



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.

TRABAJO DE DIPLOMA

AUTOR: DIEGO LUIS CASTILLO PÉREZ

TUTOR: M.Sc. JUAN GABRIEL NOA ÁGUILA



CIENFUEGOS, JUNIO DE 2020

RESUMEN

En el trabajo se realizó la modelación por elementos finitos del diafragma y el plato de respaldo de la Bomba Master KARL KROYER MP 2C120, que permitió determinar las tensiones reales que surgen durante su funcionamiento. Fue necesario evaluar la concentración de tensiones que se originan en el diafragma al entrar en contacto con los orificios del plato. Posteriormente se modeló por el método de elementos finitos en condiciones reales de operación del diafragma, determinando las tensiones que surgen en cada una de las zonas de este. Se obtuvo a partir de la modelación del plato con diferentes configuraciones las tensiones que se originan desde el borde hasta el centro. Se obtuvo la ecuación de ajuste que rige el comportamiento de las tensiones en el interior y en el exterior del plato.

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

ABSTRACT

In the work, the finite element modeling of the diaphragm and the backing plate of the KARL KROYER MP 2C120 Master Pump was carried out, which allowed determining the real stresses that arise during its operation. It was necessary to evaluate the concentration of stresses that originate in the diaphragm when it comes into contact with the plate holes. Subsequently, it was modeled by the finite element method under real operating conditions of the diaphragm, determining the stresses that arise in each of its areas. Tensions originating from the edge to the center were obtained from the modeling of the plate with different configurations. The adjustment equation that governs the behavior of the tensions inside and outside the plate was obtained.

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

INDICE

INTRODUCCIÓN	I
CAPÍTULO I: Generalidades de las bombas reciprocantes.	1
1.1) Generalidades de las bombas reciprocantes. Bombas de diafragmas.	1
1.1.1) Clasificación de las bombas reciprocantes.	2
1.1.2) Bombas de diafragmas.	3
1.1.2.1) Bombas de diafragmas de discos.	6
1.1.2.2) Bombas con diafragma tubular.	7
1.1.2.3) Otras configuraciones de diafragmas.	7
1.1.2.4) Principales tipos de válvulas en las bombas de diafragmas.	7
1.1.2.5) Criterios para la selección de una bomba de diafragma.	8
1.1.2.6) Materiales para su fabricación.	9
1.2) Bombas de diafragmas usadas mundialmente.	10
1.2.1) Bombas de diafragmas Wilden.	10
1.2.1.1) Principio de funcionamiento.	10
1.2.1.2) Clasificación de las bombas de diafragmas Wilden.	10
1.2.1.3) Partes de una bomba de diafragma.	11
1.2.2) Bombas de Diafragmas ABEL. Gama HM, HMT.	12
1.2.2.1) Generalidades, gama HM.	12
1.2.2.2) Generalidades, gama HMT.	14
1.3) Bomba Máster KARL KROYER MP 2C120.	16
1.3.1) Descripción y modo de operación.	16
1.3.2) Parámetros fundamentales.	18
1.3.3) Plato perforado de respaldo al diafragma.	18
1.4) Principales modelaciones por el método de elementos finitos.	20
CAPÍTULO II: Simulación del diafragma por el método de los elementos finitos.	24
2.1) Características del diafragma.	24
2.2) Simulación del diafragma con plato.	24
2.3) Simulación del diafragma con plato de agujero único.	26

2.3.1) Tensiones y deformaciones en el diafragma.....	27
2.3.2) Comportamiento de la porción del diafragma en el agujero.....	33
CAPÍTULO III: Modelación por el método de los elementos finitos del plato de respaldo con diferentes configuraciones de agujeros.	35
3.1) Determinación experimental de la composición química del material del plato.....	35
3.2) Modelación del plato en el instante en que el diafragma se ejerce presión sobre el mismo.	40
3.3) Modelación del plato en el instante en que el líquido (leche de almidón) esté siendo evacuado de la cavidad de la bomba.	42
3.4) Modelación del plato para diferentes configuraciones de agujeros.	46
3.5) Análisis de resultados.....	48
3.5.1) Comportamiento de las tensiones durante el instante de flujo del material para configuración original.	48
3.5.2) Comportamiento de las tensiones en el instante de contacto diafragma- plato para configuración original.	49
3.5.3) Comportamiento de las tensiones en el instante de contacto diafragma- plato con diferentes configuraciones.....	51
3.5.3.1) Comportamiento de las tensiones en el interior del plato con diferentes configuraciones.	51
3.5.3.2) Comportamiento de las tensiones en el exterior del plato con diferentes configuraciones.	52
3.6) Obtención de ecuaciones que rigen el comportamiento de las curvas de tensiones.	54
CONCLUSIONES.....	58
RECOMENDACIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXOS	62

INTRODUCCIÓN

La Empresa Glucosa Cienfuegos subordinada a LABIOFAM, ubicada en la zona Industrial No 2 del reparto Pueblo Griffo en la periferia noreste de la ciudad de Cienfuegos, fue puesta en marcha en 1978, luego de un periodo inversionista que duró 6 años. Con una tecnología de origen sueca de la firma Alfa Laval y DDS Kroyer de Dinamarca es la única fábrica existente en Cuba dedicada a la producción de glucosa y otros derivados del maíz. La misma se construyó con el objetivo de producir diariamente 90 toneladas de Sirope de Glucosa, 9 toneladas de Gluten, 7 toneladas de Germen, 19 toneladas de Licor de Remojo y 21,5 toneladas de Forraje y últimamente se está produciendo el Vimang.

El proceso tecnológico de la Empresa se encuentra dividido en tres plantas: la planta de producción de almidón, la planta de producción de sirope de glucosa y la planta de mezclas secas. Además de contar con un sistema de facilidades auxiliares comunes a todas las plantas como son: el sistema de generación de vapor, que dispone de dos calderas de tubos de fuego con una capacidad de 8 y 12 toneladas de vapor por hora respectivamente. En ella existen una serie de equipos que mantienen su vitalidad y su funcionabilidad, así como un personal técnico encargado del desarrollo, mantenimiento y recuperación que permiten el trabajo sostenido y los resultados de dicha industria.

Entre los equipos mencionados se encuentra la Bomba Master KARL KROYER MP 2C120, la cual se encarga de bombear la leche de almidón acidificada que se utiliza para la producción de glucosa. Debido al largo período de aprovechamiento de estas unidades, se han presentado fallas en la zona en la que se produce la glucosa, específicamente en la Bomba Master. A partir del período 2005-2006 la bomba empieza a presentar problemas en el diafragma llevando consigo a que este se quiebre, lo cual al hacerlo se mezcla el aceite que contienen los pistones con el producto, perdiendo así toda la materia prima, el aceite de la bomba y por consiguiente pérdidas económicas y de tiempo por la limpieza a las tuberías que se contaminan de aceite.

Esta avería ha significado grandes pérdidas económicas porque al fallar el diafragma se para la producción completa en dicha zona, la empresa en 8

horas de trabajo deja de producir 10 ton y cada tonelada hora representa 1.25 USD.

A criterio de los especialistas de la planta la falla se produce por el aumento de tensiones en el plato de respaldo provocando rotura entre los agujeros del mismo, haciendo que las tensiones aumenten sobre el diafragma y este se rompa.

Para poder esclarecer la causa de la avería y comprobar el comportamiento de las tensiones que surgen en el diafragma y plato de respaldo de la bomba KARL KROYER MP 2C120 es que surge el presente proyecto.

Problema científico

No existe una modelación por elementos finitos del diafragma y plato de respaldo con diferentes configuraciones de agujeros de la Bomba Master KARL KROYER MP 2C120, que permita simular las tensiones reales que surgen durante el funcionamiento de la misma.

Hipótesis

Es posible a partir de la modelación por elementos finitos determinar las tensiones reales que surgen en el diafragma y plato de respaldo con diferentes configuraciones de agujeros en el funcionamiento real de la bomba.

Objetivo General

Realizar la modelación por elementos finitos del diafragma y el plato de respaldo de la Bomba Master KARL KROYER MP 2C120, que permita determinar las tensiones reales que surgen durante el funcionamiento de la bomba, evaluando diferentes configuraciones de agujeros.

Objetivos Específicos

1. Caracterizar las generalidades de las bombas reciprocantes, en particular de las bombas de diafragma, específicamente de la Bomba Master KARL KROYER MP 2C120.
2. Evaluar la concentración de tensiones que se originan en el diafragma al entrar en contacto con los orificios del plato.

3. Modelar por el método de elementos finitos en condiciones reales de operación del diafragma de la Bomba Master KARL KROYER MP 2C120, para determinar las tensiones que surgen en cada una de las zonas de este.
4. Modelar por el método de elementos finitos las tensiones que se originan en el plato de respaldo para diferentes configuraciones de agujeros en condiciones de operación de la bomba.
5. Obtener la ecuación de ajuste de las curvas de tensiones para cada configuración.

CAPÍTULO I: Generalidades de las bombas reciprocantes.

En este capítulo se introducen los elementos fundamentales que conforman las bombas de diafragmas, las principales características que ofrecen dos de los mayores productores de este tipo de bombas, así como la descripción y el modo de operación de la bomba de diafragma KARL KROYER perteneciente a la empresa Glucosa Cienfuegos. Se analizan las principales modelaciones recogidas en la literatura para el diafragma.

1.1) Generalidades de las bombas reciprocantes. Bombas de diafragmas.

Las bombas reciprocantes (alternativas) (ver figura 1.1) se utilizan en numerosas aplicaciones que exceden la capacidad de las bombas centrífugas o rotatorias, son de desplazamiento positivo, es decir, 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 se logra por el movimiento alternativo de un pistón émbolo diafragma. La bomba no es cinética como la centrífuga y no requiere velocidad para producir presión, pues se pueden obtener presiones altas a bajas velocidades. Esta es una de las ventajas de la bomba en particular para manejar pastas aguadas abrasivas y líquidos muy viscosos. La justificación para su selección, en vez de una centrífuga o rotatoria debe ser el costo; no solo el costo inicial sino el costo total, incluso los costos de energía y mantenimiento. La mejor característica de este tipo de bomba es su alta eficiencia, pues suele ser de 85 a 94 %. La pérdida del 10 % incluye todas las que ocurren en las bandas, engranes, cojinetes, empaquetaduras y válvulas. Otra característica de la bomba reciprocante es que la capacidad está en función de la velocidad y es más o menos independiente de la presión de descarga (J, 1990); (Matalx, 2006).



Figura 1.1: Bombas reciprocantes; Fuente: Google.

1.1.1) Clasificación de las bombas reciprocantes.

Las bombas reciprocantes, por lo general, se clasifican por sus características:

- Extremo de impulsión, es decir, potencia o acción directa.
- Orientación de la línea de centros del elemento de bombeo, es decir, horizontal o vertical.
- Número de carreras de descarga por ciclo de cada biela, es decir: acción sencilla o doble acción.
- Configuración del elemento de bombeo: pistón émbolo o diafragma.
- Número de varillas o bielas de mando, es decir, símplex, dúplex o múltiplex (G.K.Sahu, 2000); (Dorothy Hoffman, 1997).

En la (Figura 1.2) se muestra un esquema general de la clasificación.

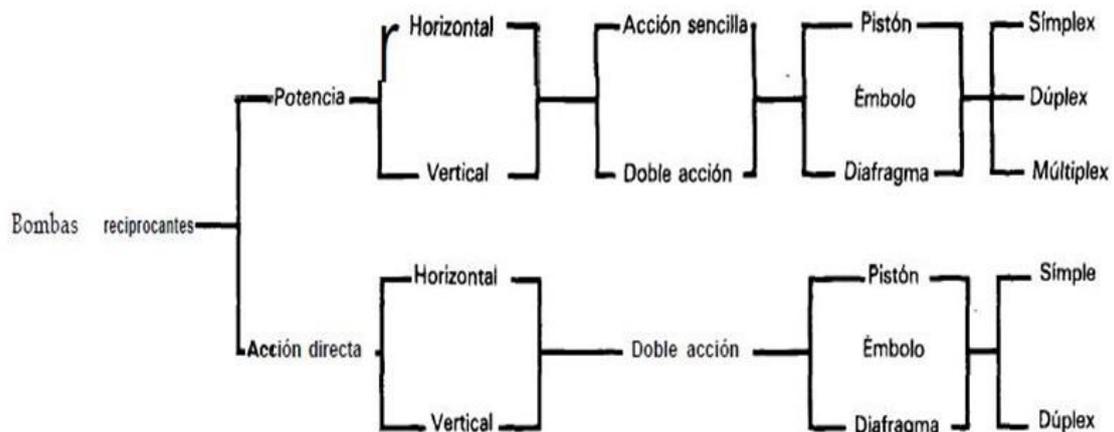


Figura 1.2: Clasificación de las bombas reciprocantes. Fuente: (Borges, 2014).

1.1.2) Bombas de diafragmas.

Una bomba de diafragma o membrana (ver Figura 1.3) como ya se anunció anteriormente es una bomba de potencia, reciprocante, que desplaza un volumen predeterminado de líquido en un tiempo especificado. Esta bomba es de desplazamiento positivo; a veces se la llama de volumen controlado, proporcionadora o para inyección de productos químicos. La propulsión suele ser externa, de velocidad fija o variable. (J, 1990); (Luszczewski, 2010).

La bomba tiene un diafragma flexible, con un lado en contacto directo con el líquido de proceso; se pueden utilizar uno o más diafragmas que pueden ser planos o configurados, las de múltiples diafragmas operan bajo el mismo principio que las de simple diafragma, estas cuentan con múltiples cámaras y en cada una de ellas un diafragma de forma que cuando una membrana disminuye el volumen de su cámara respectiva, la otra membrana aumenta el volumen de la otra cámara y viceversa. Los extremos de líquido, válvulas y mecanismos de ajuste de carrera son los principales componentes de las bombas de diafragmas, permiten que sean de cero fugas, con insensibilidad del caudal a los cambios en la presión, gran precisión de los ajustes de flujo y la posibilidad de separar la cámara de bombeo del resto de la bomba. La acción de estas bombas puede ser:

- Eléctrica, mediante un motor eléctrico, en cuyo caso se dice que es una electrobomba. Sin embargo, hay otras electrobombas que no son bombas de diafragmas.
- Neumática, mediante aire comprimido, en cuyo caso se dice que es una bomba neumática. La mayoría de las bombas neumáticas son bombas de membranas.

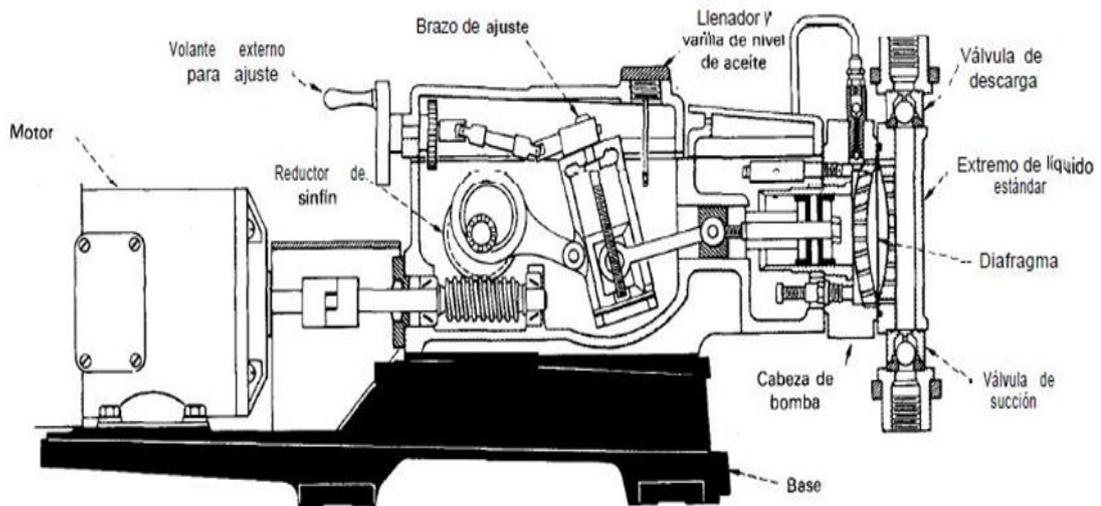


Figura 1.3: Bomba de diafragma con acoplamiento hidráulico. Fuente (*Borges, 2014*).

Para mover ácidos corrosivos o contaminantes para los que no se permiten fugas, una opción, algo más costosa son las bombas dosificadoras de diafragmas. En estas bombas, el diafragma actúa como interconexión entre el émbolo y el líquido de proceso. El émbolo se mueve en un cilindro, pero en lugar de desplazar directamente el líquido de proceso, acciona un diafragma con el cual se transmite energía. En el lado opuesto del diafragma, se succiona una cantidad proporcional del líquido del proceso hacia la cámara de desplazamiento y se descarga en cada ciclo del émbolo. Los diafragmas pueden ser de accionamiento mecánico, es decir, con conexión directa con el émbolo o de accionamiento hidráulico. Este último está equilibrado entre dos líquidos a fin de aminorar los esfuerzos en el diafragma y permitir presiones de descarga más elevadas. (*Antonio Viedma Robles, 1997*); (*Nesbitt, 2006*).

Para asegurar la exactitud del extremo de líquido de accionamiento hidráulico, se debe mantener el volumen adecuado de líquido en la cámara hidráulica. A menudo, se instala un sistema de tres válvulas para mantener el líquido hidráulico libre de aire o gases atrapados y para proteger contra una presión excesiva los líquidos hidráulicos y de procesos. (*Nelik, 2012*); (*Merle C. Potter, 2002*).

Extremos de líquido:

Los extremos de líquido, llamados a veces cabeza pared reactante o extremo mojado incluyen todas las piezas que contienen o están en contacto en alguna forma con el líquido que se bombea.

En una bomba con diafragma de accionamiento mecánico (Figura 1.4 a), el extremo de líquido incluye el diafragma, cámara de desplazamiento del diafragma, válvulas de retención de succión y descarga y extremo de líquido.

En una bomba con diafragma de accionamiento hidráulico (Figura 1.4 b), c) el extremo del líquido incluye uno o más diafragmas, la cámara de desplazamiento del diafragma, válvulas de retención de succión y descarga, el extremo de líquido y, a veces, un líquido intermedio (Volk, 2013); (Paresh Girdhar, 2011).

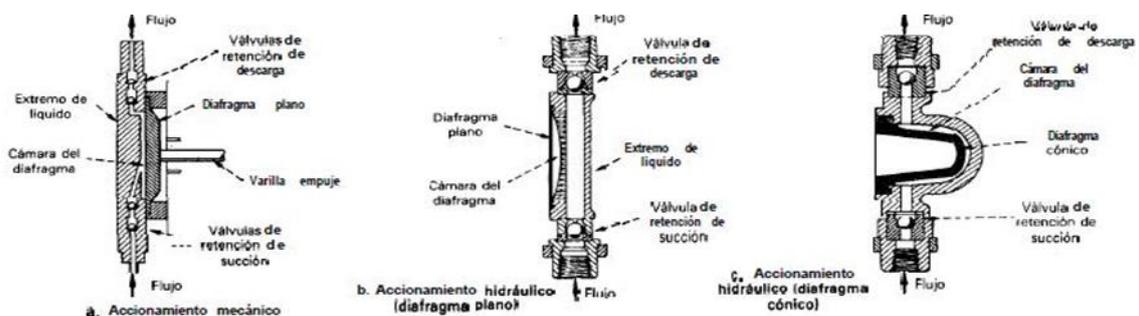


Figura 1.4 Bombas con accionamiento mecánico e hidráulico. Fuente (Borges, 2014).

Diafragmas:

Los diafragmas de accionamiento hidráulico pueden aislar y transmitir el movimiento hidráulico de un líquido a otro. Los diafragmas deben soportar flexiones máximas con esfuerzos inferiores a su límite de resistencia, sin que importe la longitud de la carrera y deben ser de suficiente espesor y densidad para que no penetre el líquido en ellos. En un diafragma con accionamiento hidráulico se producirán esfuerzos más bajos y uniformes que en uno de accionamiento mecánico (Rex Miller, 2011); (Warren E. Rupp).

El diafragma doble produce una cámara intermedia llena con líquido que transmite el movimiento entre los extremos de bombeo y de potencia. El líquido intermedio debe ser compatible con los líquidos del proceso y el hidráulico. La

cámara puede tener una abertura a fin de introducir una sonda para detectar una falla en el diafragma. La mayor parte de las bombas tienen diafragmas sujetos directamente en ellas por el extremo de líquido. Pero, en servicios con temperaturas extremas con mucha contaminación o con materiales explosivos, se pueden utilizar diafragmas dobles sencillos de montaje remoto (separados). Los diafragmas sencillos y los primarios en las bombas de doble diafragmas tienen un componente llamado placa cóncava para evitar la flexión excesiva. Algunos diafragmas absorben la energía durante la carrera de descarga y la liberan durante la carrera de succión a fin de que la bomba tenga altura de aspiración adicional (Gallimard, 2012).

1.1.2.1) Bombas de diafragmas de discos.

El diafragma de estas bombas, que suele ser de tetrafluoretileno (TFE), se flexiona entre dos placas de soportes cóncavas, que tienen agujeros para la circulación. Estas placas, llamadas a veces placas de contornos, retienen el diafragma y evitan su desgarramiento con altas presiones. La Figura 1.5 muestra una bomba con diafragma de disco de accionamiento hidráulico.

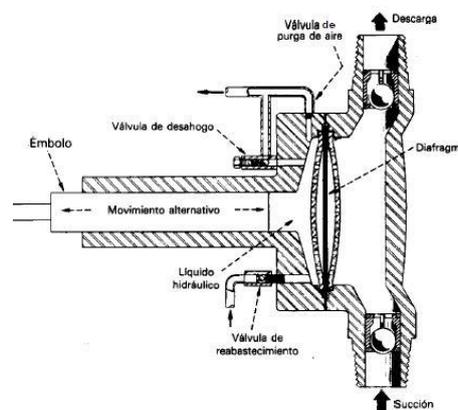


Figura 1.5: Bomba con diafragma de disco con accionamiento hidráulico. Fuente: (Borges, 2014).

Este sistema elimina el problema de las fugas de fluidos por los sellos del émbolo y es eficaz para bombear líquidos corrosivos, como los ácidos. Su empleo principal es para líquidos en aplicaciones, donde no se permite la mínima fuga. (Warren E. Rupp); (Rayner, 1995).

Sin embargo, este tipo de bomba puede ocasionar problemas cuando se manejan fluidos viscosos o pastas aguadas. Con fluidos viscosos ocurre una

caída de presión notoria en los agujeros de flujos en las placas cóncavas, que a menudo producen cavitación en la succión. La formación de burbujas de gas en el fluido reduce la exactitud de la bomba a menos de un grado aceptable.

1.1.2.2) Bombas con diafragma tubular.

En estas se esgrime un émbolo recíprocante como el descrito, pero se emplea un diafragma tubular de elastómero que se dilata o se contrae con la presión ejercida por el fluido hidráulico. La contracción o la dilatación del diafragma combinado con la acción de las válvulas de retención, de succión y descarga, envían un impulso de líquido dosificado por la bomba, así como se reducen los problemas de cavitación porque no se utilizan placas cóncavas en el lado del proceso del diafragma. (Sumbramaya, 2013).

1.1.2.3) Otras configuraciones de diafragmas.

Otra configuración es con diafragma doble de disco, hecho de TFE. Este diseño, con la seguridad inherente del diafragma doble, es adecuado para manejar disolventes y productos químicos que atacan los materiales elastoméricos. Su desventaja principal es que la construcción de las piezas metálicas puede ser costosa.

Todos estos diafragmas se utilizan en diversos servicios en las industrias de procesos químicos. La selección del tipo idóneo para cualquier aplicación depende de las características del fluido que se maneja, la cantidad permisible de mantenimiento, aspectos de seguridad y costo del sistema deseado. Además de los diversos mecanismos de bombeo se fabrican muchos mecanismos de accionamientos para transmitir la fuerza motriz con toda la eficiencia que lo permite la aplicación. (Gallimard, 2012).

1.1.2.4) Principales tipos de válvulas en las bombas de diafragmas.

Para desahogar, compensar o purgar el sistema hidráulico las bombas de diafragmas con accionamiento hidráulico pueden incluir las siguientes válvulas:

1. *Válvula de desahogo de presión:* 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.

También descarga el sobrante de aceite que podría entrar al sistema hidráulico, si hay agotamiento de aceite en el sistema de succión.

