8 Se muestra de conjunto la distribución de tensiones en el interior y exterior de la placa para ambas condiciones de simulación, con diafragma y sin diafragma

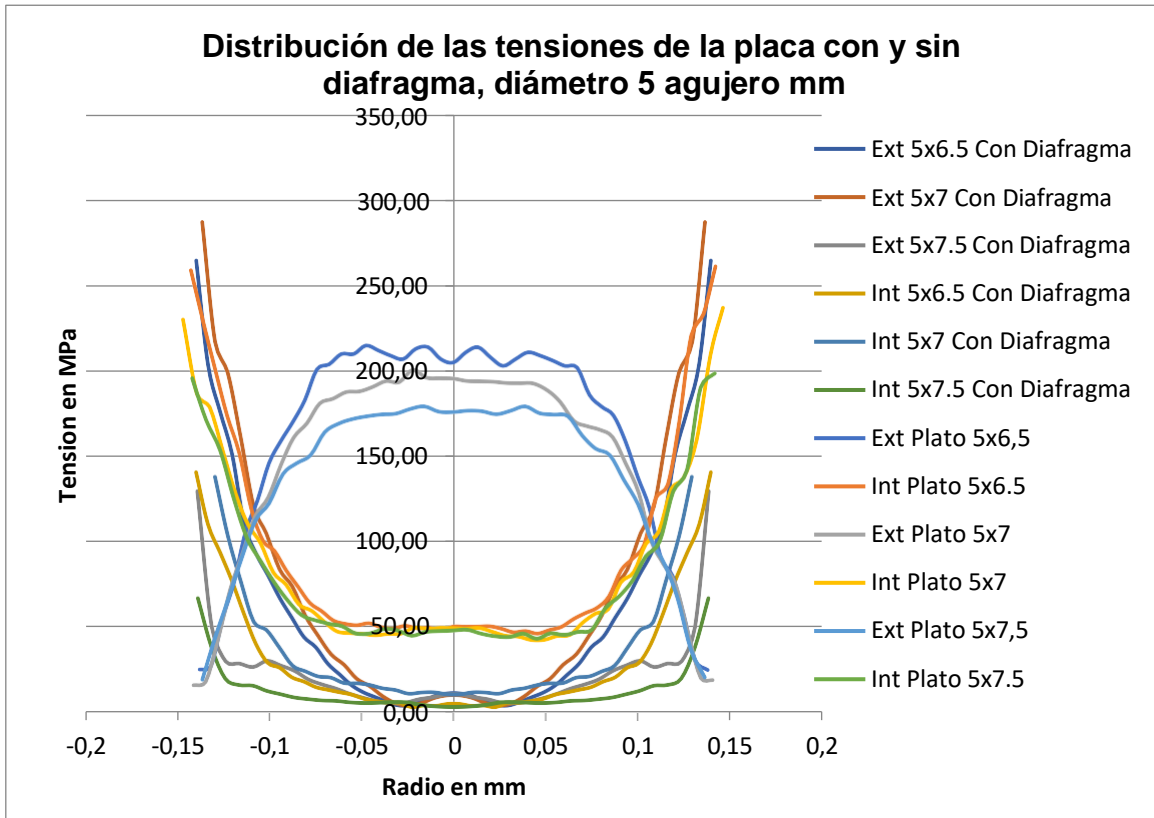


Figura 3.8: Distribución de las tensiones de la placa con y sin diafragma, diámetro 5 agujero mm. Fuente: Elaboración propia.

Del análisis antes realizado se puede apreciar que en la simulación con diafragma coinciden las zonas de máximas tensiones con las de roturas presentadas en la placa (Figura 3.9), demostrando que el modelado que más se ajusta a las condiciones reales de operación es con diafragma.

