

ESTUDIO DEL MATERIAL PARA FABRICAR UN RECIPIENTE A PRESIÓN A
TRAVES DE SOFTWARE CAD/CAM/CAE

SERGIO DURÁN ROJAS
CARLOS ANDRÉS SANCHEZ

UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
AREA DE DISEÑO
MEDELLÍN
2006

ESTUDIO DEL MATERIAL PARA FABRICAR UN RECIPIENTE A PRESIÓN A
TRAVES DE SOFTWARE CAD/CAM/CAE

SERGIO DURÁN ROJAS
CARLOS ANDRÉS SANCHEZ

Proyecto de grado
como parte de los requerimientos para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Asesor Principal
Gabriel Jaime Páramo
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
AREA DE DISEÑO
MEDELLÍN
2006

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios y a nuestras familias por confiar en nosotros y apoyarnos constantemente durante toda nuestra carrera universitaria y en el desarrollo de este proyecto.

A INMA S.A., en especial a Carlos Mario Bolívar y Juan Carlos Velásquez, por su atención, disposición y colaboración prestada en todo momento, lo cual fue indispensable para culminar exitosamente nuestro proyecto.

A nuestro asesor Gabriel Jaime Páramo, quien siempre estuvo acompañándonos y ayudándonos durante la elaboración del proyecto.

A los profesores del departamento de ingeniería mecánica y producción: Jorge Restrepo, Carlos López y Santiago Paris, por su colaboración y disponibilidad para aclarar algunos conceptos técnicos relevantes para el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad EAFIT y sus diferentes áreas de trabajo, como: los laboratorios de máquinas herramientas, materiales y operaciones unitarias, por la colaboración prestada para la realización de los ensayos; y al área de sistemas por el servicio de los recursos informáticos y el apoyo en esta actividad académica.

Finalmente, a los otros profesores y demás personas que nos brindaron alguna idea, nos apoyaron y participaron de alguna forma en el proyecto.

CONTENIDO

	Pag
1. INTRODUCCIÓN	16
2. OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GENERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3. MARCO TEORICO	20
3.1 GENERALIDADES DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS	20
3.1.1 Fases del FEA (Finite Element Analysis)	21
3.2 CAE	24
3.3 SOFTWARE PROENGINEER®	25
3.3.1 Herramienta CAE en PROENGINEER	26
3.3.2 ProMechanica	28
3.4 PRINCIPIOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	28
3.4.1 Conducción	29
3.4.2 Convección	30
3.5 RECIPIENTES A PRESIÓN	31
4. PREPROCESAMIENTO	35
4.1 MODELO	35
4.2 MATERIAL	41
4.2.1 Ensayo de tracción	44
4.2.2 Cálculos de las propiedades mecánicas	49
4.2.3 Definición del material en el software	56

4.3	CONDICIONES DE FRONTERA	56
4.3.1	Restricciones	56
4.3.2	Cargas	71
4.4	SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS	75
5.	PROCESAMIENTO	79
6.	POSTPROCESAMIENTO	85
6.1	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO TÉRMICO	85
6.1.1	Resultados de temperatura	85
6.1.2	Resultados de gradientes de temperatura	88
6.1.3	Resultados del flujo de calor	89
6.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTRUCTURAL	90
6.2.1	Esfuerzos Von Mises	90
6.2.1	Desplazamientos	93
6.2.4.	Índice de falla (Failure index)	96
6.3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁTICO REALIZADO CON LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA DEL ESTUDIO TÉRMICO	97
7.	FATIGA	101
7.1	FATIGUE ADVISOR	105
7.1.1	Análisis de los resultados del estudio de fatiga	108
8.	ALTERNATIVAS DE DISEÑO	113
8.1	PRIMERA ALTERNATIVA DE REDISEÑO	113
8.2	SEGUNDA ALTERNATIVA DE REDISEÑO	118
9.	CONCLUSIONES	122
10.	RECOMENDACIONES	125
11.	NUEVAS LÍNEAS DE TRABAJO	126