2. *Válvula compensadora de vacío*: 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, por cambio de temperatura o por cualquier válvula de purga (sangría). Si es del tipo correcto y está bien ajustada, permite que la bomba logre máxima altura de aspiración. Si está graduada para una presión de apertura muy baja, el aire disuelto en el aceite hidráulico se puede desprender y producir menor capacidad y funcionamiento errático de la bomba.
3. *Válvulas de purga (sangrado)*: Suelen estar en el sistema hidráulico para eliminar el aire o vapores que se puedan acumular. Esta válvula puede ser de accionamiento manual o automático cuando funciona la bomba.
4. *Válvulas de retención*: 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.
5. *Válvula de bola o de no retorno*: 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, para permitir el paso en un solo sentido. La bola está guiada por las paredes del cuerpo de la válvula. (Micheal D. Holloway, 2012).

1.1.2.5) Criterios para la selección de una bomba de diafragma.

Las bombas dosificadoras de diafragmas se seleccionan para aplicaciones en donde se necesitan las siguientes características:

- Hay que evitar las fugas o la contaminación cruzada entre el líquido que se bombea y otros fluidos.
- El flujo no se debe alterar con las variaciones en la presión de descarga.

- Se requiere gran exactitud para controlar la capacidad de salida.
- La cámara de bombeo debe estar separada del resto de la bomba.

1.1.2.6) Materiales para su fabricación.

Debido a que la bomba de diafragma está exenta de fugas, a menudo se selecciona cuando el líquido que se maneja es corrosivo o abrasivo. Los componentes de la bomba que no están en contacto directo con el líquido se suelen hacer con hierro fundido, acero, aluminio, bronce o plástico. Su tamaño se determina para absorber las cargas y minimizar las tensiones y deformaciones, para mantener la exactitud de la dosificación y resistir las condiciones severas de trabajo. El extremo de líquido presenta un problema muy diferente. Los factores a considerar son: experiencia en la operación, uso temporal o por largo tiempo, costo, características del líquido tales como temperatura, concentración de sólidos o gases arrastrados y el grado de protección requerido. (A. Bertuco, 2001); (Tooley, 2009).

Los fabricantes de bombas tienen datos de la resistencia a la corrosión de diversos materiales que solo se publican como guía y están basados en la experiencia del fabricante y los datos de pruebas de usuarios y proveedores de materiales. Una ligera corrosión que se puede permitir en una instalación, sería inaceptable en otra. El mecanismo de la corrosión es tan complejo y las condiciones que influyen en la capacidad de un material para que resulte económico o adecuado son tan variables, que no se suelen hacer recomendaciones en cuanto a la resistencia. Ya que el usuario conoce los productos químicos y las condiciones de operación y debe ser quien haga la selección final de los materiales.

Las piezas de la bomba en contacto con el líquido bombeado son el extremo de líquido, cubiertas y topes de válvulas, asientos y juntas; con maquinado de precisión para producir un sellamiento que no permita fugas. La corrosión o erosión de sus superficies correlativas anularán el sellamiento.

Los diafragmas también son críticos, pues suelen ser delgados y no tienen tolerancias para la corrosión; además funcionan con elevados esfuerzos. Es esencial seleccionar el material de máximas cualidades. La selección de materiales para otras piezas como el extremo de líquido, cubiertas y topes de

válvulas y otras, quizá no sea tan crítica y se pueden emplear materiales menos resistentes.

1.2) Bombas de diafragmas usadas mundialmente.

1.2.1) Bombas de diafragmas Wilden.

Una de las mayores compañías de fabricación de bombas es la Wilden, sus productos sobresalen por su calidad y eficiencia por encima de otros productores, la fabricación de bombas de diafragmas se encuentra dentro de sus prioridades debido al gran auge que estas tienen actualmente para gran parte de los procesos industriales. (Renedos, 2010).

1.2.1.1) Principio de funcionamiento.

El funcionamiento de las bombas de membrana está basado fundamentalmente en la acción conjunta de cuatro elementos (Figura 1.6):

- Un par de membranas.
- Un eje que las une.
- Una válvula distribuidora de aire.
- Cuatro válvulas de esfera.



Figura 1.6: Bomba de diafragma. Fuente: (Wilden, 2012).

El movimiento alternativo de las membranas genera la succión y la impulsión del producto a través de las válvulas. Este movimiento es producido por aire comprimido, el cual es distribuido a una membrana u otro por la válvula de aire.

1.2.1.2) Clasificación de las bombas de diafragmas Wilden.

Muchas son las características que hacen que este tipo de bombas se empleen en disímiles procesos industriales y que a su vez permitan emplearlas como

sustitución de otras bombas o porque las características del fluido a trasegar lo indiquen. Dentro de estas particularidades se encuentran: Bombas de diafragmas sumergibles y no sumergibles, ampliamente difundidas, capacidad para manejar materiales críticos de una manera confiable y segura, dentro de algunos materiales que esta es capaz de trasegar están (lodos, melazas, etc.) y otros de elevada viscosidad. Estas trabajan libres de aceite y con un funcionamiento en seco, su caudal y altura de elevación son regulables, así como la velocidad y la presión. Un mantenimiento simple y rápido son dos de sus características más importantes por la importancia en la reducción de costos por concepto de reparaciones de estas máquinas. (Liptak, 1993).

Existen tres tipos principales de las bombas de membranas, pueden ser de:

- **Primer tipo:** Las bombas de doble membrana garantizan la máxima seguridad en todas las aplicaciones industriales donde es necesario recurrir a bombas accionadas con aire comprimido o líquido hidráulico.
- **Segundo tipo:** Tiene un dispositivo electromecánico para generar el movimiento. Este método dobla la membrana con una acción mecánica simple y un lado de la membrana está abierto al aire.
- **Tercer tipo:** Cuenta con una o más membranas sin sellar, con el líquido que se bombeará en ambos lados. Las membranas se doblan otra vez, haciendo cambiar el volumen. (Wilden, 2012); (Huerta, 2013).

1.2.1.3) Partes de una bomba de diafragma.

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

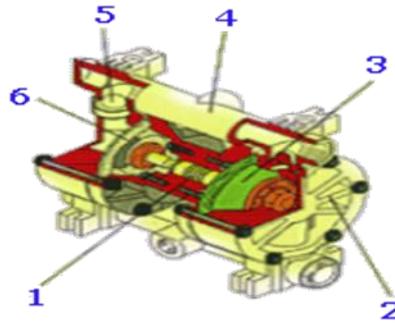


Figura 1.7: Partes de una bomba de diafragma. Fuente: (Wilden, 2012).

Principales ventajas de las bombas de diafragmas Wilden.

- Estas bombas no necesitan un motor eléctrico para su funcionamiento y operan únicamente por aire comprimido.
- No tienen sellos mecánicos ni partes rotatorias.
- Diseño sencillo y robusto.
- No requieren de controles complejos.
- Cuentan con la particularidad de poder construirse en una amplia gama de materiales para que sean química y térmicamente compatibles con el producto a bombear.
- Idóneas para un transporte cuidadoso de líquidos y productos viscosos.
- Pueden trabajar cuando existan válvulas cerradas en la impulsión, la bomba se detiene simplemente; un beneficio importante cuando trabajen en máquinas llenadoras.
- Auto aspirante.

1.2.2) Bombas de Diafragmas ABEL. Gama HM, HMT.

Las bombas de diafragmas del tipo ABEL sobresalen por su gran prestigio en el mercado especialmente por las atractivas características que ofrecen sus diseños. Existen dos grandes gamas de este tipo de bombas, la Gama HM, y la gama HMT.

1.2.2.1) Generalidades, gama HM.

La **gama HM** de bombas de pistón membrana de ABEL ha sido especialmente desarrollada para operaciones que combinan altos caudales con presiones de trabajo elevadas. Su vida útil, increíblemente larga, es uno de los motivos por lo

que este tipo de bombas de pistón de diafragmas gozan de un elevado prestigio a nivel mundial. (Figura 1.8).



Figura 1.8: Rango de operación: hasta 100 m³/h (450 GPM) y 10,0 MPa (1450 psi). Fuente: (Pérez, 2012).

Se encuentran disponibles en modelos de efecto simple o doble. Garantizan altas prestaciones, funcionamiento fiable y, sobre todo, bajos costes de explotación y mantenimiento. Admiten caudales de hasta 100 m³/h, con presiones de trabajo de hasta 10,0 MPa. Las bombas ABEL HM están equipadas con membranas preformadas que mantienen su estabilidad a lo largo de toda la duración de las operaciones de bombeo. El principio de construcción de las bombas ABEL HM se han puesto a prueba en numerosos sectores y con medios muy complicados. Han demostrado una seguridad operativa contrastada y vidas útiles extremadamente largas, tanto de las membranas como del conjunto de las bombas. Las partes de la bomba que entran en contacto con el medio bombeado están construidas en fundición nodular (también disponibles en versiones engomadas), polipropileno, fundición de acero o acero inoxidable. Este modelo de bomba es la mejor elección en procesos críticos, como alimentación a secadores por atomización, o para el transporte de lodos muy abrasivos con granulometrías heterogéneas. Utilizada como bomba de alimentación de filtros prensa con control mediante un sensor de presión, este tipo de bomba de pistón membrana se caracteriza por ser

energéticamente muy eficiente, duradera y de una altísima disponibilidad. También son posibles diseños a prueba de explosión (ATEX). (Figura 1.9).



Figura 1.9: Diseño a prueba de explosión de ABEL. Fuente: (Pérez, 2012).

La Figura 1.10 permite escoger un tipo de gama de bomba determinada en función del caudal y la presión requerida:

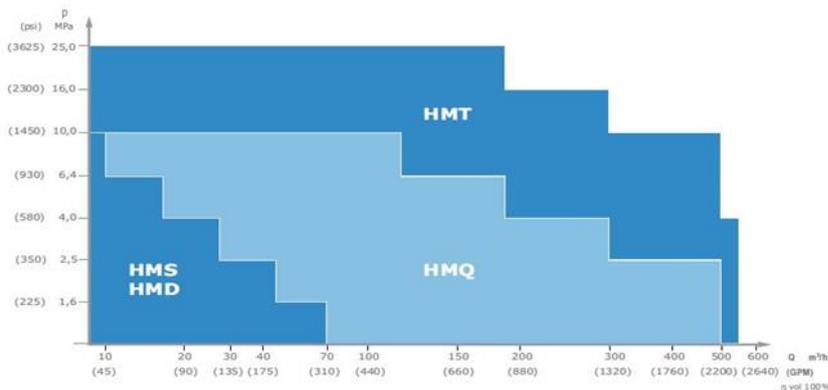


Figura 1.10: Selección de una Bomba HMS, HMT, HMQ. Fuente: (Pérez, 2012).

Áreas de aplicación:

- Para transporte de lodos.
- Para alimentación de reactores.
- En la industria minera.
- En plantas de tratamientos de aguas residuales.
- En la industria química y cerámica.

1.2.2.2) Generalidades, gama HMT.

La **gama HMT** de pistón membrana tiene un principio de funcionamiento sencillo y trabaja a baja velocidad, es muy segura, incluso cuando funciona en seco, y puede utilizarse con caudales de hasta 500 m³/h. (Figura 1.11).



Figura 1.11: Rango de operación: hasta 600 m³/h (2640 GPM) y 25,0 MPa (3625 psi). Fuente: (Pérez, 2012).

Las bombas alternativas de desplazamiento positivo pueden producir irregularidades en el caudal, sobre todo en las aplicaciones con altas presiones de trabajo, esto ocasionaría pulsaciones que se transfieren a la base de la bomba y a las tuberías de conexión. La gama HMT de ABEL utiliza un reductor tríplex con un cigüeñal conectado a tres pistones con un desfase de 120°, de este modo se produce un flujo optimizado y más uniforme que el que pueden ofrecer las unidades de construcción simple. Las bombas ABEL HMT ofrecen altas prestaciones, pulsaciones reducidas y gran facilidad de manejo a presiones de trabajo de hasta 25,0 MPa. Así pues, evitan daños en la cimentación de la bomba y en el sistema de tuberías, con lo que incrementan la seguridad operativa de la planta.

Las bombas HMT también están provistas de membranas preformadas, con las mismas especificaciones que el resto de la gama HM de ABEL. La extraordinaria resistencia de estas membranas especiales, se ponen de manifiesto a lo largo de todo el proceso de bombeo, sin que aparezca el más mínimo problema de tensión excesiva o contracción. La amplia experiencia con décadas de construcción, han llevado a establecer nuevos estándares en tecnología y equipos de bombeo. Muchas industrias de todo el mundo consideran que estos equipos son los verdaderos líderes del mercado.

Las bombas de la gama HMT disponen de válvulas cónicas API y se encuentran disponibles en versiones de flujo invertido para el transporte de lodos no estables con tendencia a la sedimentación. Las partes en contacto con el producto de bombeo están construidas en fundición nodular, fundición de acero

o distintas calidades de acero inoxidable. Las bombas HMT de ABEL se emplean típicamente en aplicaciones con altas presiones y requisitos de transporte exigentes, como transporte por tubería, alimentación de autoclaves y reactores o alimentación de secadores por atomización.

1.3) Bomba Máster KARL KROYER MP 2C120.

La bomba maestra KARL KROYER MP 2C120 (ver anexo No1) perteneciente a la empresa Glucosa Cienfuegos se emplea para bombear la leche de almidón acidificada y más tarde precalentada, por el convertidor, en un flujo constante a chorro pulsante de 7,2 m³/h, con la presión requerida (30 kgf/cm²), 430 psi.

1.3.1) Descripción y modo de operación.

Dos bombas de diafragma accionadas hidráulicamente con sus válvulas hacen avanzar la leche de almidón cuando el diafragma de goma se mueve hacia adelante y hacia atrás entre las dos partes de la casilla del diafragma. (Figura 1.12).

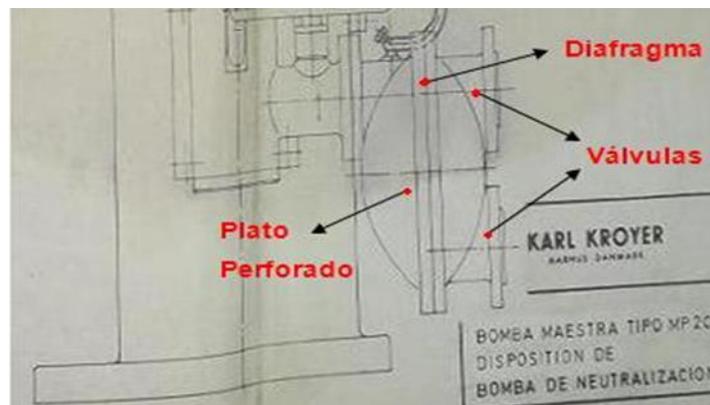


Figura 1.12: Bomba Maestra KARL KROYER MP 2C120. Fuente: (Borges, 2014).

Empleando este principio, se evita que la leche de almidón, que es corrosiva y deteriorante, toque las partes móviles de la bomba, como las superficies deslizantes, los prensaestopas, etc. Es, además, una ventaja que todas las partes que entran en contacto con la leche de almidón, estén fabricadas de un material resistente a la corrosión. Los movimientos de diafragma se producen hidráulicamente a base de aceite, transmitiendo las carreras del émbolo al diafragma. El émbolo está activado mediante un cigüeñal el cual está

accionado por la bomba del motor sobre una transmisión a rueda de engranes y una transmisión por correa en "V".

Es muy importante que no haya acumulaciones de aire en las cámaras de aceite y de la leche de almidón, pues dichas acumulaciones ocasionarán reducciones de la capacidad de la bomba. Sin embargo, se ha construido la bomba de tal modo que las acumulaciones de aire, bajo condiciones normales, se escapan automáticamente. Si fuera necesario, es posible ventilar por los grifos debajo de los manómetros, los grifos están provistos de un barreno en forma de T para esta operación.

Es posible cambiar la capacidad de la bomba maestra y consiguientemente de la instalación de conversión. Los límites en las variaciones de velocidad dependen principalmente del convertidor y el producto que se desea fabricar. El cambio de capacidad se efectúa normalmente reemplazando la polea del motor motriz con una más grande o más pequeña, hecho que ocasiona un cambio en el número de revoluciones. En el caso de desear frecuentes cambios en la capacidad, se recomienda insertar un cambio por engranes entre el motor y la transmisión a polea.

Además de la lubricación, el cambio de aceite y la limpieza, el mantenimiento de la bomba maestra se limita esencialmente a una inspección regular de la parte interior de las válvulas de almidón, vale decir, los discos de las válvulas, los asientos de las válvulas, los conos de las válvulas y el guía delantero de la válvula. Si estas piezas presentan señales de desgaste o corrosión, hay que sustituirlas, un ejemplo lo constituye el cambio de diafragma que se debe realizar con una periodicidad de seis meses. Existen los siguientes puntos de lubricación en la Bomba Maestra:

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

1.3.2) 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

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 1.13).

d₁: 170 mm d₂: 450 mm

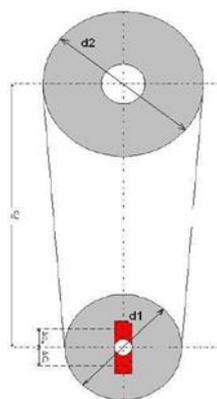


Figura 1.13: Correas trapezoidales de la transmisión. Fuente: (Borges, 2014).

1.3.3) Plato perforado de respaldo al diafragma.

Situado adyacente al diafragma (3) se encuentra el plato perforado (4:5) que le sirve de apoyo a este y además a través de los orificios circula la materia prima de la producción, por consiguiente, toda la presión ejercida sobre el diafragma

(Figura 1.14) recae sobre el plato provocando roturas frecuentes de este componente tan vital dentro del conjunto completo de la bomba. Los platos originales son del material Bronce AMPCO, 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: Catálogo Bronce AMPCO.

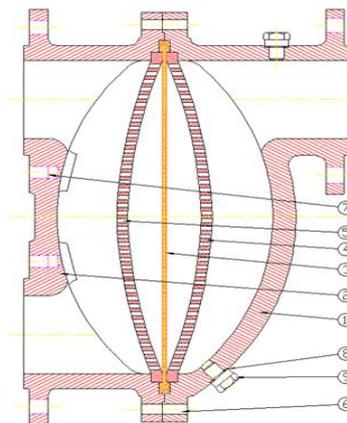


Figura 1.14: Diafragma con sus correspondientes platos perforados. Fuente: (Borges, 2014).

Denominación de las partes de la Figura 1.14

1. Cuerpo de la válvula de escape. (1)
2. Pernos del soporte. (7)
3. Diafragma. (3)
4. Plato Perforado (1) de respaldo al diafragma. (4)
5. Plato Perforado (2) de respaldo al diafragma. (5)

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. (Ampco metal excellence in engineered alloys, 2013). En estos momentos se encuentran situados en la bomba platos de acero comercial. La Figura 1.15 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 1.15: Plato perforado Bomba Master MP 2C120 y posición de las grietas y los cordones de soldadura durante su reparación. Fuente: (Borges, 2014).

1.4) Principales modelaciones por el método de elementos finitos.

Numerosos trabajos de investigación han estudiado la distribución de tensiones en secciones con discontinuidades geométricas y la relación con el factor teórico de la concentración del estrés utilizando el método de elementos finitos. Estos trabajos han tratado temas como la influencia de la longitud de las piezas en el factor en placas ortotrópicas rectangulares; el comportamiento del factor

de concentración de tensión en ejes cortos con cambios de sección bajo cargas de flexión; el factor teórico de concentración de tensión en partes planas sometidas a tensión con ranuras en "U"; la estimación del factor de concentración de tensión teórica para una placa plana con dos orificios sometidos a cargas de tensión. Otros estudios han comparado la distribución del estrés mediante la aplicación de tres métodos: teoría de la elasticidad, análisis de elementos finitos y técnicas experimentales. (Feras Darwish, 2012); (A.R. Torabi, 2014).

Los efectos de tamaño relacionados con muestras circulares implican que la resistencia de la estructura disminuye a medida que aumenta el radio del agujero. En este marco, las pruebas de discos brasileños se llevan a cabo en muestras frágiles que contienen un agujero circular. Al considerar dos polímeros diferentes, a saber, Polimetilmetacrilato (PMMA) y Poliestireno de uso general (GPPS), respectivamente, se mecanizaron y probaron cinco radios de muestras diferentes para cada material, manteniendo baja la relación de diámetro de orificio a disco para reproducir un infinito geometría. Bajo este supuesto, la relación analítica para el campo de tensión y el factor de intensidad de tensión se pueden implementar sin pérdida de precisión. La mecánica de fractura finita acoplada (FFM) se aplica luego para atrapar las tensiones de falla registradas, lo que permite una descripción completa de los efectos experimentales de tamaño. Por el contrario, el radio más pequeño conduce a una geometría localmente negativa, que abre la discusión sobre la estabilidad de la propagación de grietas en placas con muestras circulares bajo cargas biaxiales genéricas. (Abdulrazaq A. Araoye, 2016).

Los elementos, que se utilizan para fines de mecanizado ofrecidos con irregularidades geométricas, que alteran la distribución de la tensión y, por lo tanto, el estado de tensión en las regiones concentradas de tensión no puede describirse en los elementos de la máquina. Por lo tanto, el método de elementos finitos (FEM) es una herramienta importante que se utiliza para analizar la tensión. El método de elementos finitos (FEM) es un método de análisis numérico para esfuerzos y deformaciones en estructuras de cualquier geometría dada. La estructura se discretiza en los llamados "elementos finitos" conectados a través de nodos. El tipo, la disposición y el número total de elementos afectan la precisión de los resultados. Con frecuencia se utiliza para

resolver los difíciles problemas de ingeniería, principalmente en los campos de la ingeniería mecánica, civil y aeronáutica. Además, es una solución de varios tipos de problemas de ingeniería como la conducción de calor, dinámica de fluidos, electricidad y campos magnéticos, análisis de estructuras, mecánica de sólidos, dinámica, análisis térmico, análisis eléctrico, biomateriales. Las aleaciones de magnesio son mezclas de magnesio con otros metales (llamadas aleaciones), a menudo silicio, cobre, aluminio, zinc, manganeso, tierras raras y circonio. Mientras que un polímero de etileno es un termoplástico parcialmente cristalino, que es resistente a los químicos y la humedad, tiene buenas propiedades aislantes y se usa especialmente en empaques y aislamientos.

La aleación de magnesio y el polietileno son ligeros y tienen excelentes propiedades debido a que tienen una amplia gama de aplicaciones. La aleación de magnesio encuentra muchos usos en el campo de los automóviles y los aviones. Considerando, polietileno aplicado en equipos, electrodomésticos, cubiertos, tanques de combustible, contenedores, tanques agrícolas, barreras de carreteras y tanques de agua y aguas residuales. En general, la placa rectangular que tiene un orificio central es una estructura común, pero la concentración de tensión alrededor del orificio hace que el material sea susceptible de fallar a través de la región del orificio.

Existen muchas soluciones para reducir la concentración de estrés, lo que incluye proporcionar muestras de alivio, orificios, etc. Muchas actividades de investigación se llevan a cabo en este campo por diferentes investigadores analizaron una placa rectangular con un orificio circular en el centro utilizando un análisis de elementos finitos. (Arora., 2015).

Observaron que el SCF (sistema continuo de flujo) aumenta con el aumento en la relación T / D , mientras que el estrés de Von Mises disminuye con el aumento en la relación T / D . estudiaron los SCF dependiendo de la relación de dimensión definida como el diámetro del orificio de la viga al ancho de la viga. Investigaron una placa con un orificio circular aplicado a una tensión uniforme y examinaron la desviación en los resultados obtenidos a través de diferentes mallas. Además, Brahmbhatt analizó una placa rectangular con un orificio elíptico central utilizando ANSYS.

Llegaron a la conclusión de que valores más bajos de relación de aspecto, factor de intensidad de tensión da menos error. (Shivlingesh, 2016); (D. Brahmabhatt, 2015); (G. C. Mekalke, 2012).

Jain calculó los esfuerzos y la deflexión en las placas isotrópicas y ortotrópicas rectangulares que tienen un orificio circular central bajo carga estática transversal, analizó la tensión alrededor del orificio circular formado por diferentes materiales utilizando ANSYS. Descubrió la concentración de la tensión siempre se lleva a cabo en el límite del orificio en una placa de ancho finito con un orificio central debajo de la carga estática, la introducción de orificios auxiliares en ambos lados con una placa compuesta redujo el factor de concentración de tensión, observó que la relación de tensión máxima aumenta con el aumento del ángulo de oblicuidad. Por lo tanto, hoy en día, existe un requisito de información sobre la concentración del estrés en el diseño del componente de la estructura. Aunque, la mayoría de las grietas de servicio ocurrieron en el área de concentración de la tensión en el borde de un agujero. (Pravin Pawar, 2016); (Mirzana, 2016); (B. Mallikarjun, 2012).

