

UABC

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

CON EL TEMA DE:

**“MANUFACTURA DE UN SILENCIADOR
DE VAPOR”**

QUE PRESENTA:

MIRANDA HERRERA CARLOS ALFONSO

MATRICULA:

01/48124

MEXICALI B. C. A VIERNES 16 DE ENERO DE 2004

AGRADECIMIENTOS:

Deseo agradecer una vez más a Dios por permitirme estar de nuevo en este camino. A mi Alma Máter por continuar dándome la oportunidad de desarrollarme profesionalmente y a todos aquellos maestros que hicieron esto posible, en especial a los Ingenieros Miguel Ángel Martínez, Víctor Nuño e Israel Saucedo.

DEDICATORIA:

Esta propuesta de manufactura esta dedicada a todas aquellas personas que necesiten una opción accesible para hacer equipos reductores de ruido metálicos de gran escala.

Sin embargo, no puedo dejar de dedicar este trabajo a una de las personas más importantes en mi vida, alguien que siempre ha estado ahí para recordarme que debo comer, dormir y limpiar, mi madre.

PRÓLOGO

***E**n esta segunda parte de la trilogía dedicada a un solo sistema se abarca el proceso de manufactura del silenciador de vapor. Habiendo realizado en el trabajo anterior una introducción al funcionamiento de este equipo dejando sentadas las bases del diseño de su funcionamiento, características, ventajas y porqué no, también desventajas; ahora manejo un tema diferente pero más concreto y específico: Encontrar que la naturaleza teórica del prototipo pueda ser llevado a la práctica de una forma real y acorde a los materiales que existen en el mercado.*

Para entender este trabajo no se requiere de tener conocimientos de termodinámica ni fluidos o física, ya que no se pretende explicar o justificar el funcionamiento del equipo como tampoco se discute si cumple con los requisitos de bajos niveles de ruido sino que se parte del entendido de que todas estas suposiciones son reales, ya que lo que interesa es su construcción y el porqué de las diferentes elecciones de los procesos y los materiales. Tampoco exige este trabajo conocimientos en metal-mecánica ya que en el marco teórico se dejan sentadas todas las bases necesarias para la total comprensión de los procesos a los que se somete el acero.

Solo me resta desear que el lector disfrute de esta lectura tanto como yo disfrute realizándola y que le sea de interés y utilidad.

ÍNDICE

	Pag.
AGRADECIMIENTOS	<u>ii</u>
DEDICATORIA	<u>ii</u>
PRÓLOGO	<u>iii</u>
INTRODUCCIÓN	<u>vii</u>
 CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	<u>1</u>
1.1 Planteamiento del Problema	1
 CAPÍTULO II	
OBJETIVOS	<u>2</u>
2.1 Objetivos	2
2.1.1 Objetivos particulares	2
2.2 Alcance	2
 CAPÍTULO III	
MARCO TEÓRICO	<u>3</u>
3.1 Manufactura	3
3.1.1 Manufactura asistida por computadora	7
3.2 Limitaciones de manufactura	7
3.2.1 Flexibilidad en paredes	9
3.2.2 Materiales acústicos	9
3.3 Diseño Mecánico	10
3.3.1 Esfuerzo Máximo Permisible (S_a)	10
3.3.2 Cargas	10
3.3.3 Presión de Operación	10
3.3.4 Presión de Diseño	10

3.3.5 Máxima Presión de Operación	11
3.4 Máquinas herramientas	12
3.4.1 Herramientas	15
3.4.2 Centro de control numérico	16
3.4.3 Arco de plasma	19
3.4.4 Corte con arco de carbono y aire	22
3.5 Metalmecánica	22
3.5.1 Extracción	24
3.5.2 Doblado	25
3.5.3 Formado por rolado	27
3.6 Materiales Posibles	29
3.7 Corrosión	33
3.8 Tratamientos térmicos	35
3.9 Soldadura	37
3.9.1 Ensayos no destructivos	38
3.9.2 Imperfecciones comunes	40
3.10 Placas de Orificio	41
3.10.1 Especificaciones	42
3.11 Análisis de elemento finito	43
CAPÍTULO IV	
<u>HIPÓTESIS</u>	<u>43</u>
4.1 Hipótesis	43
CAPÍTULO V	
<u>COMPROBACIÓN</u>	<u>44</u>
5.1 Desarrollo	44
5.2 Factor de seguridad	46
5.3 Corte	49
5.4 Manufactura de placas de orificio (CNC)	49
5.5 Formado del cuerpo	53
5.5.1 Prensa hidráulica	54
5.5.2 Doble de placas	55
5.6 Proceso de soldadura	56
5.7 Acabado	58
5.8 Análisis de esfuerzos (Elemento finito)	58

5.9 Ingeniería Económica	63
--------------------------	----

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

64

6.1 Conclusiones	64
------------------	----

APÉNDICE A (PLANOS DE DISEÑO)

APÉNDICE B (GRÁFICOS DE ELEMENTO FINITO)

BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

Este documento contiene valiosa información acerca de los procesos de manufactura tipo taller de equipos de uso rudo en condiciones de uso extremas. Se maneja un alto contenido de especificaciones de corte, soldadura, tratamientos y ecuaciones de formado de metales enfocado a acero inoxidable como es el común 316L.

En otros apartados se manejan características más específicas del sistema del proceso para el que fue hecho, el silenciador de vapor, como es la producción de placas de multi-orificio, así como su análisis de esfuerzos por elemento finito.

Se pretenden dejar sentadas las bases de la manufactura de silenciadores de vapor monofásico para cualquier proceso donde se necesite desfogar vapor de alta calidad a la atmósfera y el ruido provocado pueda resultar en el daño de los obreros u otros equipos.

Las características que se tomaron en cuenta para el desarrollo de la fabricación de este sistema fueron el de la corrosión, las vibraciones, el tamaño especificado por el diseñador y sobre todo los costos de fabricación. Todo esto nos debe dar una vida útil suficientemente larga como para amortiguar su costo y que resulte viable la fabricación del sistema.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En procesos industriales el vapor desfogado a la atmósfera a alta temperatura y presión provoca una gran cantidad de ruido inadmisible por sus efectos dañinos en la salud de los trabajadores, de aquí surge la necesidad de un silenciador de vapor.

Silenciadores de vapor son comunes en el mercado pero a precios elevados y en

condiciones estándar de diseño. Cada proceso es diferente y requiere protecciones adecuadas para su sistema de alivio, ya que estas no se accionarán ni a la misma temperatura ni a la misma presión para todos los casos. Al tener estos sistemas de alivio un sistema de desfogue no adecuado, ya sea por encima o por debajo de las características de diseño, estos no funcionarán adecuadamente y pueden producir daños en el sistema o simplemente no realizar la función para la que fueron adquiridos.

Partiendo de una investigación anterior se obtuvo el diseño de un nuevo tipo de silenciador de vapor, el cual se puede fabricar a las medidas de las necesidades de cada sistema de desfogue; y una vez comprobadas, mediante un prototipo, la eficiencia de las ecuaciones del diseño llegamos al punto donde se tiene que desarrollar el sistema de manufactura para la fabricación de estos silenciadores, para demostrar que el diseño puede ser realizado con éxito con los procesos actuales de manufactura.

De esta manera llegamos a plantearnos la pregunta que este trabajo de investigación pretende contestar:

¿Cómo manufacturar un silenciador de vapor?

En la actualidad los diseños modernos de equipo requieren maquinados especiales que, aunque no se necesite una amplia producción, difícilmente pueden hacerse tipo taller. Esta investigación pretende encontrar los procesos de manufactura más adecuados para la realización de silenciadores a la medida de las necesidades de los diferentes procesos donde se puedan requerir.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS:

2.1 OBJETIVOS

Esta investigación tiene el propósito de desarrollar un sistema de manufactura eficiente dirigido a la fabricación de un silenciador de vapor.

2.1.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- Encontrar las mejores técnicas de fabricación de silenciadores tanto para el formado de la coraza exterior como para hacer las placas difusoras de alta precisión; estos métodos deben ser estandarizados y flexibles para facilitar la manufactura y disminuir tiempos de fabricación.
- El proceso de manufactura debe ser repetible, confiable, seguro y de alta calidad.
- El modelo debe mantener tiempos mínimos de manufactura y evitar el desperdicio de material.
- Se busca un modelo sencillo y fácil de aplicar, que no consuma mucho tiempo de trabajo de los empleados, ya que estos silenciadores no se crearán en serie ni en grandes cantidades, solamente bajo pedidos individuales.
- El nuevo sistema debe ser económico en el aspecto de su producción, a partir de materia prima básica común, como el metal del que esta hecho.
- Esta investigación tiene como objetivo producir un sistema de manufactura para un silenciador de máxima eficiencia con un mínimo de costo de fabricación para su implementación en plantas industriales que necesiten desfogar vapor de alta calidad a la atmósfera.

2.2 ALCANCE

Esta investigación pretende abarcar todas las necesidades de manufactura de un sistema de silenciaci3n a gran escala partiendo del hecho de que el dise1o es funcional.

Se opt3, como ejemplificaci3n, dise1ar un sistema de manufactura que fabrique silenciadores relativamente grandes, esto por las diferentes implicaciones y complicaciones que en un proceso a gran escala pueden ocurrir para as3 llevar el dise1o a un alto nivel de detalle en la carta de manufactura donde se incluir3n sistemas de formado de la estructura, soldado, maquinado de partes y planos. Tambi3n se incluir3 una breve introducci3n a la manufactura enfocada a nuestro sistema y se explicar3n las diferentes alternativas de materiales y procesos a utilizar y el porque de la mejor elecci3n.

CAPÍTULO III **MARCO TEÓRICO**

3.1 MANUFACTURA

“Un ingeniero de dise1o debe conocer lo que necesita satisfacer el dise1o, que se puede asumir de requerimientos y carga de servicio, que ambiente de servicio debe soportar el producto, y cual debe ser la apariencia final del producto. Los materiales a ser usados deben ser seleccionados y especificados. La selecci3n de un material especifico puede

dictar que proceso debe ser usado. El diseño puede tener que ser modificado por el proceso para ser utilizado efectiva y económicamente. Tamaños dimensionales pueden dictar los procesos, y algunos procesos requieren ciertos tamaños para las partes que procesan.

Los ingenieros de manufactura seleccionan y coordinan procesos específicos y equipo a ser usado, o supervisar y manejar su uso.

Un sistema de producción incluye personal, recursos financieros, equipo, materiales y suplementos, mercados, manejo (gerencia), y el sistema de manufactura. El sistema de producción incluye el sistema de manufactura y le da servicio.

Existen cinco sistemas de manufactura: *maquinado, flujo, células, proyectos y proceso continuo*.

El *maquinado* tiene gran variedad de componentes, máquinas de propósito general, y un plan funcional. Esto significa que las máquinas son dispuestas por su función y que las partes son mandadas alrededor del taller en contenedores a las diferentes máquinas. El material en el carro o contenedor es llamado lote.

El *taller de flujo* se caracteriza por grandes cantidades de construcción, máquinas de uso especial, menos variedad, y más mecanización. Si es continuo, básicamente corren un producto de gran volumen, complejo y en gran cantidad; y nada más. Si es interrumpido, la línea manufactura grandes cantidades pero es periódicamente cambiado para correr un componente similar pero diferente.

El *sistema de celda de manufactura* esta compuesto de células de manufactura conectadas entre si usando una forma única de inventario e información de control (kanban).

El *taller de proyectos* tiene la inmovilidad del articulo que se esta manufacturando. Es necesario que los trabajadores, máquinas, y materiales vengan al sitio. El número de artículos terminados no es muy grande, por lo que el tamaño de lote de los componentes finales no es grande. Así el taller de maquinado usualmente suple partes y subensambles al taller de proyectos en pequeños lotes.

El *flujo continuo* es el más común por que presenta menos costo por eficiencia. Las partes de los componentes en un taller de trabajo típico dura 5% de su tiempo en máquinas y el resto del tiempo esperando a ser movido.

Una *máquina herramienta* es un ensamble de mecanismos relacionados en un marco o cama que juntos producen un resultado deseado.

Una *estación* es el área de trabajo de una línea de producción.

Un *trabajo* es el total de los deberes que hace un trabajador.

Un *trabajo* puede ser un grupo de operaciones relacionadas y tareas hechas en una estación o series de estaciones en células. Un *trabajo* es un grupo de operaciones relacionadas,

generalmente realizadas en una estación, y una *situación* es una posición o locación en una máquina donde las operaciones específicas son realizadas. Una simple máquina puede tener una sola estación. Máquinas complejas pueden estar compuestas de muchas estaciones.

Una *operación* es una acción distinta realizada para producir un resultado deseado o efecto. Las operaciones pueden ser divididas en elementos suboperacionales. Las operaciones son categorizadas en:

- 1.- Manejo de materiales y transporte.
- 2.- Procesamiento.
- 3.- Empaquetado.
- 4.- Inspección y prueba.
- 5.- Almacenaje.”¹

“La cantidad de producción se refiere al número de unidades de una parte o producto producido anualmente y se clasifican en:

- 1.- Baja producción: Cantidades en el rango de 1 a 100 unidades por año
- 2.- Producción media: Cantidades en el rango de 100 a 10,000 unidades anuales.
- 3.- Alta producción: Cantidades de producción de 10,000 a millones de unidades

La variedad del producto se refiere a diferentes diseños de producto o tipos que son producidos en una planta. Diferentes productos tienen diferentes formas, tamaños y estilos, realizan diferentes funciones.

Existe una correlación inversa entre variedad y producción, esto es, a mayor producción menor variedad y viceversa. Existen dos tipos de variedad de producto:

- 1.- Variedad de producto dura: En la cual los productos difieren substancialmente, esta caracterizada por la baja proporción de partes comunes.
- 2.- Variedad de producto blanda: Cuando hay pequeñas diferencias entre productos, tienen una alta proporción de partes comunes.

El tipo de instalaciones donde se fabrican elementos de “baja producción” generalmente se les conoce como talleres, los cuales hacen bajas cantidades de productos especializados y personalizados.

Un taller debe ser diseñado para tener flexibilidad máxima.

Las producciones de alto rango (de 10,000 a millones de unidades) son referidas como producción en masa. Se caracteriza por la gran demanda de su producto y por que las instalaciones de producción están dedicadas a la manufactura de ese producto.

Una compañía se debe organizar para diseñar el proceso y el equipo, planear y controlar las ordenes de producción y satisfacer los requerimientos de calidad de la producción.

Diseño del producto

Si el producto se ha fabricar a las necesidades del cliente, el diseño será provisto por el cliente. Si el producto se ha de producir con las especificaciones del cliente, el departamento de diseño del producto se encargará del diseño y la manufactura.

La planeación de la manufactura incluye hechos logísticos, como planeación de la producción. La autorización para producir un producto debe de ser trasladada al plan maestro de producción, el cual es una lista de los productos a fabricar, cuando se entregarán, y en que cantidades. Los componentes individuales y subensambles deben ser programados. La materia prima debe ser comprada o requisitada del almacén, las partes compradas deben ser ordenadas a los proveedores para que lleguen cuando se les necesite. Esta tarea se le llama Plan de requerimientos de Materiales (Material Requirements Planning “MRP”). La lista maestra no debe contener más cantidades de producto del que la fabrica es capaz de producir cada mes, el cual esta dado por el número de máquinas y mano de obra. Una función llamada Capacidad de Planeación se dedica a la planeación de maquinaria y mano de obra.

Planeación de proceso

Es la determinación de cómo una parte específica será hecha en una fabrica. Son los pasos detallados de producción de una parte, y entonces seleccionar el método optimo para lograr cada paso. Esto incluye la determinación del mejor proceso de manufactura, así como la secuencia de operaciones que asegurarán la medida más eficiente de tiempo y costo.

Automatización puede ser definida como la tecnología que se dedica a la aplicación de sistemas mecánicos, electrónicos y computaciones para operar y controlar la producción. Los elementos autómatas pueden ser separados en dos categorías:

- 1.- Automatización de los sistemas de manufactura en la planta y
- 2.- Computarización de los sistemas de soporte de manufactura.

Estas dos categorías se traslapan en algún momento, ya que los sistemas automatizados de manufactura que operan en el piso de la fábrica son implantados por sistemas de manufactura y conectados a los sistemas de soporte de manufactura y a los sistemas operativos de manejo de información de la planta y niveles empresariales.

Razones para automatizar

1. Incrementar la productividad
2. Reducir costos de trabajo
3. Mitigar los efectos de déficit de trabajo
4. Reducir la rutina manual
5. Mejorar la seguridad del empleado
6. Mejorar la calidad del producto
7. Reducir el tiempo de manufactura
8. Realizar los procesos que no pueden ser hechos manualmente
9. Evitar altos costos por no automatizar

No se niega el hecho de que a largo plazo, la tendencia de la manufactura es hacia el uso de máquinas automatizadas para sustituir la labor manual.

Existen países donde los costos promedio de hora de mano de obra son suficientemente bajos que la mayoría de los proyectos de automatización son imposibles de justificar. En adición a esto existen factores económicos que hacen a la labor manual una alternativa fehaciente a la automatización, algunas de estas razones son:

1. La tarea es tecnológicamente difícil para automatizar
2. Corta vida del producto
3. Productos personalizados
4. Mercado variable
5. Reducir el riesgo de falla del producto

Puntos fuertes y atributos de los humanos y las máquinas

PUNTOS FUERTES DE LOS HUMANOS	PUNTOS FUERTES DE LAS MÁQUINAS
Perciben estímulo inesperado	Realizan tareas repetitivas consistentemente
Encuentran nuevas soluciones a problemas	Almacenan grandes cantidades de información
Lidian con problemas abstractos	Recuperan información de memoria confiable
Se adaptan al cambio	Realizan múltiples operaciones al mismo tiempo
Generalizan de la observación	Aplican grandes fuerzas y energía
Aprenden de la experiencia	Computan rápidamente
Toman decisiones difíciles basados en información incompleta	Toman decisiones de rutina rápidamente

Tabla 1

Ir a través de cada paso del procedimiento para un proyecto de automatización puede revelar que simplificar el proceso es suficiente y no es necesario automatizar. El principio de automatización consta de tres partes:

1. Entender el proceso existente
2. Simplificar el proceso
3. Automatizar el proceso

Una estrategia de migración a la automatización es como sigue:

Fase 1.- Producción manual usando estaciones sencillas operando independientemente. Usado para la introducción de un nuevo producto por razones antes mencionadas: bajo costo en herramientas y rapidez para empezar.

Fase 2.- Producción automatizada usando células sencillas automatizadas operando independientemente. Según aumente la demanda y se justifique la automatización, las estaciones sencillas son automatizadas para reducir el trabajo y aumentar la producción. Las unidades de trabajo todavía se mueven entre estaciones manualmente.

Fase 3.- Producción integrada automatizada usando un sistema automatizado de multiestación con operaciones seriales y transferencia automatizada de unidades de trabajo entre estaciones. Cuando la compañía esta segura que el producto será producido en masa y por muchos años, la integración de una estación sencilla de células automatizadas esta garantizada para reducir el trabajo e incrementar la producción.”²

“Los tres criterios fundamentales, que determinan la producción económica son:

1. Diseño funcional de la parte o del conjunto, con la mayor simplicidad compatible con la calidad estética apropiada
2. Selección de un material compatible con las propiedades físicas, aspecto, costo y facilidad de procesar.
3. Selección del proceso correcto para producir la parte individual, de tal forma, que no se obtenga más precisa de lo necesario y al menor costo unitario.”³

3.1.1 MANUFACTURA ASISTIDA POR COMPUTADORA

“El uso de computadoras para monitorear y controlar el proceso de una parte diseñada y para soportar sus operaciones de producción es llamada manufactura asistida por computadora (CAM, Computer Aided Manufacturing). Tiene como funciones principales el control numérico de las operaciones de una máquina herramienta, planeación de proceso, robótica y manejo de la planta. Debe proporcionar un ambiente eficiente de manufactura, y la computadora es una parte integral de esto.”⁴

3.2 LIMITACIONES DE MANUFACTURA

Se tiene que referir particularmente al análisis del diseño mecánico, analizando independientemente el diseño de placas de orificios múltiples por ser la base del sistema de silenciación. El diseño de las placas de orificio se basa en continuas iteraciones a partir de los datos de entrada de diseño como es la caída de presión que se requiere en el sistema y el diámetro de la tubería que lleva el fluido, así como las propiedades de este.

Lo que se busca es maximizar el uso de la placa de orificio, por lo que debe tener medidas exactas al hacer que caiga considerablemente la presión de vapor sin llegar al flujo sónico y tomando en cuenta que si se reduce mucho el agujero de la placa el vapor tenderá a dejar de fluir, y esto, provocará que aumente la presión en la entrada y habrá un gran diferencial de presión, pero considerables daños al sistema en el peor de los casos. De manera contraria, si el diámetro es muy grande no habrá caída de presión, que es lo que se busca.

En la salida de las placas de orificio se forman vórtices de Kármán generadores de vibración en sentido perpendicular a la dirección del fluido. Esta fuente de vibración puede llegar a ser muy intensa y si no se toma en consideración en el diseño puede llegar a causar la destrucción del sistema de silenciación, por lo que se debe tener un estricto control de calidad de la soldadura. Las altas velocidades provocadas por la reducción de área en la placa de orificio provocan grandes remolinos y diferencias de presión; esto conlleva a reforzar el diseño mecánico, en especial el de aplicación de la soldadura, que en caso de ser mal aplicada, al no reunir las especificaciones o cuando se omiten detalles de fabricación

como los biseles de aplicación en el material, pueden ser de factor crítico para la vida del silenciador. De cualquier manera esta vibración se debe absorber por medio de sistemas tensores poniendo especial atención en la cimentación del sistema en conjunto, tanto para anclajes del cuerpo del silenciador como para el sistema absorbente de vibración.

Mientras más largas sean las paredes mayor será el decremento en el nivel de sonido. Ya que esto formara un ángulo de sombra de sonido que no permitirá que escape hacia el punto de referencia de observación y permitirá una difusión dentro del silenciador que provocará que las paredes absorban el ruido. Y mientras más flexibles sean las paredes mayor será la absorción de sonido, siempre y cuando las paredes no vibren a la misma frecuencia que la fuente de ruido lo que produciría un daño significativo al equipo o hasta su posible destrucción. Si se decide incrementar el tamaño de la pared se debe tomar en cuenta que los soportes antivibratorios también tendrán que desplazarse hacia arriba o colocar un nuevo sistema, ya que se corre el riesgo de que se produzca vibración en la punta del silenciador debida al golpeteo producido por el flujo turbulento del vapor contra las paredes sin fijar. Si esta vibración se produce a baja frecuencia se recuperará la onda de presión, esto es ruido, debido a que la pared del silenciador moverá el aire a su alrededor.

La salida del silenciador tendrá que ser con bordes cuadrados con arista recta para provocar una súbita expansión del fluido y disminuir su velocidad. Ya que si las aristas tienen un ángulo que obstruya la salida de manera piramidal se generará un flujo en extremo turbulento con una aceleración y si las aristas tienen un ángulo a manera cónica el flujo no se expandirá súbitamente llegando a conservar algunas de las características indeseables que tenía en el silenciador.

La carcasa del silenciador deberá estar hecha para soportar el uso rudo y las condiciones adversas altamente corrosivas y altas temperaturas. La forma o modelo final de silenciador debe contar con una abertura para drenaje en el punto mas bajo practicable en la coraza; o puede ser usado un tubo extendido hacia adentro desde alguna otra localización hasta 6mm ($\frac{1}{4}$ de pulgada) del punto más bajo.

En los silenciadores el gradiente de presión es parcialmente reducido creando menos ruido, los silenciadores permiten la expansión cuando aumenta la temperatura sin poner demasiado esfuerzo en la rigidez. El diseño compacto y cilíndrico suprime posibles vibraciones.

3.2.1 FLEXIBILIDAD EN PAREDES

En un silenciador es bueno que las paredes tengan cierta flexibilidad para amortiguar las vibraciones producidas en el interior, pero si estas son muy delgadas puede presentarse el caso de que vibre la estructura. Lo que se debe evitar a toda costa es que las paredes vibren a la misma frecuencia que la fuente generadora de ruido y entren en resonancia, ya que esto provocaría su destrucción al entrar en resonancia.

“No es posible admitir que los movimientos de los distintos puntos de una pared son independientes unos de otros. Una deformación forzada localmente da origen a ondas

libres que se propagan a toda la masa de la pared. Si el espesor de la pared es suficientemente reducido, las ondas puestas en juego son ondas de flexión. Al contrario de las ondas aéreas y de las ondas sólidas de dilatación y de cortadura, las ondas de flexión tienen una velocidad función de la frecuencia.