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pag
Ilustración 1. Subdivisión en elementos definidos por los nodos	21
Ilustración 2. Fases de un proceso de análisis con el MEF	24
Ilustración 3. El modo de transferencia de calor por conducción	30
Ilustración 4. El modo de transferencia de calor por convección	30
Ilustración 5. Diagrama termodinámico	32
Ilustración 6. Esquema de funcionamiento de la válvula de la olla	34
Ilustración 7. Problema de importación desde Rhinoceros	37
Ilustración 8. Procedimiento para el modelo	38
Ilustración 9. Isométrico y vistas del modelo	39
Ilustración 10. Contacto entre las pestañas del recipiente y la tapa	40
Ilustración 11. Recipiente de presión	41
Ilustración 12. Lámina para el proceso de embutición	45
Ilustración 13. Elaboración de probetas para ensayos de tracción	46
Ilustración 14. Dimensiones de cada probeta	46
Ilustración 15. Máquina universal de ensayos Schenk Trebel UPM 120	48
Ilustración 16. Elongación y reducción de área	54
Ilustración 17. Seis grados de libertad	56
Ilustración 18. Restricciones para el análisis estático	58
Ilustración 19. Convección del aire ambiente	63
Ilustración 20. Transductor y sonda de contacto	64
Ilustración 21. Curva típica de ebullición para agua a 1atm	67

Ilustración 22.	Convección de cambio de fase (ebullición)	71
Ilustración 23.	Presión interna	73
Ilustración 24.	Fuerza ejercida en cada pliegue	74
Ilustración 25.	Fuente de calor en la superficie inferior	75
Ilustración 26.	Espesor de la superficie media	78
Ilustración 27.	Resultados de temperatura en el recipiente	86
Ilustración 28.	Curva de temperatura de las paredes externas del modelo	87
Ilustración 29.	Resultados de gradientes de temperatura en el recipiente	88
Ilustración 30.	Resultados de flujo de calor en el recipiente	89
Ilustración 31.	Esfuerzos Von Mises en el recipiente	91
Ilustración 32.	Esfuerzos máximos en el fondo del recipiente	92
Ilustración 33.	Esfuerzos en las paredes y pliegues del recipiente	93
Ilustración 34.	Desplazamientos en el recipiente	94
Ilustración 35.	Desplazamiento máximo del recipiente	95
Ilustración 36.	Desplazamientos en un corte del recipiente	96
Ilustración 37.	Índice de falla del recipiente	97
Ilustración 38.	Esfuerzos de Von Mises causado por la temperatura	98
Ilustración 39.	Simulación de los desplazamientos	99
Ilustración 40.	Desplazamientos por causa de la temperatura	100
Ilustración 41.	Aparición y aumento de grietas	102
Ilustración 42.	Carga de amplitud constante	103
Ilustración 43.	Carga de amplitud variable	104
Ilustración 44.	Flujo de trabajo de Fatigue Advisor	106
Ilustración 45.	Vida del producto del recipiente	109
Ilustración 46.	Daños ocasionados en el recipiente	110
Ilustración 47.	Factor de seguridad en el recipiente	111
Ilustración 48.	Confiabilidad de vida del recipiente	112
Ilustración 49.	Concentración de esfuerzos en el fondo del recipiente	114
Ilustración 50.	Nueva alternativa de la geometría del fondo	115

Ilustración 51.	Paralelo de esfuerzos Von Mises entre el diseño original y la primera propuesta	116
Ilustración 52.	Paralelo de los desplazamientos entre el diseño original y la primera propuesta	117
Ilustración 53.	Paralelo de la deformación simulada del diseño original y la primera propuesta	118
Ilustración 54.	Nueva geometría de los pliegues	119
Ilustración 55.	Esfuerzos Von Mises de la segunda alternativa de diseño	120
Ilustración 56.	Nueva ubicación del esfuerzo máximo calculado	121
Ilustración 57.	Desplazamientos en la segunda alternativa de diseño	121

LISTA DE TABLAS

	Pag
Tabla 1. Composición química del aluminio 3104	42
Tabla 2. Propiedades térmicas del Aluminio 3104 H19	44
Tabla 3. Propiedades del aluminio 3104	55
Tabla 4. Comparación entre valores teóricos y valores reales	55
Tabla 5. Coeficientes de transferencia de calor por convección	59
Tabla 6. Propiedades del aire a una $T_f = 345$ K	61
Tabla 7. Temperatura de la superficie inferior externa del recipiente	65
Tabla 8. Propiedades del agua saturada a 120°C (373K)	69
Tabla 9. Características del estudio estático	80
Tabla 10. Resultados del análisis estático	81
Tabla 11. Características y resultados del estudio térmico	82
Tabla 12. Características del análisis estático partiendo de los resultados del estudio térmico	83
Tabla 13. Resultados del análisis estático partiendo de los resultados del análisis térmico	84
Tabla 14. Información requerida para el análisis de fatiga	108