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

2.1) Características del diafragma.

El diafragma construido de POLITETRAFLUOROETILENO (PTFE), 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 como lo mostrado en la figura 2.1:



Figura 2.1: Diafragma de PTEF empleado en la bomba master. Fuente: Elaboración propia.

2.2) Simulación del diafragma con plato.

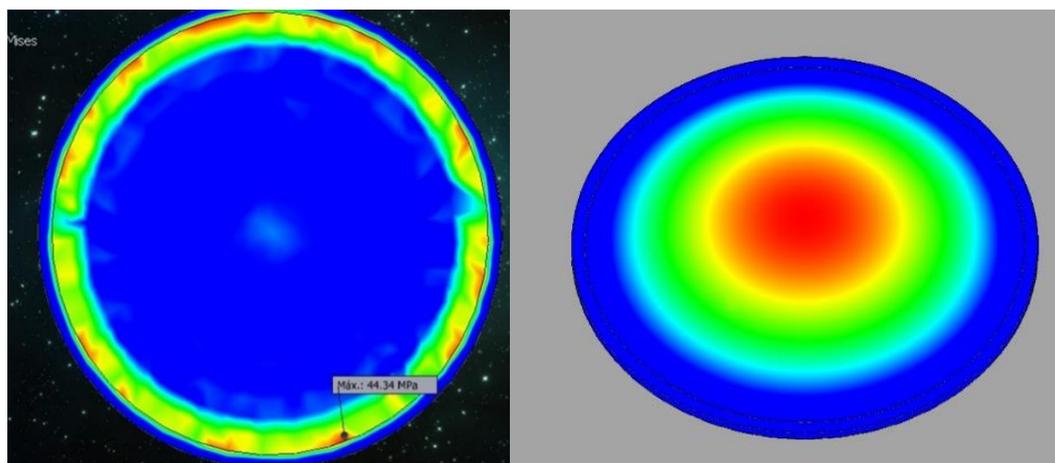
Para poder realizar un análisis teórico de las tensiones y las deformaciones que sufre el diafragma en el instante que este hace contacto con el plato de respaldo en el momento donde se obtiene la máxima presión durante el funcionamiento de la bomba, se llevó a cabo un experimento que consiste en hacer un análisis mediante el método de elementos finitos, expresando los valores de forma tabular y gráfica de las tensiones y los desplazamientos en el diafragma para así evitar que la eficiencia de la bomba no baje y el diafragma sufra una rotura. Como se muestra en la figura 2.1.

Partiendo del concepto que la presión inicial ejercida por la bomba provocará una deformación sobre el diafragma hasta el punto de contacto con el plato de respaldo, instante en que la deformación será conjunta, se procede a simular por el método de los elementos finitos para obtener los valores de deformación y tensiones del plato y del diafragma.

En la figura 2.2 se pueden observar las huellas dejadas por los agujeros del plato en el diafragma reafirmando el contacto entre ellos en el proceso de bombeo como se ha explicado anteriormente.



Figura 2.2: Huella dejada por el contacto del diafragma con el plato. Fuente: Elaboración propia.



a)

b)

Figura 2.3: Modelación por el método de elementos Finitos de las tensiones a) y el desplazamiento b) del diafragma para el plato de respaldo original. Fuente: Elaboración propia.

Partiendo de esta modelación se construyen las gráficas de deformación y tensiones a lo largo del diámetro tomando valores punto a punto como se muestra en la figura 2.4, 2.5.

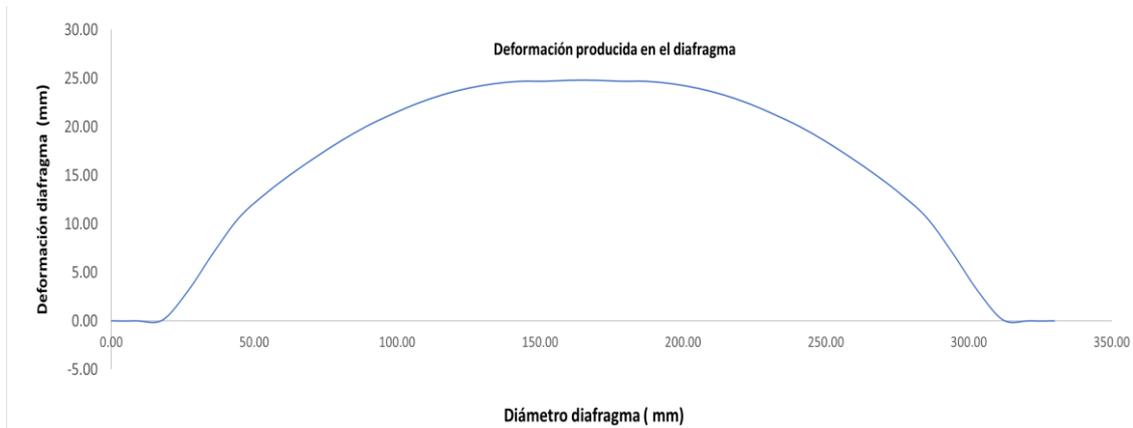


Figura 2.4: Valores de deformación del diafragma en función del diámetro.
Fuente: Elaboración propia.

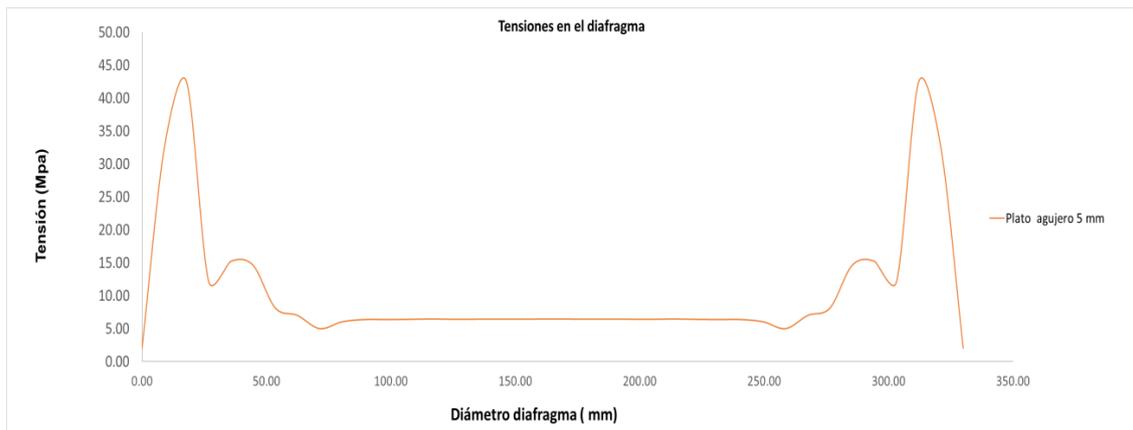


Figura 2.5: Valores de tensiones en el diafragma en función del diámetro.
Fuente: Elaboración propia.

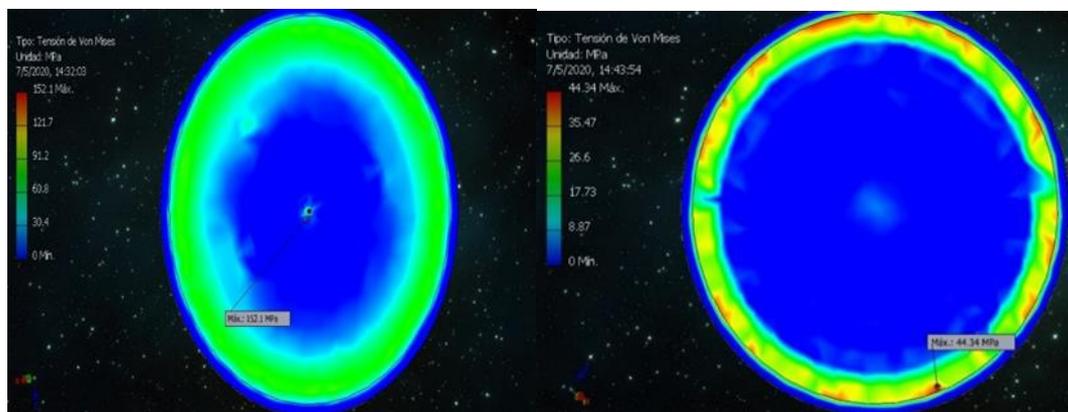
2.3) Simulación del diafragma con plato de agujero único.

Para realizar la simulación del plato con un único agujero se llevó a cabo mediante el método de elementos finito, en el programa Invento 2017. Para mayor exactitud en los resultados de la simulación se modelaron las piezas en su conjunto, o sea plato y diafragma ensamblados, utilizando la presión real con que trabaja la bomba, variando el diseño del plato (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.

2.3.1) Tensiones y deformaciones en el diafragma.

En la figura 2.6 se muestra la modelación realizada para el plato 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 del plato. 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 2.6: Imagen de la tensión del plato con un único agujero de 5mm a) y del diafragma correspondiente a dicho plato 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 2.1 se presenta una muestra de los resultados obtenidos, el resto de ellos se presentan en el anexo 2.

Tabla 2.1: Tensiones y desplazamientos del diafragma con platos de un único agujero de 5 mm, 20 mm y 40 mm. Fuente: Elaboración propia.

Plato agujero 5 mm			Plato agujero 20 mm			Plato agujero 40 mm		
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

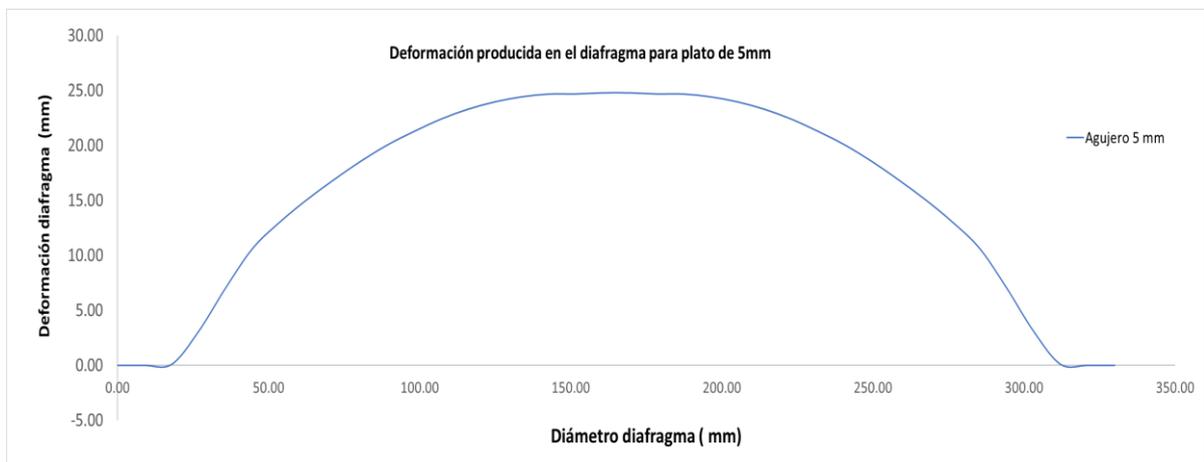


Figura 2.7: Gráfica que representa los valores de deformaciones del diafragma obtenidos en la simulación en conjunto con el plato de agujero único de 5mm. Fuente: Elaboración propia.

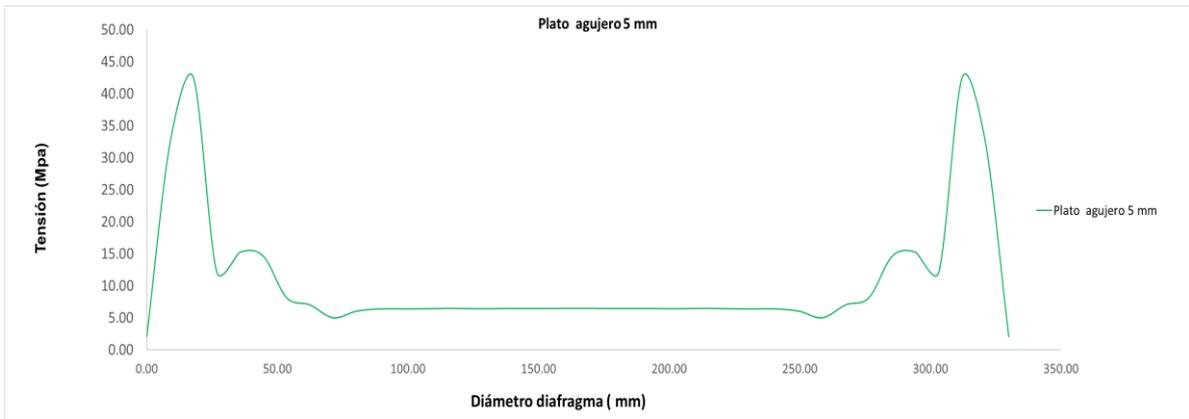


Figura 2.8: Gráfica que representa los valores de tensiones obtenidos en el diafragma en la simulación realizada en conjunto con el plato correspondiente de 5 mm. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.9: Gráfica que representa los valores de deformaciones del diafragma obtenidos en la simulación en conjunto con el plato de agujero único de 20mm. Fuente: Elaboración propia.

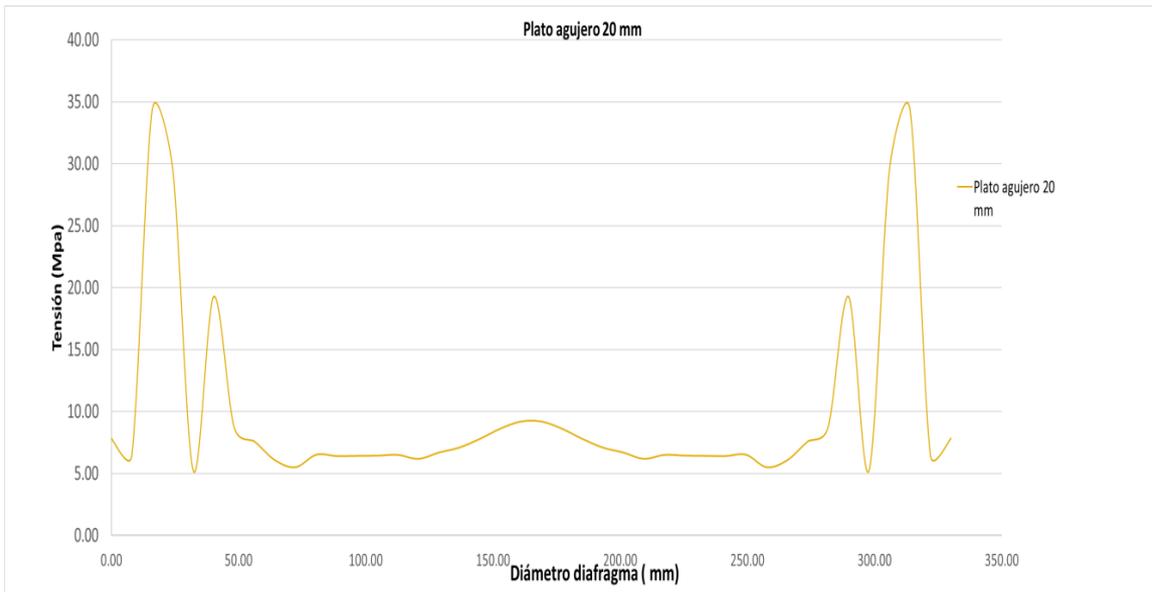


Figura 2.10: Gráfica que representa los valores de tensiones obtenidos en el diafragma en la simulación realizada en conjunto con el plato correspondiente de 20 mm. Fuente: Elaboración propia.

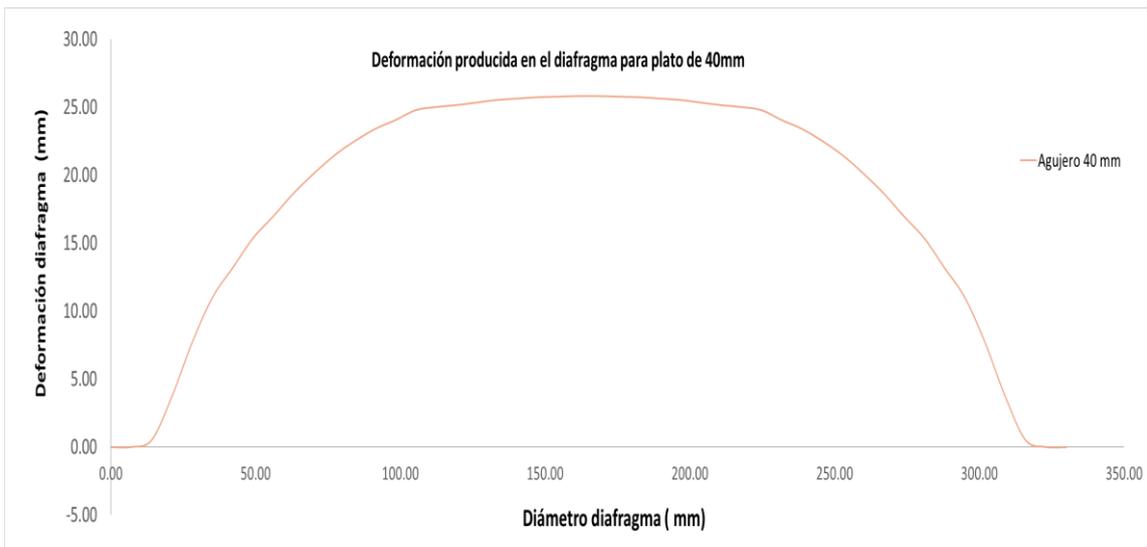


Figura 2.11: Gráfica que representa los valores de deformaciones del diafragma obtenidos en la simulación en conjunto con el plato de agujero único de 40mm. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.12: Gráfica que representa los valores de tensiones obtenidos en el diafragma en la simulación realizada en conjunto con el plato 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 2.13.

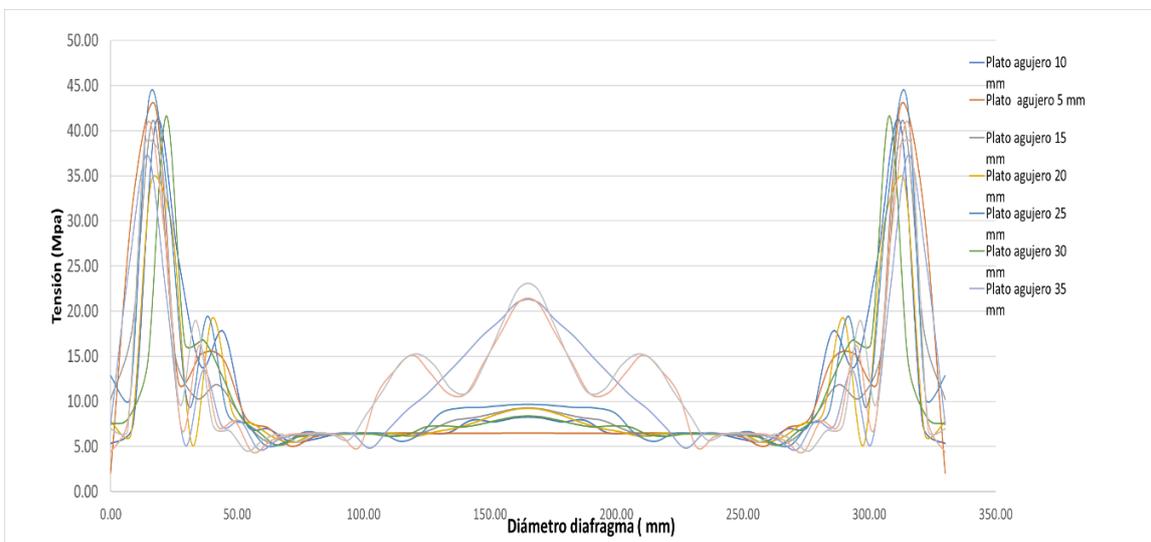


Figura 2.13: Gráfico que muestra el comportamiento de las tensiones en los diafragmas al ir variando el diámetro del agujero. Fuente: Elaboración propia.

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.

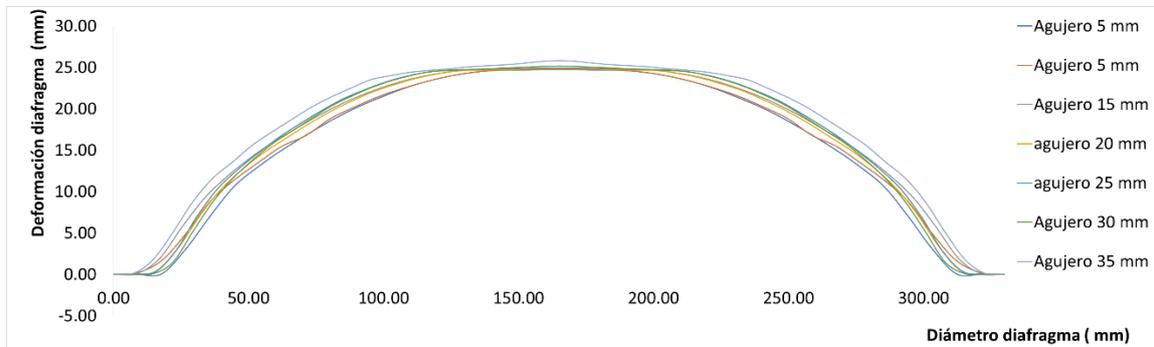


Figura 2.14: Comportamiento de las deformaciones lo largo del diámetro. Fuente: Elaboración propia.

2.3.2) 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 el plato de respaldo que sirve como muro para evitar que el diafragma sufra una rotura, como muestra la figura 2.15.

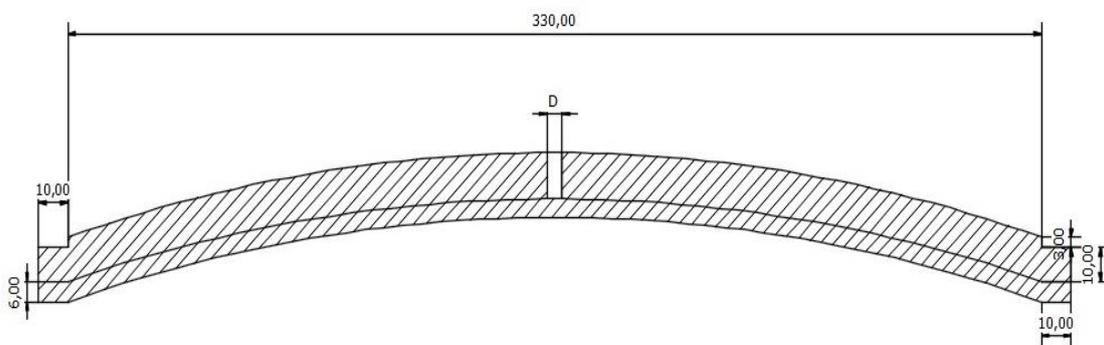


Figura 2.15: Plano del contacto del diafragma con el plato. Fuente: Elaboración propia.

En el momento que el líquido ejerce la máxima presión será el momento en el que el diafragma ejercerá la máxima presión sobre el plato, 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 2.16.