Para frecuencias de incidencia iguales a la **frecuencia crítica (f_c)** de la pared se tiene que: las velocidades del sonido en el aire y de las ondas de flexión en la pared son iguales. Para las frecuencias inferiores a f_c , el sonido aéreo es el más rápido. Para las frecuencias superiores a f_c , las más rápidas son las ondas de flexión. Las **paredes de metal** tienen características de flexión dependientes de las direcciones (paredes ortótropas). La velocidad de las ondas de flexión depende de la dirección de propagación. En consecuencia no existe en este caso una sola frecuencia crítica, sino infinidad de ellas, comprendidas entre dos valores límites correspondientes a direcciones de propagación perpendiculares.”⁸

De aquí la relación del espesor de la pared con la fabricación del sistema.

3.2.2 MATERIALES ACÚSTICOS

“Cuando una onda acústica incide sobre un material poroso, queda poco reflejada, penetra casi íntegramente en el material. Durante el transcurso de su propagación en el seno del material, pierde energía como consecuencia de los rozamientos inevitables de las moléculas del aire en movimiento contra el material. El coeficiente de absorción de un material poroso aumenta con la frecuencia. **El desplazamiento del aire en el tubo va forzosamente acompañado de un desprendimiento de calor sobre la cara interna del tubo**, a consecuencia del rozamiento. El sistema se comporta como un dispositivo que absorbe parte de la energía acústica que incide sobre la abertura.

La relación de ley de masa teórica muestra que:

Una pared carente de elasticidad es tanto más aislante cuanto más pesada es.”⁸

De aquí la importancia de la elección del material para las paredes del silenciador.

3.3 DISEÑO MECÁNICO

Los recipientes a presión están sujetos a diversas cargas que causan esfuerzos de diferentes magnitudes en el recipiente. La intensidad depende de las cargas aplicadas, de la geometría del recipiente y de su construcción.

3.3.1 ESFUERZO MÁXIMO PERMISIBLE (S_a)

“El esfuerzo máximo permisible a la tensión para acero al carbono y de baja contenido de elementos de aleación, tabla de la norma UCS-23; para acero con alto contenido de

elementos de aleación, tabla de la norma UHA-23, en lb/in².

Es 1.2 veces el esfuerzo permitido si la temperatura no sobrepasa los:
700° F para el carbono y el acero con bajo contenido de elementos de aleación.
800° F para el acero (inoxidable) con alto contenido de elementos de aleación.”⁶

3.3.2 CARGAS

“No se debe confundir carga con esfuerzo, aunque la carga puede provocar un esfuerzo debido a:

- a) Presión interna o externa.
- b) Peso del recipiente y su contenido.
- c) Reacciones estáticas del equipo auxiliar, tubería, revestimiento, aislamiento, piezas internas, apoyos.
- d) Reacciones cíclicas y dinámicas debidas a la presión o a las variaciones térmicas.
- e) Presión del viento y fuerzas sísmicas (no se considera que las fuerzas sísmicas y la presión del aire actúen al mismo tiempo).
- f) Reacciones por impacto debido a choque hidráulico.
- g) Gradientes de temperatura y expansión térmica diferencial.”⁶

3.3.3 PRESIÓN DE OPERACIÓN

“La presión que se requiere en el proceso del que forma parte del recipiente, a la cual trabaja normalmente este.”⁶

3.3.4 PRESIÓN DE DISEÑO

“La presión que se emplea para diseñar el recipiente. Se recomienda diseñar un recipiente y sus componentes para una presión mayor que la operación. Este requisito se satisface utilizando una presión de diseño de 206.7MPa (30 lb/in²) o 10% más que la presión de trabajo, la que sea mayor. También debe tomarse en cuenta la presión del fluido y de cualquier otra sustancia contenida en el recipiente.

La presión uniforme, interna o externa, induce en la costura longitudinal un esfuerzo unitario igual al doble del que obra en la costura circunferencial, por la geometría misma del cilindro.

Cuando otras fuerzas no son factores importantes, un recipiente sujeto a presión interna, debe diseñarse para resistir solo la presión circunferencial. El esfuerzo de la presión interna se determina mediante las siguientes fórmulas:

Junta circunferencial

$$S_1 = \frac{PD}{4t} \quad (1)$$

Junta longitudinal

$$S_2 = \frac{PD}{2t}$$

(2)

D= Diámetro medio del recipiente, pulgadas
P= Presión interna o externa, lb/in²
S₁= Esfuerzo longitudinal, lb/in²
S₂= Esfuerzo circunferencial, lb/in²
T= Espesor del casco, sin margen por corrosión, pulgadas”⁶

3.3.5 MÁXIMA PRESIÓN DE OPERACIÓN

“La presión interna a la que esta sujeto el elemento más débil del recipiente correspondiente al esfuerzo máximo admisible, cuando se supone que el recipiente está:

- a) en estado de desgaste por corrosión
- b) a una temperatura determinada
- c) en posición normal de trabajo
- d) bajo el efecto de otras cargas (cargas de viento, presión externa, presión hidrostática, etc.) que son aditivas a la presión interna.

El tamaño de espesor máximo permitido en el casco del cilindro se dan para la costura longitudinal que es la que rige generalmente. El esfuerzo de la costura circunferencial rige cuando la eficiencia de la junta circunferencial es menor que la mitad de la eficiencia de la junta longitudinal, o cuando además de la presión interna, hay cargas adicionales (carga de viento, acción de las silletas), que producen flexión o tensión longitudinales. La razón de esto es que el esfuerzo que se origina en la costura circunferencial es igual a la mitad del que se origina en la costura longitudinal.

Las formulas para la costura circunferencial (para presión interna) son:

$$t = \frac{PR}{SE + 0.4P} \quad (3)$$

$$= \frac{2SEt}{R - 0.4t} \quad (4)$$

P= Presión de diseño o presión máxima de trabajo permitida, lb/in².
S= Valor del esfuerzo del material, lb/in².
E= Eficiencia de la junta.
R= Radio interior en pulgadas.
D= Diámetro interior, pulgadas.
t= Espesor de la pared, pulgadas.
C.A.= Margen por corrosión, pulgadas.

Para la costura longitudinal:

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad (5)$$

$$P = \frac{SEt}{R + 0.6t} \quad (6)$$

Para esfera y cabeza hemisférico:

$$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P} \quad (7)$$

$$P = \frac{2SEt}{R + 0.2t} \quad (8)$$

Para cabezal elipsoidal

$$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P} \quad (9)$$

$$P = \frac{2SEt}{D + 0.2t} \quad (10)$$

Para los recipientes con espesor mínimo requerido menor de 6.3 mm (¼ de pulgada) que hayan de usarse para vapor de agua deberán tener un margen por corrosión no menor de 1/6 del espesor de placa calculado. Espesor mínimo, de cascos y cabezas, 2.4 mm (3/32 de pulgada). De acuerdo al párrafo UCS-25 y UG-16 (b) (6) de la norma ASME.

En la mayoría de los casos de diseño se utilizarán medidas estándar de materiales dados por el proveedor debido a que una fabricación de espesor o características especiales elevaría mucho el costo de producción. A menos que se piense hacer un contrato grande con este para la fabricación en serie de equipos. De cualquier forma se debe especificar el requerimiento mínimo de espesor de pared del equipo, y de acuerdo con los otorgados por el fabricante seleccionar el inmediato superior para no sobredimensionar. En dado caso que el espesor obtenido por este medio sea considerablemente mayor al esperado se podrá tomar como referencia para otorgarle un número de factor de seguridad al diseño.”⁶

3.4 MÁQUINAS HERRAMIENTAS

“La fabricación de un producto requiere herramientas y máquinas que puedan producir económicamente y con precisión. Lo económico depende de la correcta selección de la máquina o del proceso, que proporcionen un producto terminado, satisfactorio. La selección queda influenciada por la cantidad de artículos que habrán de producirse.

La selección de la mejor máquina o proceso para un producto dado, requiere el conocimiento de todos los métodos posibles de producción. Los factores que deben considerarse son, volumen de producción, calidad del producto, acabado, ventajas y limitaciones de los diversos tipos de equipos capaces de hacer el trabajo. Generalmente hay un método que es el más económico.

El trabajo de los metales se puede clasificar de acuerdo con el tipo de proceso:

A. Procesos usados para cambiar la forma del material

B. Procesos usados para labrar partes a dimensiones fijas

C. Procesos para obtener acabado en las superficies

D. Procesos usados para unir partes o materiales

E. Procesos usados para cambiar las propiedades físicas

Los procesos usados principalmente para cambiar la forma de los metales, incluyen:

1.- Vaciado	8.- Perforado	15.- Corte por llama
2.- Forjado	9.- Recalcado	16.- Formado por explosión
3.- Extrusión	10.- Doblado	17.- Formado electrohidráulico
4.- Laminado	11.- Corte	18.- Formado magnético
5.- Estirado	12.- Rechazado	19.- Electroformado
6.- Prensado	13.- Estirado	20.- Formado de metal pulverizado
7.- Triturado	14.- Laminado en perfil	

En este grupo de procesos, el material cambia su forma inicial para convertirse en una parte específica.

En la fabricación de cualquier producto, interviene usualmente cierto número de operaciones de labrado a máquina, que se clasifican como sigue:

A.- Procesos mecánicos con arranque de viruta

1.- Torneado	7.- Corte
2.- Cepillado	8.- Escariado
3.- Formado	9.- Fresado
4.- Perforado	10.- Esmerilado
5.- Taladrado	11.- Roscado
6.- Rimado	12.- Perfilado

B.- Procesos electrónicos o químicos

1.- Ultrasónico	4.- Láser óptico
2.- Descarga eléctrica	5.- Electroquímico
3.- Arco eléctrico	6.- Fresado químico

En estas operaciones secundarias, que son obligatorias para diferentes productos que requieren gran precisión en sus dimensiones, se retira metal de la pieza, en forma de pequeñas virutas. Tales operaciones se efectúan en máquinas herramientas, que incluyen las diversas operadas por motor, usadas para el corte de metales. Todas ellas trabajan bajo

el principio de reciprocidad, o bien, de rotación; ya sea la herramienta o la pieza, una de ellas queda sujeta al movimiento recíproco o al de rotación. Las máquinas rotatorias están representadas por el torno, que hace girar el trabajo, manteniendo estacionaria la herramienta. En el taladro, la herramienta es la que gira.

En el labrado ultrasónico, se quita metal mediante granos abrasivos que son transportados por un líquido y que bombardean las superficies de trabajo a velocidades extremadamente elevadas. La velocidad se logra mediante un generador ultrasónico. Para el labrado por descarga eléctrica y por arco eléctrico, se generan arcos especiales, que se utilizan para labrar cualquier material conductor. El láser óptico, es un potente haz de electrones usado para generar temperaturas altas, para cortar o soldar metales. El labrado químico se efectúa por medio del ataque químico del metal, o bien, utilizando un proceso inverso de galvanoplastia.

Acabado de superficies

Las operaciones de acabado de superficies se llevan a cabo para asegurar superficies tersas de gran precisión, de aspecto estético o como recubrimiento protector.

Los procesos empleados son:

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1.- Bruñido | 7.- Superacabado |
| 2.- Esmerilado con banda abrasiva | 8.- Atomizado metálico |
| 3.- Frotación en tambor | 9.- Recubrimientos inorgánicos |
| 4.- Galvanoplastia | 10.- Procedimiento Parker |
| 5.- Asentado con piedra | 11.- Anodizado |
| 6.- Pulido | 12.- Procedimiento Sherar |

En este grupo hay procedimientos que producen muy pocos cambios en las dimensiones, dando como resultado un acabado de las superficies. Otros procedimientos como el esmerilado quitan algo de metal y ajustan las partes a dimensiones previstas. En procesos como el asentado, el pulido y el bruñido, la operación es de ajuste y eliminación de pequeñas raspaduras, con poco cambio en las dimensiones. El superacabado también es un proceso de mejoramiento de las superficies, que elimina los fragmentos indeseables del metal, dejando una superficie limpia de metal sólido. La galvanoplastia y los procesos similares, que se usan para obtener superficies resistentes a la corrosión o simplemente para mejorar la apariencia, no cambian materialmente las dimensiones.

Uniones

Los productos que requieren el ensamble de dos o más partes se les une, comúnmente, por alguno de los siguientes procesos:

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------|
| 1.- Caldeo | 5.- Prensado |
| 2.- Soldadura con aporte de metal | 6.- Remachado |
| 3.- Latonado | 7.- Unión con tornillos |
| 4.- Aglomerado | 8.- Unión con adhesivos |

El caldeo es la fusión o unión de partes metálicas mediante el calor y la presión. Las operaciones de soldadura y latonado son similares, excepto que las partes se unen introduciendo, entre ellas, diferentes metales en estado fundido. El aglomerado o sinterizado, se aplica a la unión de partículas metálicas, mediante el concurso del calor. Los adhesivos para fines estructurales en forma de polvos, líquidos, sólidos y cintas, se utilizan ampliamente en la unión de metales, madera, vidrio, tela y plásticos.

Cambio de las propiedades físicas

Hay cierto número de procesos en los cuales, cambian las propiedades físicas del material por la aplicación de altas temperaturas o por esfuerzos rápidos o repetidos a que se somete el material. Los procesos en los cuales cambian las propiedades físicas, incluyen:

- | | |
|-------------------------|--|
| 1.- Tratamiento térmico | 3.- Trabajo en frío |
| 2.- Trabajo en caliente | 4.- Picado con chorro
de perdigones |

El tratamiento térmico incluye cierto número de procesos, de los cuales resulta un cambio en las propiedades y esfuerzos de los metales. No obstante que el trabajo de los metales, tanto en caliente como en frío son procesos tendientes principalmente a cambiar la forma de los metales, estos procesos tienen influencia considerable, tanto sobre la estructura, como sobre la forma del metal. El picado con chorro de perdigones, produce gran resistencia a la falla por fatiga, en las partes pequeñas, tales como resortes.”⁴

3.4.1 HERRAMIENTAS

“El mecanismo más bajo en rango en términos de producción es la herramienta. Es usado para sostener, cortar, dar forma, o terminar un producto. Las máquinas son versiones mecanizadas de tales herramientas. Herramientas que no son de corte para formado incluyen dados de extrusión, impactos y moldes.

Las herramientas también incluyen sujetadores, mandíbulas y mordazas.

Las herramientas de corte se gastan y fallan y deben ser reemplazadas periódicamente antes de que se arruinen las partes.

La inspección y las herramientas de medición son las reglas, micrómetros, calibradores y medidores. Los instrumentos de precisión que usan láser óptico o sistemas de visión acoplados con electrónica sofisticada se están volviendo comunes.

La integración del proceso de inspección en el proceso de manufactura o en el sistema de manufactura es un paso crítico hacia la construcción de productos de calidad superior. Se busca la prevención de defectos *pokayoke* (contra falla). La prevención de defectos es mejor que la inmediata detección de defectos y su corrección. El sistema debe ser capaz de

prever la probabilidad de defecto, corrigiendo el problema desde la fuente. Pokayoke y la fuente de inspección son determinantes del diseño del sistema de manufactura que producen productos de calidad superior a bajo costo.

Los productos resultan de la manufactura. Los productos pueden ser manufacturados por fabricación o por proceso. La fabricación es la manufactura de un producto de piezas tales como partes, componentes o ensambles. Los productos individuales o partes también pueden ser fabricados. Artículos discretos separables como llantas, clavos, cucharas, desarmadores, refrigeradores, y bisagras son fabricados.

Los procesos se refieren a la manufactura de un producto por métodos continuos, o por series continuas de operaciones, para un propósito específico. Muchos productos procesados son marcados como artículos discretos, como botellas de cerveza, sacos de harina, gancho de ropa y carretes de cable.

Los productos que fluyen son procesados en plantas o refinerías. Las industrias de proceso continuo, tales como el petróleo y plantas químicas, son a veces llamadas industrias de proceso o industrias de flujo.

En la manufactura de bienes, el principal objetivo es la producción de un componente con una geometría, tamaño y terminado deseado.

El ciclo de vida de un producto es dinámico y cambia con el tiempo y por tradición sigue estos pasos:

1. Comienzo. Nuevo producto, bajo volumen, pequeña compañía.
2. Crecimiento rápido. Estandarización de productos y rápido incremento de volumen.
3. Maduración. Emergen diseños estándares. El desarrollo del proceso es muy importante.
4. Comodidad. Larga vida, estándar de industria del tipo de producto.
5. *Decaimiento. El producto es lentamente reemplazado por productos mejorados.*"⁴

3.4.2 CENTRO DE CONTROL NUMÉRICO

“Una unidad fundamental en cualquier sistema de proceso de material es el centro de maquinado. Tal centro es de hecho una versión altamente sofisticada de una máquina herramienta tal como un torno, una fresadora, o un taladro. Este equipo especial difiere del ordinario en que las operaciones pueden ser realizadas automáticamente, con poca o ninguna participación humana.”²

Control numérico (NC, Numerical control)

“Se refiere al método de direccionar una máquina herramienta para producir una parte de acuerdo a una pregrabación, números codificados, letras, y símbolos. Cuando cambia un trabajo, el programa de instrucciones cambia. Esta capacidad de cambio le da al CN la

flexibilidad deseada, ya que es más fácil escribir los cambios en el programa controlador que modificar el equipo de producción. Sistemas más avanzados y comunes emplean control numérico computarizado (CNC), donde la máquina herramienta contiene una microcomputadora que almacena la información y controla la máquina. El sistema más sofisticado es el control numérico distribuido (DNC, Distributed Numerical Control) donde diversas máquinas CNC están unidas a una computadora central.”³

Control Numérico Computarizado (CNC)

“La herramienta es controlada por una computadora y es programada con un sistema de código de máquina que permite ser operada con un mínimo de supervisión y con gran repetibilidad.

Los mismo principios utilizados en la operación de una máquina manual son usados en la programación de una CNC. La principal diferencia es que en lugar de palancas para posicionar la bancada en un punto, la dimensión es guardada en la memoria del control de la máquina. El control entonces se moverá a estos puntos cuando corra el programa.

Se requiere un entendimiento básico de las prácticas de la máquina y un conocimiento en matemáticas es necesario para operar y programar una máquina controlada por CNC.

La bancada es la parte móvil. La posición cero puede ser definida en cualquier punto a lo largo de los tres ejes, y generalmente será diferente para cada setup de la máquina. Sin embargo el eje Z esta posicionado al cero, de manera que cualquier movimiento hacia abajo de la herramienta será considerado como negativo.

Este cero esta generalmente situado en la parte superior de la superficie y cualquier avance será ingresado con valor negativo para cada herramienta.

Se debe definir el cero para los ejes X y Y. Automáticamente su intersección divide los cuatro cuadrantes.

La definición de un programa de parte para cualquier CNC consiste en movimientos de herramienta, y cambios de velocidad. También contiene funciones de comando auxiliares como cambio de herramienta, encendido del lubricante, o códigos externos de comando.

Los movimientos de la herramienta consiste en comandos de posicionamiento rápido. movimientos en línea recta o movimiento a lo largo de un arco de la herramienta a una velocidad controlada.

El cero de la máquina es donde el usillo esta apuntando a la esquina superior derecha, con la bancada corrida totalmente a la izquierda en el eje X, y hacia el operador en el eje Y, y en el Z esta arriba en la posición de cambio de herramienta.

Un programa es escrito como un grupo de instrucciones en el orden que deben realizarse. El formato del programa define el lenguaje de la máquina herramienta.

El código G usa la información en las líneas para hacer que la máquina haga operaciones específicas.

El código M hace que ocurran acciones al final del bloque y solo se permite un código M por bloque.

Actualmente la programación se identifica con los códigos M y G dado que son los más repetidos en un programa. Estos se relacionan con datos indicados en el programa, los cuales a su vez son procesados en un postprocesador o enlace, este postprocesador conoce todos los códigos G, M, T, S, etc. Y las características de aceleración y desaceleración en los formatos ASCII o EIA, además de las velocidades y limitantes físicas de los movimientos. El postprocesador es el enlace entre una computadora externa (el cual reconoce el dibujo que contiene la geometría de la pieza) y el controlador de la máquina CN, este sistema es el que actualmente conocemos como sistema CAD/CAM.

Hoy en día es generalizado el uso del diseño gráfico por computadora, en la mayoría de las industrias se usan los paquetes de CAD para hacer planos y diseños de piezas, esta información se graba en memoria y posteriormente se genera el lenguaje de programación para la CNC sin tener que realizar los códigos de forma manual; y además se puede reimprimir el plano cuantas veces sea necesario. Se realiza a través de convertir todas las entidades geométricas contenidas en un dibujo computarizado en comandos de corte y movimiento, así como la activación de cambios automáticos de herramientas. Se genera automáticamente un programa en formato APT o en código máquina G/M, el cual será ejecutado por la CNC para fabricar la pieza. A este sistema de conversión de gráficos a programa se conoce como CAM (Manufactura Asistida por Computadora).

Las primeras subrutinas preprogramadas fueron los ciclos enlatados (por su capacidad de hacer barrenos o cilindros a forma de lata) ofrecieron la oportunidad de ejecución de un programa desde memoria lo cual ofreció ventajas de edición y a la vez disminuyó los errores por lectura de las cintas perforadas. En la actualidad los ciclos preprogramados que realizan los procesos de forma automática tienen rutinas de barrenado, roscado y cavidades circulares.

Los principios de movimiento de la herramienta y la mesa se realizan a través de 3 tipos de control de movimiento: Movimiento de punto a punto, Movimiento para cortes rectos, Movimiento para cortes en contorno. Para realizar estos movimientos se usan mecanismos que pueden generar desplazamientos mensurables o cuantificables con respecto a una referencia y a través de motores que también pueden generar movimientos rotacionales precisos y mensurables (servomotores). La unión del servomecanismo con el servomotor genera un dispositivo controlado por señales eléctricas y simultáneamente se monitorean los movimientos y distancias recorridas, este conjunto recibe entonces instrucciones del controlador por medio de un comparador lógico y un amplificador y a la vez detecta su posición.

El controlador es el cerebro que organiza, coordina, ejecuta y verifica todo el proceso de fabricación logrando altos niveles de funcionalidad, flexibilidad y precisión. La principal función de una máquina CNC es posicionar la herramienta o la bancada de acuerdo con los

datos contenidos en un programa previamente diseñado. Existen dos sistemas de posicionamiento por servomecanismos de circuito cerrado. La diferencia radica en sus formas de posicionar la herramienta y la bancada, ya sea verificando o no el punto donde se ubicaron finalmente estas.”⁷

3.4.3 ARCO DE PLASMA

“El corte con arco (AC) abarca un grupo de procesos térmicos de corte que separan o eliminan metal deritiéndolo con el calor de un arco entre un electrodo y la pieza de trabajo.

El acanalado térmico (también es llamado biselado) es una variación del proceso de corte térmico que elimina metal mediante la fusión o combustión de toda la porción eliminada, formando un bisel o un surco.

El proceso de corte con arco de plasma (plasma arc cutting, PAC) separa metal empleando un arco constreñido para fundir un área localizada de la pieza de trabajo, que al mismo tiempo elimine el material derretido con un chorro de alta velocidad de gas ionizado que sale por el orificio de constricción. El gas ionizado es un plasma, de ahí el nombre del proceso. Los arcos de plasma por lo regular operan a temperaturas de 10 000° a 14 000°C (18 000° a 25 000°F).

El PAC presenta peligros como son incendios, coque eléctrico, luz intensa, humo y gases, y niveles de ruido que probablemente no estén presentes en los procesos mecánicos. Además es difícil controlar el PAC con tanta precisión como algunos procesos mecánicos, para trabajos con tolerancias estrechas. El equipo PAC tiende a ser más costoso que los demás sistemas de corte (a excepción del láser), requiere cantidades bastante grandes de energía eléctrica.

Un plasma de arco es un gas que ha sido calentado por un arco hasta alcanzar un estado de por lo menos ionización parcial, lo que le permite conducir una corriente eléctrica. En cualquier arco eléctrico existe un plasma, pero el término arco de plasma se aplica a sopletes que utilizan un arco constreñido.

El arco se constriñe haciéndolo pasar por un orificio situado corriente abajo del electrodo. Cuando el gas de plasma atraviesa el arco, se calienta rápidamente hasta una temperatura elevada, se expande y se acelera al pasar por el orificio de constricción hacia la pieza de trabajo. La intensidad y la velocidad del plasma dependen de cierto número de variables, entre las cuales están el tipo de gas, su presión, el patrón de flujo, la corriente eléctrica, el tamaño y la forma del orificio y la distancia respecto a la pieza de trabajo.

Cuando el arco funde la pieza de trabajo, el chorro de alta velocidad expulsa el metal derretido para formar el corte. El arco de corte se conecta o transfiere a la pieza de trabajo, por lo que se conoce como arco transferido. El calor no sólo altera la estructura del metal en esta zona, sino que también introduce esfuerzos de tensión internos a causa de la rápida expansión, alteración y contracción del metal en la superficie cortada. La profundidad a la

que el calor del arco penetra en la pieza de trabajo es inversamente proporcional a la velocidad de corte.

Debido a las elevadas velocidades de corte en acero inoxidable y al efecto de templado de la placa base, la cara cortada pasa por la temperatura crítica de 650°C (1200°F) con gran rapidez. Por ello no hay oportunidad de que se precipite carburo de cromo a lo largo de las fronteras de los granos, con lo que se conserva la resistencia a la corrosión.