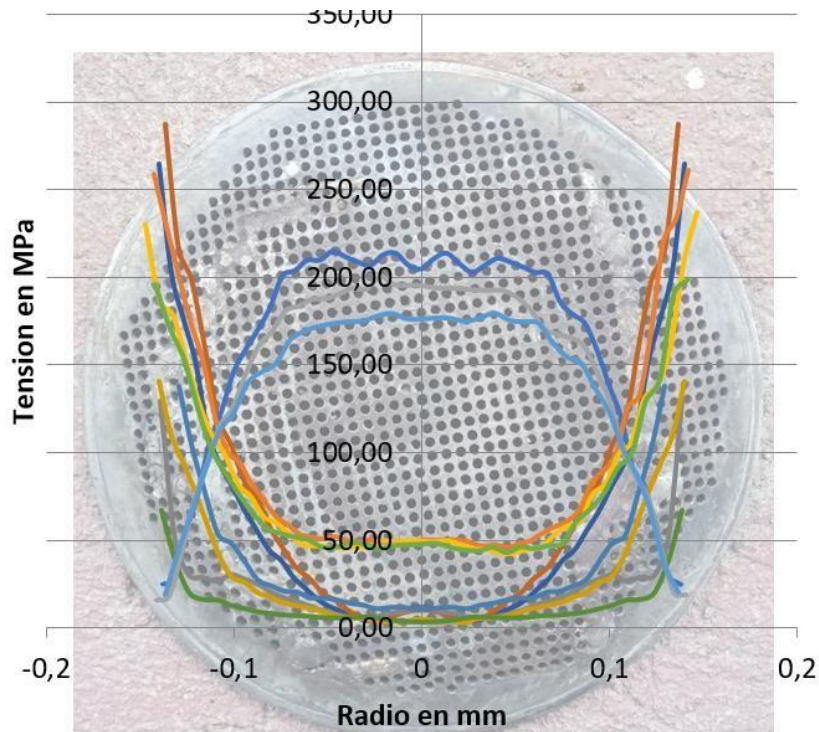


Figura 3.9: Roturas presentadas en la placa. Fuente: Elaboración propia

Conclusiones del capítulo III

- 1- Se modelaron diferentes configuraciones de agujeros variando el diámetro y el paso entre ellos. Los resultados mostraron cómo estas configuraciones afectan la distribución de tensiones en la placa.
- 2- Para la placa teniendo en cuenta la influencia del diafragma, las tensiones con respecto a las simulaciones sin el diafragma disminuyen las tensiones, asegurando que el material opere dentro de sus capacidades elásticas.
- 3- Estas simulaciones demuestran la capacidad de absorción de las tensiones del diafragma en el centro de la placa, aunque aumentando en los extremos de la misma, al contrario de las simulaciones sin diafragma que las tensiones se concentraban al centro de la placa

Conclusiones Generales

1. De la revisión bibliográfica realizada se logró caracterizar las bombas de diafragma dentro de las bombas de desplazamiento positivo. Se caracterizó igualmente la Bomba Máster MP 2C120.
2. Las máximas tensiones obtenidas en las simulaciones para las diferentes configuraciones de la placa sin diafragma en la parte exterior se producen en el centro de la placa para agujeros de 10 mm y un paso de 11 mm, en la parte interior en el borde de la placa para la misma configuración, en la parte exterior se producen en el borde de la placa para agujeros de 5 mm y un paso de 7.5 mm y en la parte interior en el centro de la placa para la misma configuración
3. De la simulación de la placa y el diafragma con diferentes configuraciones de agujero se pudo demostrar que la distribución de tensiones en el interior y exterior son más bajas a diferencia de las simulaciones de la placa solamente garantizado su perfecto funcionamiento.
4. Las tensiones en la parte exterior de la placa con contacto al diafragma y sin contacto con diafragma no presentan coincidencias en las distribuciones de estas.
5. Para la placa simulada sin contacto con diafragma los mayores valores de tensiones se encuentran en el centro de la misma y en los extremos para el caso de contacto con el elemento elástico.

Recomendaciones

- Continuar la investigación rediseñando la placa de respaldo con otros diámetros de orificios y diferentes pasos buscando disminuir al mínimo las tensiones producidas.

Bibliografía

- Abdulrazaq, A. y. (2016). Dynamic Behaviour of Flow through Multi-Stage Restricting Orifices. *Proceedings of the 3rd International Conference on Fluid Flow, Heat and Mass Transfer (FFHMT'16)*, 161.
- Abel, H. (2012). *Bombas Hidráulicas de Membrana, Catálogo*. Pump Technology.
- Alloys. (2013). *Ampco metal excellence in engineered*.
- Arora., S. D. (2015). Stress Analysis of a Rectangular Plate with Circular Hole Using Three Dimensional Finite Element Model. *Business and Enterprise Applications* , 15.
- Borges, R. J. (2014). *Modelos Matemáticos para el cálculo de las tensiones en el plato de respaldo de la Bomba Máster MP 2C120 de la Planta de Glucosa de Cienfuegos y su validación por el Método de los Elementos Finitos*.
- Brahmbhatt, K. B. (2015). Stress Concentration Factor Converts Into Stress Intensity Factor using ANSYS. *European J. Adv. Engg. Techno*, 4649.
- Mekalke, G. C., M. V. Kavade., Deshpande, S. S. (2012). Analysis of a Plate with a Circular Hole by FEM. *IOSR J. Mech. Civil Engg. (IOSR-JMCE)*, 30.
- López, J. L. (2010). *Bombas Reciprocantes*. Logistica S.A.
- Merle, C. y. (2002). *Mecánica de fluido*. San Rafael, Argentina.
- Nelik, L. (2012). *Fundamentals with applications*. Centrifugal e rotary pumps.
- Noa, J. G., Quiza, R., & Montelier, S. (2023). Simulación del estado tensional de la placa de respaldo de bomba KARL0. *Ingeniería Mecánica*, 6.
- Pérez, D. L. (2020). *Modelación por el Método de Elementos Finitos del diafragma y el plato de respaldo con diferentes configuraciones de agujeros de la Bomba Master KARL KROYER MP 2C120 de la empresa GYDEMA*.
- Pérez, E. A. (2012). *Bombas hidráulicas de membranas HMT*. Colombia.
- Rayner, R. (1995). *Pump users handbook*. (Tesis de grado). Univercidad Cienfuegos).

Shivlingesh, S. B. (2016). FEA Analysis of Stresses for Cantilever Beam with Hole Subjected to Different Mode of Loading Systems. *Int. J. Adv. Engg. Technol., Manage. Appl. Sci* , 126.

Sumbramaya, K. (2013). *Hydraulic machines*. (Tesis de grado). Universidad Cienfuegos.

Vieira, J. D. (2019). *Modelación por el método de elementos finitos de las tensiones en condiciones reales de operación en el plato de respaldo de la bomba máster mp 2c120 de la planta glucosa de Cienfuegos*. (Trabajo de diploma). Universidad de Cienfuegos).

Wilden. (2012). *Bombas neumaticas de diafragmas*. Madrid,España.