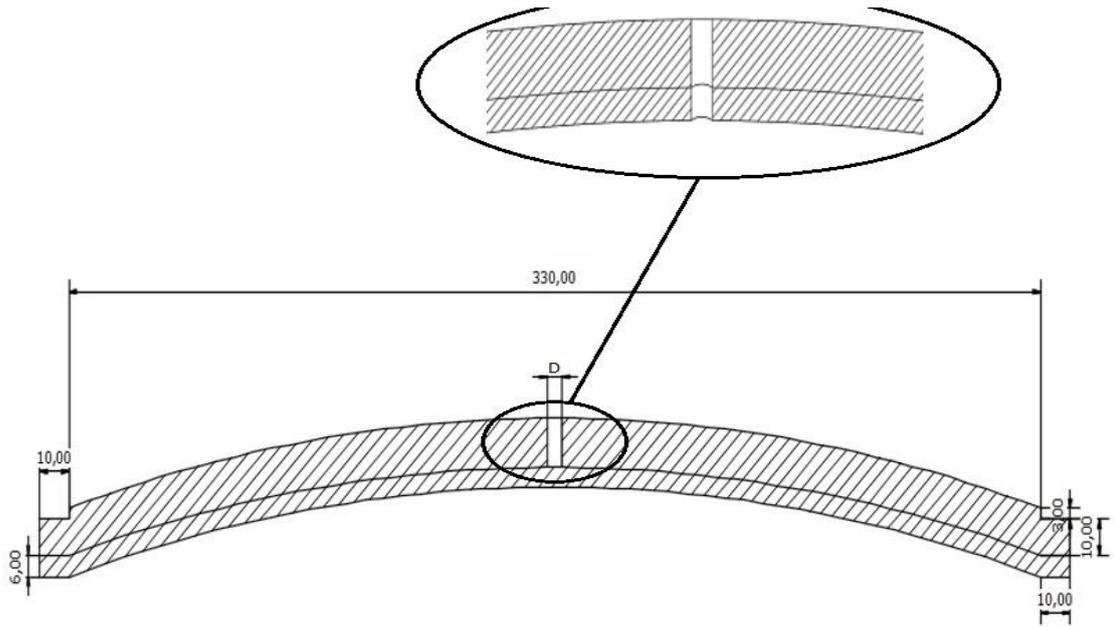


Figura 2.16: Deformación del diafragma en el momento del contacto con el plato ejerciéndose la máxima presión. Fuente: Elaboración propia.

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 2.17 se muestra el gráfico de deformaciones del diafragma dentro del agujero para diferentes diámetros de manera más detallada:

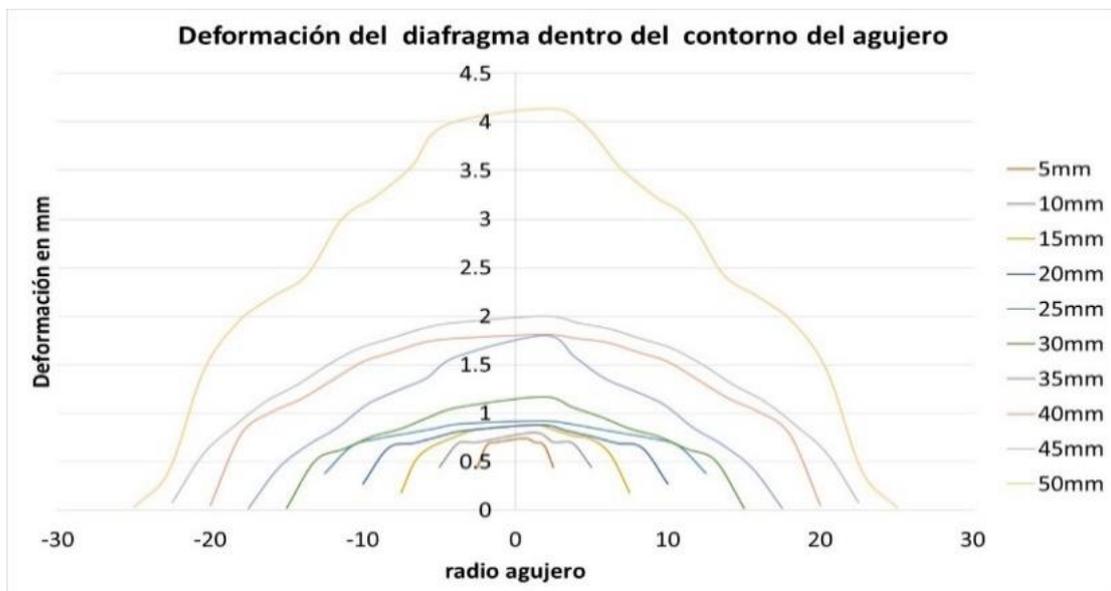


Figura 2.17: Deformación del diafragma dentro del agujero. Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III: Modelación por el método de los elementos finitos del plato de respaldo con diferentes configuraciones de agujeros.

Para realizar la modelación por el método de los elementos finitos es necesario determinar el tipo de material que se empleará.

3.1) Determinación experimental de la composición química del material del plato.

Para la determinación de la composición química del material del plato se empleó un Espectrómetro de emisión óptica portátil PMI Master PRO perteneciente a la Central Termoeléctrica de Cienfuegos, "Carlos Manuel de Céspedes".

El PMI Máster PRO (ver figura 3.1) 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.

Los datos son fácilmente visualizados y el instrumento se puede controlar a través de un panel "touch screen" usando software basados en paquetes de Windows. El panel touch screen permite utilizar el software incluso en ambientes adversos.

Dependiendo de las necesidades del usuario el instrumento cuenta con tres modos de funcionamiento diferentes, uno para clasificación de materiales, uno para hacer una identificación de grado y otro para hacer un análisis completo de los metales.



Figura 3.1: Espectrómetro de emisión óptica portátil PMI Master PRO. Fuente: Central Termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes”.

Para efectuar el experimento inicialmente se realizó la preparación de la superficie con material abrasivo y limpieza con alcohol al 90% como se muestra en la figura 3.2:

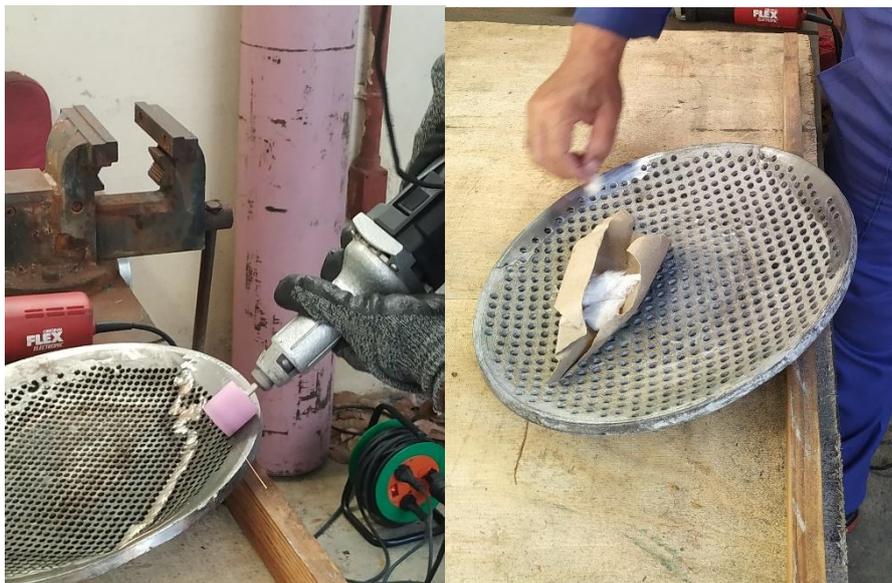
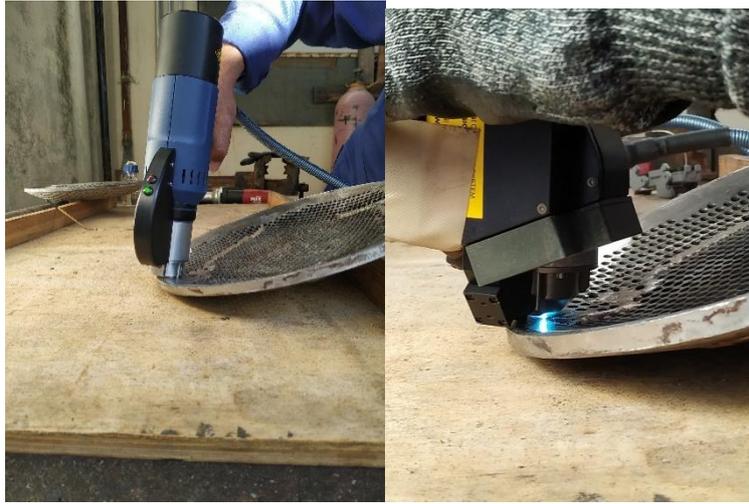


Figura 3.2: Preparación de la superficie del plato. Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizada la correcta limpieza de la superficie se procede a las mediciones experimentales. Para ello se realizaron cinco mediciones por dos métodos diferentes, con argón (gas inerte) y sin argón, empleando en cada caso una pistola de medición diferente como se muestra en la figura 3.3.



a)

b)

Figura 3.3: Pistolas de medición empleadas a) sin argón, b) con argón. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.4: Mediciones realizadas en el plato. Fuente: Elaboración propia.

De las 5 mediciones realizadas una de ella se desecha al ser de calibración según plantea manual del equipo. En la tabla 3.1 se muestran los resultados obtenido para las mediciones sin argón.

Tabla 3.1: Propiedades químicas del metal del plato perforado, experimento sin argón.

PMI Master Pro 13P0189 Optiknr. 13P0189							
Sample: Plato Respaldo. Ac Inox.							
Alloy: FE_930 Mode: PA 1/20/2020 10:43:47 AM							
	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 3.5:

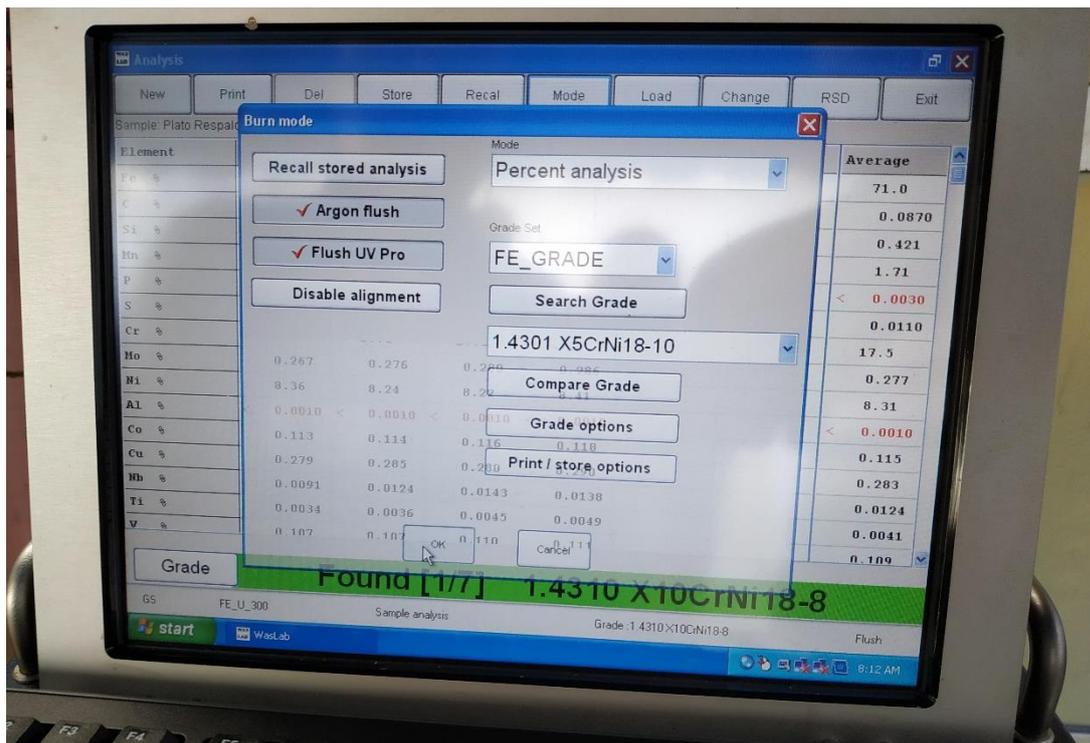


Figura 3.5: Valores obtenidos en el display del equipo para medición sin argón. Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera se realizan 5 mediciones con argón, desechando la de calibración. En la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos para las mediciones con argón.

Tabla 3.2: Propiedades químicas del metal del plato perforado, experimento con argón. Fuente: Elaboración propia.

PMI Master Pro 13P0189 Optiknr. 13P0189							
Sample: Plato Respaldo Ac Inox. Argón							
Alloy: FE_U_300 Grade :1.4310 X10CrNi18-8							
Mode: GS 1/20/2020 9:10:26 AM							
	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 3.6:

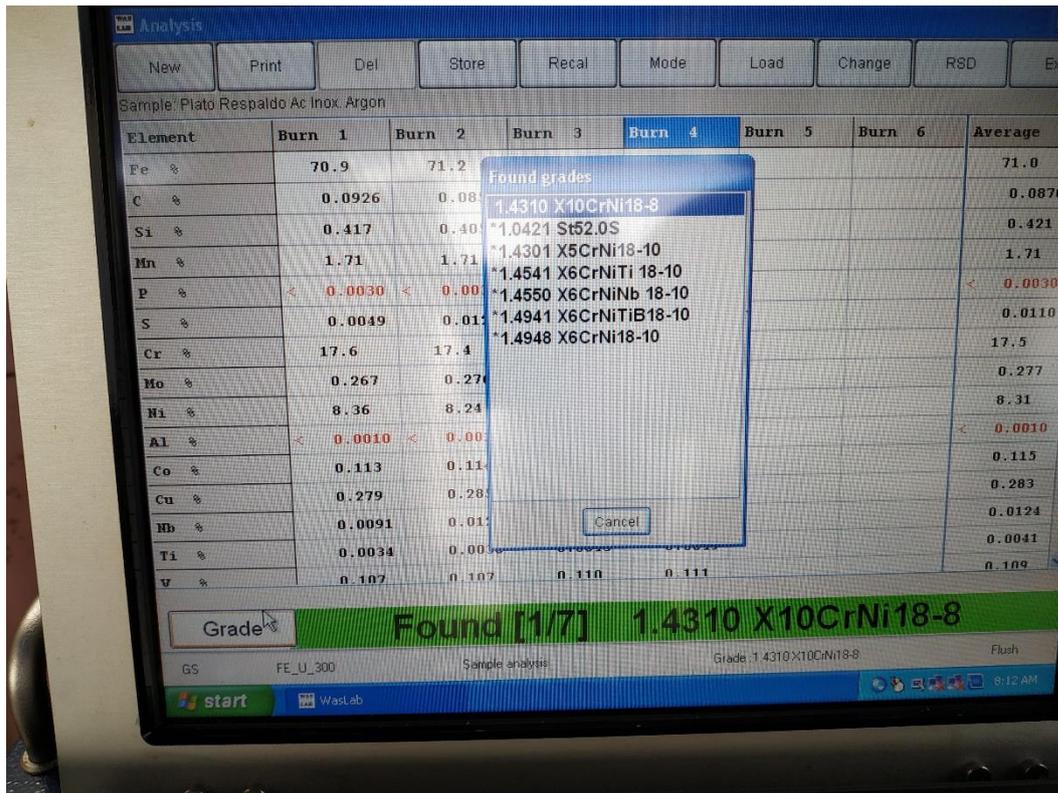


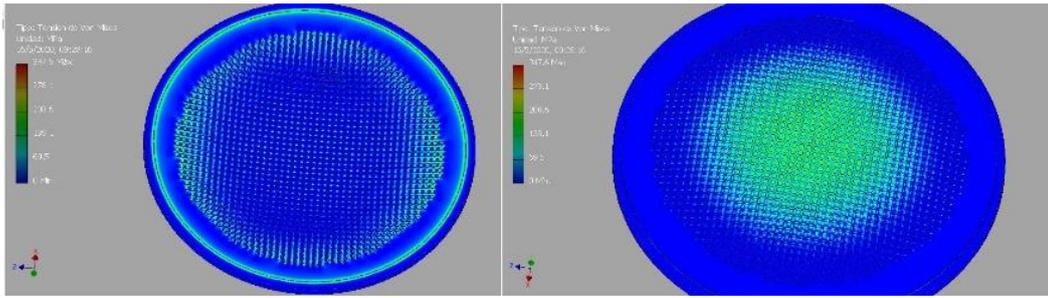
Figura 3.6: Valores obtenidos en el display del equipo para medición con argón.
Fuente: Elaboración propia.

Este acero se empleará en las simulaciones posteriores.

3.2) Modelación del plato en el instante en que el diafragma se ejerce presión sobre el mismo.

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).

Este caso sucederá solo en el instante en que el diafragma se pega al plato de respaldo, o sea cuando todo el líquido de la cavidad fuese evacuado. Para esta condición se realizó la modelación por elementos finitos Figura 3.7 Considerando una placa curvada, casquete esférico con agujeros múltiples. Existen varios autores que han realizado modelaciones de placas, pero planas con pocos agujeros y en su mayoría sometidas a tracción (A.R. Torabi, 2014).



a) b)

Figura 3.7: Distribución de tensiones en la parte interior a) y exterior b) del plato. Fuente: Elaboración propia.

Para la obtención de los resultados se tomaron mediciones en el interior del plato y en el exterior obtenidas de dos puntos fundamentales como se muestra en la Figura 3.8 El punto 1 en el centro de la cruceta formada por los agujeros y el punto (2) en el borde del agujero.

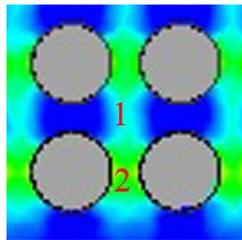


Figura 3.8: Puntos de medición de tensiones. Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de estas tensiones se muestra en la figura 3.9, 3.10.

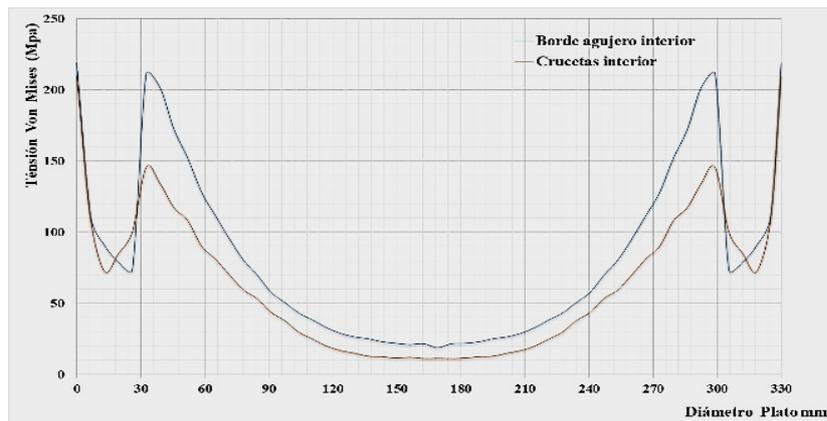


Figura 3.9: Valores de tensiones en la parte interior del plato, concavidad. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.10: Valores de tensiones en la parte exterior del plato, convexidad.
Fuente: Elaboración propia.

3.3) Modelación del plato en el instante en que el líquido (leche de almidón) esté siendo evacuado de la cavidad de la bomba.

Cuando el líquido (leche de almidón) esté siendo evacuado de la cavidad de la bomba ejerce una presión sobre el plato perforado.

Es necesario construir un perfil del plato perforado con agujeros verticales y el cuerpo de las válvulas. El fluido que actúa sobre el plato perforado es leche de almidón con una densidad de 1160kg/m^3 a una presión de 30atm (3039750Pa). El plato va acoplado en la caja de las válvulas, se aplica una condición de frontera para el análisis de fluido con las presiones de trabajo en la entrada, a la salida un Caudal de $0.0022\text{m}^3/\text{s}$ desde la boquilla de descarga de 80 mm de diámetro, una vez obtenido los resultados se conecta con el análisis estático para exportar la presión generada en el plato desde el análisis de fluido con el fin de conocer la deformación, la tensión (Von-Mises).

Para la posterior simulación del plato se dibuja el plato y la caja de las válvulas con las características reales que permiten la realización de la simulación, estos se dibujan en el software SOLIDWORKS 2016, tal como se puede ver en la figura 3.11:

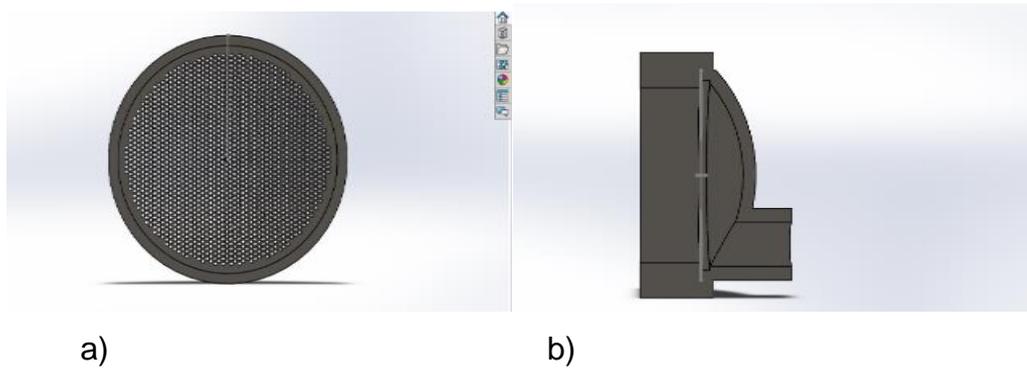


Figura 3.11: a) Plato perforado con agujeros verticales; b) Caja de válvulas.
Fuente: elaboración propia.

Para la modelación del fluido se exporta el modelo ensamblaje para el ANSYS 18.1 y se crea un volumen de control desde la región de frontera de modo a prepararlo para los análisis de fluido (Ansys, 2017).

Para el ensamblaje se decide tomar un elemento tetraédrico con un ajuste curvo esto debido a que este elemento permite altos niveles de arreglo cuando se modelan sólidos de geometrías irregulares por su propia configuración y se logra un mejor ajuste a la geometría con curvatura empleando un ajuste curvo de estos elementos lográndose resultados más exactos. Otro de los aspectos importante son los controles de mallas aplicados a los modelos, los cuales se situaron en los lugares donde existían fuertes transiciones, todo esto, con el objetivo de lograr resultados más exactos y sin tener que elevar excesivamente el costo computacional, Figura 3.12.

Para las condiciones de fronteras se le aplica una presión de entrada del fluido a 30atm desde la boquilla de entrada con un caudal a la salida de $0.0022\text{m}^3/\text{s}$ la boquilla de salida se le aplica el fluido con sus propiedades a partir del comando Fluent.

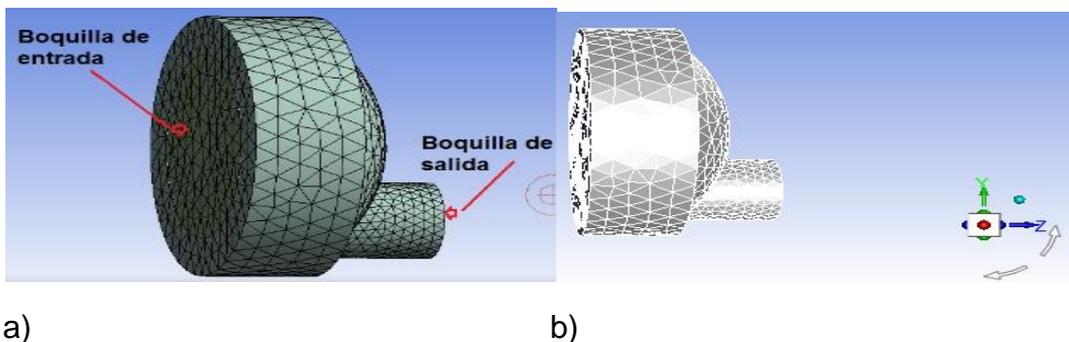


Figura 3.12: a) Mallado del modelo; b) Condiciones de frontera desde el comando. Fuente: elaboración propia.

Se obtienen los resultados para el perfil analizado tal como la velocidad de fluido, la presión de fluido, esfuerzo cortante etc. Los resultados se pueden observar desde las paredes del perfil permitiendo evaluar la presión sobre la superficie de la placa perforada como se muestra en la Figura 3.13:

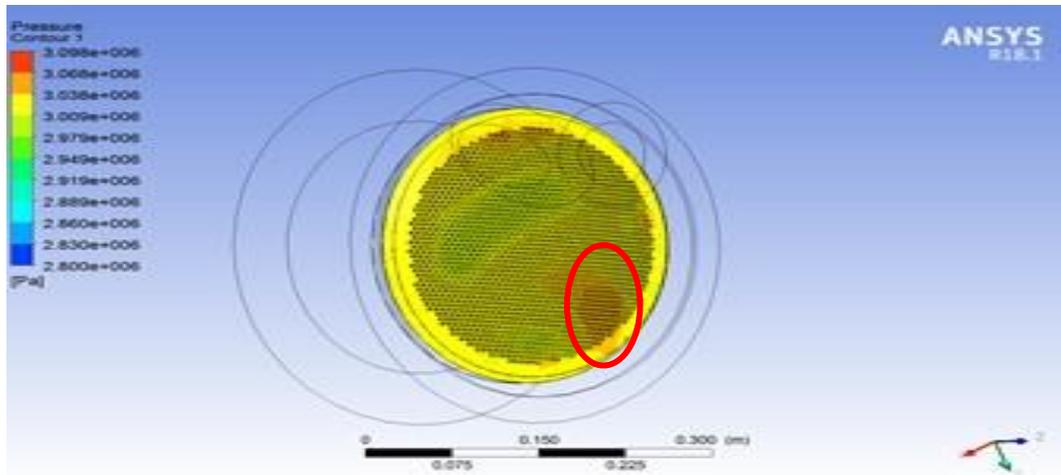


Figura 3.13: Presión sobre la placa perforada. Fuente: elaboración propia.