Para el acanalado con plasma se reduce la constricción del arco, lo que hace disminuir la velocidad del chorro en el arco. El surco queda brillante y limpio, no se requiere limpieza posterior antes de soldar una superficie acanalada con plasma.

Casi cualquier equipo de corte con plasma puede servir para acanalar siempre que la curva de salida volt-ampere de la fuente de potencia sea lo bastante alto como para sostener el arco largo que se emplea para el acanalado con plasma.

El soplete lleva una punta de acanalado diseñada para producir un arco más suave y limpio, y un chorro con la velocidad apropiada. El soplete empleado es idéntico al de corte con plasma y puede tener uno o dos flujos de gas y enfriamiento con aire o agua.

CONDICIONES TÍPICAS PARA CORTAR ACEROS INOXIDABLES CON ARCO DE PLASMA							
ESPESOR DE PLACA		VELOCIDAD		DIÁM. ORIFICIO DEL SOPLETE		CORRIENTE (ccen), A	POTENCIA kW
pulg	mm	pulg/min	mm/s	pulg	mm		
1/2	13	100	42	1/8	3.2	300	60
1	25	50	21	5/32	4.0	400	80

Tabla 2

El gas de plasma recomendado para acanalar es el argón con 35-40% de hidrógeno. Se puede usar helio pero el canal será más somero. El gas de enfriamiento, si se utiliza, es el argón, nitrógeno o aire. La selección se basa en la brillantez del canal deseado, la generación de emisiones y el costo.

Para el acanalado el soplete se inclina a 30 grados respecto a la horizontal. La profundidad del surco depende de la velocidad de recorrido. Es importante no intentar eliminar demasiado metal en una sola pasada.

Entre los gases que se usan para el corte con arco de plasma están el nitrógeno, argón, aire, oxígeno y mezclas de nitrógeno/hidrogeno y argón/hidrogeno.

El proceso de corte con plasma emplea un soplete de mano o uno montado mecánicamente. Los sopletes mecanizados pueden montarse en un tractor o en una máquina de corte controlada por computadora o robot. Por lo general, se mantiene una separación entre la punta del soplete y la pieza de trabajo para obtener cortes de calidad óptima.

Los voltajes de operación van desde 50 o 60 volts hasta más de 200 volts, por lo que las fuentes de potencia para PAC tendrán voltajes de circuito abierto entre unos 150 y más de 400 volts.

La cantidad de ruido generada por un soplete de PAC operado al aire libre depende principalmente de la corriente de corte. Un soplete que trabaja a 400 A por lo regular genera unos 100 dBA medidos a unos dos metros. A 750 A el nivel de ruido es de unos 110 dBA. Gran parte del ruido está en el intervalo de frecuencias de 5000 a 20 000 Hz. Estos niveles de ruido pueden dañar el oído humano, por lo que debe usarse protección para los oídos cuando el nivel de ruido exceda los límites especificados. Estos valores pueden variar localmente y en Estados Unidos los especifica la OSHA para la mayor parte de los entornos industriales.

El proceso de corte con plasma es por su naturaleza ruidoso y genera emisiones. Una estrategia que se usa comúnmente para reducir el ruido y las emisiones es cortar sobre una mesa de agua y rodear el arco con un capuchón de agua. Requiere una mesa de corte llena con agua hasta la superficie de apoyo del trabajo, un aditamento de capuchón de agua que rodee al soplete y una bomba recirculante para extraer agua de la mesa de agua y bombearla a través del capuchón. En este caso se usa un flujo relativamente alto (55 a 75 L/min [15 a 20 gpm]).

Otro método para reducir el ruido es el corte con plasma subacuático. El extremo funcional del soplete y la placa que se va a cortar se sumergen bajo aproximadamente 75 mm (3 pulg.) de agua. Cuando el soplete está bajo el agua pero no está cortando, se mantiene a través de él un flujo constante de aire comprimido para impedir que entre el agua.

El arco de plasma emite radiaciones intensas en los espectros visibles (ultravioleta e infrarrojo). Esta radiación puede producir ozono, óxidos de nitrógeno u otros vapores tóxicos en la atmósfera circundante. El capuchón de agua también actúa como escudo que absorbe la luz, sobre todo cuando se agrega un tinte al agua de la mesa. El corte con plasma subacuático reduce la radiación debido a la mayor profundidad del agua. Generalmente no se requiere tinte adicional.

Los factores a considerar al evaluar la calidad del corte incluyen la tersura de la superficie, el ancho del corte, el ángulo de corte, la adherencia de escoria y lo recto del borde superior. Estos factores son afectados por el tipo de material que se corta, el equipo que se emplea y las condiciones de corte.

Los cortes con arco de plasma son entre 1½ y 2 veces más anchos que los cortes con gas oxcombustible en placas de hasta 50 mm (3/16"). El ancho de un corte típico en acero inoxidable de 25 mm (1") es de aproximadamente 5 mm (3/16"). El ancho del corte aumenta con el espesor de la placa.

El chorro de plasma tiende a eliminar más metal de la parte superior del corte que de la parte inferior. Esto hace que los cortes biselados sean más anchos arriba que abajo.

Con el equipo mecanizado actual, es posible producir cortes libres de escoria en acero inoxidable de hasta 75 mm (3") de espesor.

El redondeo del borde superior aparece cuando se usa demasiada potencia para cortar una placa de un cierto espesor o cuando la distancia de separación del soplete es excesiva.”¹³

3.4.4 CORTE CON ARCO DE CARBONO Y AIRE

“Es una variación del proceso de corte con arco de carbono que elimina metal fundido con un chorro de aire. El intenso calor del arco entre un electrodo de carbón-grafito y la pieza de trabajo derrite una porción de esta última. Se hace pasar por el arco un chorro de aire con velocidad y volumen suficientes para que el material fundido salga despedido. El metal sólido expuesto se funde por el calor del arco, y la secuencia continúa.

El corte con arco de carbono y aire no depende de la oxidación para mantener el corte. La velocidad de fusión es función de la corriente; la tasa de eliminación del metal depende de la velocidad de fusión y de la eficiencia del chorro de aire para remover el metal derretido. El aire debe ser capaz de expulsar el metal fundido de la región del arco antes de que pueda solidificarse de nuevo.”¹³

3.5 METALMECÁNICA

Elasticidad

“Elasticidad es la habilidad de un metal para regresar a su forma original después de ser deformado. La elasticidad de un material es la cantidad de energía absorbida en el rango elástico de deformación.

Debido a su elasticidad, cuando una parte es doblada en una prensa usando un golpe y un dado, tiene una tendencia a regresar a su estado original cuando es liberado por el dado. Obviamente, si la parte debe tener la forma deseada, este rebote debe ser compensado.

Maleabilidad

Termino cualitativo que describe la habilidad de un metal para resistir deformación plástica sin fracturarse. Se refiere particularmente a la deformación bajo cargas de compresión. Un término relacionado es la dureza, la cual es la cantidad de energía absorbida por un material hasta la fractura, en contraste con la cantidad de deformación antes de la fractura.

Ductilidad

Es también una medida de la habilidad del metal a resistir deformación plástica sin fracturarse. Sin embargo es la reacción de un metal a esfuerzos de tensión. Es importante en operaciones de doblado o extrucción. La maleabilidad y la ductilidad, a pesar de ser similares, no necesariamente tienen el mismo valor para un metal dado.

Si el material falla con poca o cero ductilidad, se dice que es quebradizo. Ser quebradizo no se puede considerar como falta de fuerza. Ser quebradizo solo significa una pequeña

parte de la deformación plástica antes de la fractura: se puede necesitar un gran esfuerzo aplicado para tener un punto de fractura en materiales quebradizos, fuertes y duros.

La ductilidad de un material dado es medida por la cantidad de elongación y reducción en sección transversal que ocurre bajo cargas determinadas.

Fuerza

Es el esfuerzo actuando en una condición particular de deformación del material. El esfuerzo necesario para causar deformación permanentes llamado esfuerzo de cedencia. El esfuerzo último de un material es el esfuerzo máximo que el material puede soportar. La fuerza de fractura es el esfuerzo en la fractura.

La fuerza necesaria para causar deformación de placa estará relacionado con la fuerza del material, la cantidad de deformación impuesta y el tamaño de la parte producida.

Endurecimiento por deformación

Los metales dúctiles se endurecen con la deformación y un flujo de esfuerzo a través del metal. El flujo de esfuerzo es el necesario para provocar deformación continua y también puede ser definido como la fuerza de un metal en cualquier instante en un proceso de deformación.

Mientras se deforma el metal, el material pasa a través de cambios en su estructura atómica y cristalina resultando en un incremento de resistencia del material contra futuras deformaciones. Deformación adicional requiere un incremento adicional de esfuerzo en el material.

Dureza

Es la habilidad de un material para resistir la penetración o la abrasión. La dureza de un metal tiene una relación con la habilidad del metal a ser deformado plásticamente, y a la cantidad de carga instantánea requerida para que tome lugar la deformación. Una aproximación útil es que la dureza de un material dúctil es tres veces el esfuerzo de cedencia.

Esfuerzo y deformación

Cuando se aplica una carga estática a un material, produce fuerzas de reacción a través del material. Esta reacción se llama esfuerzo. Cuando una parte es cargada y soporta esfuerzo, se deforma de sus dimensiones originales. Esta deformación depende de la magnitud y de la duración del esfuerzo.

Adelgazamiento

En un punto de la deformación, de pronto esta se localiza produciendo un adelgazamiento. Cuando esto ocurre cualquier deformación adicional en la hoja puede provocar su fractura en esta región.

Anisotropía

Es la diferencia en comportamiento en diferentes direcciones. Los metales están compuestos de muchos granos o cristales individuales orientados irregularmente. Si un pedazo de metal con granos uniformemente equidistantes se somete a una deformación plástica, ocurrirán cambios en la estructura granular, la cual depende de la cantidad de deformación en las diferentes direcciones. En el ejemplo de la compresión, los granos se elongan en una dirección y se contraen en la otra. Este pedazo de metal se ha convertido en anisotrópico, y sus propiedades son diferentes en la dirección vertical que en la horizontal.

Por ejemplo, en la formación de una tapa elipsoidal extruida por un golpe circular se produce deformación alrededor de la periferia de la hoja. Un proceso simétrico produce partes asimétricas. Esto ocurre cuando se forman cilindros en un proceso de rolado, diferentes cantidades de deformación en la dirección del rolado y en la dirección perpendicular a la dirección del rolado. La anisotropía puede estar presente no solo en el plano de la hoja (anisotropía planar), sino también en la dirección del espesor (anisotropía normal o plástica).

Rebote

Cuando una parte que está siendo formada se le quita la carga y es removida del dado, ocurre una recuperación elástica o rebote. La recuperación elástica aparece en la forma final de la parte formada al ser diferente de la forma del dado. Si la recuperación elástica es relativamente grande en comparación con la deformación necesaria para formar la parte, ocurren grandes desviaciones de la parte deseada.

La solución al rebote es sobredoblar las partes. Se tienen que hacer predicciones de la cantidad de rebote en términos de las propiedades del material y las características del proceso. Esta predicción requiere descripción precisa del comportamiento del material y modelos del proceso.¹⁴

3.5.1 EXTRACCIÓN

“Existen dos métodos principales usados en esta técnica de formado. Extracción superficial involucra solo un movimiento moderado de material para producir objetos como ejes automotrices, bandejas, y ollas, y generalmente requieren dados superiores e inferiores de formas opuestas. Esta es una operación relativamente simple lograda en un tipo de prensa de acción simple. Extracción profunda envuelve el movimiento o deformación de una cantidad considerable de material cuando se forman objetos de gran profundidad, como cilindros de gas y botes de bebidas. Este proceso requiere el uso de prensas de doble o triple acción, así el formado ocurre tras una serie de formados graduales para evitar cortar la pieza.

En la extracción profunda, el dado del fondo es llamado dado de extracción y el dado superior es conocido como golpe. Cuando se forma un bote de aluminio para una bebida, el dado de extracción es un agujero redondo y el golpe es un cilindro sólido. Durante el formado, el metal es prensado en pasos graduales a través del dado de extracción, y envuelve el golpe para formar el bote. En operaciones subsecuentes, una tapa del bote es

extraída superficialmente y asegurada al bote después del llenado. Cuando se usa un golpe y un orificio cuadrado se obtiene un bote cuadrado. Obviamente cualquier forma puede ser producida con el dado apropiado.

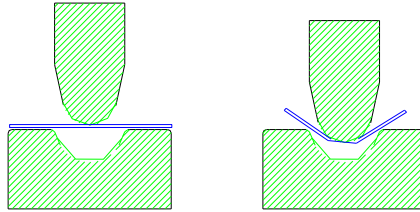


Figura 1

Dados flexibles pueden ser usados en extracción superficial y profunda para simplificar las herramientas necesarias para producir formas complejas.

La hoja de metal se coloca en el golpe y el ariete fuerza el cojín de hule contra la hoja y entonces alrededor del golpe para formar la parte. Este es un método económico de extracción superficial porque el dado de hule puede ser usado con cualquier forma de dado. Los golpes son más fáciles de prepara que los dados cóncavos.

El proceso de Vernon-Whealon utiliza una prensa especial para aplicar fuerza al cojín de hule mediante un saco de fluido flexible en vez de un ariete movable. Esto resulta en una presión de trabajo más alta para producir partes más largas y profundas. El proceso Marform emplea una combinación de cojín de hule y pistón hidráulico para producir profundidad excepcional (tres veces el diámetro de la hoja de metal). Estos están entre los numerosos métodos de extracción superficial y profunda usados en la manufactura de producto. La extracción de alambre es una técnica totalmente diferente usada para formar alambres, tubos, y barras de muchas configuraciones y tamaños.”³

3.5.2 DOBLADO

“El doblado contrasta con la extracción en que el dobles es estirar una pieza unidireccionalmente a lo largo de un eje recto, como cuando se dobla una hoja de papel. Es una operación común de formado aplicable a hojas, platos, barras, tubos, y otras formas estructurales. El método más simple para doblar es el dobles de freno lateral. El dobles de freno de prensa emplea dados rígidos, de precisión, en parejas arriba y abajo, o cojines flexibles de hule en conjunción con un dado con forma.”³

“A primera vista el dobles de una placa de metal puede parecer como un simple doblado de una sección transversal rectangular. Se espera que la fuerza de dobles dependa en la fuerza del material y en el espesor y la longitud de la placa. Solo que de esta forma se pierden dos factores, la deformación plástica y los efectos del proceso de la herramienta. El proceso de la herramienta introduce fricción y la posibilidad de represión de la deformación. Se incluirá la apertura del dado W. Otro factor es K que depende de la forma del dado. La

expresión general para la fuerza de doblez máximo P es:

$$P = \frac{K(S_T)LT^2}{W} \quad (11)$$

Don de K es igual a 2.6 para dados en forma de U.

La fuerza de doblez también cambia con el viaje del golpe. Se espera un incremento en la fuerza ya que los metales se endurecen con la deformación, pero existen otros factores que influyen la fuerza de doblez. La fuerza de doblez puede decrecer a medida que se completa el doblez debido a los efectos geométricos o a la forma. La fuerza incrementa a medida que el golpe llega al final de su carrera en el caso de dobles con dado. En el caso de doblez al aire o libre, la fuerza no vuelve a incrementa después de que empieza a disminuir cerca del final del doblez.

El esfuerzo a la tensión más grande ocurre en la superficie exterior de la placa doblada. El esfuerzo a la tensión disminuye cerca del centro del espesor de la placa y se vuelve cero en el eje neutral. El esfuerzo a la compresión incrementa del eje neutral hacia adentro del doblez. El esfuerzo máximo debe ser menor que el esfuerzo último del material para evitar deformación localizada y fracturas.

La región central de la placa permanece elástica y al quitar la carga ocurre la recuperación elástica. Cuando se abre el dado, la banda elástica trata de regresar a su estado original plano. La zona plástica previene la total recuperación pero ocurre un pequeño regreso. Ocurre una recuperación elástica en la deformación plástica del material.

El factor de recuperación elástica o rebote depende de radio de doblez R_i en el dado y del radio R_f que queda en la placa cuando se remueve del dado. El espesor de la placa, t , es una constante el proceso de doblez. R_i siempre deberá ser mayor a R_f . a_i es el ángulo que se forma en la placa cuando está en el dado, y a_f es el ángulo final de doblez en la placa. A_f es mayor que a_i . K_s es el factor de rebote.

$$K_s = \frac{a_f}{a_i} \quad (12)$$

Igualando las longitudes dentro y fuera del eje neutral.

$$K_s = \frac{a_f}{a_i} = \frac{(R_i + t/2)}{(R_f + t/2)} \quad (13)$$

Una $K_s=1$ indica que no existe rebote, y una $K_s=0$ indica recuperación elástica completa.

Se debe dejar un claro entre el dado y el golpe para dejar que corra la placa a través de el dado sin que sufra cizallamiento, este claro está dado por:

$$J=k \cdot g \quad (14)$$

Donde J es el claro entre el dado y el golpe, g es el espesor de la placa y k es el coeficiente de dureza del material, el cual va de 0.06 a 0.09 para materiales duros.”¹⁴

3.5.3 FORMADO POR ROLADO

“El formado por rolado es un método para producir formas cilíndricas de hojas y platos de metal. El equipo usado incluye rodillos cilíndricos para formar cilindros o curvas, y rodillos con forma de llanta para doblar tubos y barras. El formado de rodillos, diferente del rolado, es usado para formar tiras de metal en longitudes largas y rectas de diferentes secciones transversales. El material es deformado mientras pasa a través de una serie de rodillos cóncavos y convexos. Un uso importante para este método es para producir tubería soldada en un proceso continuo. El rolado simple es presionar una pieza entre los rodillos para reducirlo a una hoja plana o barra. Este método es usado para producir materia prima para operaciones subsecuentes, y puede ser hecho en frío o en caliente.”³

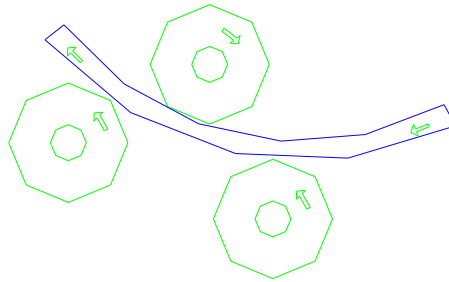


Figura 2

“Una placa de espesor menor a 6 mm (1/4”) es generalmente llamada plato. El formado de hojas usualmente involucra materiales relativamente delgados.”¹⁴

“Mientras más dúctil es el metal más fácil se formará.

Materiales tan delgados como 0.127 mm (0.005”) de espesor y tan gruesos como 79 mm (0.750”) pueden ser formados. Piezas de material tan delgado como 3.175 mm (1/8”) y tan ancho como 1.83 m (72”), o más, pueden ser formados, dependiendo de la máquina roladora.

La longitud del final de la parte formada está restringida solamente por la longitud que puede ser funcionalmente manejada después de que la parte final sale de la máquina roladora.

Algunas veces, varias secciones pueden ser formadas de una tira sencilla o varias tiras pueden ser alimentadas concurrentemente y unidas para producir una sección combinada. El único requisito para formado es que el material debe ser capaz de ser formado al ángulo deseado a la temperatura ambiente.

Cuatro tolerancias son críticas para las operaciones de formado, éstas son las dimensiones

de la sección transversal, tolerancias longitudinales, angulares, y la rigidez del material.

Tolerancias de sección transversal de $\pm 0.254\text{mm}$ (0.010") a $\pm 0.7874\text{mm}$ (0.031") pueden ser alcanzadas con equipo de formado.

Las tolerancias longitudinales son totalmente dependientes del espesor del material, la longitud de la parte, la velocidad de la línea de formado, la calidad del equipo, su condición, y el tipo de medidas y sistemas de corte usados por la formadora.

Es aconsejable cuando se compre un material para formar que éste sea de más dureza que el de tolerancias de calidad comercial CQ. Este material mejorado evitará muchos problemas dimensionales a la hora del formado.

Tolerancias angulares de $\pm 1^\circ$ son típicas en el proceso de formado.

- Curvatura

Es la variación de un borde lateral de una línea recta. Curvatura extrema contribuye a la curva, arqueado y/o torcedura en la parte final

- Barrido

Variación de una línea recta en el plano horizontal medido después de que la parte ha sido formada. Las causas de un barrido incluyen la alineación horizontal incorrecta y presión no uniforme de formado.

- Arqueado

Es la variación de una línea recta en el plano vertical. Puede ser arqueado transversal o longitudinal. El arqueado es causado por la existencia de espacios verticales irregulares en secciones simétricas y por áreas desiguales de formado en secciones asimétricas.

- Torcedura

Se dice que una parte formada tiene una torcedura cuando parece sacacorchos. Esto es causado por presión excesiva de formado en la parte final. Para la mayoría de las operaciones de formado, la torcedura típicamente es de menos de 5° por cada 3.048 m (10') de parte formada.

Dos situaciones afectan negativamente a la calidad y a la precisión de las partes formadas, estas son el rebote y ensanchamiento final, este último es la deformación en el final de una parte formada. El ensanchamiento final puede ser eliminado o al menos reducido a través del uso del correcto rodillo formador.

Los rodillos formadores son herramientas que forman la pieza a través de la máquina. El número de pasos que hace el material depende de la complejidad de la parte y las propiedades del material formado.

Diseño de ramillete

La creación del ramillete es el primer paso a ser tomado en cuenta en el diseño de la

herramienta de rodillo. El ramillete es el arreglo de “estación por estación” de secciones progresivas empezando con las tiras de metal y terminando con el perfil requerido del componente.

Las dos grandes consideraciones en el diseño del ramillete son:

1. Un flujo de material suave del primero al último paso, y
2. Control extremo sobre las dimensiones fijadas mientras se forma.

El material más usado para la manufactura de rodillos es acero endurecido con aceite que ha sido endurecido a RC57-60. Para excelente longevidad, los fabricantes de herramientas deben usar un acero con alto contenido de carbón y cromo, endurecido a RC59-60.

La operación de formado por rodillos forma al material por incrementos a medida que va pasando de una estación a otra. Los parámetros variables en las operaciones de formado por rodillo incluyen requisitos de potencia, velocidad, y tipo de lubricante usado. Estos parámetros son determinados por el espesor, el ancho, y tipo de material, complejidad de la sección transversal, pintura en el material y la precisión requerida.

Operaciones auxiliares como pregolpeo, estampado, curvatura y roscado, y corte, incorporados en la línea de formado, influyen los parámetros a los cuales un formador de rodillos debe operar.”¹⁵

3.6 MATERIALES POSIBLES

Cuando se desea construir un equipo de esta naturaleza se desea comparar todos los recursos contra nuestras necesidades, aquí se consideran varios materiales para la posible fabricación de un sistema de silenciación y se analizan sus características.

“En el diseño y manufactura de un producto, es esencial que el material y el proceso, sean valores entendidos. Los materiales difieren ampliamente en propiedades físicas, características de labrado, métodos de formado y vida probable en servicio.”⁴

Acero al carbón y aleaciones bajas:

“Picadura y corrosión severa pueden ocurrir. La corrosión no es uniforme. Estos materiales están sujetos al ataque de hidrógeno, especialmente en ambientes con sulfito. La corrosión galvánica depende del material de cople; La corrosión de bajo carbono es mayor cuando el material catódico es bronce en lugar de acero inoxidable.”⁹

Acero inoxidable:

“Aleaciones ferríticas están sujetas a picaduras y corrosión en hendiduras, algunos aceros inoxidables de alta aleación ferrítica tienen resistencia a fluido geotérmico de temperatura moderada. Estas aleaciones están sujetas a corrosión intergranular. Pruebas de estas aleaciones incluyen la evaluación de intrusión de oxígeno al fluido geotérmico. Aleaciones martensíticas sufren de la misma corrosión que los aceros inoxidables ferríticos y

austeníticos.”⁹

“Características del acero inoxidable común en comparación con el acero al carbón

- Mayor fuerza (dureza)
- Mayor susceptibilidad a endurecimiento
- Alta propensión a la soldadura o a raspaduras para maquinado
- Menor conductividad al calor.

Los aceros martensíticos 403, 410 y 414 son recomendados para aplicaciones de formado en frío. Por el alto contenido de carbono los martensíticos restantes son recomendados para formado en caliente.

Para aplicaciones de estirado profundo es preferible un nivel bajo de dureza y puede ser obtenido en las aleaciones austeníticas que tienen alto contenido de níquel: 304, 304L y 305.”¹³

“El acero Inoxidable contiene adiciones de aleación de níquel y cromo. Su costo es alto, pero por la apariencia de su fina superficie y resistencia a la corrosión, son usados en la formación de partes especiales. Los aceros inoxidables con varios tratamientos térmicos se encuentran en el mercado.”¹⁴

“Al aumentar la cantidad y el número de elementos de aleación en el hierro, la velocidad de oxidación disminuye respecto a la del hierro puro, y el corte se hace más difícil.