De la simulación se obtiene que la distribución de presión sobre el plato no es uniforme concentrándose en la zona de la superficie de la placa que corresponde a la parte inferior del plato producto de la turbulencia que se genera al tener desplazada la descarga del centro de la bomba.

Durante la operación de descarga la válvula de succión se mantiene cerrada impidiendo así el pase de flujo como se puede ver en la Figura 3.14, lo cual genera presión diferente en las distintas zonas del plato.

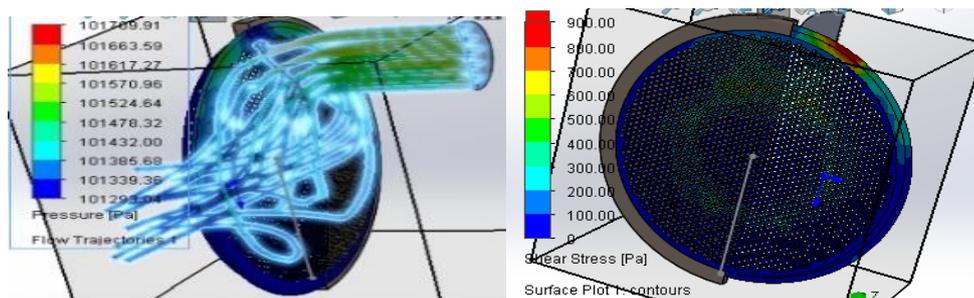


Figura 3.14: Simulación de la operación de descarga. Fuente: elaboración propia.

Para el caso del plato 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 3.15 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 exportada del análisis de fluido 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 del plato respondiendo a las condiciones reales de trabajo.

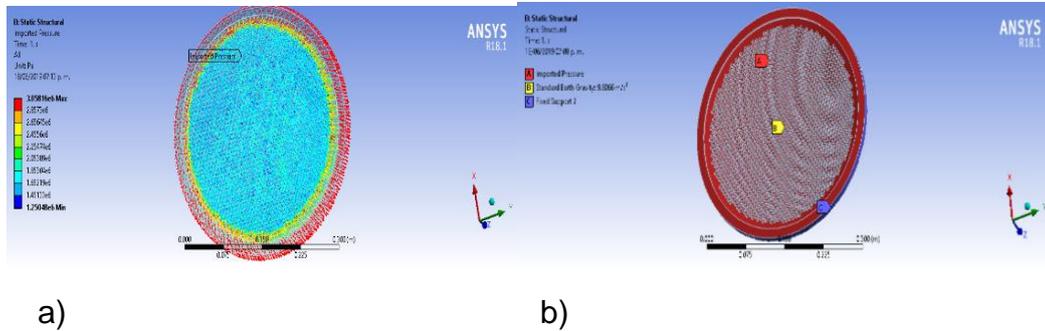


Figura 3.15: a) Presión exportada; b) Restricciones y esfuerzos. Fuente: Elaboración propia.

Para la presentación de los resultados del plato estudiado se realiza mediante las tensiones de Von Mises a través de una vista superior del plato y una vista en sección del mismo lo que permite obtener una visión general del perfil. Como se puede apreciar estas tensiones van desde $\sigma_{eq} = 0.079 \text{ Mpa}$ $\sigma_{eq} = 4,20 \text{ Mpa}$, detalladamente en el campo de tensiones descrito en el perfil presentado en Figura 3.16 para la vista superior.

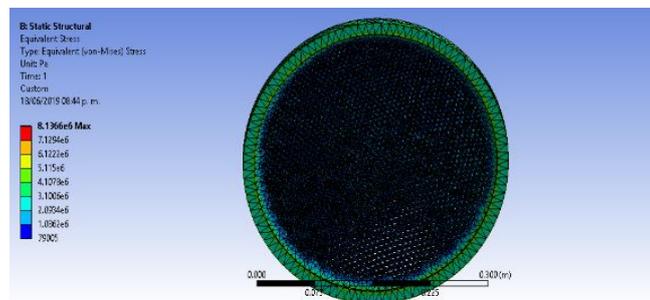


Figura 3.16: Resultado de las tensiones equivalentes por Hubber-Von Mises-Hencky, vista superior. Fuente: elaboración propia.

También se puede observar la deformación que ocurre por la presión sometida sobre el plato en que la zona crítica que está representada por el color rojo y está ligeramente aproximada al centro del centro del plato tal como se ve en la Figura 3.17:

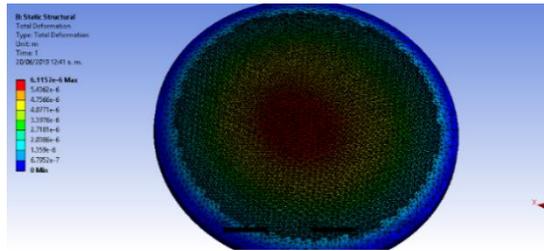


Figura 3.17: Deformación del plato perforado. Fuente: elaboración propia.

3.4) Modelación del plato para diferentes configuraciones de agujeros.

Para realizar la modelación se tomaron diferentes configuraciones de agujeros en el plato modificando los valores de diámetro de los agujeros y el paso entre ellos. En la tabla 3.3 se muestran los valores empleados.

Tabla 3.3: Configuraciones de agujeros, diámetro y paso. Fuente: Elaboración propia.

Configuración	4.8x6.5	4.8x7	4.8x7.5	5x6.5	5x7	5x7.5	5.5x6.5	5.5x7	5.5x7.5
Diámetro	4.8	4.8	4.8	5	5	5	5.5	5.5	5.5
Paso	6.5	7	7.5	6.5	7	7.5	6.5	7	7.5
Distancia entre agujeros	1.7	2.2	2.7	1.5	2	2.5	1	1.5	2
Variación del diámetro			0.2			0.5			0.5
Variación paso	0.5			0.5			0.5		
	6x7	6x7.5	6x8	7x8	7x8.5	7x9	8x9	8x9.5	8x10
Configuración	6	6	6	7	7	7	8	8	8
Diámetro	7	7.5	8	8	8.5	9	9	9.5	10
Paso	1	1.5	2	1	1.5	2	1	1.5	2
Distancia entre agujeros	0.5		1			1			1
Variación del diámetro	0.5			0.5			0.5		
	9x10	9x10.5	9x11	10x11	10x11.5	10x12			
Configuración	9	9	9	10	10	10			
Diámetro	10	10.5	11	11	11.5	12			
Paso	1	1.5	2	1	1.5	2			
Distancia entre agujeros	1		1						
Variación del diámetro	0.5			0.5					

En la figura 3.18 Se mostrarán imágenes representativas de las configuraciones para 4.8 mm, 7 mm y 10 mm donde se aprecia las diferencias en cuanto a los diámetros de agujeros y paso. La totalidad de las configuraciones se podrán ver en el anexo 3.

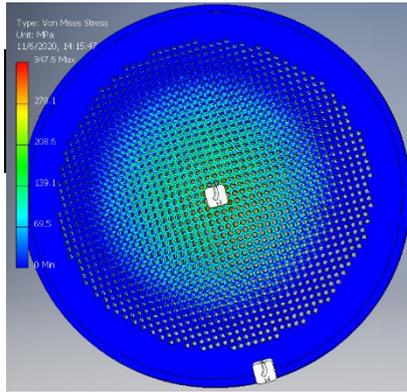
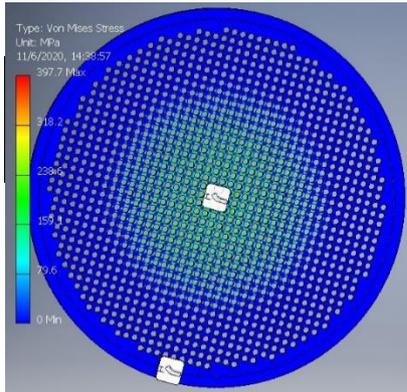
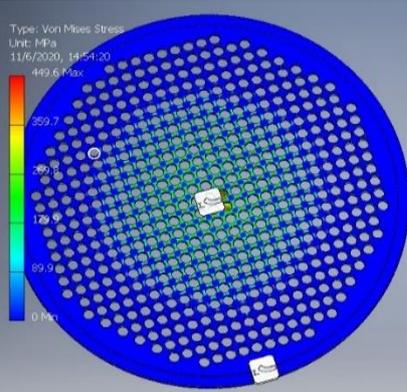
Diámetro agujero (mm)	Paso (mm)	Espesor nervio (mm)	Imagen
4.8	6.5	1.7	
4.8	7	2.2	
4.8	7.5	2.7	
7	8	1	
7	8.5	1.5	
7	9	2	
10	11	1	
10	11.5	1.5	
10	12	2	

Figura 3.18: Configuraciones para 4.8 mm, 7 mm y 10 mm. Fuente: Elaboración propia.

Los valores de tensiones fueron analizados punto a punto de manera que se realizaran cuatro mediciones en cada anillo circular correspondiente a un

diámetro determinado, por el interior del plato (concavidad) y por el exterior del plato (convexidad) en cada una de las configuraciones analizadas de la misma manera que se realizó para la configuración original.

3.5) Análisis de resultados.

3.5.1) Comportamiento de las tensiones durante el instante de flujo del material para configuración original.

Analizando la simulación del plato para el instante de trasiego de flujo y comparando las zonas con agujeros de carga y descarga de la bomba en el plato real y la zona crítica desde la simulación en condiciones de flujo se puede apreciar en la Figura 3.19 se nota una coincidencia entre ambas, lo que indica que la rotura del plato coincide con la zona de descarga por la presión generada por el fluido.

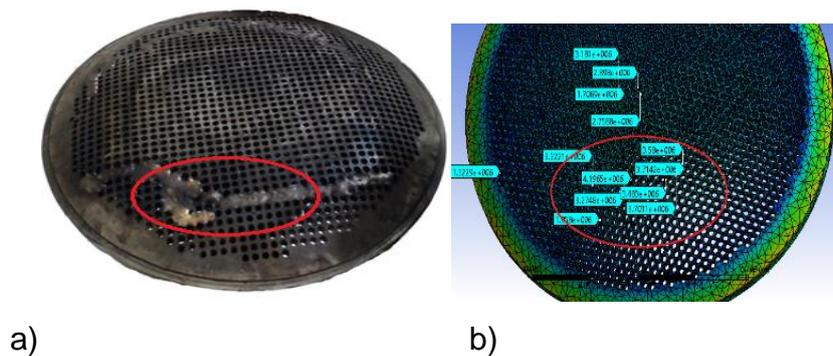


Figura 3.19: a) Plato real señalizando la zona de ruptura; b) Perfil del plato simulado señalizando la zona crítica. Fuente: elaboración propia.

En la figura 3.20 se puede apreciar de forma explícita como se distribuyen las tensiones en los orificios de la placa en la zona antes analizada para la simulación en condiciones reales de trabajo, las tensiones más elevadas se encuentran en la unión entre agujeros, donde existen fuertes concentraciones de tensiones que llegan ser del orden de 4,19 Mpa.

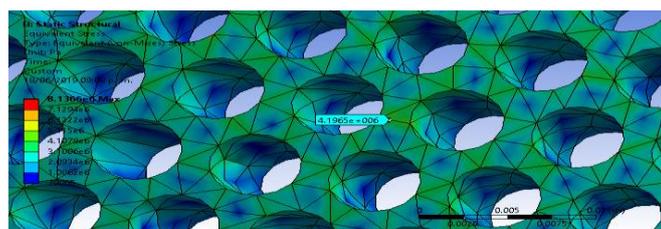


Figura 3.20: Ampliación de la zona crítica ampliada. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.4 se muestran las tensiones máximas generadas en las diferentes zonas de análisis como se muestra en la Figura 3.21.

Tabla 3.4: Tensiones altas en la zona crítica.

Zonas	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ_{eq} (MPa)	3.18	2.89	3.27	1.35	3.58	3.32	4.19	3.48	3.7

A medida que se recorre el plato hasta la zona central se observa que existe una zona próxima al contorno que se distribuyen las tensiones uniformemente, no siendo así a medida que se aproxima al centro del plato donde estas van cambiando por zonas.

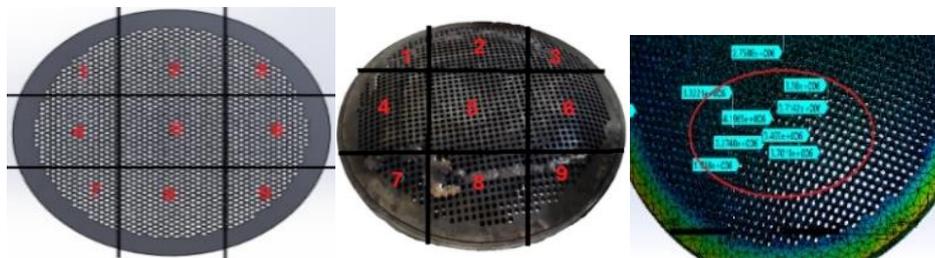


Figura 3.21: Zona crítica ampliada y tensión máxima. Fuente: Elaboración propia.

Presenta una zona extensa de transición que dan lugar a unas tensiones medias que varían de $\sigma_{eq} = 8,6$ MPa en el borde del plato hasta 0,76 Mpa en la zona central, por otra parte, si se recorre verticalmente la geométrica del modelo sección geométrica del modelo (8), que corresponde con la descarga, se observan tensiones que van desde una tensión media hasta decaer a la mínima con un valor de $\sigma_{eq} = 1.35$ Mpa hasta 4,19 Mpa.

3.5.2) Comportamiento de las tensiones en el instante de contacto diafragma- plato para configuración original.

De igual manera analizando el plato en la condición en que el diafragma hace contacto, ejerciendo una presión, se puede ver como varía la distribución de tensiones tanto para la parte interior (cóncava) como exterior (convexa) mostrada en la Figura 3.22.

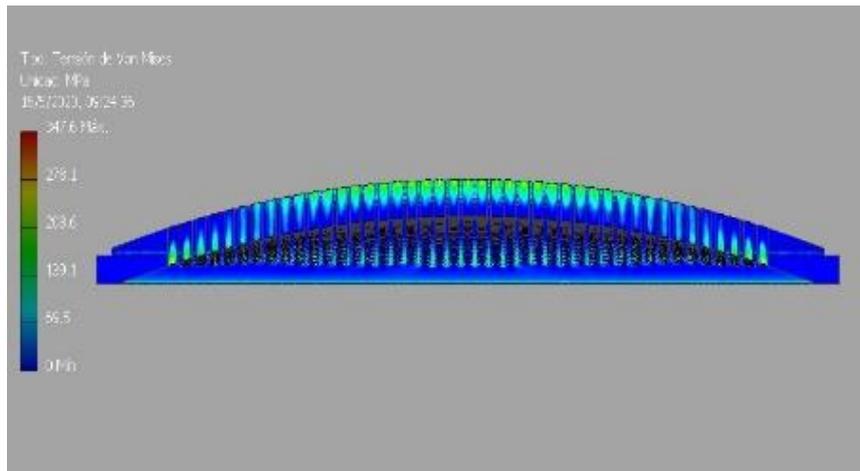


Figura 3.22: Sección transversal del plato. Fuente: Elaboración propia.

Partiendo de las mediciones realizadas se construyen curvas que representan la distribución de tensiones en la parte externa e interna como se muestra en la Figura 3.23.

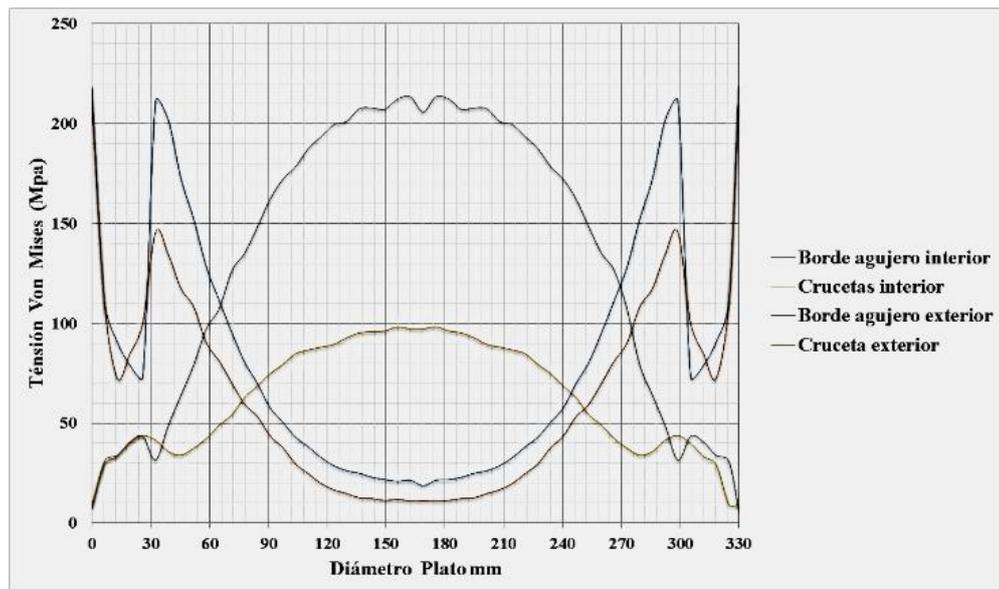


Figura 3.23: Distribución de tensiones en el interior y exterior del plato. Fuente: Elaboración propia.

La distribución de tensiones para este caso conforma anillos circulares, notándose que entre 30 y 60 mm del borde del plato existe una notable diferencia entre las tensiones interiores y exteriores del plato, zona coincidente con el análisis realizado para el paso del flujo.

3.5.3) Comportamiento de las tensiones en el instante de contacto diafragma- plato con diferentes configuraciones.

3.5.3.1) Comportamiento de las tensiones en el interior del plato con diferentes configuraciones.

De la misma manera se procesaron los valores de tensiones para cada una de las configuraciones antes mencionadas, en la figura 3.24 se muestran los valores de tensiones en la zona próxima al agujero por la parte interior del plato tomando valores medios entre los obtenidos en la zona próxima al agujero y en el centro de la cruceta.

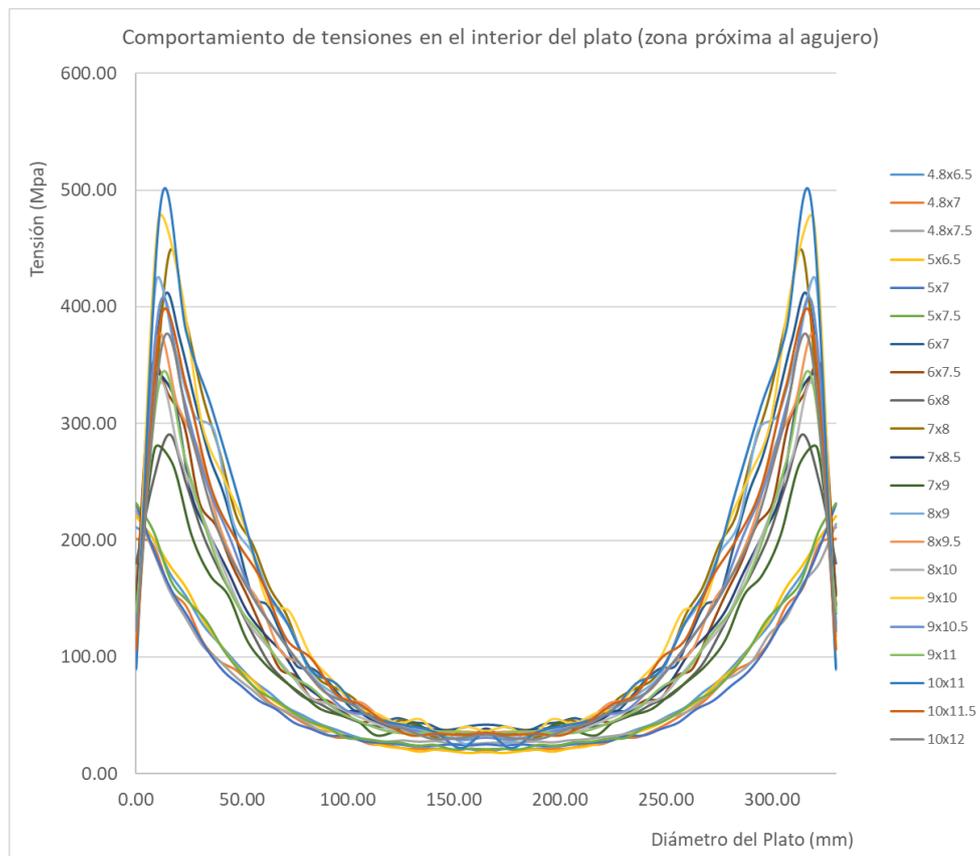


Figura 3.24: Comportamiento de tensiones en el interior de plato zona próxima al agujero. Fuente: Elaboración propia.

Para mejor comprensión se analizó el comportamiento de dichas tensiones para cada diámetro de agujero, en la figura 3.25 se muestra una representación, el resto de las gráficas se pueden ver en el anexo 4. Como se puede apreciar para un mismo diámetro de agujero la tensión en la zona máxima disminuye a medida que aumenta el paso entre agujeros.

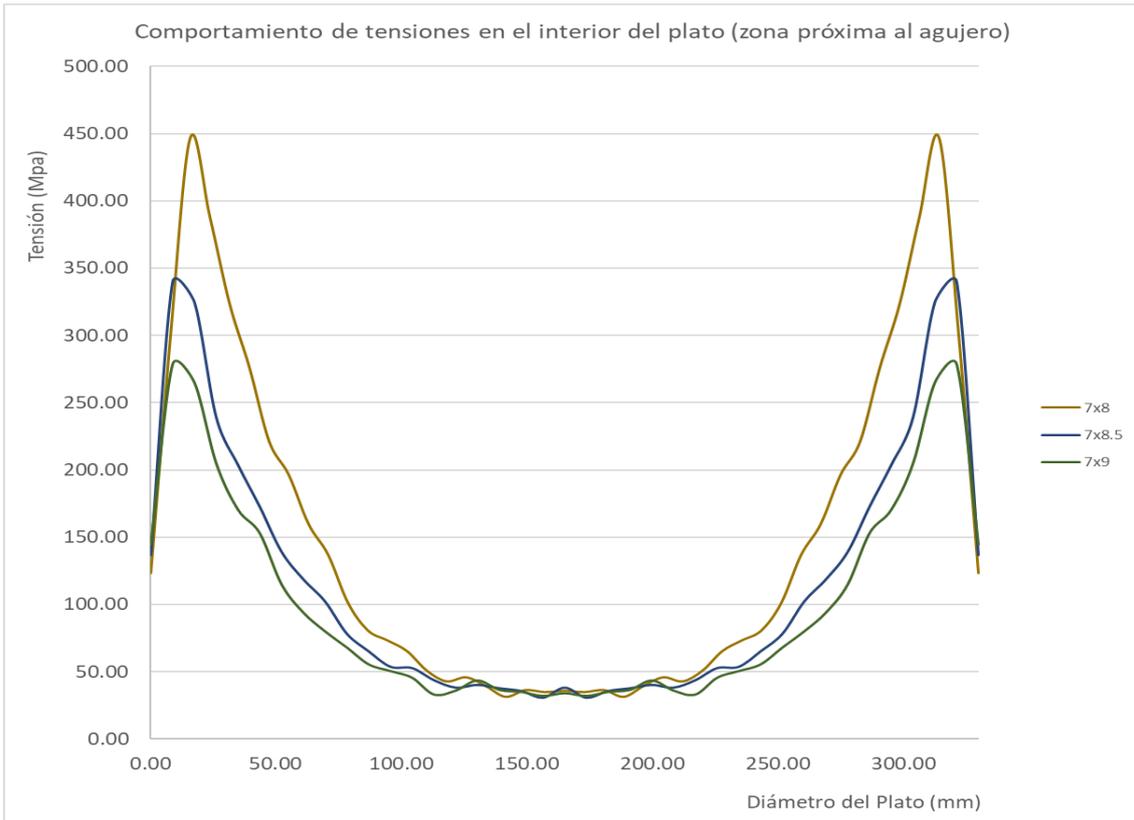


Figura 3.25: Comportamiento de tensiones en el interior de plato con diámetro agujero 7 mm. Fuente: Elaboración propia.

3.5.3.2) Comportamiento de las tensiones en el exterior del plato con diferentes configuraciones.

Se procesaron los valores de tensiones para cada una de las configuraciones antes mencionadas, en la figura 3.26 se muestran los valores de tensiones en la zona próxima al agujero por la parte exterior del plato tomando valores medios entre los obtenidos en la zona próxima al agujero y en el centro de la cruceta.

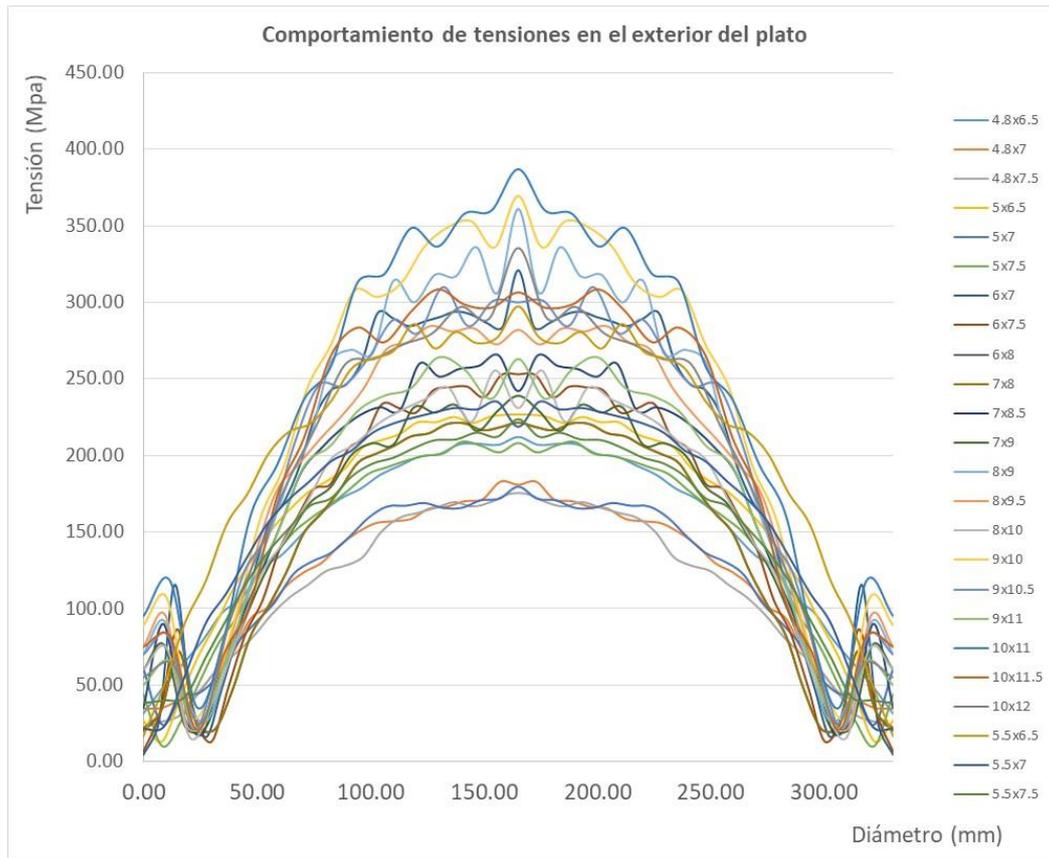


Figura 3.26: Comportamiento de tensiones en el exterior de plato zona próxima al agujero. Fuente: Elaboración propia.

Para mejor comprensión se analizó el comportamiento de dichas tensiones para cada diámetro de agujero, en la figura 3.27 se muestra una representación, el resto de las gráficas se pueden ver en el anexo 5. Como se puede apreciar para un mismo diámetro de agujero la tensión en la zona máxima disminuye a medida que aumenta el paso entre agujeros.

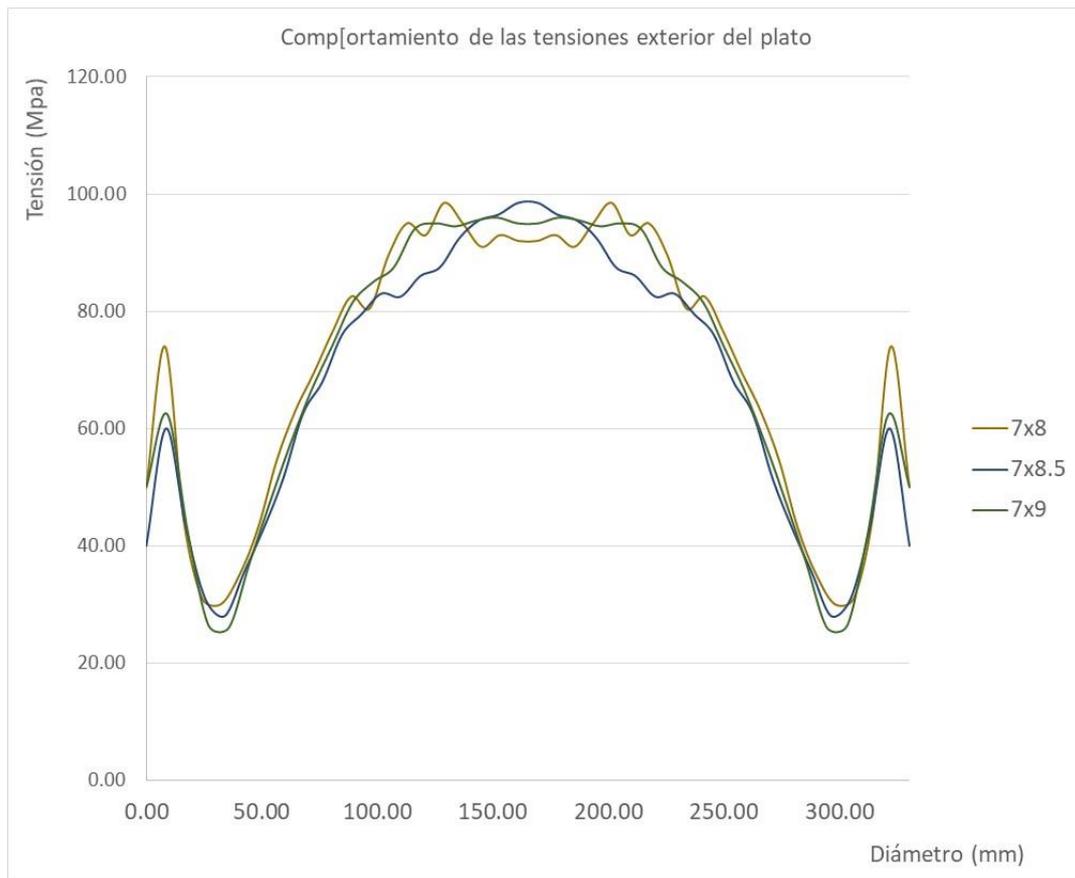


Figura 3.27: Comportamiento de las tensiones en el exterior del plato. Fuente: Elaboración propia.

3.6) Obtención de ecuaciones que rigen el comportamiento de las curvas de tensiones.

Para este análisis se emplearán las curvas obtenidas anteriormente para tensiones en interior del plato en la zona próxima al agujero y en la cruceta, de igual manera para el exterior del plato. Se realizaron ajustes de curvas en el programa Excel de manera que se obtenga una homogeneidad en el comportamiento de ellas. En la figura 3.28 se muestra uno de los casos con las líneas de tendencias correspondientes.

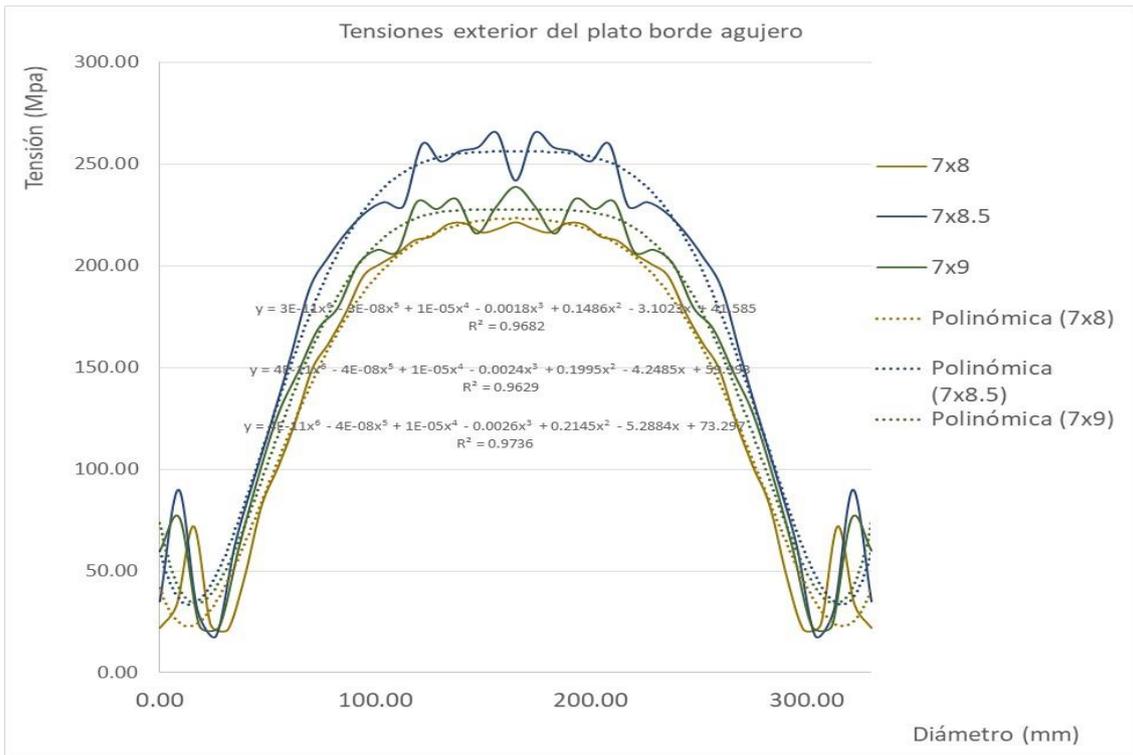


Figura 3.28: Líneas de tendencias ajustadas a curvas de tensiones en el exterior del plato para agujero 7 mm.

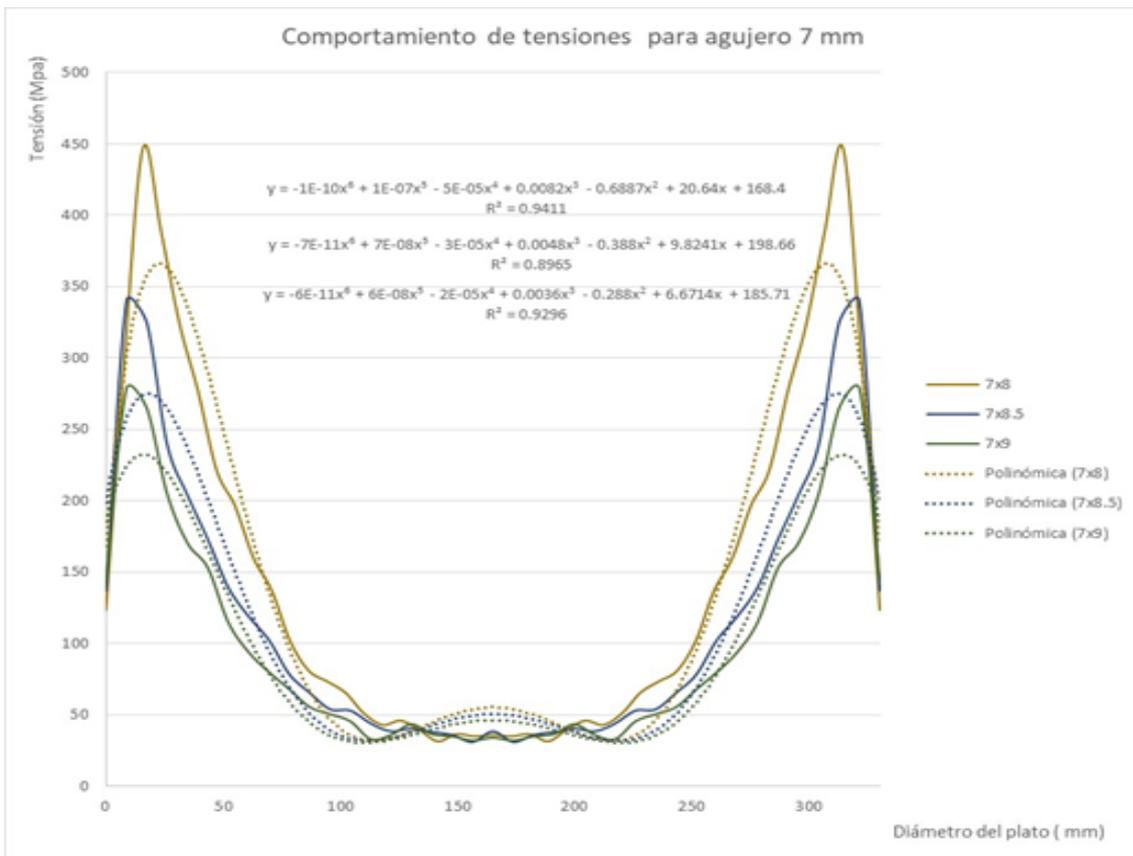


Figura 3.39: Líneas de tendencias ajustadas a curvas de tensiones en el interior del plato para agujero 7 mm.

Para el resto de las configuraciones se realizaron los mismos ajustes (ver anexo 4 y 5) detectando que todas las curvas siguen una distribución de una línea de tendencia polinómica de 6to orden, la cual se puede escribir como:

$$y = c1 * x^6 + c2 * x^5 + c3 * x^4 + c4 * x^3 + c5 * x^2 + c6 * x + c7$$

Donde:

C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7- Coeficientes de la curva polinómica de 6to orden.

y- Tensión (Mpa).

x- Diámetro (mm).

Para cada caso se obtuvieron los valores de dichos coeficientes y el valor de R² como se muestra en las tablas 3.5:

Tabla 3.5: Valores de los coeficientes y los R² de las ecuaciones de las curvas polinómicas para los interiores de los platos.

Valores de los coeficientes de la curva para interior plato									
Diámetro	Paso	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	R2
4.8	6.5	-6.00E-12	6.00E-09	-2.00E-06	3.00E-04	-4.60E-03	-2.80E+00	2.16E+02	9.99E-01
4.8	7.0	-5.00E-12	5.00E-09	-2.00E-06	2.00E-04	3.80E-03	-3.09E+00	2.09E+02	9.96E-01
4.8	7.5	3.00E-13	-6.00E-10	5.00E-07	-2.00E-04	4.67E-02	-4.81E+00	2.24E+02	9.99E-01
5	6.5	-7.00E-12	7.00E-09	-3.00E-06	4.00E-04	-7.70E-03	-2.91E+00	2.23E+02	9.99E-01
5	7.0	1.00E-12	-1.00E-09	8.00E-07	-3.00E-04	5.18E-02	-5.14E+00	2.31E+02	1.00E+00
5	7.5	-3.00E-12	3.00E-09	9.00E-07	6.00E-05	2.04E-02	-3.98E+00	2.33E+02	9.98E-01
5.5	6.5	-8.00E-12	8.00E-09	-3.00E-08	4.00E-04	-1.01E-02	-3.18E+00	2.60E+02	9.98E-01
5.5	7.0	-5.00E-12	5.00E-09	-2.00E-06	2.00E-04	3.50E-03	-3.21E+00	2.33E+02	1.00E+00
5.5	7.5	-4.00E-12	4.00E-09	-1.00E-06	1.00E-04	1.28E-02	-3.68E+00	2.30E+02	9.99E-01
6	7.0	-1.00E-10	1.00E-07	-4.00E-05	6.70E-03	-5.47E-01	1.49E+01	2.15E+02	9.39E-01
6	7.5	-8.00E-11	9.00E-08	-3.00E-05	5.00E-03	-3.99E-01	9.73E+00	2.18E+02	9.26E-01
6	8.0	-6.00E-11	6.00E-08	-2.00E-05	3.70E-03	-2.90E-01	6.54E+00	2.05E+02	9.69E-01
7	8.0	-1.00E-10	1.00E-07	-5.00E-05	8.20E-03	-6.89E-01	2.06E+01	1.68E+02	9.41E-01
7	8.5	-7.00E-11	7.00E-08	-3.00E-05	4.80E-03	-3.88E-01	9.82E+00	1.99E+02	8.97E-01
7	9.0	-6.00E-11	6.00E-08	-2.00E-05	3.60E-03	-2.88E-01	6.67E+00	1.86E+02	9.30E-01
8	9.0	-1.00E-10	1.00E-07	4.00E-05	7.70E-03	-6.47E-01	1.92E+01	1.65E+02	8.94E-01
8	9.5	-9.00E-11	9.00E-08	3.00E-05	6.10E-03	-5.06E-01	1.42E+01	1.77E+02	8.98E-01
8	10.0	-8.00E-11	8.00E-08	3.00E-05	5.00E-03	-4.07E-01	1.08E+01	1.75E+02	9.04E-01
9	10.0	-1.00E-10	1.00E-07	-5.00E-05	8.60E-03	-7.16E-01	2.09E+01	1.88E+02	8.64E-01
9	10.5	-1.00E-10	1.00E-07	-4.00E-05	6.60E-03	-5.44E-01	1.52E+01	1.84E+02	8.91E-01
9	11.0	-8.00E-11	8.00E-08	-3.00E-05	5.20E-03	4.20E-01	1.11E+01	1.79E+02	8.98E-01
10	11.0	-1.00E-10	1.00E-07	-5.00E-05	9.80E-03	8.23E-01	2.48E+01	1.57E+02	8.81E-01
10	11.5	-1.00E-10	1.00E-07	-4.00E-05	7.10E-03	5.97E-01	1.78E+01	1.55E+02	8.97E-01
10	12.0	-9.00E-11	9.00E-08	-4.00E-05	6.30E-03	5.27E-01	1.52E+01	1.63E+02	8.96E-01

Tabla 3.6: Valores de los coeficientes y los R² de las ecuaciones de las curvas polinómicas para los exteriores de los platos.

Valores de los coeficientes de la curva para exterior plato									
Diámetro	Paso	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	R2
4.8	6.5	8.00E-12	-8.00E-09	3.00E-06	-0.0006	0.0477	-0.9949	40.773	0.9981
4.8	7.0	9.00E-12	-9.00E-09	3.00E-06	-0.0006	0.0545	-1.2809	42.78	0.9971
4.8	7.5	1.00E-11	-1.00E-08	5.00E-06	-0.0009	0.0781	-2.1135	48.836	0.995
5	6.5	7.00E-12	7.00E-09	3.00E-06	-0.0005	0.0379	-0.5164	36.615	0.995
5	7.0	1.00E-11	1.00E-08	5.00E-06	-0.0008	0.0702	-1.5913	40.173	0.992
5	7.5	1.00E-11	1.00E-08	4.00E-06	-0.0007	0.0544	-1.0345	35.607	0.9939
5.5	6.5	4.00E-12	-4.00E-09	2.00E-06	-3.0E-04	0.0203	0.0224	38.393	0.9926
5.5	7.0	4.00E-12	-4.00E-09	1.00E-06	-0.0003	0.0216	-0.0801	34.685	0.9953
5.5	7.5	8.00E-12	-8.00E-09	3.00E-06	-0.0005	0.0416	-0.5419	32.603	0.9902
6	7.0	1.00E-11	-1.00E-08	5.00E-06	-0.0009	0.0811	-2.6031	62.309	0.8795
6	7.5	3.00E-12	-3.00E-09	1.00E-06	-0.0003	0.0285	-0.7802	41.169	0.8739
6	8.0	1.00E-11	-1.00E-08	4.00E-06	-0.0008	0.0764	-2.3705	54.843	0.9261
7	8.0	1.00E-11	-1.00E-08	5.00E-06	-0.0009	0.0867	-2.8808	66.534	0.8915
7	8.5	6.00E-12	-6.00E-09	2.00E-06	-0.0005	-0.0502	-1.6662	52.33	0.9269
7	9.0	1.00E-11	-1.00E-08	5.00E-06	-0.0009	0.0824	-2.7592	62.323	0.9317
8	9.0	2.00E-12	-2.00E-09	9.00E-06	-0.0002	0.0234	-0.6339	43.328	0.8887
8	9.5	8.00E-12	-8.00E-09	3.00E-06	-0.0006	-0.0615	-2.0052	57.19	0.9159
8	10.0	9.00E-12	-8.00E-09	3.00E-06	-0.0007	0.0644	-2.207	59.653	0.9323
9	10.0	9.00E-12	-9.00E-09	3.00E-06	-0.0006	0.0596	-1.7855	52.185	0.8934
9	10.5	4.00E-12	-3.00E-09	1.00E-06	-0.0003	0.0331	-0.9496	44.373	0.8597
9	11.0	6.00E-12	-6.00E-09	2.00E-06	-0.0005	0.0478	-1.3864	44.94	0.907
10	11.0	1.00E-11	-1.00E-08	5.00E-06	0.0009	0.0847	-2.7102	61.391	0.8795
10	11.5	8.00E-11	-8.00E-09	3.00E-06	-0.0006	0.0587	-1.8606	54.348	0.9134
10	12.0	1.00E-11	-1.00E-08	4.00E-06	-0.0009	0.0751	-2.375	57.68	0.9015

Como se puede apreciar en todos los casos el R² se encuentra en la mayoría de por encima del 90 %, lo cual brinda una fiabilidad en los ajustes realizados.

CONCLUSIONES

1. Se caracterizó el plato de apoyo y el diafragma, objetos de estudio del presente trabajo, sus materiales, las averías que han ocurrido en el mismo, así como los principales métodos para modelar por elementos finitos en placas con agujeros.
2. La tensión máxima en el diafragma no supera valores de 45 Mpa y ocurre en la zona próximo al borde, coincidiendo con la zona de rotura.
3. De la simulación del diafragma con diferentes configuraciones del plato se demostró que los valores de diámetro máximos de agujeros no deben superar los 10 mm, para diámetros superiores la deformación en su interior supera los valores de 1,1 mm, provocando el aumento excesivo en las tensiones de cortante en el borde del agujero.
4. Los experimentos realizados demostraron que el material del plato de respaldo es acero inoxidable austenítico del tipo 1.4301 x5CrNi18-10.
5. El flujo de almidón a través del plato genera tensiones no uniformes en toda la superficie del mismo, la tensión máxima (4,19 Mpa) demostrada en la simulación ocurre en la zona de descarga.
6. Las tensiones máximas en el plato de respaldo durante el contacto con el diafragma a presión máxima alcanzan valores de 218.5. Mpa en el interior del plato y 222.4 Mpa en el exterior del plato respectivamente.
7. De la simulación del plato con diferentes configuraciones de agujero se pudo demostrar que la distribución de tensiones en el interior y exterior el mismo se pueden describir por una ecuación polinómica de 6to orden, obteniéndose un coeficiente de correlación $R^2 >$ del 90 % en la mayoría de los casos.

RECOMENDACIONES

Continuar la investigación realizando el análisis de optimización a múltiples criterios basado en los ajustes de curvas obtenidos, que permita tener la mejor variante de configuración.