Los óxidos de muchos de los elementos de aleación de los aceros, como el aluminio y el cromo, tienen puntos de fusión muy altos, superiores a los de los óxidos de hierro. Estos óxidos de alto punto de fusión, de naturaleza refractaria, pueden proteger el material del área de corte e impedir que el hierro nuevo quede continuamente expuesto al chorro de corte. Por esto, la velocidad de corte disminuye al aumentar la cantidad de elementos formadores de óxidos refractarios en el hierro.

Todas las aleaciones de acero inoxidable son difíciles de soldar por su elevado contenido de cromo. Las aleaciones de plata que contienen cinc son las mejores cuando se busca la resistencia a la corrosión. Los metales de aporte que contienen fósforo no deben usarse en piezas sometidas a esfuerzos grandes porque es posible que se formen fosfuros de níquel y hierro quebradizos en la zona de la unión. Los metales de aporte de níquel que contienen fósforo son los mejores para aceros inoxidables que contienen titanio o aluminio porque el boro tiene una acción fundente moderada que ayuda a mojar estos metales base.”¹³

Aleaciones con base de níquel:

“Superalaciones resistentes a la corrosión, son sujetos a corrosión localizada, como picadura y corrosión en hendiduras, especialmente en ambientes con clorito a alta temperatura.

Aleaciones con base de cobre:

Sujetos a ataque por Sulfito de hidrógeno. Aleaciones sin níquel son más resistentes que las niqueladas con la misma cantidad de cobre. Las aleaciones de cobre son atacadas por amoníaco. Agua con más de 1mg por litro debe ser probada para conocer su agresividad hacia las aleaciones de cobre.

Aleaciones de aluminio:

Recomendadas para aplicaciones desalinizadoras pero no para ambientes geotérmicos por los altos niveles corrosivos.

Aleaciones de titanio.

Es atacado por fluoruro. A temperaturas arriba de 573K son sujetos a corrosión en hendidura.

Otras aleaciones.

Como las aleaciones con base de cobalto y zirconia tienen buena resistencia a la corrosión pero su costo es muy alto.

Laminas de fibra reforzada: Plástico de fibras reforzadas (FRP) laminado puede ser útil por su resistencia a la corrosión y costo razonable. Otro material utilizable puede ser el termoplástico y pinturas y barnices.

Acero con alto contenido de elementos de aleación:

Acero que contiene grandes porcentajes de elementos diferentes al carbono.

Acero con bajos contenidos de elementos de aleación:

Acero al carbono que acepta temple, que contiene no más del 1% de carbono y uno o más de los siguientes componentes de aleación: < (menos de) 2% de manganeso, < 4% de níquel, < 2% cromo, < 0.6% de molibdeno y < 0.2% de vanadio.

Acero muerto:

Acero completamente desoxidado (por ejemplo, debido a la adición de aluminio o silicio) en el que se suprime la reacción entre el carbono y el oxígeno durante la solidificación. Este tipo de acero tiene composición química y propiedades más uniformes en comparación con otros tipos.”⁹

“Los metales y aleaciones ferrosos se basan en el metal denominado hierro, el cual constituye su componente principal. Se trata de un metal suave y gris que raramente se encuentra en estado puro fuera del laboratorio. El coque es una forma de carbono, y es con base en el coque utilizado en los altos hornos con lo que se forman inicialmente los compuesto hierro/carbono. Esta asociación con el carbono modifica grandemente la conducta del hierro, y lo hace más duro, más fuerte, y más útil. Unas ligeras variaciones en la cantidad de carbono suponen grandes diferencias en las propiedades del metal.

A la temperatura ambiente, los metales ferrosos, recocidos, contienen tres constituyentes principales:

Ferrita: Solución sólida y muy débil de carbono en el hierro (0.006%) y éste se considera, para todos el objetivo práctico, como hierro puro. Este constituyente es muy suave y dúctil.

Cementita: Este es un compuesto de hierro y carbono. Los químicos le denominan carburo de hierro, en tanto que el ingeniero y el metalúrgico le dan el nombre de cementita. La cementita es muy dura y quebradiza.

Perlita: Esta es una estructura cristalina que contiene capas alternas de ferrita y cementita. Esta estructura laminada (semejante a la de la madera contrachapada) es muy fuerte, y los cristales se denominan cristales lamelares. La perlita es muy fuerte y rígida.

Nombre	Grupo	Contenido de carbono %	Algunos usos
Hierro forjado	Hierro Forjado	Menos de 0.05	Cadena para aparejos de izar, ganchos de grúas, hierro arquitectónico.
Acero muy dulce	Acero simple al carbono	0.1 a 0.15	Lamina para el prensado de formas tales como las carrocerías de automóvil. Alambre delgado, varilla, y tubos estirados.
Acero dulce	Acero simple al carbono	0.15 a 0.3	Empleo general en el taller, en barras, láminas para calderas y vigas.
Acero al medio carbono	Acero simple al carbono	0.3 a 0.5 0.5 a 0.8	Forja de cigüeñales, ejes, muelles en hoja, cortafíos.
Acero al alto carbono	Acero simple al carbono	0.8 a 1.0 1.0 a 1.2 1.2 a 1.4	Resortes, formones, limas, brocas, machos de rosca y dados. Herramientas con filo fino (cuchillos, etc.).
Fundición de hierro gris	Hierro fundido	3.2 a 3.5	Fundición de máquinas.

Tabla 3

Metales Ferrosos (hierro forjado)

Los hierros forjados constituyen un grupo de metales ferrosos con un contenido tan bajo de carbono que los compuestos hierro/carbono, esenciales en el acero, no pueden formarse. Por otra parte contienen fibras de escoria que quedan atrapadas en el metal, y que aumentan la resistencia a la corrosión y evitan la producción de fracturas súbitas.

Metales ferrosos (aceros simples al carbono)

Los aceros simples al carbono se definen como aleaciones de hierro y carbono en las cuales el carbono y el hierro se combinan químicamente en todo momento. Únicamente la gama

de metales ferrosos cuyo contenido de carbono se encuentra entre 0.1 y 1.7% cumplen la definición. En la práctica, rara vez excede el límite de 1.4% de carbono.

Además del carbono, todos los aceros simples al carbono contienen:

Manganeso: hasta 1.0%

Sílice: hasta 0.3%

Azufre: hasta 0.05%

Fósforo: hasta 0.05%”⁵

3.7 CORROSIÓN

“Los recipientes o partes de los mismos que estén sujetos a corrosión, erosión o abrasión mecánica deben tener un margen de espesor para lograr la vida deseada, aumentando convenientemente el espesor del material respecto al determinado por las formulas de diseño, o utilizando algún método adecuado de protección (Norma UG-25b).

Las normas no prescriben la magnitud del margen por corrosión excepto para recipientes con espesor mínimo requerido menor de 6.3 mm (0.25 pulgadas) que han de utilizarse para servicio de vapor de agua, agua o aire comprimido, para los cuales indica un margen por corrosión no menor de la sexta parte del espesor de placa calculado. No es necesario que la suma del espesor calculado más el margen por corrosión exceda de 6.3 mm (¼ de pulgada) (Norma UCS-25).

Para otros recipientes en los que sea predecible el desgaste por corrosión, la vida esperada del recipiente será la que determine el margen, y si el efecto de la corrosión es indeterminado, el margen lo definirá el diseñador. Un desgaste por corrosión de 5 milésimas de pulgada por año (1/16 de pulgada en 12 años) generalmente es satisfactorio para recipientes y tuberías.

La vida deseada de un recipiente es una cuestión económica. Los recipientes principales o mayores se diseñan generalmente para una vida larga de servicio (15 a 20 años), mientras que los secundarios o menores para periodos más cortos (8 a 10 años).

No necesita aplicarse el mismo margen por corrosión a todas las partes del recipiente si se esperan diferentes grados de ataque para las distintas partes (Norma UG-25 c).

Existen varios métodos diferentes para medir la corrosión. El más simple consiste en taladrar agujeros de prueba (Norma UG-25 e) o indicadores de la corrosión.

Los recipientes sujetos a corrosión deberán tener una abertura de purga (Norma UG-25 f).

Todos los recipientes a presión sujetos a corrosión, erosión o abrasión mecánica interna deberán ser provistos con abertura de inspección (Norma UG-46).

Para eliminar la corrosión se utilizan materiales resistentes, ya sea como recubrimientos únicamente, o para fabricar todo el recipiente.

Las reglas de los recubrimientos se indican en la norma ASME en la parte UCL, apéndice F y párrafo UG-26.

Un recipiente puede protegerse contra abrasión mecánica por medio de parches de placa metálica, los cuales se sueldan o se unen por otros medios al área expuesta del recipiente.”¹⁰

“En los recipientes sujetos a presión se evitaren todos los entrehierros y bolsas angostas uniendo las partes a la pared del recipiente con soldadura continua.

Los minerales de incrustación son la sílica y el calcio.

Ion de Hidrógeno:

La corrosión aumenta cuando disminuye el pH. Sobre todo en materiales como el acero al alto carbón. El acero inoxidable sufre ruptura por corrosión en presencia del ion de hidrógeno.

Clorito:

El ion clorito causa rompimiento de película que provee protección a los metales substrato. Forma iones complejo estables que provocan una corrosión acelerada.

Sulfito de hidrógeno:

El cobre y sus aleaciones son atacados por el Sulfito de hidrógeno. La ruptura por Sulfito en aceros de alta resistencia es muy común.

Dióxido de carbono:

Agente oxidante, causa incremento en la corrosión en aceros al alto carbono.

Amonia:

Lleva a una corrosión aumentada de aleaciones de cobre.

Sulfato:

Ion agresivo primario en los fluidos geotérmicos.

La inadvertida intrusión del oxígeno a los fluidos geotérmicos lleva a una corrosión acelerada.

Corrosión uniforme: Sucede en toda la superficie del metal promovida por clorito, dióxido de carbono oxígeno o amonia.

Picadura: Forma de ataque localizada, son picaduras en la superficie del metal. Asociado con la ruptura de la película protectora.

Corrosión en hendiduras: Similar a la picadura en el aspecto de que es un ataque localizado. Depende de la geometría ya que se forma en las hendiduras del equipo.

Ruptura por corrosión: Tipo catastrófico de falla promovido por una combinación de

esfuerzos de tensión y la presencia del ion clorito. La presencia de oxígeno e incrementos de temperatura incrementan la severidad del ataque.

Ruptura por Sulfito: Falla resultada de la exposición bajo estrés de materiales susceptibles a ambiente con H₂S en fase acuosa. La ruptura por Sulfito disminuye con el aumento de temperatura; bajo pH acelera la falla.

Burbujeo de hidrógeno: Ruptura de materiales metálicos cuando se atrapa hidrógeno en vacíos a suficiente presión. El material no necesita estar bajo esfuerzo para que ocurra.

Corrosión intergranular: Ocurre en las fronteras granulares, con poco ataque en los cuerpos de los granos. La aleación se desintegra o pierde su resistencia.

Corrosión galvánica: Ocurre cuando dos metales están unidos eléctricamente. Se acelera la corrosión del menos noble. Los materiales pueden ser ordenados en series galvánicas. Pero esto puede cambiar su química y temperatura.

Fatiga por corrosión: Fractura prematura cuando se impone un esfuerzo cíclico en un ambiente corrosivo.

Exfoliación: Formación de capas discretas de corrosión, las capas se pueden soltar dañando componentes flujo abajo. Sulfito de hierro se forma como en capa en tuberías de acero que llevan vapor con H₂S. Hay una tendencia de estas capas a romperse y descascararse y si ocurre cerca de la turbina puede causar erosión.”⁹

3.8 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

“Los tratamientos operan continuamente en la pieza de trabajo. Alteran o modifican el producto en proceso sin contacto de herramienta. Tratamiento térmico, galvanizado, curado, terminado, limpieza química y pintado son ejemplos de tratamientos que agregan valor a la parte. Estos procesos son comúnmente difíciles de incluir en células porque generalmente tienen tiempos de ciclo largos, son dañinos a la salud de los trabajadores, o son molestos al estar cerca de ellos por las altas temperaturas o los químicos. Generalmente se hacen en tanques grandes o cuartos o en hornos. El tiempo de ciclo de estos procesos puede dictar el tiempo de ciclo para el sistema entero.

Término	Significado
Recocido	Estado en que se encuentra el metal que ha sido calentado por encima de una determinada temperatura, dependiendo de su composición, y enfriado a continuación en el propio horno o enterrándolo en cenizas o en cal. Este proceso de recocido hace al metal muy suave y dúctil. El

	recocido precede normalmente a las operaciones de flujo, tales como el prensado del metal y el estirado de alambres y tubos.
Normalizado	Estado de un metal que se calienta por encima de una temperatura determinada, dependiendo de su composición, y a continuación se enfría al aire libre. Aún cuando este enfriamiento es lento, no es tan lento como el de recocido, de forma que el metal queda menos suave y dúctil. Este estado no es adecuado para la formación por flujo, pero si lo es para el maquinado. El normalizado se emplea con frecuencia para reducir esfuerzos de molde y forja después de un maquinado duro.
Endurecimiento por temple	Estado de un metal que se calienta por encima de una determinada temperatura, dependiendo de su composición, y enfriado a continuación muy rápidamente por inmersión en agua fría o aceite frío. El enfriamiento rápido se denomina temple, y el agua o el aceite utilizado se denomina baño para templado. Este enfriamiento rápido partiendo de temperaturas elevadas da gran dureza al metal. Únicamente los aceros al alto carbono o al medio carbono se endurecen de esta manera.
Revenido	Los aceros endurecidos por temple son frágiles, a la vez que duros. Para hacerlos adecuados para su uso en herramientas de corte tienen que volver a calentarse hasta una determinada temperatura, entre 200 y 300°C, y enfriarse de nuevo. Esto los hace ligeramente menos duros, pero mucho más rígidos. Los metales en este estado se dice que están revenidos o recocidos.

Tabla 4

Trabajo en caliente y en frío

Las propiedades de los materiales cambian cuando éstos se someten al trabajo en frío o en caliente.

Los materiales obtienen su forma fundiéndolos para darles la forma deseada en moldes, o bien cortándolos a mano o en máquinas herramientas hasta que tengan la forma deseada. Existen alternativas de trabajarlos y de darles forma. Esto significa dar forma a una pieza de metal mediante un esfuerzo de estiramiento o de compresión. El metal que recibe forma por este procedimiento ha sido forjado.

En los metales que se trabajen en frío o en caliente el trabajo que se realiza en el metal distorsiona los cristales que lo forman, endureciendo el metal y haciéndolo menos dúctil.

En los metales trabajados en frío los cristales no se deforman, y el metal permanece duro y falto de ductilidad aun después de ser procesado. Se dice que el metal se ha endurecido por el trabajo.

En el trabajo en caliente el metal está lo suficientemente caliente para que los cristales se reformen después de haber sido distorsionados durante el proceso de trabajo. El metal trabajado en caliente de esta manera permanece suave y dúctil, por fuerte que haya sido el trabajo al que se le sometió. La temperatura en que vuelven a formarse los cristales depende de la composición del metal y se la denomina temperatura de recristalización.”⁵

3.9 SOLDADURA

“La soldadura de recipientes sometidos a presión depende de las circunstancias en que ha de realizarse la soldadura, los requisitos del código y los aspectos económicos.

En muchos casos, la accesibilidad de la junta determina el tipo de soldadura. En un recipiente de diámetro pequeño (menos de 18-24 pulgadas), no puede aplicarse la soldadura manual. Se utiliza una tira de respaldo, esta debe permanecer en su lugar. En los recipientes de mayor diámetro, si no tienen registro para hombre, la última junta (de cierre) sólo puede soldarse desde el exterior. El tipo de soldadura puede ser determinado también por el equipo del fabricante.

De acuerdo al tipo de junta (TABLA 3), las normas establecen requisitos basados en el servicio, el material y la ubicación de la soldadura. Los procesos de soldadura que pueden aplicarse en la construcción de recipientes a presión están restringidos también por las normas, como se describe en el párrafo UW-27.

FACTORES DE REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA K_f	
TIPO DE JUNTA	K_f
A tope con refuerzo	1.2
De filete transversal, en la punta	1.5
De filetes paralelos, en el extremo	2.7
A tope en T, con esquinas agudas	2.0

Tabla 5

Cuando se sueldan placas de espesor grueso o de acero inoxidable es necesario realizar un bisel (soldadura en V) en las aristas para permitir que la soldadura penetre en el material y queden soldadas no solo superficialmente sino precisamente en el punto de unión.

Si los dos factores anteriores permiten la libre elección, la economía del factor es decisivo. La preparación con bordes en V, que pueden hacerse con soplete, es siempre más económica que la preparación para juntas en J o en U.

La preparación en V doble requiere sólo de la mitad del metal de soldadura depositada de la que requiere la preparación en V sencilla. Al aumentar el tamaño de la soldadura de filete, su resistencia aumenta en proporción directa, mientras que el metal de la soldadura depositado aumenta en proporción el cuadrado de su tamaño. La soldadura de baja calidad hace necesaria la utilización de placa de mayor espesor para el recipiente. El que sea más económico utilizar soldadura de mayor resistencia y placa más delgada o lo contrario, depende del tamaño del recipiente, del equipo de soldadura, etc. Esto debe decidirse en cada caso particular.”⁶

Para referencias acerca de los tipos de soldadura en las juntas de placas referirse al apéndice.

“Uno de los mejores estándares en uso es el código o reglamento para la construcción de

edificios del Instituto Americano de Construcción con Acero (American Institute of Steel Construction, mejor conocido como AISC por sus siglas en inglés). Aquí los esfuerzos permisibles se basan en la resistencia de fluencia del material, en vez de en la resistencia última, y el código permite el uso de uno o varios aceros estructurales ASTM. Siempre que la carga sea la misma, el código admite que se considere el mismo esfuerzo en el metal soldante que en el metal base. Por lo general el material soldante es el más resistente por lo que hay que verificar los materiales primarios.”⁶

3.9.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

“Son métodos de inspección que sirven para verificar la sanidad superficial e interna de los materiales, así como la hermeticidad de los recipientes o sistemas que trabajan a presión o al vacío, sin destruirlos o alterar en forma permanente sus propiedades físicas, químicas o dimensionales.

Son métodos físicos indirectos que se emplean para la detección y evaluación de discontinuidades superficiales y subsuperficiales.

Métodos de ensayos no destructivos contemplados por The American Society for Nondestructive Testing (ASNT).”¹¹

Método de inspección	Símbolo/Abreviatura
Inspección visual	VT
Líquidos penetrantes	PT
Partículas magnéticas	MT
Electromagnetismo	ET
Ultrasonido	UT
Radiografía	RT
Emisión acústica	AET
Radiografía con neutrones	NRT
Termografía infrarroja	TIR
Análisis de Vibraciones	VA
Prueba de fuga	LT

Tabla 6

Inspección visual

“Toda unión soldada se deberá examinar visualmente; es una prueba preliminar conveniente cuando se van a usar otros métodos de prueba.

La unión deberá estar libre de materiales extraños: grasa, pintura, aceite, películas de óxido, fundente y bloqueador. El examen visual deberá revelar fallas debidas a daños, falte de alineación y embonamiento deficiente de las piezas, inexactitudes dimensionales, flujo insuficiente de metales de aporte de soldadura, huecos expuestos en la unión, defectos superficiales como grietas o porosidad y daños térmicos al metal base.

La inspección visual no revela defectos internos, como atrapamiento de fundente en la unión o flujo incompleto del metal de aporte entre las superficies de empalme.

Prueba en servicio

La prueba en servicio es un método de inspección que somete a la unión soldada a cargas ligeramente superiores a las que experimentará durante su vida de servicio subsecuente. Estas cargas se pueden aplicar con métodos hidrostáticos, cargas de tensión, pruebas centrífugas, o otros muchos métodos.

Inspección con líquido penetrante

Este método de prueba no destructiva encuentra grietas, porosidad, flujo incompleto y defectos superficiales similares en las uniones soldadas. Los penetrantes comerciales coloreados o fluorescentes entran por acción capilar en las aberturas superficiales. Una vez eliminado el penetrante de la superficie, el penetrante introducido en los defectos se extrae con un revelador blanco que se aplica a la superficie. El penetrante coloreado puede verse bajo luz ordinaria; las indicaciones de defectos con penetrante fluorescente brillan bajo una fuente de luz ultravioleta (negra).”¹³

Radiografía industrial

“La inspección radiográfica de ensambles soldados detecta la falta de adhesión o el flujo incompleto de metal de aporte. Las uniones deberán tener espesor uniforme y la exposición deberá realizarse en una línea normal a la unión. La sensibilidad de este método por lo regular está limitada al 2% del espesor de la unión. La absorción de los rayos X por ciertos materiales de aporte es mayor que la de la generalidad de los metales base; por tanto, las áreas de la unión en las que no hay metal de aporte se ven mucho más oscuras que el área soldada en la película o en la pantalla.”¹³

“Es un método de ensayo no destructivo que utiliza radiación ionizante de alta energía capaz de penetrar materiales sólidos; la condición interna de estos materiales es registrada en una película radiográfica o pantalla fluorescente.

Los rayos “X” y “Gamma”, poseen la capacidad de penetrar los materiales. Pasando a través de cualquier materia, la cantidad de absorción en algún punto, depende del espesor y densidad en ese punto. Cuando esta variación de la radiación debido a la absorción es detectada y registrada, la imagen de la estructura interna del material está disponible.

Cuando la película es procesada, la imagen latente producida en esta será un negativo de la muestra.

La radiografía proporciona un registro permanente de la estructura interna de un material, el cual es relativamente fácil de interpretar y evaluar. En la industria se emplean dos tipos de radiación en la inspección radiográfica.

1. Rayos X
2. Rayos Gamma

La principal diferencia es cómo se producen.

A excepción de sus fuentes, los rayos gamma y X tienen exactamente la misma clase de radiación.

Ambos tipos de rayos no son de pequeñas porciones de materia, tal como son las partículas Alfa y Beta.

Tanto los rayos Gamma como los X no tienen masa ni peso, y nuestros sentidos normales no pueden detectarlos.

Aplicaciones

Determinación de estructuras cristalográficas por difracción.

Determinación de composición química por fluorescencia

Medición de espesor en procesos de alta temperatura por atenuación

Medición de niveles de fluidos

Control de calidad en componentes soldados, forjados, de fundición, etc.

Ventajas

Puede ser usada en la mayoría de los materiales

Proporciona una imagen visual permanente

Revela la naturaleza interna del material

Revela errores de fabricación

Revela discontinuidades estructurales

Revela discontinuidades estructurales”¹¹

3.9.2 IMPERFECCIONES COMUNES

Falta de llenado (huecos, porosidad)

“Puede ser el resultado de una limpieza inadecuada, una separación excesiva, falta de metal de aporte, gas atrapado y movimiento de las piezas embonadas por deficiencia de la fijación. El metal de aporte es vulnerable cuando se encuentra en estado líquido o parcialmente líquido. La falta de llenado reduce la resistencia mecánica de la unión porque reduce el área que soporta la carga, y puede proveer un camino de fuga.

Atrapamiento de fundente

Puede haber fundente atrapado en cualquier operación de soldadura en la que se agregue fundente para evitar y eliminar la oxidación durante el ciclo de calentamiento. El fundente atrapado en la unión evita el flujo del metal de aporte al interior de esa área y por tanto reduce la resistencia mecánica de la unión; además, puede falsear las indicaciones de las pruebas de fugas y en servicio. Si queda atrapado un fundente corrosivo, posiblemente reduzca la vida de servicio.

Filetes discontinuos

La falta de filetes por lo regular se observa durante la inspección visual. Que las omisiones puedan tolerarse o no dependerá del contrato de trabajo.

Erosión del metal base

La erosión ocurre cuando el metal de aporte de soldadura se alea con el metal base. Puede causar socavamiento o la desaparición de la superficie de empalme. La erosión reduce la resistencia mecánica de la unión porque altera la composición de los materiales y reduce el área de sección transversal del metal base.

Aspecto superficial insatisfactorio

Un aspecto insatisfactorio del metal de aporte de soldadura (lo que incluye aspereza y una extensión excesiva) es objetable no sólo por razones estéticas. Los defectos de apariencia pueden actuar como concentraciones de esfuerzos o sitios de corrosión, y pueden interferir con la inspección del ensamble soldado.

Grietas

Las grietas reducen tanto la resistencia mecánica como la vida de servicio. Actúan como elevadores de esfuerzos, disminuyendo la resistencia mecánica del ensamble soldado y causando falla prematura por fatiga.”¹³

3.10 PLACAS DE ORIFICIO

Una parte fundamental para la reducción de presión es la placa de orificio, ya que nos proporcionan las caídas de presión necesarias para obtener un flujo menos turbulento que ayudará a la difusión del vapor. Las características más importantes de estos dispositivos además de la caída de presión son la velocidad que se tendrá a la salida y la longitud de la vena contracta ya que esto nos dirá si en cualquier punto se llega al flujo sónico y cuando se uniformará el flujo.

“Las placas de orificio son dispositivos de precisión de grado industrial. Requieren diseño propio, instalación, inspección y mantenimiento.