BIBLIOGRAFÍA

- Ansys 18.1, "User manual", ANSYS-CFX, (2017)
- A.R. Torabi, S. E. (2014). Loading and Environmental effects on Structural Integrity Brazilian disk tests: Circular holes and size effects. *Ain Shams Engineering Journal* , 839–850.
- Abdulrazaq A. Araoye, H. M. (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), Paper No. 161.
- Alejandro J. Patanella, & M. (2012). Placas planas rectangulares de espesor delgado. Bolivar, Colombia.
- Ampco metal excellence in engineered alloys. (2013).
- Antonio Viedma Robles, e. B. (1997). Teoría de máquinas hidráulicas. Madrid, España.
- Arora., S. D. (2015). Stress Analysis of a Rectangular Plate with Circular Hole Using Three Dimensional Finite Element Model, . *Business and Enterprise Applications* , 15.
- B. Mallikarjun, P. D. (2012). Finite Element Analysis of Elastic Stresses Around Holes in Plate Subjected to Uniform Tensile Loading. . *Bonfring Int. J. Indust. Engg. Manage. Sci.*, 136-142.
- Bertuco, e. G. (2001). High pressure process technology: fundamentals and aplicaciones. Ocaña, Colombia.
- 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 glucosa de Cienfuegos y su validación por el método de los elementos finitos. Cienfuegos.
- D. Brahmabhatt, K. B. (2015). Stress Concentration Factor Converts Into Stress Intensity Factor using ANSYS. *European J. Adv. Engg. Technol* , 4649.
- Dorothy Hoffman, B. S. (1997). Handbook of vacuum science and Thechnology.
- F.P, B. (1993). Mecánicas de materiales (Segunda Edición). Mc Graw-Hill.
- Feodosiev, V. (1985). Resistencia de material (Tercer Edición). Mosco: MIR.
- Feras Darwish, M. G. (2012). A modified equation for the stress concentration factor in countersunk holes. *European Journal of Mechanics A/Solids* 36, 360.
- G. C. Mekalke, M. V. (2012). G. C. Mekalke, M. V. Kavade and S. S. Deshpande, Analysis of a Plate with a Circular Hole by FEM. *IOSR J. Mech. Civil Engg. (IOSR-JMCE)*, 30.
- G.K.Sahu. (2000). Pumps: rotodynamic and positive displacement types. Oruro, Bolivia.
- Gallimard, L. (2012). Bombas de membrana de doble efecto. Santa Rosa, Guatemala.
- Huerta, S. (2013). Bombas de diafragma (Tesis de Grado). Riobamba, Ecuador.
- J, K. (1990). Bombas, Selección, Uso y Mantenimiento. Mc Graw-Hill, Michigan.
- Kanak Kalita, Salil Halder " Stress Concentration Minimization of 2D Simply Supported Perforated Steel Plate." (ISSN Jan 2014)

- Landau, L. (2009). Teoría de la elasticidad. Mir.
- Liptak, B. G. (1993). Flow measurement. Wisconsin, Estados Unidos.
- Luszczewski, A. (2010). Redes industriales de tubería, bombas para agua, ventiladores y compresores. Chitré, Panamá.
- Matalx, C. (2006). Mecánica de fluido y máquinas hidráulicas. Ediciones del castillo S.A.
- Merle C. Potter, e. D. (2002). Mecánica de fluido. San Rafael, Argentina.
- Micheal D. Holloway, C. N. (2012). Process plant equipment: operation, control and reliability. Elsevier.
- Mirzana, A. S. (2016). Stress Concentration of Rectangular Plate with a Hole Made With Composite Material Using Finite Element Analysis. IOSR J. Mech. Civil Engg. (IOSR-JMCE).13.
- Nelik, L. (2012). Centrifugal e rotary pumps: fundamentals with applications. Hikari, Japón.
- Nesbitt, B. (2006). Handbook of pumps: pumping manual international. Pittsburg, Estados Unidos.
- Paresh Girdhar, e. O. (2011). Pratical centrifugal pumps. Baroda, India.
- Pérez, E. A. (2012). Bombas hidráulicas de membranas HMT. Ibagué, Colombia.
- Pravin Pawar, R. B. (2016). Finite Element Method Analysis of Rectangular Plate With Circular Hole Using ANSYS. Department of Manufacturing Engineering, National Institute Of Technology, 2787-2798.
- R., S. J. (1997). Diseño en ingeniería mecánica. España: Mc Craw- Hill.
- Rayner, R. (1995). Pump users handbook.
- Renedos, C. (2010). Aluminio, Bombas a diafragma. Cantabria, España.
- Rex Miller, M. R. (2011). Abel Pumps and Hydraulics. Elsevier.
- 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.
- Timoshenko, S. (1997). Teorías de placas planas y curvas. MIR.
- Tooley, M. (2009). Plant and process engineering 360.
- Torabi, A.R.. (2014). Loading and Environmental effects on Structural Integrity Brazilian disk tests: Circular holes and size effects. Ain Shams Engineering Journal , 839–850.
- V, D. (1970). Elementos de máquinas. Moscú: MIR.
- Volk, M. (2013). Pumps characteristics and aplicaciones (Thirt Edition. Maharashtra, India.
- Wahren, U. (1997). Pratical introduction to pumping tecnology: a basic guide. Chicago, Estados Unidos.
- Warren E. Rupp, R. B. (s.f.). Diaphramg pumps.
- Wilden. (2012). Bombas neumaticas de diafragmas. Madrid, España.

ANEXOS

Anexo 1: Bomba Master Karl KROYER MP 2C120 perteneciente a la Empresa Glucosa Cienfuegos.



Anexo 2: Tensiones y desplazamientos de todos los diafragmas con sus correspondientes platos de agujero único.

Plato agujero 5 mm			Plato agujero 10 mm			Plato agujero 15 mm		
Diámetro	Tensión	Deformación	Diámetro	Tensión	Deformación	Diámetro	Tensión	Deformación
mm	Mpa	mm	mm	Mpa	mm	mm	Mpa	mm
0.00	2.05	0.00	0.00	5.32	0.00	0.00	10.25	0.02
8.92	32.38	0.23	8.92	7.46	0.00	8.46	17.96	0.08
17.84	42.56	1.68	17.84	40.87	0.08	16.92	41.14	1.90
26.76	12.22	4.92	26.76	25.83	3.07	25.38	15.34	5.74
35.68	15.26	8.79	35.68	13.89	7.01	33.85	10.39	9.29
44.59	14.66	11.38	44.59	17.71	10.61	42.31	11.87	11.91
53.51	8.18	13.50	53.51	7.56	13.00	50.77	8.71	14.11
62.43	7.04	15.50	62.43	6.94	15.03	59.23	6.02	16.03
71.35	5.03	16.80	71.35	5.51	16.85	67.69	5.20	17.64
80.27	6.06	18.82	80.27	5.78	18.54	76.15	6.41	19.24
89.19	6.41	20.22	89.19	6.35	20.04	84.62	6.41	20.64
98.11	6.41	21.48	98.11	6.47	21.29	93.08	6.43	21.81
107.03	6.44	22.47	107.03	6.44	22.41	101.54	6.41	22.81
115.95	6.49	23.31	115.95	6.47	23.31	110.00	6.48	23.60
124.86	6.45	23.98	124.86	6.47	23.98	118.46	6.20	24.18
133.78	6.46	24.44	133.78	6.53	24.44	126.92	6.92	24.57
142.70	6.47	24.67	142.70	7.90	24.69	135.38	7.91	24.73
151.62	6.47	24.70	151.62	7.72	24.70	143.85	8.24	24.77
160.54	6.48	24.74	160.54	8.19	24.80	152.31	8.75	24.83
169.46	6.48	24.74	169.46	8.19	24.80	160.77	9.24	24.88
178.38	6.47	24.70	178.38	7.72	24.70	169.23	9.24	24.88
187.30	6.47	24.67	187.30	7.90	24.69	177.69	8.75	24.83
196.22	6.46	24.44	196.22	6.53	24.44	186.15	8.24	24.77
205.14	6.45	23.98	205.14	6.47	23.98	194.62	7.91	24.73
214.05	6.49	23.31	214.05	6.47	23.31	203.08	6.92	24.57
222.97	6.44	22.47	222.97	6.44	22.41	211.54	6.20	24.18
231.89	6.41	21.48	231.89	6.47	21.29	220.00	6.48	23.60
240.81	6.41	20.22	240.81	6.35	20.04	228.46	6.41	22.81
249.73	6.06	18.82	249.73	5.78	18.54	236.92	6.43	21.81
258.65	5.03	16.80	258.65	5.51	16.85	245.38	6.41	20.64
267.57	7.04	15.50	267.57	6.94	15.03	253.85	6.41	19.24
276.49	8.18	13.50	276.49	7.56	13.00	262.31	5.20	17.64
285.41	14.66	11.38	285.41	17.71	10.61	270.77	6.02	16.03
294.32	15.26	8.79	294.32	13.89	7.01	279.23	8.71	14.11
303.24	12.22	4.92	303.24	25.83	3.07	287.69	11.87	11.91
312.16	42.56	1.68	312.16	40.87	0.08	296.15	10.39	9.29

321.08	32.38	0.23	321.08	7.46	0.00	304.62	15.34	5.74
330.00	2.05	0.00	330.00	5.32	0.00	313.08	41.14	1.90
						321.54	17.96	0.08
						330.00	10.25	0.02

Plato agujero 20 mm			Plato agujero 25 mm			Plato agujero 30 mm		
Diámetro	Tensión	Deformación	Diámetro	Tensión	Deformación	Diámetro	Tensión	Deformación
mm	Mpa	mm	mm	Mpa	mm	mm	Mpa	mm
0.00	7.82	0.01	0.00	12.83	0.01	0.00	7.51	0.00
8.05	6.43	0.04	7.67	10.40	0.04	7.33	8.31	0.02
16.10	34.37	0.43	15.35	43.79	0.34	14.67	14.38	0.10
24.15	29.56	3.28	23.02	31.51	2.85	22.00	41.63	1.49
32.20	5.23	7.21	30.70	9.53	6.92	29.33	16.49	5.16
40.24	19.27	10.44	38.37	19.43	10.29	36.67	16.83	8.72
48.29	8.71	12.85	46.05	8.73	12.68	44.00	12.92	11.55
56.34	7.56	14.87	53.72	7.49	14.71	51.33	8.38	13.77
64.39	6.05	16.56	61.40	5.08	16.60	58.67	6.62	15.74
72.44	5.49	18.22	69.07	5.49	18.22	66.00	5.17	17.31
80.49	6.50	19.71	76.74	6.59	19.74	73.33	6.06	18.86
88.54	6.40	20.99	84.42	6.41	21.12	80.67	6.26	20.35
96.59	6.41	22.13	92.09	6.40	22.20	88.00	6.42	21.52
104.63	6.43	22.99	99.77	6.42	23.14	95.33	6.41	22.56
112.68	6.49	23.74	107.44	6.43	23.87	102.67	6.44	23.39
120.73	6.17	24.27	115.12	5.55	24.38	110.00	6.18	24.02
128.78	6.68	24.64	122.79	6.48	24.66	117.33	6.34	24.51
136.83	7.08	24.69	130.47	8.68	24.74	124.67	7.20	24.63
144.88	7.78	24.76	138.14	9.25	24.79	132.00	7.32	24.76
152.93	8.61	24.82	145.81	9.31	24.84	139.33	7.20	24.84
160.98	9.18	24.88	153.49	9.50	24.89	146.67	7.53	24.96
169.02	9.18	24.88	161.16	9.65	24.92	154.00	8.01	25.06
177.07	8.61	24.82	168.84	9.65	24.92	161.33	8.37	25.17
185.12	7.78	24.76	176.51	9.50	24.89	168.67	8.37	25.17
193.17	7.08	24.69	184.19	9.31	24.84	176.00	8.01	25.06
201.22	6.68	24.64	191.86	9.25	24.79	183.33	7.53	24.96
209.27	6.17	24.27	199.53	8.68	24.74	190.67	7.20	24.84
217.32	6.49	23.74	207.21	6.48	24.66	198.00	7.32	24.76
225.37	6.43	22.99	214.88	5.55	24.38	205.33	7.20	24.63

233.41	6.41	22.13	222.56	6.43	23.87	212.67	6.34	24.51
241.46	6.40	20.99	230.23	6.42	23.14	220.00	6.18	24.02
249.51	6.50	19.71	237.91	6.40	22.20	227.33	6.44	23.39
257.56	5.49	18.22	245.58	6.41	21.12	234.67	6.41	22.56
265.61	6.05	16.56	253.26	6.59	19.74	242.00	6.42	21.52
273.66	7.56	14.87	260.93	5.49	18.22	249.33	6.26	20.35
281.71	8.71	12.85	268.60	5.08	16.60	256.67	6.06	18.86
289.76	19.27	10.44	276.28	7.49	14.71	264.00	5.17	17.31
297.80	5.23	7.21	283.95	8.73	12.68	271.33	6.62	15.74
305.85	29.56	3.28	291.63	19.43	10.29	278.67	8.38	13.77
313.90	34.37	0.43	299.30	9.53	6.92	286.00	12.92	11.55
321.95	6.43	0.04	306.98	31.51	2.85	293.33	16.83	8.72
330.00	7.82	0.01	314.65	43.79	0.34	300.67	16.49	5.16
			322.33	10.40	0.04	308.00	41.63	1.49
			330.00	12.83	0.01	315.33	14.38	0.10
						322.67	8.31	0.02
						330.00	7.51	0.00

Plato agujero 35 mm			Plato agujero 40 mm			Plato agujero 45 mm		
Diámetro	Tensión	Deformación	Diámetro	Tensión	Deformación	Diámetro	Tensión	Deformación
mm	Mpa	mm	mm	Mpa	mm	mm	Mpa	mm
0.00	7.51	0.00	0.00	4.40	0.00	0.00	6.95	0.00
7.33	25.05	0.14	7.02	8.25	0.02	6.73	6.85	0.01
14.67	37.25	1.80	14.04	40.25	0.53	13.47	38.38	0.07
22.00	21.74	5.10	21.06	29.17	3.73	20.20	36.71	3.01
29.33	5.24	8.77	28.09	6.93	7.72	26.94	9.99	7.16
36.67	13.47	11.60	35.11	16.22	11.03	33.67	18.95	10.55
44.00	7.30	13.56	42.13	7.39	13.21	40.41	7.42	12.95
51.33	7.83	15.60	49.15	7.81	15.39	47.14	6.71	15.01
58.67	4.68	17.21	56.17	4.40	17.00	53.88	4.50	16.82
66.00	5.75	18.73	63.19	5.65	18.69	60.61	5.79	18.59
73.33	6.31	20.21	70.21	6.34	20.15	67.35	6.36	20.08
80.67	6.31	21.45	77.23	6.46	21.46	74.08	5.47	21.41
88.00	6.44	22.53	84.26	6.50	22.51	80.82	6.49	22.45
95.33	6.46	23.53	91.28	6.13	23.40	87.55	6.31	23.36
102.67	4.85	24.02	98.30	4.96	24.05	94.29	5.75	24.08
110.00	6.98	24.43	105.32	10.77	24.78	101.02	8.50	24.58
117.33	9.09	24.67	112.34	13.44	25.01	107.76	11.23	24.87
124.67	10.73	24.85	119.36	15.17	25.15	114.49	14.22	25.12
132.00	12.81	25.09	126.38	13.16	25.34	121.22	15.24	25.29
139.33	14.93	25.23	133.40	10.93	25.53	127.96	14.00	25.50

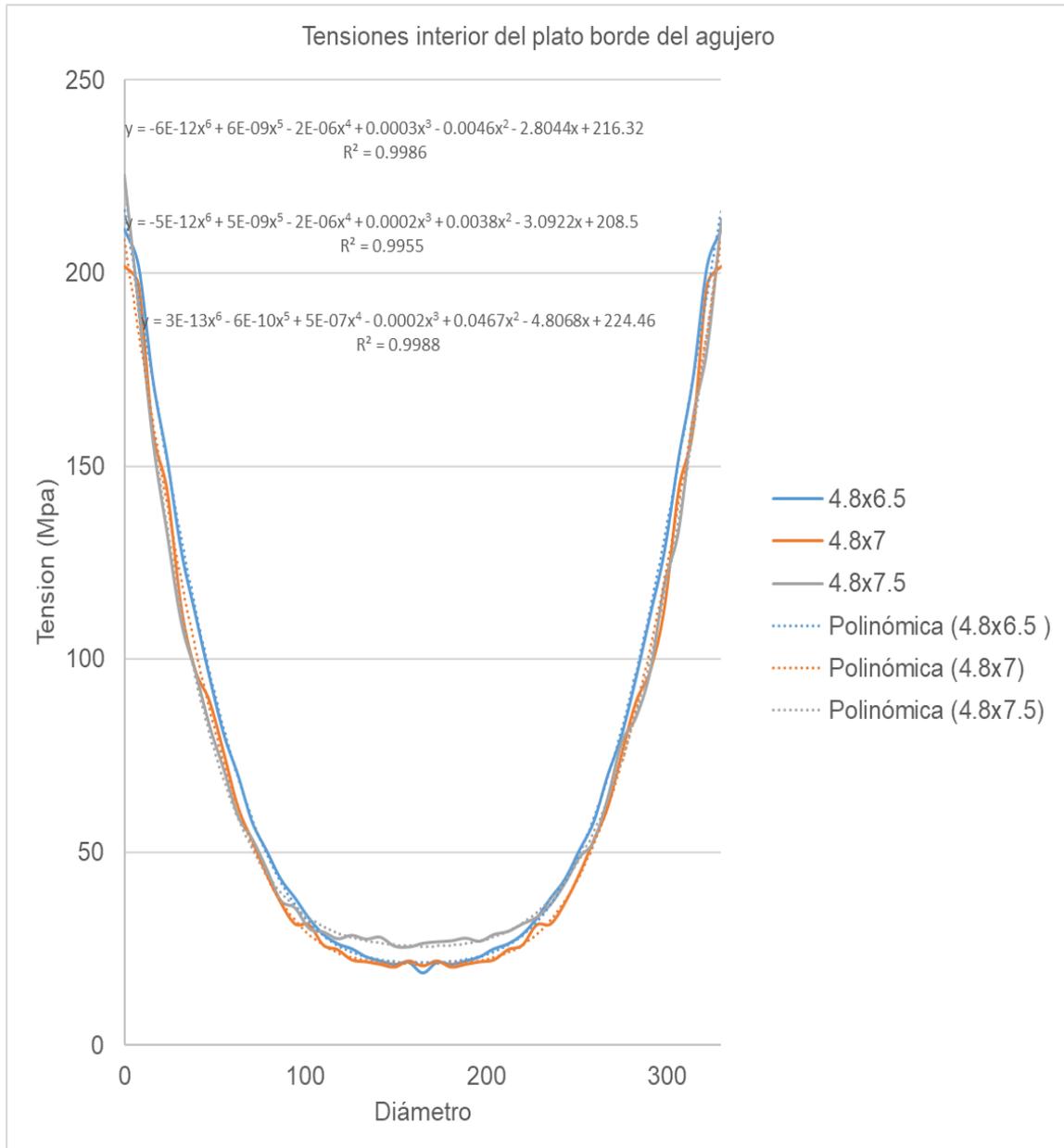
146.67	17.19	25.36	140.43	10.87	25.63	134.69	11.35	25.67
154.00	19.00	25.58	147.45	14.27	25.73	141.43	11.00	25.77
161.33	21.05	25.80	154.47	17.69	25.77	148.16	14.37	25.87
168.67	21.05	25.80	161.49	21.03	25.81	154.90	18.66	25.93
176.00	19.00	25.58	168.51	21.03	25.81	161.63	22.58	26.00
183.33	17.19	25.36	175.53	17.69	25.77	168.37	22.58	26.00
190.67	14.93	25.23	182.55	14.27	25.73	175.10	18.66	25.93
198.00	12.81	25.09	189.57	10.87	25.63	181.84	14.37	25.87
205.33	10.73	24.85	196.60	10.93	25.53	188.57	11.00	25.77
212.67	9.09	24.67	203.62	13.16	25.34	195.31	11.35	25.67
220.00	6.98	24.43	210.64	15.17	25.15	202.04	14.00	25.50
227.33	4.85	24.02	217.66	13.44	25.01	208.78	15.24	25.29
234.67	6.46	23.53	224.68	10.77	24.78	215.51	14.22	25.12
242.00	6.44	22.53	231.70	4.96	24.05	222.24	11.23	24.87
249.33	6.31	21.45	238.72	6.13	23.40	228.98	8.50	24.58
256.67	6.31	20.21	245.74	6.50	22.51	235.71	5.75	24.08
264.00	5.75	18.73	252.77	6.46	21.46	242.45	6.31	23.36
271.33	4.68	17.21	259.79	6.34	20.15	249.18	6.49	22.45
278.67	7.83	15.60	266.81	5.65	18.69	255.92	5.47	21.41
286.00	7.30	13.56	273.83	4.40	17.00	262.65	6.36	20.08
293.33	13.47	11.60	280.85	7.81	15.39	269.39	5.79	18.59
300.67	5.24	8.77	287.87	7.39	13.21	276.12	4.50	16.82
308.00	21.74	5.10	294.89	16.22	11.03	282.86	6.71	15.01
315.33	37.25	1.80	301.91	6.93	7.72	289.59	7.42	12.95
322.67	25.05	0.14	308.94	29.17	3.73	296.33	18.95	10.55
330.00	7.51	0.00	315.96	40.25	0.53	303.06	9.99	7.16
			322.98	8.25	0.02	309.80	36.71	3.01
			330.00	4.40	0.00	316.53	38.38	0.07
						323.27	6.85	0.01
						330.00	6.95	0.00

Anexo 3: Configuraciones de agujeros para cada uno de los platos de respaldo utilizados en las simulaciones. Fuente: Elaboración propia.