La precisión de la placa de orificio se ve seriamente afectada cuando el flujo no pasa a través del orificio en línea recta.

Efectos de las placas:

- Obstrucción o bloqueo pueden causar errores.
- Bordes mellados o desafilados introducen del 1 al 10% de error.
- Dobleces o deformaciones usualmente son el resultado de condiciones de flujo excedentes de condiciones de diseño. Cuando la placa se deforma el orificio se agranda (cambia la relación β) y puede producir tanto como un 6% de flujo de error sin registrar.
- Orificios no centrados en la tubería pueden producir un 2% de error.
- Placas flexibles causados por la operación justo arriba del punto de diseño causando el doblez o flexión de la placa cambiando la relación β . El error puede ser de hasta el 20%
- Flujo pulsante registra más flujo.
- Placas reversibles, colocados con el orificio de filos hacia la salida pueden introducir

errores de hasta el 20%.

- Deshechos y lubricantes en la cara de la placa aguas arriba producen errores tan grandes como el 15% con la superficie aguas abajo incrustada contribuyendo con 5% de error.

Las placas de orificio son más que un pedazo de acero con un agujero en el centro, son dispositivos de precisión de grado industrial capaces de producir medidas precisas, repetibles.”¹²

3.10.1 ESPECIFICACIONES

“Dimensiones críticas

- Ambas caras son planas.
- Las superficies son lisas.
- Filo en la entrada del orificio.
- Calibre del orificio.
- Espesor del filo del orificio.

Una placa de orificio es aceptable si no es plana a lo largo de su diámetro por más de 0.010 in.

La superficie de la placa debe de estar limpia y libre de incrustaciones. La suavidad de un dispositivo limpio no debe exceder las 50 micropulgadas.

Un borde afilado no refleja luz cuando es visto a simple vista.

El diámetro debe ser medido con un micrómetro interno. La tolerancia varía de 0.0003 in para un orificio de 0.250 in hasta 0.0005 in de diámetro para orificios de calibre mayor de 1 in. El diámetro debe ser determinado a 68° F (20° C). Si se va a trabajar a otra temperatura el diámetro necesita ser ajustado para expansión térmica.

El máximo espesor de bordo tiene que ser menor o igual al diámetro del tubo entre cincuenta $D/50$ o $d/8$, el que sea menor. Se debe maquinar un bisel a 30 o 45° al filo de descarga. Sin embargo estos biseles ayudan a recuperar la caída de presión del fluido y los orificios sin bisel provocan una gran caída de presión.

Incrustaciones pueden ocurrir en la cara interna de una placa con orificio concéntrico en una tubería horizontal; un orificio excéntrico puede ser colocado nivelado con el fondo de la tubería para evadir esta dificultad.”¹²

3.11 ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO

En el análisis de elemento finito se analizan tres características principales del material

1. Grados de libertad (DOF) en los elementos.
2. Deformación unitaria (strain) en las placas.

3. Distribución de esfuerzos (stress) en las placas.

En todos éstos se analiza cuanto se desplazarán las placas al aplicarle la presión de operación en una de sus caras y empotrando el área del borde exterior de las placas, este dato aparece en el gráfico de DOF con SMX y DMX, que corresponde a la distancia en metros del desplazamiento que sufrirá la placa durante su funcionamiento; en los gráficos de deformación y esfuerzo aparece también como DMX. Con estas mismas características de operación en cada una de las placas se tiene la deformación unitaria al aplicarle la presión correspondiente, los resultados que arroja SMX (deformación promedio localizada máxima) y SMN (deformación promedio localizada mínima) no son más que un promedio de deformación a lo largo de toda la placa en unidades adimensionales; si el signo es negativo significa que la deformación se encuentra en contra del sentido de la presión, y positivo significa que es a favor del sentido del flujo. Por último en los gráficos de distribución de esfuerzos aparecen dos datos SMX (distribución de esfuerzo máximo) y SMN (distribución de esfuerzo mínimo), que corresponden a la distribución de esfuerzos en kg/m^2 a lo largo de toda la placa según la presión que se le aplique a la cara, ésta no debe de exceder del esfuerzo último a la tensión, que para el acero 316L corresponde a $S_T=74.46 \text{ MPa}$ o $7.593 \times 10^3 \text{ kg/m}^2$; esto es para que la placa no pase del límite plástico y pueda recuperarse; si los esfuerzos son positivos significa que se encuentra trabajando a tensión y si es negativo que esta a compresión. Si alguno de los esfuerzos, positivos o negativo, excede al límite de cedencia que es de $S_y=106.87 \text{ MPa}$ o $1.09 \times 10^7 \text{ kg/m}^2$ la placa sufrirá fallará y el signo indicará si fue por tensión o compresión, o ambos.

En la distribución de esfuerzos no importa el módulo de elasticidad, éste solo se relaciona con las deformaciones. La distribución de esfuerzos es una relación de la fuerza aplicada entre el área de aplicación de dicha fuerza.

CAPÍTULO IV

HIPÓTESIS:

4.1 HIPÓTESIS

El sistema de manufactura capaz de producir un silenciador que cumpla con los objetivos de la tesis contará con una fabricación simple para mantener un costo bajo de producción pero con materiales de muy alta calidad, guardando la linealidad con los procesos y con el diseño. Siendo esta prácticamente una producción tipo taller. Esto es, que los procesos deberán estar acordes con los materiales utilizados.

CAPÍTULO V

COMPROBACIÓN

5.1 DESARROLLO

En base a los planos presentados por el diseñador se desarrolló un sistema de manufactura que incluye la fabricación de placas de orificios múltiples, también se maneja el formado del cuerpo del silenciador, esto es el doblado y cortado de las láminas, fabricación de biseles y aplicación de la soldadura.

Sin embargo existen partes que se encuentran en el mercado a un precio más bajo del que costaría fabricarlo, tales partes son las bridas, los accesorios y las placas de acero inoxidable que vienen a ser la materia prima. Esta placa, como se especifica en los planos, debe ser de 16 mm (5/8") de espesor de acero inoxidable austenítico serie 300 por poderse deformar en frío, se optó por el acero 316L (16 Cr-12 Ni-2 Mo) para el cuerpo y 13 mm (1/2") para las placas de orificio por ser más barato y por cumplir con los requisitos de resistencia. El diámetro interno del cuerpo del silenciador es de 1676 mm (66"). Cabe mencionar que el acero utilizado sufrirá una dilatación de 96.52 mm (3.8") por cada 30.48 m (100ft) durante la operación, esta información esta dada para placa SA-240, grado 316L y para tubo sin costura SA-312, grado TP316L con un Módulo de Elasticidad $E = 18'631 \text{ kg/mm}^2$ o $182'711.1 \text{ MPa}$ ($26.5 \times 10^6 \text{ psi}$). Con un Esfuerzo de Cedencia $S_y = 106.87 \text{ MPa}$ (15.5 kpsi) y un Esfuerzo a la Tensión $S_T = 74.46 \text{ MPa}$ (10.8kpsi) @ 204 °C (400°F). Con una Relación de Poisson $\nu = 0.3$, Factor de Junta = 1.00, Densidad $\rho = 8'027 \text{ kg/m}^3$ (0.29 lb/in^3) y un Coeficiente Lineal de Expansión Térmica $\alpha = 17.26 \times 10^{-6} \text{ mm/mm/}^\circ\text{C}$ ($9.59 \times 10^{-6} \text{ in/in/}^\circ\text{F}$); todos los anteriores a una temperatura de 204 °C (400 °F).

Sin embargo no se deben adquirir todas las partes a la vez para evitar un exceso de inventario y que estas piezas no vayan a sufrir un daño en piso. Por lo que se debe diseñar un plan maestro de producción, y para llegar a este, primero se debe tener un listado de los productos que necesitamos y sus cantidades.

De aquí tenemos que nuestro BOM es el siguiente:

NÚMERO DE PARTE	TIPO DE PRODUCTO	CANTIDAD
1	Placa de acero inoxidable 316L de 16mm X 5400mm X 254mm (5/8" X 212.6" X 10")	19
2	Placa de acero inoxidable 316L de 19mm X 762mm (3/4" X 30")	1
3	Placa de acero inoxidable 316L de 13mm X 1650mm (1/2" X 65")	3
4	Placa de 13 X 19 X 1645 mm de acero inoxidable 316L (1/2" X 3/4" X 64 3/4")	8
5	Placa de 3 X 38 X 152 mm de acero inoxidable 316L (1/8" X 1 1/2" X 6")	2
6	Placa de acero inoxidable 316L de	1

	<i>6mm (1/4") de espesor</i>	
7	<i>Placa de acero inoxidable 316L de 2mm (1/16") de espesor</i>	1
8	<i>Brida Deslizable 16/150 Inox. 316L</i>	1
9	<i>Brida Deslizable 24/300 Inox. 316L</i>	2
10	<i>Canal de acero inoxidable 316L de 40 mm X 102 mm X 5400 mm</i>	1
11	<i>Empaque de asbesto grafitado de 3 mm de espesor y 470 mm (18 1/2") Ø y 692 mm (27 1/4") Ø</i>	2 c/u
12	<i>Espárrago de acero inoxidable 316L de 25 mm Ø X 140 mm (1" Ø x 5 3/4")</i>	16
13	<i>Espárrago de acero inoxidable 316L de 38 mm Ø X 235 mm (1 1/2" Ø X 9 3/4")</i>	24
14	<i>Medio cople de acero inoxidable 316L de 13 mm (1/2") Ø, clase 3000</i>	3
15	<i>Tuerca de acero inoxidable 316L de 13 mm (1/2") Ø</i>	185

Tabla 7

De acuerdo a los datos de diseño la presión máxima de operación es de 972.4 kPa (141 lb/in², psi) y una temperatura de 183° C (361.4° F) en un proceso isotérmico. Así mismo el flujo máximo es de 195 t/h (390 000 lb/h), teniendo una velocidad de 360.46 m/s (1182.6 ft/s). La caída de presión en cada placa es la siguiente:

NÚMERO DE PLACA	CAIDA DE PRESIÓN
PLACA UNO	524.1 kPa (76 lb/in ²)
PLACA DOS	241.4 kPa (35 lb/in ²)
PLACA TRES	137.9 kPa (20 lb/in ²)
PLACA CUATRO	69.0 kPa (10 lb/in ²)

Tabla 8

Estos datos son necesarios para el análisis de resistencia de la soldadura en el silenciador.

A continuación se presenta un bosquejo de lo que se analiza en este trabajo:

Con el paso de los años las máquinas herramientas se han ido haciendo más complejas y versátiles combinando múltiples operaciones, siempre buscando la mayor eficiencia. De ahí que se puedan realizar estas operaciones en un proceso tipo taller, tal como es el formado del cuerpo, el cual consiste cortar y rolar la lámina en frío dándole forma cilíndrica y soldándolo. A la vez que se fabrica la tapa elipsoidal por medio de una prensa hidráulica.

Una vez definidos los pasos ha seguir se puede pasar a la ingeniería de detalle.

5.2 FACTOR DE SEGURIDAD

El factor de seguridad es la relación entre el esfuerzo máximo aplicado y la carga nominal de servicio.

En la fabricación de un producto en el cual se requiere aplicación de soldadura y maquinados, como en este caso, se requiere entregar al cliente planos tipo taller sobre la construcción del equipo, consideraciones tomadas, etc., en este trabajo solo se incluye el compilado de todos ellos que incluso tiene datos de la instalación. Para los procesos de aplicación de la soldadura se requiere hacer ciertos cálculos según el espesor que tenga la placa para definir su calidad, aplicación y penetración. Además de que ayuda a definir el factor de seguridad del equipo al indicarnos cual es el óptimo espesor de las paredes y cual es la presión máxima de operación. Para esto tenemos que definir los tipos de eficiencias de las juntas, para nuestro caso se tiene para todo el sistema soldaduras a tope biseladas de ambos lados o de filete especificadas como:

Juntas soldadas a tope hechas por doble cordón de soldadura o por otro medio con el que se obtenga la misma calidad de metal de soldadura depositada sobre las superficies interior y exterior de la pieza. Si se emplea placa de respaldo, debe quitarse esta después de terminar la soldadura.

Tipos de juntas soldables:

- a) Radiografiada totalmente = 1.00
- b) Examinada por zonas = 0.85
- c) No examinada = 0.70

Cuando un recipiente a presión esta sometido a presión interna los esfuerzos mayores se encuentran en las juntas longitudinales, es por esto que este tipo de uniones rigen el diseño de los tanques cilíndricos. La presión máxima a la que opera la entrada del silenciador es igual a 972 kPa (141 psi), sin embargo por ser la presión mayor de operación y en caso de que las placas limitadoras de presión sufran un daño, se tomará esta presión como la existente a todo lo largo del sistema. Es por esta misma razón que las paredes están hechas de un mismo espesor. De la misma forma se toman las condiciones críticas para el diseño de juntas cuando estas no se examinan ($E=0.70$). El factor S tomado de tablas indica el esfuerzo máximo al que será sometido el sistema a una temperatura dada, en este caso $S = 106.87 \text{ MPa (15.5 kpsi) @ } 204 \text{ °C (400°F)}$.

Para el cálculo de cascos cilíndricos (juntas longitudinales) sin examinar ($E=0.70$) con el diámetro exterior de 1676 (66") el espesor requerido, de acuerdo a lo visto en el capítulo 3.3, es de:

$$t = \frac{PR}{SE + 0.4P} = \frac{(41\text{psi})(63")}{(5.5\text{kpsi})(0.70) + 0.4(41\text{psi})} = 0.42663' = 10.8364\text{mm}$$

Y como el espesor real es de 16mm (5/8") se puede decir que superamos el espesor requerido en más de 6.3 mm (1/4").

Para el mismo caso la presión de diseño máxima que aguanta la junta longitudinal es de:

$$P = \frac{SEt}{R - 0.4t} = \frac{(5.5\text{kpsi})(0.70)(5/8")}{(63") - 0.4(5/8")} = 207.0611\text{psi} = 1.42764\text{MPa}$$

Y supera por mucho la presión máxima de operación, la cual es de 0.97 MPa (141 psi).

Los esfuerzos máximos permitidos para las juntas tomando en cuenta los diámetros internos están dados de la siguiente manera:

Para la junta Circunferencial:

$$S_1 = \frac{PD}{4t} = \frac{(41\text{psi})(5.375")}{(4)(5/8")} = 3687.15\text{psi} = 25.422\text{MPa}$$

Para la junta Longitudinal:

$$S_2 = \frac{PD}{2t} = \frac{(41\text{psi})(5.375")}{(2)(5/8")} = 7374.30\text{psi} = 50.8440\text{MPa}$$

Donde la altura máxima que puede tener el silenciador esta regida por:

$$H = \frac{PD}{32t} = \frac{(41\text{psi})(5.375")}{(32)(5/8")} = 460.8940\text{ft} = 140.4805\text{m}$$

Y de acuerdo a los planos de diseño el silenciador no alcanza los 7m.

Por último tenemos que para la cabeza elipsoidal de tamaño 2:1 (relación diámetro con respecto a la altura) con una eficiencia de junta no examinada ($E=0.70$), referido al diámetro exterior:

Su espesor mínimo permitido es de:

$$t = \frac{PD}{2SE + 1.8P} = \frac{(41\text{psi})(66'')}{2(5.5\text{kpsi})(0.70'') + (1.8)(41\text{psi})} = 0.42389' = 10.7668\text{mm}$$

Y la presión máxima permitida es de:

$$P = \frac{2SEt}{D - 1.8t} = \frac{(5.5\text{kpsi})(0.70'')}{(66'') - (1.8)(0.70'')} = 209.0559\text{psi} = 1.4414\text{MPa}$$

Por lo anterior se tiene que la parte que resiste menos esfuerzo, esto es, la parte más débil del silenciador es en la junta de la cabeza elipsoidal, por eso es aquí donde se aplica el factor de seguridad, el cual es de:

$$n = \frac{1441.4\text{kPa}(209\text{psi})}{972\text{kPa}(141\text{psi})} = 1.4829$$

Lo que nos indica que es una junta segura y que con el espesor de fabricación de 16 mm (5/8"), que es el espesor nominal de placa más cercano a 10.7668 mm (0.42389") que se puede obtener en el mercado, se tiene un excedente de 5.2332 mm (0.206"); y con una presión de operación de 972 kPa (141 psi) se tiene un diseño resistente que excede las expectativas con un 38.29% de lo que se requiere por norma, esto es el 10%, lo que dice que es imposible que exista una falla por sobre esfuerzos en la operación del silenciador.

Especificaciones de la soldadura

1. La forma de los bordes por unir mediante soldadura a tope deberá ser tal que permita lograr una fusión y penetración completas.
2. Las juntas a tope deberán estar libres de socavaciones, traslapes y lomos y valles bruscos. Para asegurarse que se llenen completamente de soldadura las ranuras, el metal de soldadura puede acumularse como refuerzo.
3. Antes de soldar el segundo lado de una junta a tope de doble cordón, las impurezas de la soldadura del primer lado deben separarse por rebabeo, por esmeril o por fusión para que haya metal firme para penetración y fusión completas. Para la soldadura de arco sumergido se recomienda formar por rebabeo una ranura en el cráter.

5.3 CORTE

El corte del acero inoxidable suele ser difícil por sus propiedades, es difícil pensar en su corte por medio de cegueta, pero es aún más difícil pensar en cortar acero inoxidable por

medio de oxiacetileno. Sin embargo hay otras formas de corte como puede ser el corte por arco aire o sistemas más sofisticados como el corte por láser.

Se debe utilizar un equipo de corte de plasma y un pantógrafo, como se vio en el capítulo 3.4.3, para realizar los cortes necesarios en las placas. La utilización del pantógrafo es muy común y sirve para posicionar el equipo en el ángulo correcto de corte. ¿Por qué plasma y no otro sistema de corte? La respuesta se enfoca a la facilidad de utilizar este sistema, además de hacer cortes precisos, ya que no deforma las placas ni crea desperdicio en esta, como puede ser el de “comerse” parte del material la flama como suele ocurrir con el oxiacetileno en placas de acero al carbón, la cual deja excoriaciones por donde va cortando. De cualquier manera el corte por oxiacetileno queda totalmente descartado por que su flama no llega a la temperatura necesaria de corte para acero inoxidable. El corte también se puede realizar por medio de discos de desbaste, solo que para estas condiciones se necesitarían muchos discos porque se acaban muy rápido, además que el equipo necesita descansar para que no se queme el motor del desbastador o esmerilador, lo que aumenta el tiempo de manufactura. El uso de láser es demasiado caro para este proceso, ya que proporciona una producción de alta calidad, sin embargo es preferible el uso de plasma por ser más económico y tener una calidad muy semejante al láser.

Existe otro sistema similar al plasma, este es el corte por arco aire; este proceso proporciona un acabado sucio con excoriaciones. Consiste en el corte por medio de un arco eléctrico y la aplicación de aire a alta presión al metal fundido por el arco. El aire tiene la función de ir degradando el metal fundido a la vez que lo arroja fuera de la trayectoria de corte para no permitir que se vuelva a soldar el metal.

Una vez habiendo dejado en claro el porqué de esta elección solo cabe decir que la correcta forma de utilizarlo es hacer un corte de unos 60 cm en la placa, dejar 5 cm sin cortar aproximadamente y continuar el corte, y repetir el procedimiento. Ya que si se realiza el corte en una sola tirada, el metal sufre dilatación térmica y tiende a abrirse a partir de donde se realizó el primer corte lo que resulta en una operación deficiente que tiene como resultado un corte final en forma de curva; esto a pesar de que el operador haya seguido las líneas de corte.

5.4 MANUFACTURA DE PLACAS DE ORIFICIO (CNC)

Las placas de orificio son dispositivos de precisión de grado industrial. Requieren diseño propio, instalación, inspección y mantenimiento.

Para el maquinado de las placas se debe primero obtener la geometría circular exterior para cada una de ellas, ya que es la parte más fácil de fabricar y que requiere menos precisión, durante este paso también se fabrica el bisel exterior de las placas para soldarse al cuerpo del silenciador; después se deben fabricar los orificios, después se le tiene que dar un paso superficial con una fresa (end mill) para remover cualquier rastro de rebaba dejado por la broca en la fabricación de orificios, lo que se conoce como careo. Y para finalizar esta tarea se debe pulir la pieza. Por último se debe soldar el asa (en caso de requerir), sobre el lomo de la placa a la mitad del espesor; esta tiene dos funciones: sirve para sujetar la placa

cuando se va a colocar o retirar de entre las bridas y para marcar el diámetro de los orificios u otros datos de la placa, esta información se coloca con herramienta de golpe. Esta asa se debe colocar al final de todo el proceso ya que no se requiere ninguna tolerancia, no es una parte importante para el correcto funcionamiento de la placa; además que estorba durante el procesos de fabricación de la geometría circular y tiene que ser soldada, trabajo que interrumpiría el proceso de la máquina de control numérico entre el paso de fabricación de la geometría y de los orificios.

El diseño de una placa de multiorificio para un silenciador de vapor incluye medidas específicas de barrenos; dichos orificios tienen la función de bajar la presión en el flujo. Para el caso de las placas para las bridas de 406 y 610 mm (16" y 24") caso en específico la placa de multiorificio va acoplada entre dos bridas deslizables con cara realzada de seis pulgadas clase 150; esta placa debe de tener una tolerancia de 3 mm (1/8 de pulgada) entre el círculo de barrenos de las bridas.

El acabado de la superficie de la placa tiene que ser:

Dimensiones

- Ambas caras son planas.
- Las superficies son lisas.
- Filo en la entrada del orificio.
- Calibre del orificio.
- Espesor del filo del orificio.

Las características más importantes de estos dispositivos, además de la caída de presión que provocan, son la velocidad que se tendrá a la salida y la longitud de la vena contracta, ya que esta nos dirá cuando se uniformará el flujo y si en cualquier punto se llega al flujo sónico.

Un placa de orificio es aceptable si no es plana, a lo largo de su diámetro, por más de 0.010 in/in de altura de presa. Altura de presa se define como $(D/d_1)/2$.

D = orificio del tubo.

d_1 = orificio de la placa.

V_1 = Velocidad antes de la entrada.

V_2 = Velocidad después de la vena contracta.

x = Espesor de la placa.

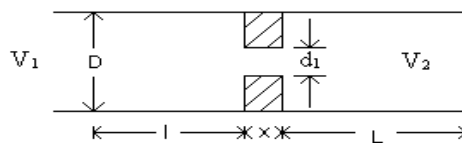


Figura 3

La superficie de la placa debe de estar limpia y libre de incrustaciones. La suavidad de un dispositivo limpio no debe exceder las 1.27 μm (50 micropulgadas).

Un borde afilado no refleja luz cuando es visto a simple vista.

El diámetro de los orificios debe ser medido con un micrómetro interno. La tolerancia varía de 7.62 μm (0.0003 pulgadas) para un orificio de 6mm (0.250 pulgadas) hasta 12.7 μm (0.0005 pulgadas) de diámetro para orificios de calibre mayor de 25mm (1"). El diámetro debe ser determinado a 20°C (68° F). Si se va a trabajar a otra temperatura el diámetro necesita ser ajustado para expansión térmica.

El máximo espesor de bordo tiene que ser menor o igual al diámetro del tubo entre cincuenta D/50 o d/8, el que sea menor.

El mantenimiento de rutina requiere que los placas sean removidos y sus dimensiones verificadas y revisar:

- Incrustaciones.
- Defectos de superficie.
- Película líquida de la superficie de la placa.
- Presencia de un nivel líquido en una aplicación de gas.
- Errores de instalación.

Si algún defecto requiere el reemplazo de la placa, valores diferenciales de presión deberán ser comparados antes y después del reemplazo para determinar errores.

Los efectos por tubería incluyen rugosidad, desalineamiento e instalaciones pobremente diseñadas, la precisión de la placa de orificio se ve seriamente afectada cuando el flujo no pasa a través del orificio en línea recta.

La rugosidad puede introducir un error de hasta el 1%.

Efectos de las placas:

- Obstrucción o bloqueo pueden causar errores.
- Bordes mellados o desafilados introducen del 1 al 10% de error.
- Dobleces o deformaciones usualmente son el resultado de condiciones de flujo excedentes de condiciones de diseño. Cuando el placa se deforma, el orificio se agranda (cambia la relación β) y puede producir tanto como un 6% de flujo de error sin registrar.
- Placas flexibles causadas por la operación justo arriba del punto de diseño causan el dobles o flexión de la placa cambiando la relación β . El error puede ser de hasta el 20%
- Flujo pulsante registra más flujo, cuando las placas se usan para medición.
- Placas reversibles, colocadas con el orificio de filos hacia la salida pueden introducir errores de hasta el 20%.
- Deshechos y lubricantes en la cara de la placa aguas arriba producen errores tan grandes como el 15%, con la superficie aguas abajo incrustada contribuyendo con 5% de error.

Las placas de multiorificio son más que un pedazo de acero con agujeros, son dispositivos de precisión de grado industrial capaces de producir caídas de presión precisas, repetibles.

Lo primero que ha de hacerse para la fabricación de las placas de orificio, como ya se dijo anteriormente, es obtener una placa circular a partir de la placa de 13mm (1/2") de espesor de acero inoxidable por medio de un corte con plasma, dejando una holgura de 6mm (1/4") para cada placa; esto significa que las placas se deberán de marcar para el corte con un diámetro mayor en 6mm (1/4") porque el diámetro de la flama del plasma es aproximadamente 3mm (1/8"), por lo que nos quedarán otros 3mm (1/8") de excedente para ser maquinados en el torno y obtener medidas precisas que no se pueden llegar a tener con el corte por plasma y lograr el acabado necesario. Cabe recordar que el corte con plasma es muy limpio y no se compara su acabado final al dejado por un corte hecho con oxiacetileno en acero al carbón. Una vez obtenida esta geometría el siguiente paso es refinarla por medio de un torno mecánico, donde las mordazas estarán sujetando la pieza por medio de una barra que se soldará concéntricamente a las placas (no se fabricará ningún orificio en la placa con el fin de hacerla girar). Se introducirá el buril en la placa en ángulo recto hasta obtener la medida que ha de quedar la placa; y para terminar en ángulo de 45° para fabricar el bisel en caso de ser necesario. Una vez terminada esta operación se procede a fabricar los orificios. A pesar de que por medio de un pantógrafo puede llegarse a tener un corte preciso no es exacto como el corte por torno. Cuando se vaya a colocar la placa en su posición final en el silenciador, la cara en la que fue soldada la barra deberá quedar aguas arriba a pesar de haber sido pulida para evitar esfuerzos microscópicos.

Se optó por realizar los trabajos de precisión (orificios) en la placa por medio de un centro de control numérico CNC, como se vio en el capítulo 3.4.2. Estos trabajos incluyen el trabajado superficial de la placa para eliminar impurezas y la fabricación de los orificios.

Así que antes de pasar a la perforación de la placa se debe de contar con el programa de computadora para el control del maquinado. Esto se logra mediante el diseño en CAD de la pieza a trabajar y después se transmite al lenguaje de la máquina CNC. Esto es un proceso sencillo que no requiere mayor esfuerzo que saber dibujar en sólidos en cualquier programa de diseño compatible con control numérico.

A partir de los planos presentados en el apéndice A se desarrollo el diseño de las placas en el programa SOLIDWORKS de CAD y se obtiene el programa de control numérico para una máquina HAAS para el maquinado de cada una de las placas, así mismo el análisis de elemento finito se realizó con ANSYS (apéndice B).

Una vez maquinadas las placas se someten a una prueba de calidad de líquidos penetrantes para asegurar que no exista ninguna falla o fractura en el material y así prolongar la vida del equipo. Esta es una prueba sencilla y barata que se realiza antes del pulido de la placa. Además esta prueba es exclusiva para partes maquinadas.

5.5 FORMADO DEL CUERPO

La forma más fácil de formar un cuerpo es por medio de forja o trabajado en caliente, donde el metal al salir del horno se coloca en un molde donde adquirirá las características

físicas y geométricas que lo han de conformar. Sin embargo este procedimiento resulta excesivamente caro por que se tiene que templar y revenir el material una vez que se extrae del molde para que adquiera todas las propiedades necesarias, a esto se le suma el precio del molde, el del horno y el tiempo. Este trabajo busca la forma más económica de realizar el silenciador sin restarle calidad, es por eso que se ha elegido una fabricación tipo taller en frío para la implementación de la manufactura, por lo tanto partiremos de materia prima básica existente en el mercado y se le aplicarán los procedimientos necesarios para que obtenga la forma física requerida.

El trabajo en caliente, efectuado en el metal en estado plástico refina la estructura del grano; en tanto que el trabajo en frío, lo distorsiona e influye poco en la reducción de su tamaño. El trabajo en frío se realiza normalmente a temperatura ambiente pero pueden utilizarse temperaturas hasta la zona de recristalización. Cuando se trabaja en frío el material ocurre una fragmentación del grano, movimiento de los átomos y distorsión de la estructura.

A nivel macroscópico lo que ocurre es una deformación en el metal, ya sea un punzonado o un doblez, pero no un corte; esta deformación es mejor conocida como dislocación de la estructura atómica o deslizamiento atómico. Las dislocaciones pueden ser introducidas por tensiones externas como la deformación plástica. Las interacciones entre las dislocaciones en el interior del metal fortalecen a los metales. Cuando los metales se deforman debido al movimiento de dislocación, mientras más barreras encuentre este movimiento, más fuerte es el metal.

Cuando ocurre un corte en el metal por desgarre, este sufre una carga mecánica en la escala atómica, los átomos tratan de separarse. Si los enlaces entre los átomos son muy fuertes, hay una tendencia a clivar los cristales. Por esto se dice que los metales no se cortan, se clivan. Sin embargo aquí utilizaremos ambos términos indistintamente.

Una vez aclarado el contenido de este capítulo se puede retomar el porqué del trabajo en frío en el proceso de formado y sus consecuencias. Claro que se requiere más presión para el trabajado en frío que para el caliente. El metal se encuentra en un estado más rígido y como no puede haber recristalización de los granos en la región de trabajo, no habrá recuperación por la distorsión de éstos o por su fragmentación y a medida que procede la deformación del grano, se desarrolla mayor oposición a esta acción, lo que hará el metal más resistente (menos dúctil), este procedimiento se conoce como endurecimiento por deformación. Cuando el metal se deforma por el trabajo en frío, se desarrollan en su interior esfuerzos residuales indeseables porque hacen que la placa de metal tienda a volver a su forma original y si el sistema fabricado estará sometido a esfuerzos ciclos puede llegar a fallar por fatiga. Estos esfuerzos pueden ser eliminados parcialmente mediante martilleo con perdigones, lo cual ocasiona que la superficie externa del metal manifieste compresión y la capa contigua tensión; sin embargo el perdigoneado intenso no es recomendable porque puede ocasionar debilitamiento del acero. Un ataque con arena simula este efecto parcialmente.

Para metales con un alto punto de fusión, como es el inoxidable, es conveniente el trabajo en frío para procesos de formado. Sin embargo, si el metal es trabajado repetidamente

puede llegar a volverse frágil, haciéndose necesaria una operación de recocido. Además al trabajar el metal en frío se mejora el acabado de la superficie y se pueden mantener tolerancias dimensionales precisas ya que el metal no sufre dilatación térmica.

Sin embargo existen partes que son preferibles adquirirlas ya que son ampliamente usadas a un precio accesible como son los pernos (espárragos, tornillos, tuercas), los accesorios y las bridas. Además que los proveedores de estos equipos se rigen por normas estándar de manufactura, lo que nos garantiza la compatibilidad con el equipo.

Tanto el formado de la tapa elipsoidal como su refuerzo, se realizan con una prensa hidráulica con las características necesarias para el trabajado de las diferentes partes. Esta prensa debe aplicar una fuerza tal que sobrepase el límite elástico y logre una deformación plástica en el metal para que adquiera la geometría requerida y permanezca así permanentemente, este es el concepto de termofluencia, todo esto de acuerdo a la ley de Hooke. Esta fuerza necesaria se calcula a partir de las ecuaciones del capítulo 3.5 del marco teórico.

Durante la operación de embutido, el flujo de metal en la pieza que se va a formar, es impedido a tener cualquier corrimiento lateral, por medio de un anillo retenedor robusto, colocado alrededor de la pieza. Presionar el punzón requiere mucho cuidado y frecuentemente son necesarias varias compresiones para que la pieza quede formada. Las superficies de las cavidades tienen un acabado altamente pulido y no necesitan más trabajo de máquinas herramientas.

En cuanto desciende el punzón y forma la pieza, la placa botadora es presionada hacia abajo comprimiendo el resorte en la parte inferior de la matriz. Cuando el punzón se eleva, la placa fuerza a la pieza a salir de la matriz con la ayuda del resorte; esto es necesario porque el metal hace presión contra las caras de la matriz haciendo difícil su extracción.

El desalineamiento de los punzones y las matrices ocasiona presiones excesivas, cortes o rebabas en los filos de la matriz o rotura de la herramienta por lo que el alineamiento se garantiza por medio de barras guías, en dos o cuatro esquinas de la matriz y que encajan en agujeros en el soporte del punzón.

El punzón se labra a la forma exacta de la pieza que se va a moldear, se trata térmicamente para obtener la dureza necesaria y la resistencia para soportar las presiones desarrolladas.

5.5.1 PRENSA HIDRÁULICA

Las prensas hidráulicas tienen carreras largas y desarrolla la presión total a lo largo de toda la carrera. La longitud de la carrera así como su capacidad son ajustables y se puede utilizar solo una fracción de su fuerza. Esta prensa se adapta al proceso de embutido por su movimiento lento y uniforme.

Las herramientas en la prensa son punzones y matrices. El punzón es la parte del conjunto que va unido a la corredera de la prensa y es forzado hacia el interior de la cavidad de la matriz; la matriz es generalmente estacionaria y descansa sobre la mesa de la prensa.

La prensa utilizada para este tipo de operaciones es la de tipo excéntrico, con cigüeñal y operado por levas.

La presión que se le debe aplicar a la placa, según el capítulo 3.5.2, es de:

$$P = \frac{K(S_T)LT^2}{W} = \frac{2.6(10'800)66''(\frac{5}{8}'')}{68''} = 17'033.824psi = 117.444MPa$$

El claro que se debe dejar entre dado y golpe para el formado de la tapa elipsoidal y su refuerzo es de:

$$J = (\frac{5}{8}'')0.09 = 0.05625' = 1.42875mm$$

5.5.2 DOBLEZ DE PLACAS

Un método para formar placas para el cuerpo del silenciador y para el rolado del canal de refuerzo es mediante una máquina dobladora de rodillos, la cual consta de tres rodillos del mismo diámetro; dos de los cuales se mantienen en una posición fija y uno es ajustable. El diámetro final es determinado por la posición del rodillo ajustable; mientras más cercano se mueva respecto a los rodillos menor será el diámetro.

Sin embargo estas máquinas roladoras son caras y no resulta redituable para este proceso tipo taller invertir en una máquina que no tendrá una alta utilización, además que también se deberá invertir en su mantenimiento y en la capacitación del personal que ha de operar el sistema. Los vendedores de placa, conscientes de que existen varios procesos donde se utiliza placa rolada, se encargan de estas tareas. El precio aproximado de estas placas deformadas se vende casi por el doble de su costo; hay que recordar que las placas se venden por peso en kg/m². El caso del canal de refuerzo es el mismo. Los vendedores realizan el rolado de forma empírica aplicándoles varios pasos hasta llegar a la geometría deseada; en placa manejan hasta 19mm ($\frac{3}{4}$ ”) de espesor.

En el proceso de rolado se pierden aproximadamente 102mm (4”) de material por la deformación y por el bisel, esto es, cuando se tiene un diámetro de 1676mm (66”) de diámetro exterior se requerirán 5265.31mm (207.3”), agregando el valor de reposición nos quedaría una placa, antes de rolar, de una longitud de 5367.31mm (211.3”).

5.6 PROCESO DE SOLDADURA

Cabe recalcar que todo el silenciador esta fabricado de acero inoxidable y no se debe utilizar ningún otro material. Esto es para evitar un par galvánico y que no exista corrosión. Sin embargo la estructura que ha de soportar el silenciador y la tubería de entronque están hechas de acero al carbón, por lo que se toman medidas de precaución cuando se instala el equipo, esto es colocar un juego de aislamiento para pernos y bridas, como se indica en los planos. Este consiste en un empaque especial que impide el flujo de electrones entre los diferentes materiales.

Una vez formado el cuerpo del silenciador el siguiente paso es hacer los biseles necesarios para la aplicación de la soldadura, esto se logra por medio de corte, o desbaste en este caso, ya que se eliminará una parte de material en el ángulo indicado en los planos. Sin embargo este acabado es tosco y se requiere dar un acabado por medio de esmerilado para que la penetración de la soldadura sea uniforme. En el bisel para aplicación de soldadura no se requiere un acabado fino ya que no tiene ninguna función estética o de aplicación ingenieril. Este bisel se debe realizar después del formado y no antes cuando las placas están todavía planas y su fabricación es más sencilla porque se pueden manipular más fácil, solo que si se hace antes el bisel se puede dañar durante el doblado de la lamina y tener que retrabajarse. Este bisel se realiza por medio de un pantógrafo (para cortar en ángulo) y equipo de plasma para corte.

El silenciador cuenta con una abertura en la parte inferior de la tapa elipsoidal para pruebas hidrostáticas de la soldadura. Como especifica la ASTM en la designación A-134 para la especificación estándar para soldadura por arco se deben someter las paredes a una presión tal que se produzca un esfuerzo al equipo que sea del 60% del punto mínimo especificado de cedencia en el acero utilizado a temperatura ambiente. Y tenemos que la presión deberá ser determinada por la ecuación

$$P=2St/D$$

$$P = \frac{(2)(0.6)(15.5kpsi)(5/8")}{66"} = 176.1364psi = 1.2144MPa$$

Donde:

P = presión mínima hidrostática de prueba, no debe exceder las 19 MPa (28000psi)

S = 0.60 veces el mínimo punto de cedencia especificado del acero utilizado, MPa (psi)

t = Espesor específico de pared, mm (in)

D = Diámetro específico exterior, mm (in)

La prueba de presión no deberá ser sostenida por más de 5 segundos, o por un tiempo más largo del especificado por el cliente y el proveedor. La tubería con espesor de pared mayor a 4 mm (0.154 in) debe ser golpeada, mientras este bajo presión, con un martillo de 1kg (2 lb), o su equivalente, cerca de la soldadura en ambos extremos de la tubería.

El esfuerzo en las fibras no debe exceder el 85% del punto especificado de cedencia del acero o al esfuerzo de una fibra que no excede el 85% del punto especificado de cedencia o las 19 MPa (2800 psi) de prueba de presión.

La circunferencia exterior no debe variar más de + 0.5% de la circunferencia nominal exterior basado en el diámetro especificado.

Las longitudes de las tuberías deben ser como se especifica en la orden con una tolerancia de ± 13 mm ($\pm \frac{1}{2}$ in). Cuando no se especifique la longitud, la tubería deberá ser fabricada en promedio en tramos de 9 m (29 ft). Con una longitud mínima de 6 m (20 ft), pero no más del 5% pueden ser menor a 8 m (25 ft).

La soldadura entera deberá ser radiografiada con rayos X, para cumplir con el párrafo UW-51 de la Sección VIII División 1 del código de Calderas y recipientes a presión de la ASME (ASME Section VIII of the Boiler and Pressure Vessel Code).

El electrodo ideal es el 532 para acero inoxidable.

De acuerdo a los planos del silenciador la soldadura varia en forma y aplicación para cada tipo de unión, sin embargo existen detalles que no se especifican en los planos y que deben ser tomados en cuenta:

- a) La soldadura deberá ser aplicada horizontalmente en la parte cilíndrica del silenciador para evitar defectos y facilitar su aplicación.
- b) Primero se deberán soldar las juntas longitudinales.
- c) Todas las soldaduras a aplicarse en el cuerpo del silenciador son a tope con doble bisel, de las cuales las juntas longitudinales no deberán coincidir cuando se suelde circunferencialmente, sino que estas deberán estar por lo menos a 45° una de otra. Esto debido a que los mayores esfuerzos se encuentran en las juntas longitudinales y esto sirve para distribuirlos.
- d) A la cabeza elipsoidal con refuerzo se le deberá soldar primero el tubo de 406 mm (16") ϕ para después unir la placa de refuerzo (con el orificio de 6mm ($\frac{1}{4}$ ") previamente fabricado) y por último su brida. Esta secuencia es lógica, ya que si no se hace de esta manera no se podrá aplicar correctamente la soldadura.
- e) El siguiente paso es unir la cabeza al cuerpo cilíndrico de la misma manera en que se soldaron las demás juntas circunferenciales.
- f) Ya que no se tiene un registro hombre por el cual acceder a las etapas intermedias del cuerpo del silenciador estas deben de seguir en la secuencia de soldado. Primero se colocará la "Placa de Multiorificio 2", estas placas por facilidad podrán soldarse verticalmente aunque es más recomendable hacerlo horizontalmente como si fuera junta circunferencial, para lo que habría que acostar todo el cuerpo del silenciador; hay que recordar que estas placas van soldadas con filete únicamente del lado del refuerzo, la soldadura deberá cubrir totalmente el bisel exterior fabricado en la placa; Una vez colocado esta placa se le debe colocar su respectivo refuerzo aplicando el mismo procedimiento de soldadura de filete para unirlo a la pared del cuerpo y filete sencillo para unirlo a la placa. Este procedimiento se repite para la "Placa de Multiorificio 1".

- g) Por último se colocan los demás accesorios los cuales no requieren de un orden especial como son las orejas de izaje, el canal de refuerzo, las ménsulas y el tubo de drenaje.

Una vez formado el cuerpo se deberá someter a una prueba de partículas magnéticas en busca de fracturas. Se escogió este método por ser de naturaleza de tipo taller y por su efectividad. No se eligió la prueba de líquido penetrante por no ser una pieza maquinada como las placas de multiorificio.

5.7 ACABADO

Una vez formado el cuerpo y soldado se deberán soldar las tuercas que servirán para fijar el aislamiento en caso de ser necesario, estas tuercas tienen que ser de acero inoxidable de la misma clase para evitar la corrosión por par galvánico. La finalidad del aislamiento es proteger a los trabajadores de quemaduras y reducir el ruido, aunque esta reducción es mínima.

Por último se debe someter el equipo a un ataque con chorro de arena (sand blast), moyuelo o munición hasta obtener una superficie metálica de color uniforme blanco grisáceo denominado LIMPIEZA A METAL BLANCO CON CHORRO A PRESIÓN para la eliminación de escamas de laminación, herrumbre, de oxidación, pintura o materia extraña, un factor adicional de este proceso es que sirve para eliminar esfuerzos residuales en la superficie del material, además que sirve para eliminar impurezas en el material y dejarlo preparado para aplicar una capa de recubrimiento primario y una capa de pintura final de alquídicos modificados especialmente por que el equipo tiene que soportar altas temperaturas (300-400°F), como puede ser la pintura alquídica negra con un contenido de sólidos de pintura por volumen de 37%, esto proporciona una cobertura máxima en seco (régimen de extendido) entre $1600 \times 0.37 = 592$ pies cuadrados (55 m^2), ya que un galón cubre aproximadamente 1600 pies cuadrados de superficie con una película de 1 milésima de pulgada de espesor, estando húmeda. (Datos obtenidos de *7 recomendados por *Steel Structures Painting Council*).

Este ataque con arena deberá aplicarse solamente al cuerpo del silenciador y nunca a las placas de multiorificio, ya que estas no deben pintarse y mucho menos cambiar su superficie pulida, ya que los ataques de arena resultarían perjudiciales.

5.8 ANÁLISIS DE ESFUERZOS (ELEMENTO FINITO)

Una causa diferente de fallo puede ser el choque térmico repentino aunado a la presión de vapor provocado por el medio ambiente relativamente frío. De esta forma al no haber salidas de vapor lo suficientemente grandes y al no tener flexibilidad ni libertad de expansión la tapa inferior puede ser arrancada por su parte más débil, esto es, el centro donde se encuentran los orificios; esto dejará la estructura débil y aunque se hubiera dilatado en este punto térmicamente la presión de vapor seguirá causando daños destruyéndolo interiormente.

Cuando se utilizan placas de orificio como sistemas reductores de presión se provoca una aceleración en el fluido al pasar por esta restricción. Si esta restricción es muy pequeña, tenderá a estrangular el fluido y a aumentar la presión en la cara interna de la placa. Y de acuerdo a la ley de la conservación de la energía, toda la energía de presión se convierte en energía de velocidad; este fluido acelerado es indeseable en un sistema de silenciación a base de placas de orificio cuando esta aceleración implica flujo sónico, esto debido a que el fluido a alta velocidad al salir por la placa de orificio provocará una gran fricción en las aristas de la placa provocando su desgaste y por lo tanto descalibración de la misma; otra consecuencia acarreada de este hecho es que este choque con las aristas causará una vibración de alta frecuencia en todo el sistema de silenciación que eventualmente puede llegar a su destrucción por fatiga; y por último pero no necesariamente la menor desventaja de que ocurra este fenómeno es que al acelerar el fluido hasta el flujo sónico se produce un ruido muy intenso y agudo inclusive más dañino para el oído humano que el grave producido por la onda de presión de descarga normal, debido a que el fluido rompe la barrera del sonido y provoca un vórtice en la atmósfera que desplaza capas de aire, lo que significa que tenemos desplazamientos de aire continuo que se transforman en ondas de presión aguda, este ruido a alta frecuencia daña permanentemente el oído humano haciendo que la persona expuesta deje de escuchar a esta cierta frecuencia. Una onda de presión normal o típica como las provocadas al descargar un fluido a alta presión, son ondas graves que provocarán que se reviente el tímpano.

Aquí se analiza la seguridad que nos proporciona la fabricación del sistema utilizando simulación de elemento finito, como se vio en el capítulo 3.11, además de decirnos donde se encuentran los posibles puntos de falla.

Siguiendo la nomenclatura de los planos a continuación se presentan los resultados de la simulación estructural en las placas. La simulación se realizó tomando en consideración los esfuerzos mayores a los que pudieran estar sometidas las placas en condiciones normales de operación, esto es 972 kPa (141 psi) cuando el silenciador este funcionando a su máxima capacidad con su respectiva caída de presión en cada una de las placas. Los esfuerzos aparecen tan altos y superan a la presión aplicada porque la presión aplicada es por unidad de área (por metro cuadrado), no debe pensarse que es una fuerza puntual que se distribuye uniformemente a lo largo de la placa. Esto significa que la concentración de esfuerzos por unidad de área a lo largo de toda la placa se dirige hacia dos puntos (el máximo y el mínimo) que corresponden a los puntos posibles de falla.

Estos resultados nos ayudan a comprender el funcionamiento de las placas cuando la presión se mantiene uniforme a lo largo de toda la cara aguas arriba y con un empotramiento total a lo largo de todo el perímetro circunferencial de las placas.

También se realizó un análisis modal de esfuerzos que nos indican las 10 primeras posibles frecuencias de falla para cada placa, las unidades están dadas en unidades de tiempo/frecuencia. Si cualquiera de estas frecuencias se acerca a la unidad se puede pensar en falla por vibración. En todos los análisis modales se encontraron frecuencias de fallas arriba de 1000 Hz, lo que las hace casi imposible de sufrir un daño por vibración.

Así tenemos que las frecuencias de falla más cercanas son muy difíciles de alcanzar, por lo que no hay porque preocuparse de daños por vibración, velocidad o aceleración, ni su efecto combinado. En las siguientes páginas se muestran las figuras donde aparecen los grados de libertad, por ser los más representativos, los gráficos de esfuerzos y deformación se muestran en los anexos.

La placa de multiorificio 1 (figura 4) muestra una deflexión máxima (grados de libertad) de 1.11 cm del centro de la placa en dirección del flujo. La deformación unitaria máxima ocurre en el centro de la placa del lado de los refuerzos con un valor de 0.0051 y la mínima en las orillas con 0.1290×10^{-5} . El esfuerzo máximo se encuentra localizado al centro de la placa con un valor de 290 kg/m^2 en el sentido del flujo y un esfuerzo mínimo en el borde de la placa de -181 kg/m^2 ; estos esfuerzos rebasan el límite de cedencia de $S_y = 106.87 \text{ MPa}$ o $1.089 \times 10^7 \text{ kg/m}^2$ por lo que fallará primero en el centro de la placa clivándose el material entre los orificios adyacentes, esto demuestra que las placas de refuerzo no son suficientes y que los orificios dejan resentida la placa al disminuir el área de distribución del esfuerzo.