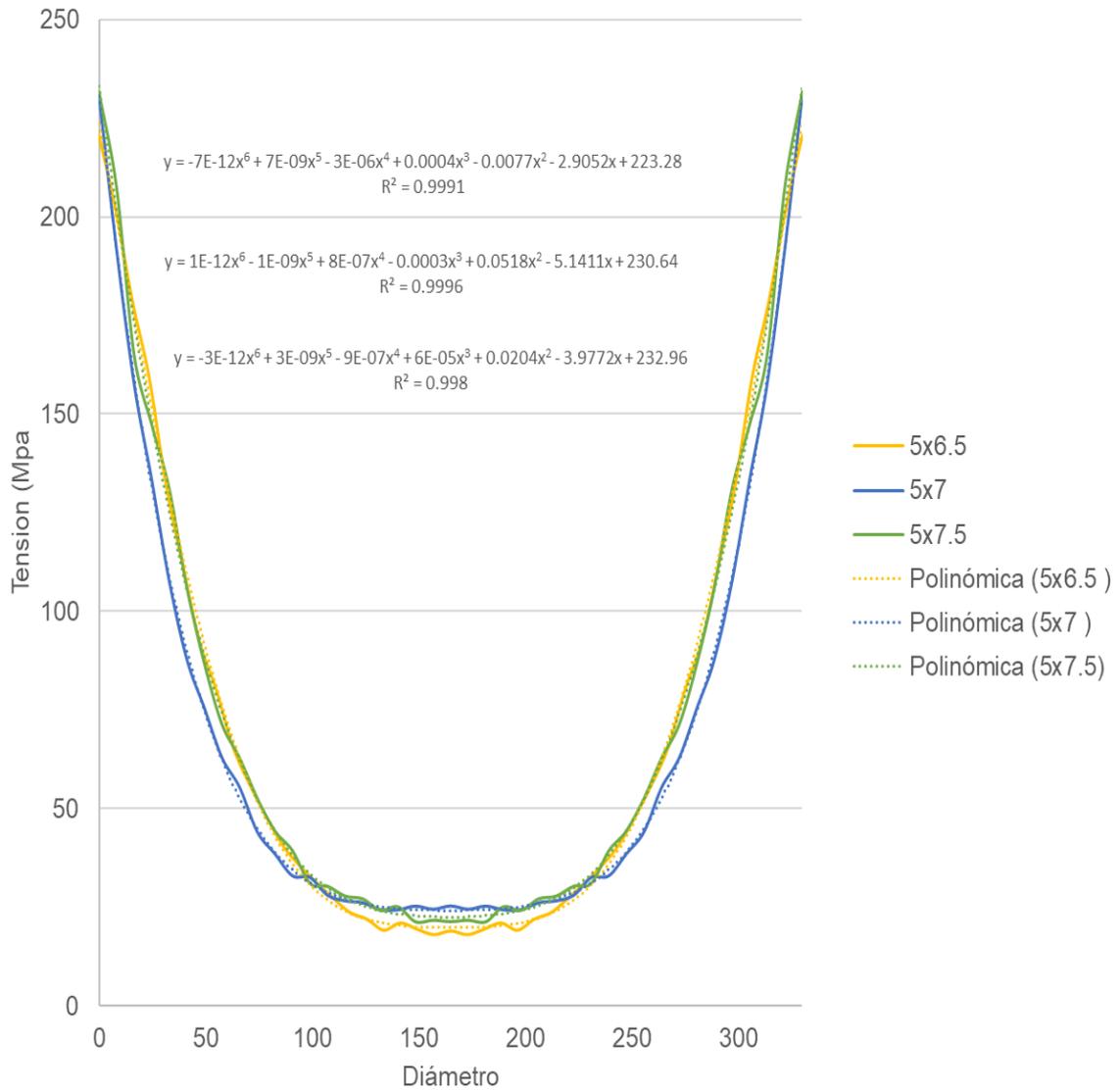
Diámetro agujero (mm)	Paso (mm)	Espesor nervio (mm)	Imagen
4.8	6.5	1.7	
4.8	7	2.2	
4.8	7.5	2.7	
5	6.5	1.5	
5	7	2	
5	7.5	2.5	
5.5	6.5	1	
5.5	7	1.5	
5.5	7.5	2	
6	7	1	
6	7.5	1.5	

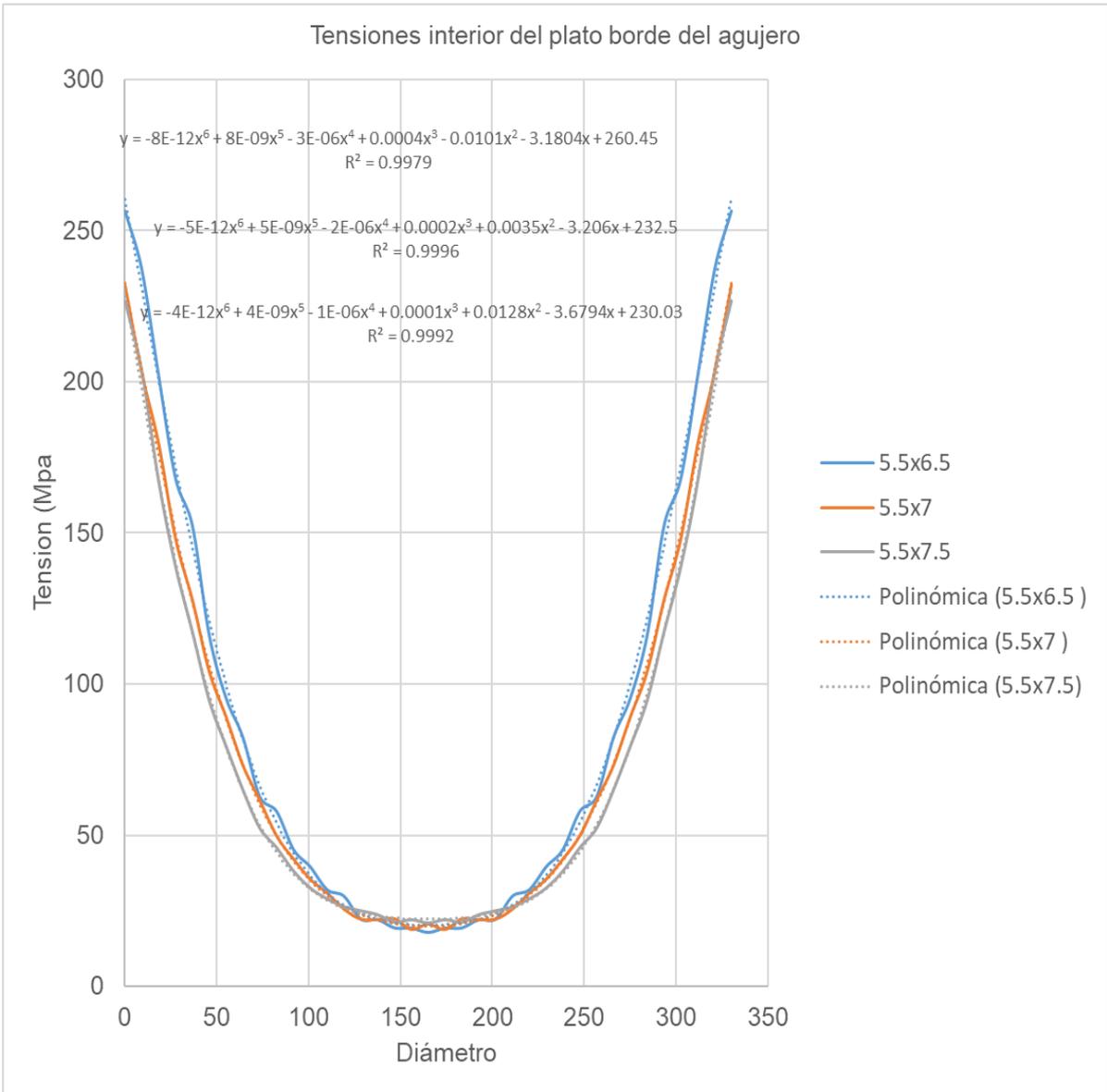
6	8	2	
7	8	1	<p>Type: Von Mises Stress Unit: MPa 11/6/2020, 14:35:57 397.7 Max 318.2 239.6 159.1 79.6 0 Min</p>
7	8.5	1.5	
7	9	2	
8	9	1	
8	9.5	1.5	<p>Type: Von Mises Stress Unit: MPa 11/6/2020, 14:40:57 409.4 Max 327.5 245.6 163.8 81.9 0 Min</p>
8	10	2	
9	10	1	
9	10.5	1.5	<p>Type: Von Mises Stress Unit: MPa 11/6/2020, 14:50:50 425.1 Max 340 259.1 178 89 0 Min</p>
9	11	2	
10	11	1	
10	11.5	1.5	<p>Type: Von Mises Stress Unit: MPa 11/6/2020, 14:54:20 449.6 Max 359.7 279.8 189.9 94.9 0 Min</p>
10	12	2	

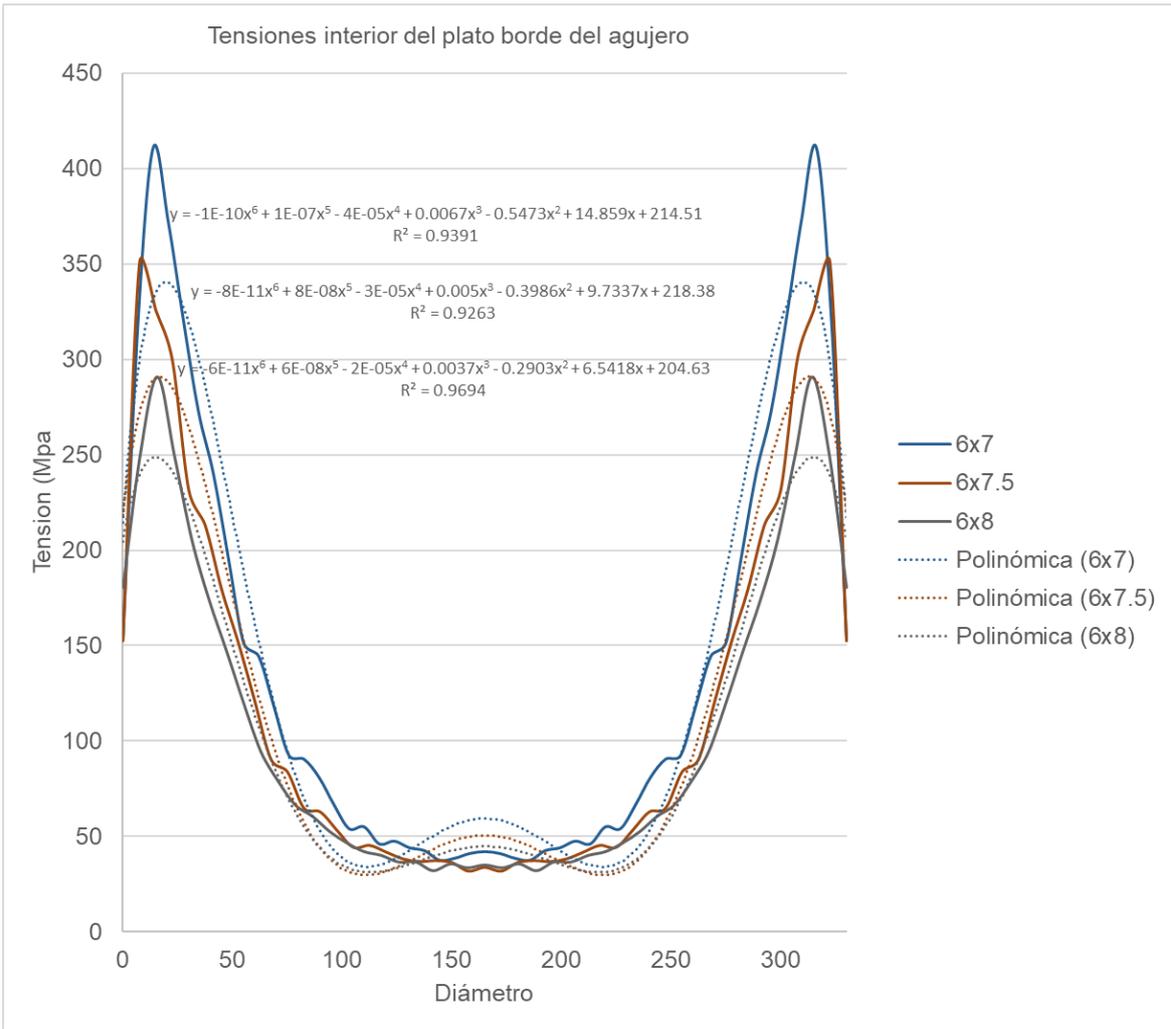
Anexo 4: Tensiones en el Interior del plato de respaldo para diferentes configuraciones.

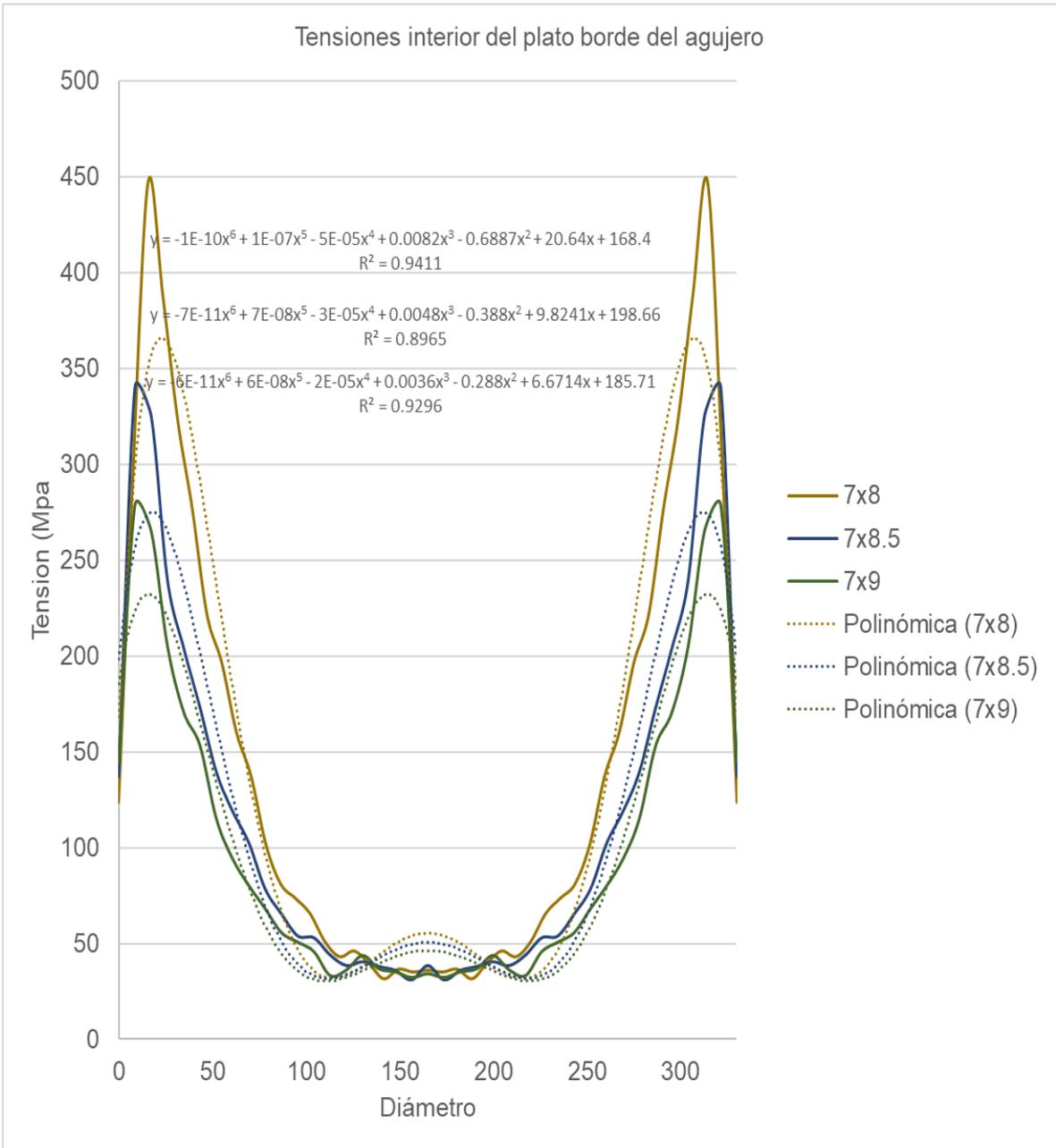


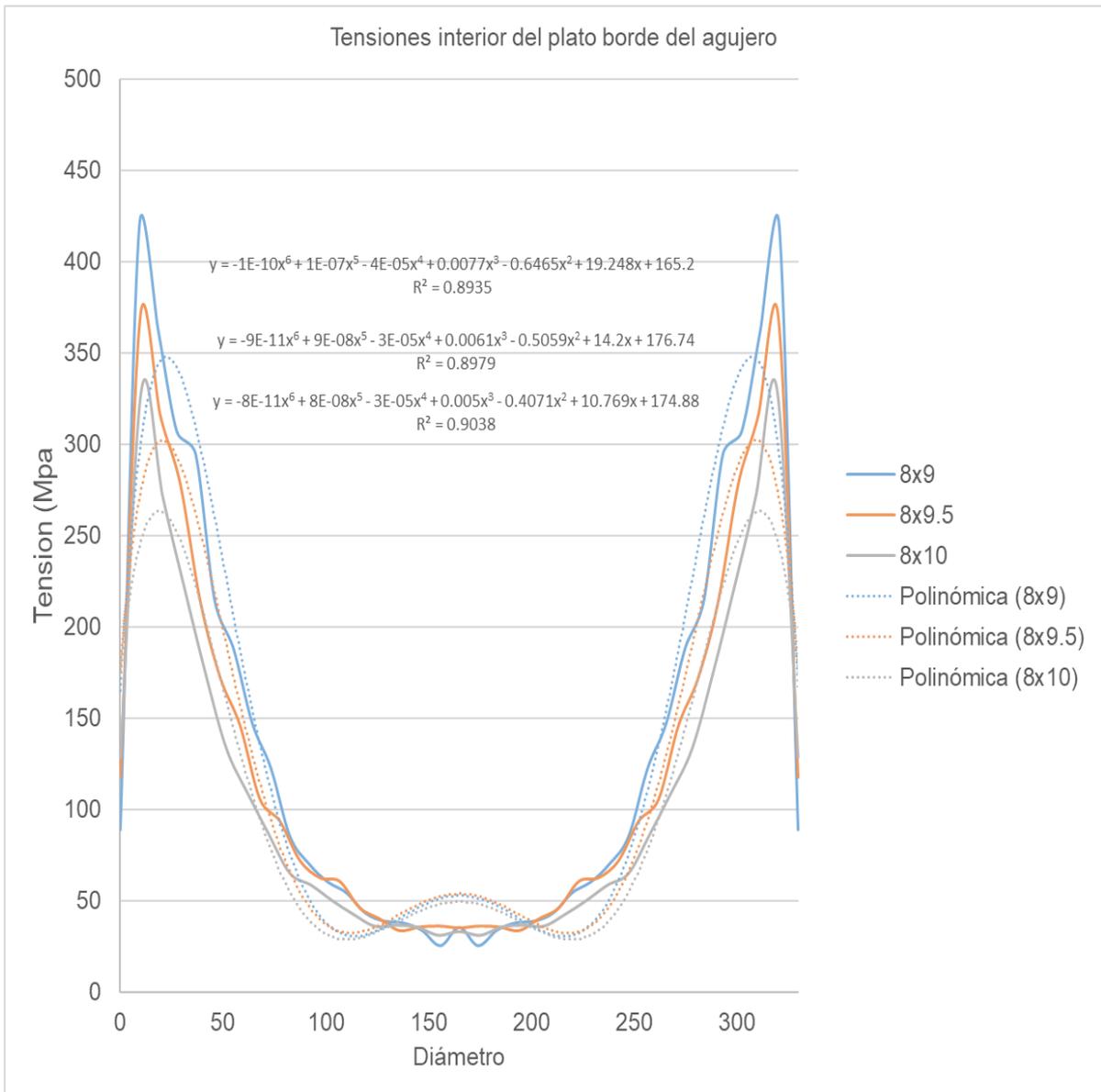
Tensiones interior del plato borde del agujero

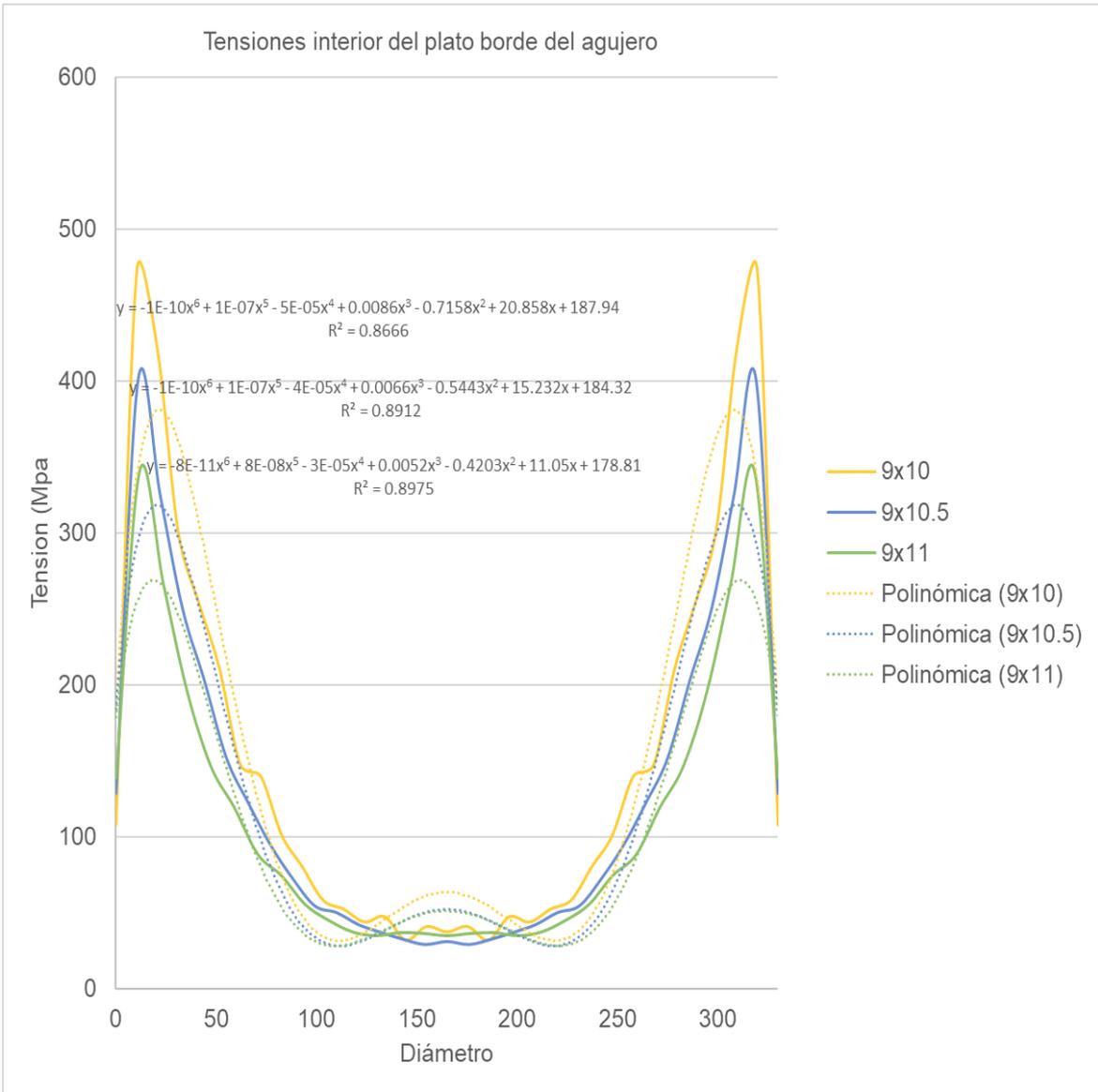


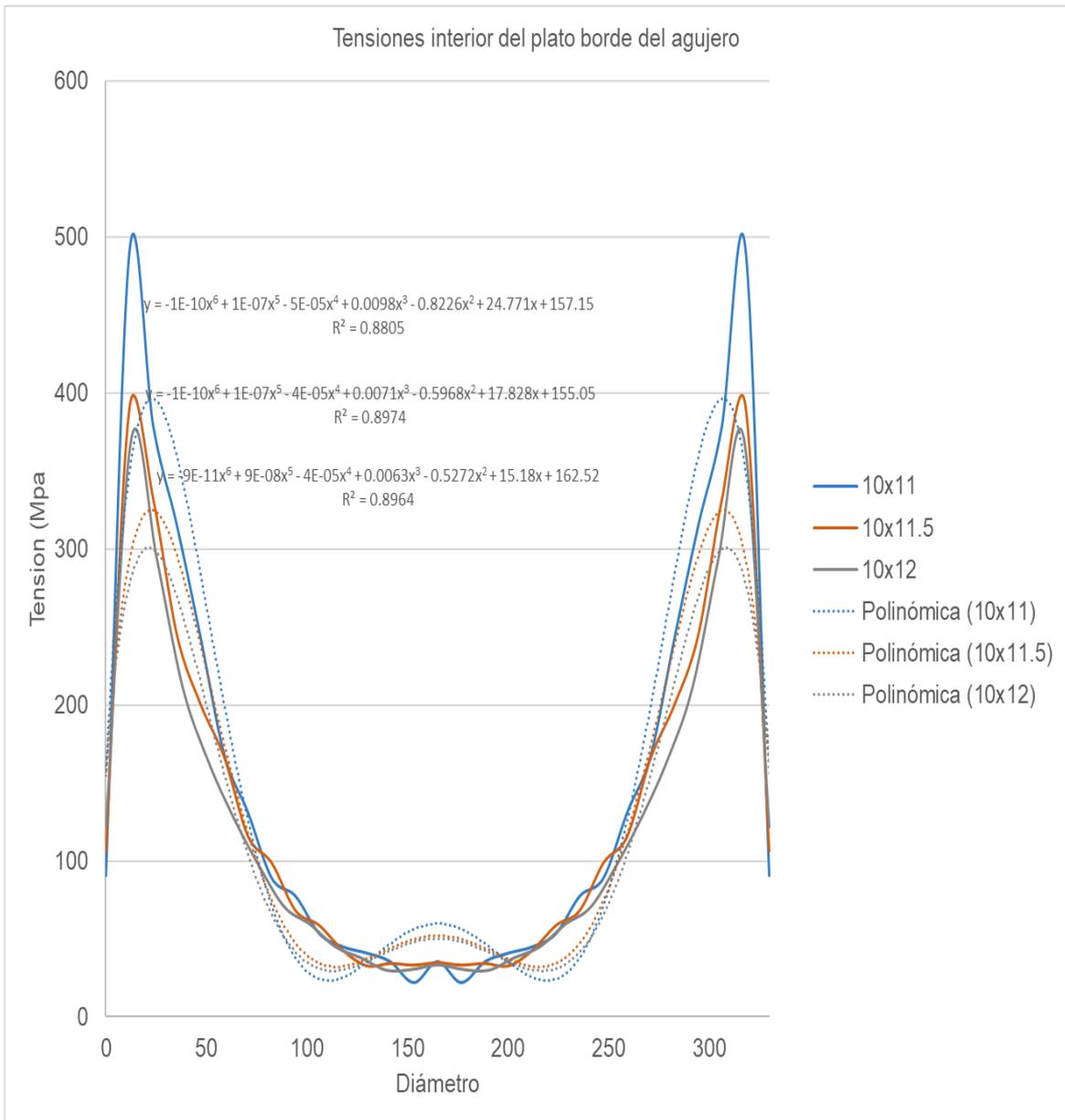












Anexo 5: Tensiones en el exterior del plato de respaldo para diferentes configuraciones de agujeros.