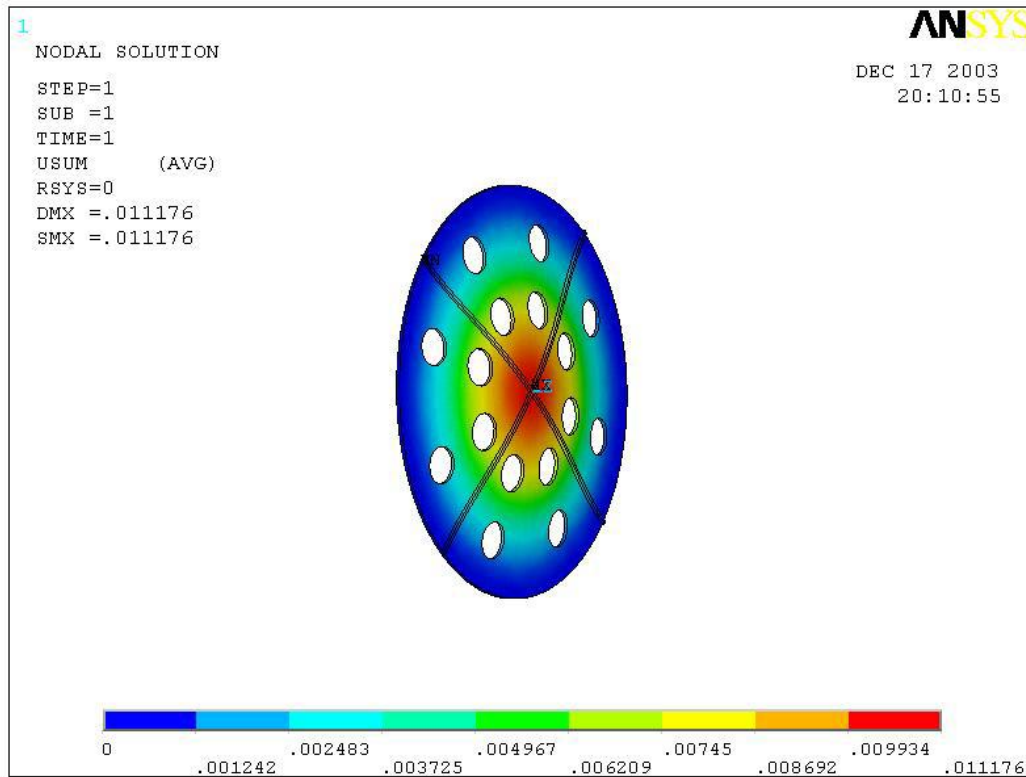


Figura 4

La placa de multiorificio 2 (figura 5) muestra una deflexión máxima de 3.17 cm del centro de la placa en dirección del flujo. La deformación unitaria máxima ocurre en el centro de la placa del lado de los refuerzos con un valor de 0.0051 y la mínima en las orillas con $0.1296E^{-05}$. El esfuerzo máximo se encuentra localizado al centro de la placa con un valor de $0.295E^{08}$ kg/m² en el sentido del flujo y un esfuerzo mínimo en el borde de la placa de $-0.184E^{08}$ kg/m². Ambos esfuerzos superan al límite de cedencia como en el caso anterior y el efecto es muy parecido, la primera falla ocurrirá en el centro de la placa entre los orificios adyacentes, la segunda falla ocurrirá por compresión en el borde exterior de la placa, justo donde se une al cuerpo del silenciador.

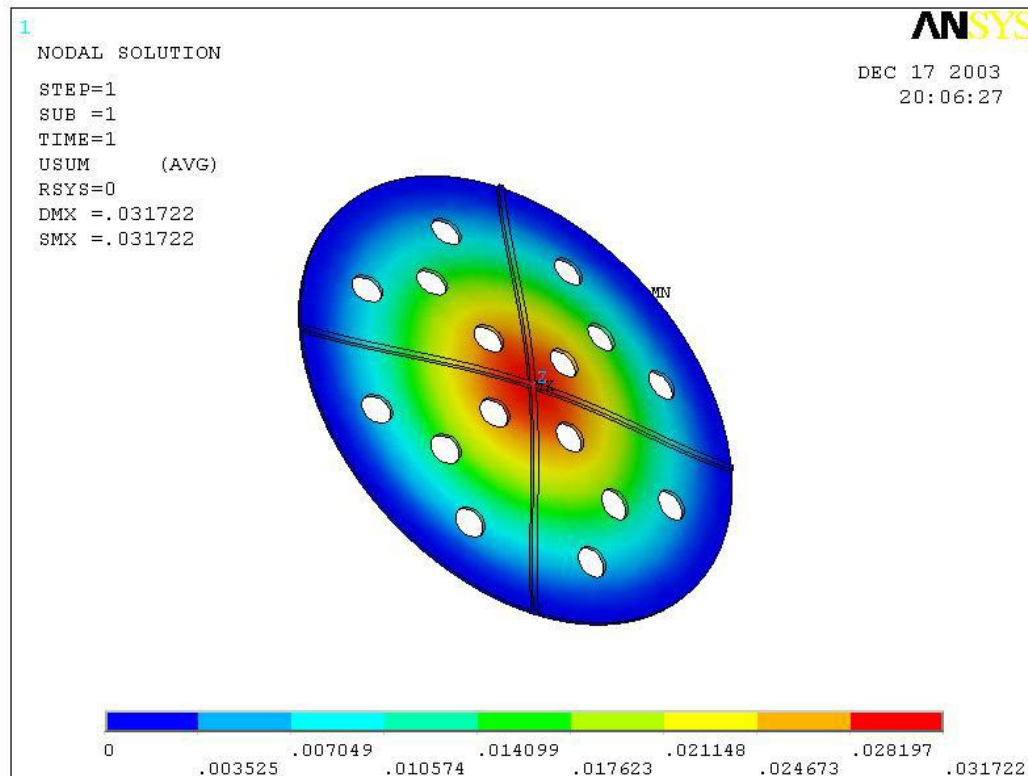


Figura 5

La placa de orificio 1 (figura 6) muestra el punto de mayor movimiento (desplazamiento) sobre el borde del orificio de la placa hacia el lado donde empuja el fluido, y es de 0.163mm. El desplazamiento mínimo o menor se encuentra localizada sobre el lomo de la placa, ya que es el lugar donde no existe ningún esfuerzo, esto es porque la brida sujeta la placa a lo largo de toda la franja azul. El esfuerzo máximo permisible se encuentra localizado en el borde del orificio de la placa con un valor de $0.674E^{07}$ kg/m² en el sentido del flujo y un esfuerzo mínimo en el borde de la placa de $-0.264E^{-07}$ kg/m²; ambos esfuerzos están por debajo de la resistencia última a la tensión $S_T=74.46$ MPa o $0.759E^{07}$ kg/m², por lo que cualquier deformación que ocurra durante la operación se recuperará.

La deformación unitaria máxima ocurre en el centro de la placa del lado de los refuerzos a los 0.276E^{-03} y la mínima en las orillas con 0.372E^{-06} .

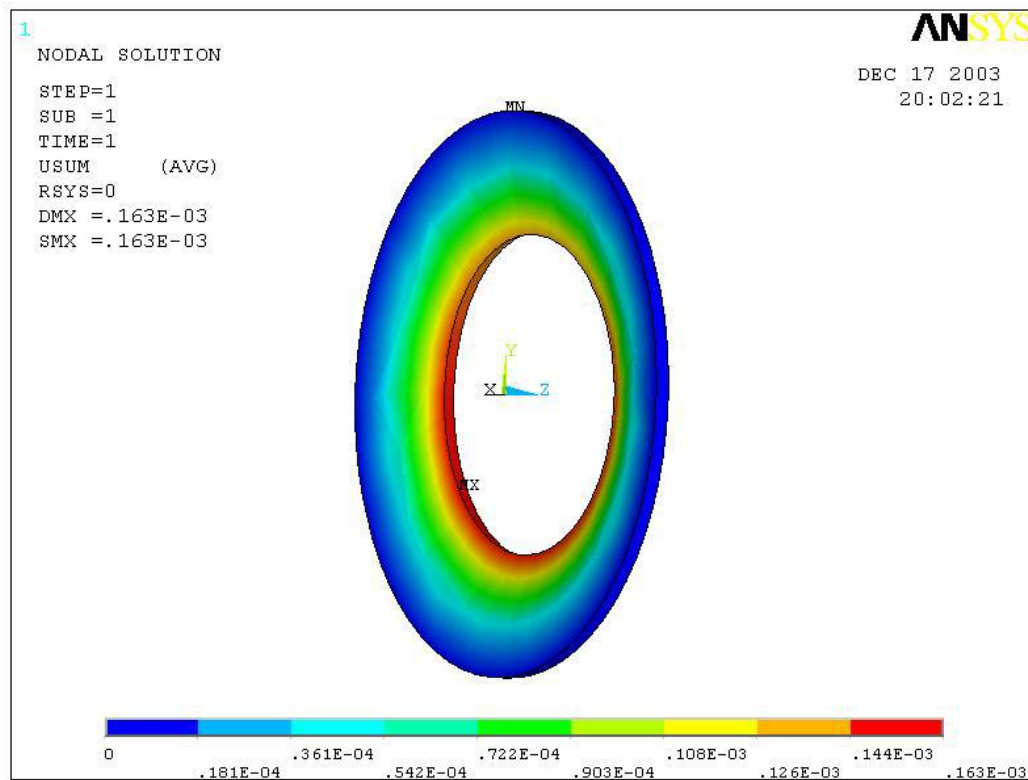


Figura 6

La placa de orificio 2 (figura 7) muestra el punto de mayor movimiento sobre el borde del orificio de la placa hacia el lado donde empuja el fluido, y es de 0.720mm . El desplazamiento mínimo o menor se encuentra localizado sobre el lomo de la placa, ya que es el lugar donde no existe ningún esfuerzo, esto es porque la brida sujeta la placa a lo largo de toda la franja azul, igual que en el caso anterior. El esfuerzo máximo permisible se encuentra localizado en el borde de la placa con un valor de $0.914\text{E}^{07} \text{ kg/m}^2$ del lado donde choca el flujo y un esfuerzo mínimo del mismo lado de la placa pero en el centro con un valor de $-0.350\text{E}^{07} \text{ kg/m}^2$. En este caso el esfuerzo máximo no rebasa el límite de cedencia pero si el esfuerzo a la tensión, por lo que se deformará la placa permanentemente en las orillas donde sujetan las bridas; el esfuerzo mínimo no rebasa ninguno de estos dos límites por lo que permanecerá intacta en el centro de la placa. Sin embargo ni para este caso ni para el anterior se tomó en consideración al anclaje fijo que proporcionan las bridas en ambas caras de las placas, lo que reduciría el esfuerzo al aumentar el área de apoyo, aunque esta reducción no sería significativa. El anclaje solo se consideró en el área del borde exterior de las placas.

La deformación unitaria máxima ocurre en el centro de la placa del lado de los refuerzos a los 0.422E^{-03} y la mínima en las orillas con -0.280E^{-04} .

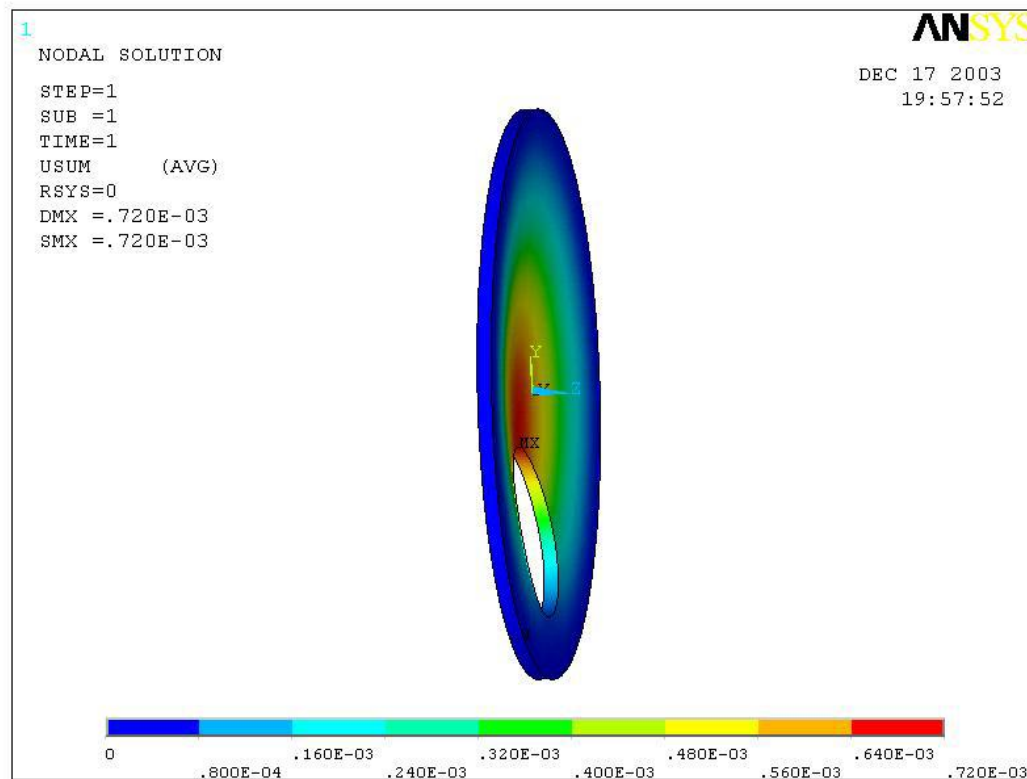


Figura 7

De este análisis de elemento finito se tiene que las placas de multiorificio son suficientemente resistentes para soportar el flujo aunque no existan las placas inferiores y que las placas de orificio pueden llegar a soportar hasta 3 veces la presión de diseño.

5.9 INGENIERÍA ECONÓMICA

Se debe considerar el costo unitario de placas de acero inoxidable cédula estándar Tipo AISI 316L (Cromo 16.00, Níquel 12.00, Molibdeno 2.00).

Con respecto a la amortización del costo de la inversión esta no se puede deducir directamente por beneficios inmediatos ya que el sistema de silenciación es un artefacto que se utiliza rara vez; de hecho nunca debería utilizarse ya que es un sistema de respaldo contra ineficiencias diversas del sistema por lo que debe ser un instrumento de alta confianza que funcione en cualquier momento.

La única forma de realizar un análisis de la recuperación de la inversión sería conociendo la cantidad de demandas realizadas contra la empresa por obreros que han sufrido lesiones por

el sistema defectuoso anterior o por la falta de un sistema de esta naturaleza. Pero como estos sistemas de descarga a la atmósfera generalmente se encuentran acordonados a cierta distancia del centro de ubicación de los obreros y no se utilizan frecuentemente, como ya se ha hecho notar, esta variación de frecuencia de uso puede llegar a ser muy grande; por ejemplo puede haber un ciclo donde el silenciador mal diseñado no se haya utilizado para nada y en este caso resultaría que es un sistema de muy alta eficiencia, pero por otro lado puede haber otro ciclo donde no se dé esta casualidad y el sistema sería criticado ampliamente.

El acero inoxidable 316L se vende en la región en la actualidad en 6 dólares por kilogramo, sin embargo éste se vende por placas de 6096 X 2438 mm (20' X 8') o 6096 X 3048 mm (20' X 10'), no se vende por pedacería. La placa de 13 mm ($\frac{1}{2}$ ") de espesor pesa alrededor de 200 kg y tiene un costo aproximado de 1200 dólares sin rolar, el costo de la placa rolada es de 2100 dólares. Así es que el costo de las 19 placas que forman el cuerpo asciende a 39'900 dólares. El precio para las placas de orificio es aproximado por el costo adicional de fabricación por los acabados especiales y son de 800 dólares para las placas de multiorificio y de 500 dólares para las placas de orificio. El canal rolado requerido ya no se fabrica en México; el tamaño mínimo de fabricación es de 152 mm X 51 mm (6" X 2") con un costo de 800 dólares con la longitud de 5.4 m. El precio de la brida de 16"/150 es de 300 dólares y la de 24"/300 es de 1300 dólares. La suma del costo del resto de los accesorios es de 900 dólares. Más el costo de la mano de obra el precio total de fabricación de un silenciador de estas características asciende a 48'200 dólares; este costo no incluye el precio del equipo de fabricación.

Todos los costos son aproximados porque varían de acuerdo al tipo de cambio diario y a otros valores externos del mercado.

CAPÍTULO VI **CONCLUSIONES**

6.1 CONCLUSIONES

De acuerdo a las consideraciones de diseños tomadas para esta investigación se llegó a las conclusiones particulares de:

1. Confiabilidad

El sistema de manufactura del silenciador de vapor es confiable para la producción en pequeña escala.

La fabricación con acero inoxidable nos proporciona la suficiente confianza en el sistema contra esfuerzos a tensión. El sistema es confiable en términos de seguridad contra falla por sobrepresión y eficiencia en el cuerpo, ya que se ha demostrado mediante ecuaciones que está diseñado para soportar el uso rudo. Sin embargo se demostró mediante elemento finito que las placas de multiorificio son altamente ineficientes si se fabrican de acuerdo a los datos de diseño, se tiene que aumentar el área de distribución de esfuerzos al aumentar el espesor de la placa o de los refuerzos o ambos.

2. Corrosión

Este tipo de sistemas están sometidos a ambientes altamente corrosivos, es por ello que se ha optado por la utilización de acero inoxidable, además que nos da una resistencia óptima para recipientes sometidos a presión.

3. Desgaste

El desgaste ocasionado por uso es el único de consideración grave para las placas de multiorificio, ya que éstas son las únicas partes del equipo que se pueden destruir, como se demostró por análisis de elemento finito para las placas de orificio y multiorificio; las frecuencias de falla están muy lejanas a la frecuencia de funcionamiento y no se contempla el fallo de placas por vibración.

4. Fricción

Las paredes están sometidas a fricción por el vapor a alta velocidad pero no es de consideración crítica ya que el material de fabricación es capaz de aceptarlo. En cuanto al sistema de manufactura en éste no ocurre ninguna.

5. Procesamiento

El procesamiento de las diferentes partes del silenciador es de forma tipo taller tratando de mantener costos bajos pero haciendo el equipo seguro. Se utilizaron las partes que se encuentran fácilmente en el mercado como las placas de acero y las tuercas. Sin embargo hay ciertos procesos que se tienen que subcontratar por ser demasiado precisos y no resulta redituable comprar el equipo especializado como sería una máquina CNC, como tampoco es amortizable capacitar al personal que ha de operarla para fabricar unos cuantos equipos, ni tampoco comprar una máquina roladora de placas.

6. Utilidad

La utilidad del servicio prestado por este tipo de sistemas de manufactura es de gran beneficio para las plantas donde se requiera un dispositivo reductor de ruido como el que aquí se presenta, y que debido a las características del proceso requiera precisión en la medida de sus necesidades de desfogue para sistemas de emergencia. Les proporciona las herramientas necesarias para poder fabricar su propio equipo a un costo reducido, sin necesidad de tener un equipo especializado.

7. Seguridad

En el diseño se cuidan los aspectos de seguridad que se deben de tener cuando se trabaja con equipos que funcionan con alta presión y temperatura, esto es, que debe operar bajo condiciones de diseño y duración. Se demostró que para la parte más débil que es la junta longitudinal se tiene un factor de seguridad de 1.48, valor que nos proporciona la suficiente confianza para operarlo con seguridad.

8. Peso

Este dependerá de los requerimientos de diseño, ya que mientras más cantidad de ruido se desee atenuar, más grande será el equipo y por consiguiente de mayor peso.

9. Duración

La duración del proceso de manufactura del silenciador depende de la capacidad del personal que se encarga de formar las uniones soldadas, ya que un par de soldadores especializados tardarían dos semanas trabajando 8 horas diarias ayudados por un tubero (persona que acomoda los accesorios en el argot técnico) y su ayudante. Este es el proceso que rige el tiempo de manufactura por ser el más tardado.

10. Ruido

El proceso de fabricación solo posee una parte donde ocurre este fenómeno, que es en el corte de las placas de acero inoxidable con plasma, y se recomienda utilizar el equipo adecuado de protección auditiva.

11. Tamaño

El tamaño dependerá de las necesidades de diseño y de las consideraciones del diseñador, siendo por lo general grande. Sin embargo para este caso se requiere un local de por lo menos la altura del silenciador más el espacio suficiente para manejar la grúa o el equipo que ha de transportarlo, 10m aproximadamente. En cuanto al espacio de suelo debe ser el suficiente para que quepa el silenciador acostado más el equipo de soldadura y el almacén de las placas de acero inoxidable, esto es 12m X 12m aproximadamente.

12. Control

El control de capacidad del silenciador dependerá del tamaño de los orificios de las placas de orificio, ya que están diseñados para que manejen la cantidad exacta de fluido 195t/h (390 000 lb/h) a una presión de 972.4 kPa (141 lb/in²) y una temperatura de 183°C (361.4°F) para lograr llegar a las condiciones esperadas.

13. Rigidez

El proceso de manufactura es lo suficiente flexible para permitir cambio en las capacidades de tamaño del equipo, ya que se pueden fabricar tanto grandes como pequeños de la misma forma y solo variaría el tiempo. Sin embargo el sistema es rígido en el aspecto de que no se pueden fabricar más de uno a la vez. Para fabricar más se requerirá más personal.

14. Acabado de superficies

Las únicas superficies que requieren de un acabado a detalle, son las placas reductoras de presión o de orificios múltiples, como se describe en el desarrollo, las caras deben ser totalmente planas con acabado a espejo y las aristas deben de tener filo.

15. Volumen

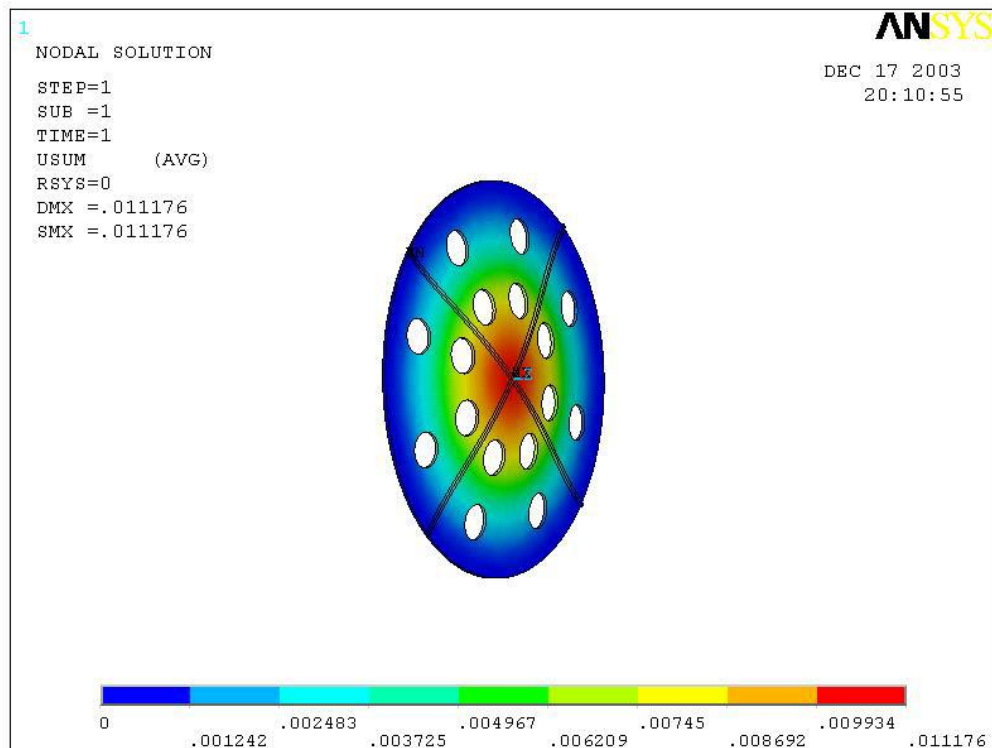
El volumen del proceso de manufactura estará dado tanto por los requerimientos de diseño del equipo, esto es tamaño y cantidad. Ya que siempre se deseará tener un equipo altamente eficiente con el menor volumen, lo que no es siempre posible.

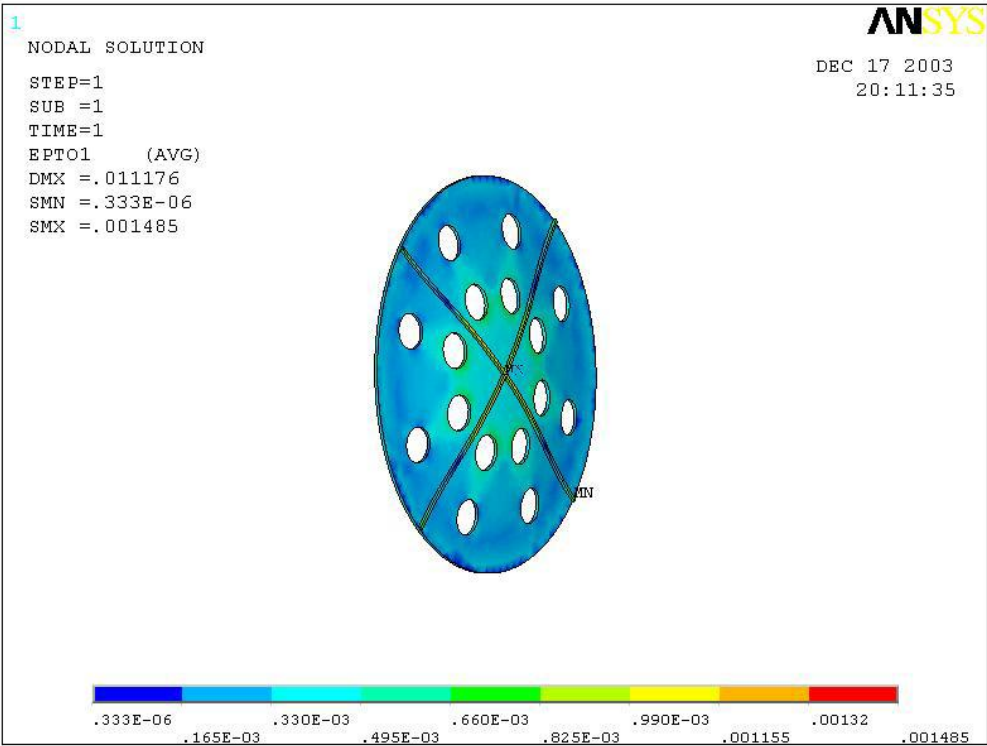
16. Responsabilidad legal

La responsabilidad cae directamente sobre el diseñador en el aspecto de selección de materiales adecuados; por lo que refiere a la manufactura, si los planos estaban realizados acorde al diseño sin omisión de detalles la responsabilidad recae en el contratista o persona

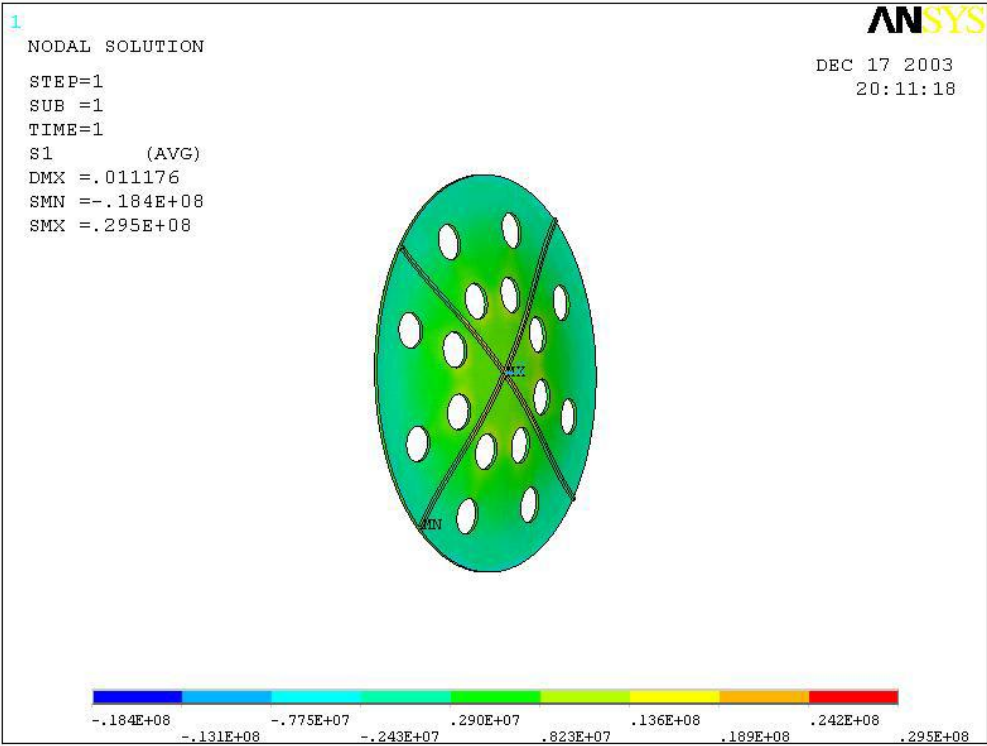
encargada de su fabricación por haber hecho caso omiso de especificaciones. En este trabajo se omiten las ecuaciones para el rolado del canal de seguridad que se observa en los planos, esto por que la presión que se le aplica para deformarlo depende de su geometría; aunque se ha demostrado que estructuralmente el canal no es necesario para el correcto funcionamiento del equipo; sin embargo este accesorio si es útil para el correcto manejo del equipo y poderlo transportar con facilidad y seguridad de un lugar a otro.

ANEXO B

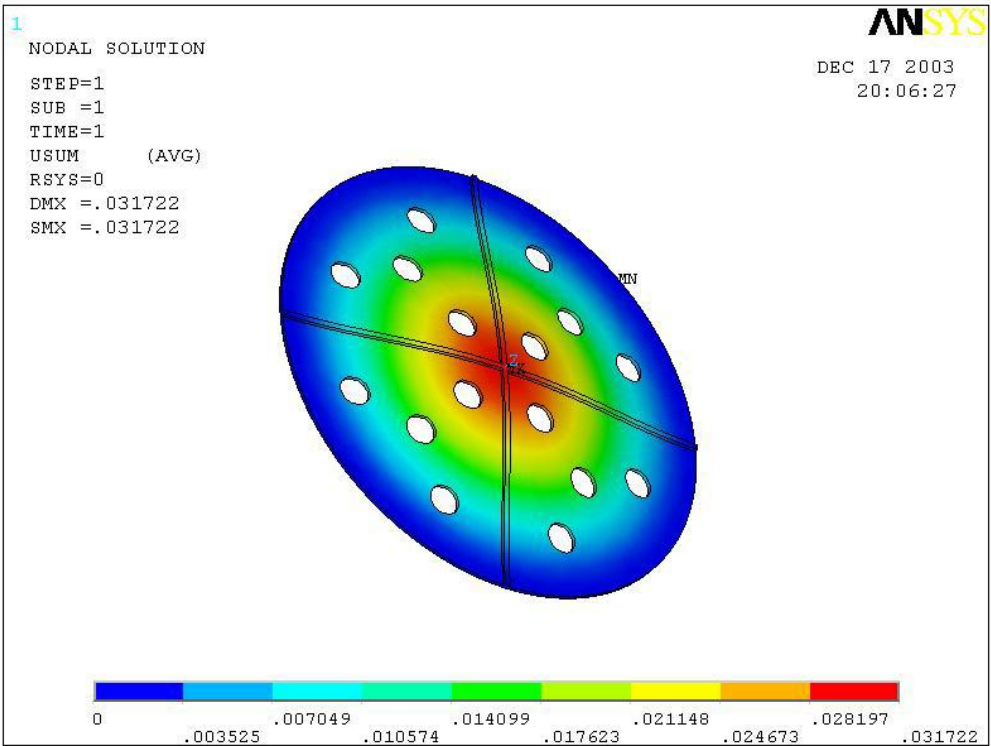




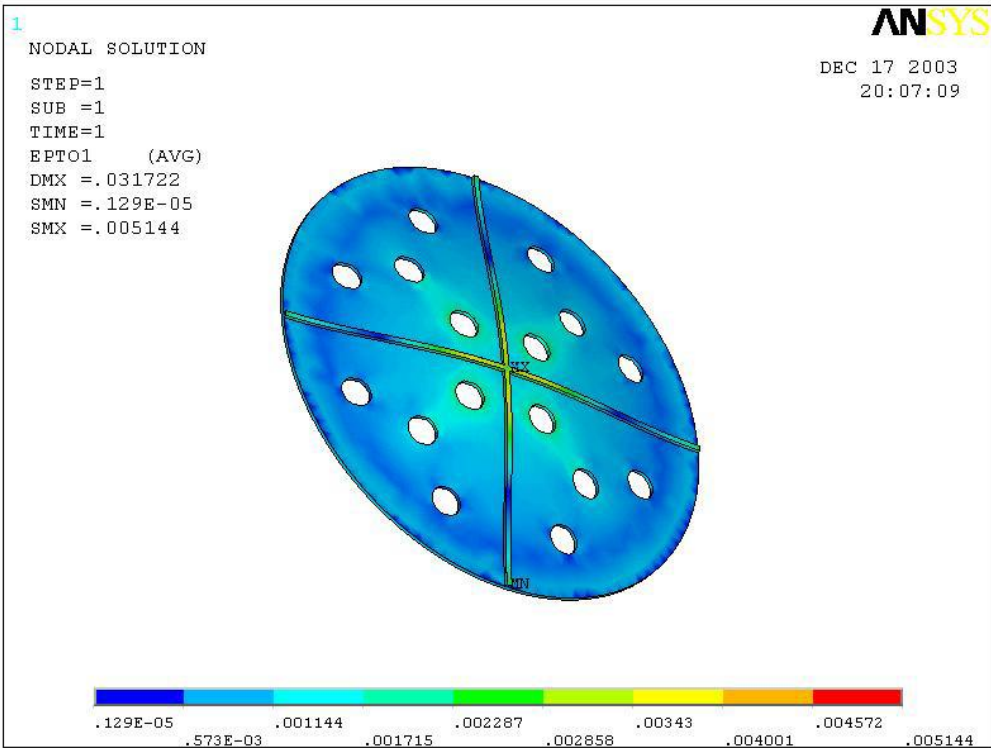
Deformación en placa de multiorificio 1



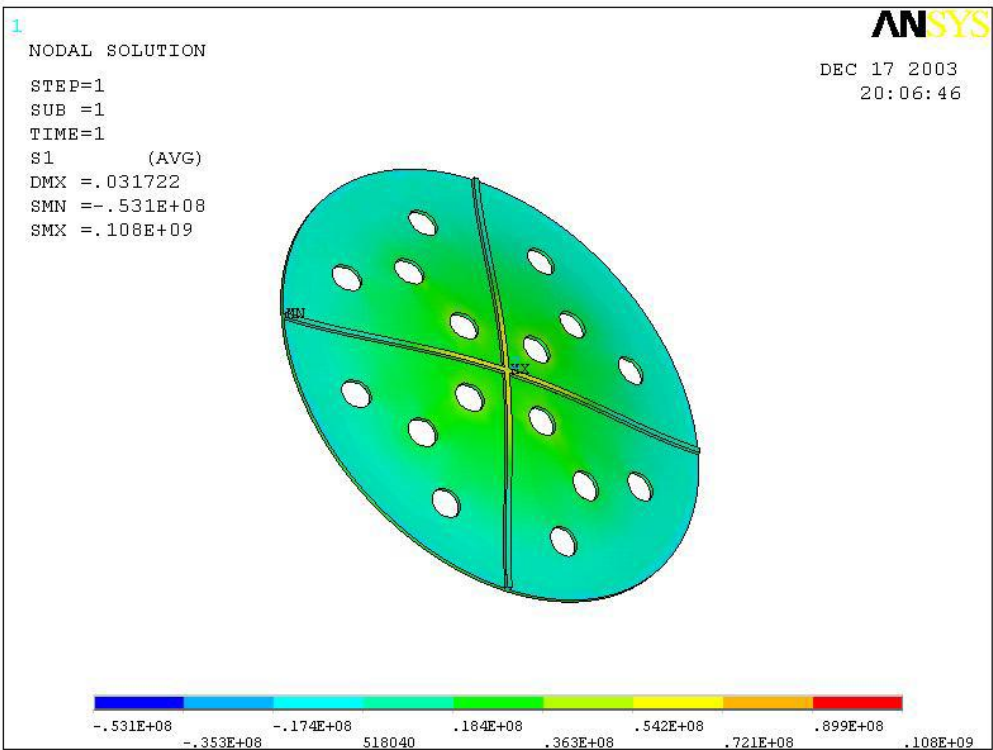
Esfuerzo en placa de multiorificio 1



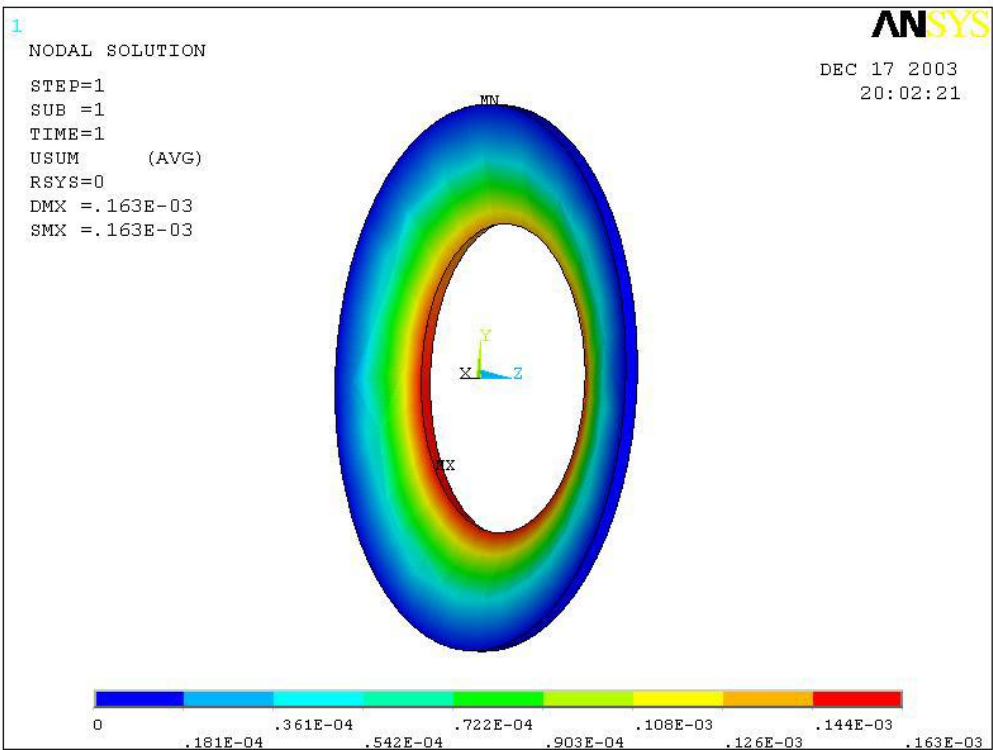
Grados de libertad en placa de multiorificio 2



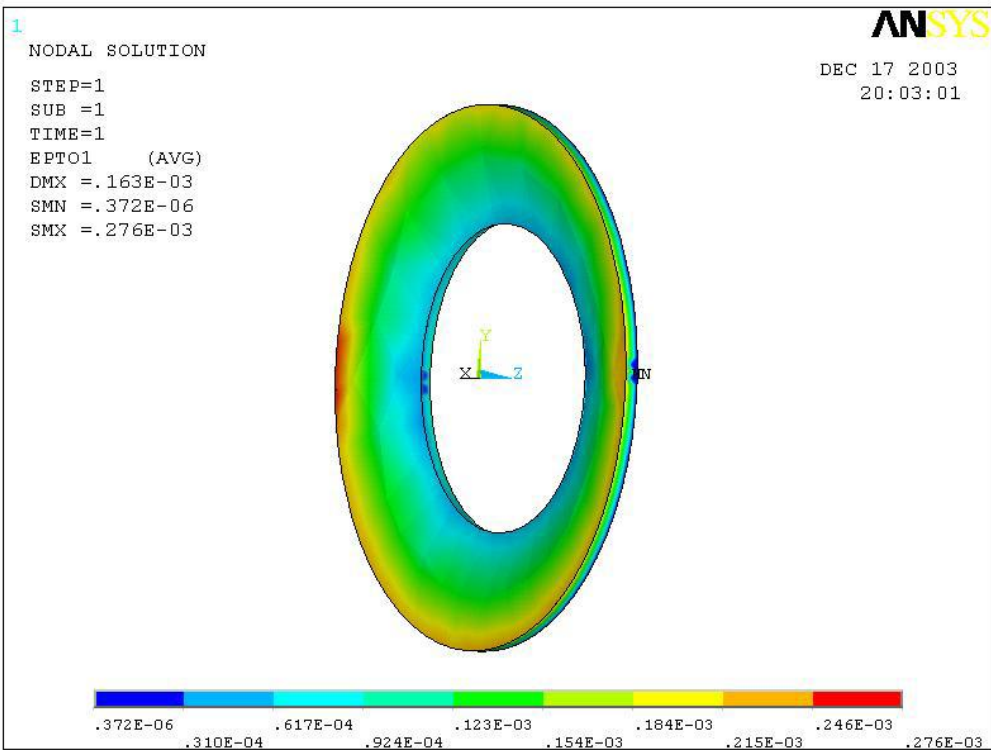
Deformación en placa de multiorificio 2



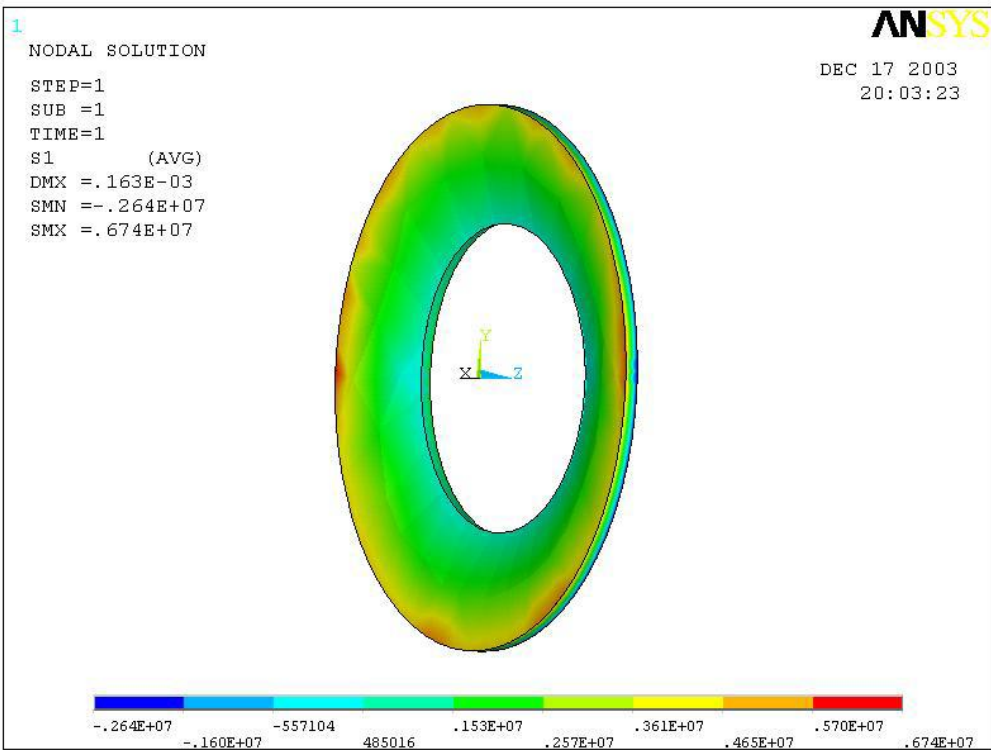
Esfuerzo en placa de multiorificio 2



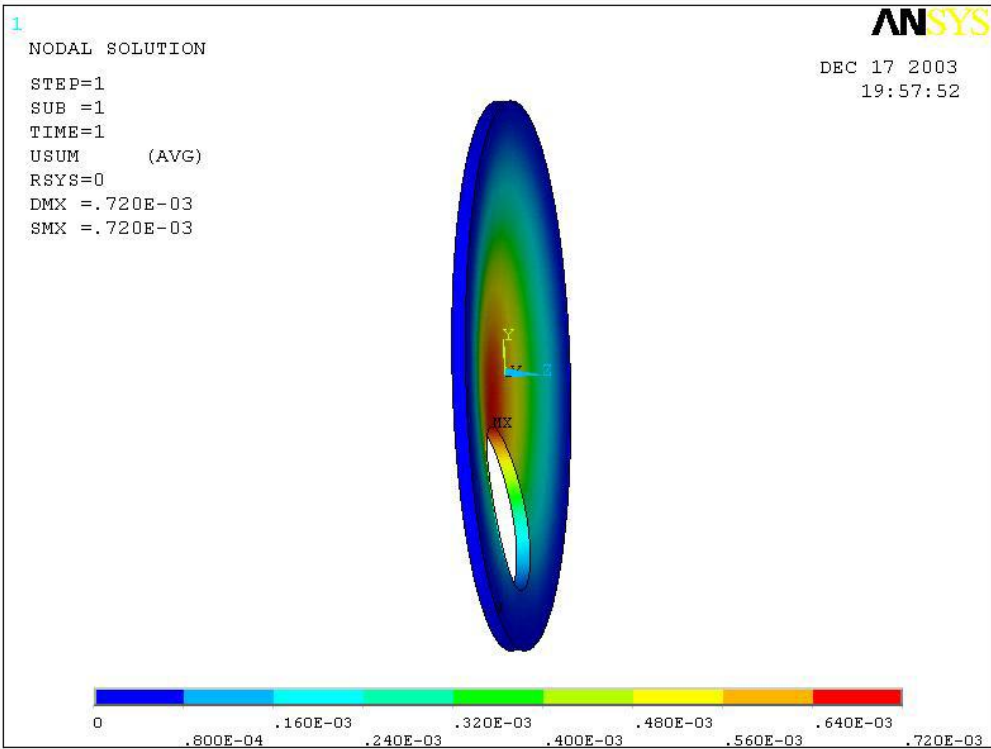
Grados de libertad en placa de orificio 1



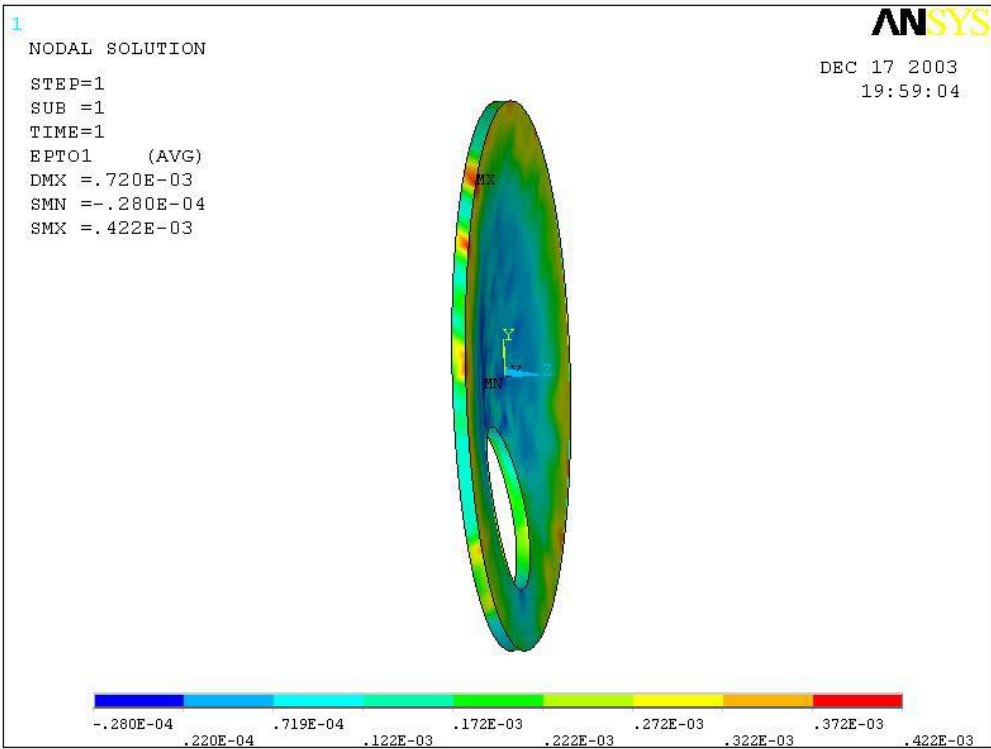
Deformación en placa de orificio 1



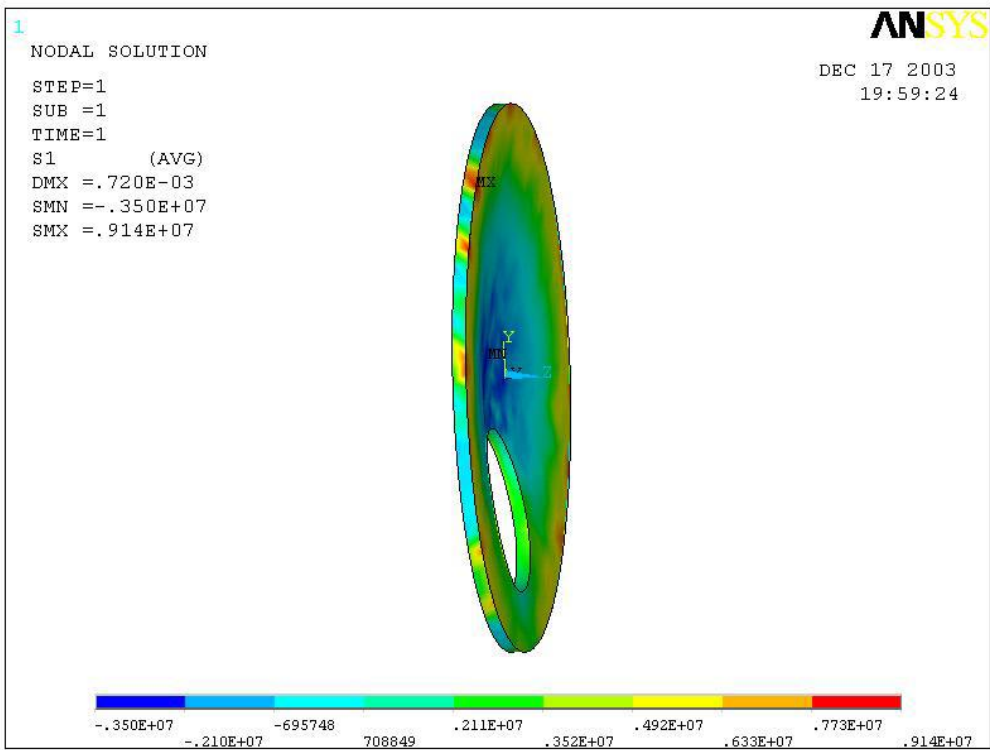
Esfuerzo en placa de orificio 1



Grados de libertad en placa de orificio 2



Deformación en placa de orificio 2



Esfuerzo en placa de orificio 2