LISTA DE ANEXOS

	Pag
Anexo A. Gráficas de F vs. ΔL	129
Anexo B. Propiedades termofísicas del aire a presión atmosférica	133
Anexo C. Propiedades termofísicas de agua saturada	134
Anexo D. Reglamento Técnico RTC-003MDE	136
Anexo E. Videos	146

GLOSARIO

- CAD: Computer Aided Design que traduce en español Diseño Asistido por Computador, se trata de una base de datos de entidades geométricas (puntos, líneas, arcos, etc.) con la que se puede operar a través de una interfaz gráfica. Permite el diseño en dos o tres dimensiones mediante geometría alámbrica, superficies y sólidos.
- CAM: Computer Aided Manufacturing que traduce en español Manufactura Asistida por Computador, hace referencia a todas las fases de la manufactura de un producto, incluyendo la planeación del proceso y la producción, maquinado, calendarización, administración y control de calidad.
- Ingeniería inversa: es un método que avanza en dirección contraria de las tareas habituales de la ingeniería, donde se obtiene información de un producto fabricado.
- Resiliencia: Cantidad de energía que puede absorber un material, antes que comience la deformación plástica. En el ensayo de tracción, es el área bajo la curva entre la deformación nula y la deformación que corresponde al esfuerzo de fluencia. En el SI se expresa en julios por metro cúbico (J/m^3).
- Capa límite: es la distancia del perfil de velocidad de un fluido, que va desde la superficie donde la velocidad es cero, hasta el punto donde la velocidad es igual a la de la corriente libre de aire.

- Calor latente: o también llamado calor de cambio de estado, es la energía absorbida por las sustancias al cambiar de estado. Se denomina calor latente de fusión, cuando hay cambio de sólido a líquido, y calor latente de vaporización cuando el cambio es de líquido a gas. Cuando ocurre lo contrario (de gas a líquido y de líquido a sólido) se devuelve la misma cantidad de energía.
- Shell: elemento simplificado que divide al modelo tridimensional en una cantidad finita de elementos bidimensionales, como triángulos y cuadrados, y que genera una malla entre superficies.
- Beam: elemento simplificado que divide al modelo tridimensional en una cantidad finita de elementos bidimensionales, y genera una malla entre curvas y puntos.
- Dilatación: cambio de volumen que sufre un cuerpo debido al cambio de temperatura que se provoca en él por cualquier medio.
- Esfuerzo medio: promedio de los esfuerzos máximo y mínimo en el ciclo. Se representa con las siguientes letras: σ_m
- Dislocación: imperfección lineal en la red de un material cristalino. El movimiento de las dislocaciones ayuda a explicar la manera en la que se deforman los materiales. La interferencia con el movimiento de las dislocaciones ayuda a explicar como se endurecen los materiales. La dislocación es un defecto relacionado con el arreglo atómico y no con el material en sí. Inclusive pueden ser colocados intencionalmente para lograr ciertas propiedades mecánicas y físicas (ASKELAND, 1998, P 76).

- Límite a la fatiga: Nivel de esfuerzo debajo del cual se logra la vida infinita.
- Isotrópico: material con iguales propiedades en todas las direcciones.

1. INTRODUCCIÓN

La industria actual se mueve con rapidez y el tiempo es uno de sus valores más preciados e importantes que deben cuidarse para evitar gastos o costos innecesarios.

Las compañías están invirtiendo gran parte de sus ingresos en la investigación de procesos, productos o servicios que mejoren y optimicen la utilización del tiempo, para alcanzar con ello mayor competitividad y rendimiento económico.

Las industrias que se dedican a la fabricación de artículos para el hogar y concretamente para la cocina y la cocción de alimentos, investigan constantemente el mercado para encontrar productos que ayuden, mejoren la calidad y reduzcan el tiempo de preparación sin deterioro de los componentes nutritivos, el sabor, el color y la apariencia, que son características que se esperan presenten los alimentos preparados.

Las empresas manufactureras que atienden la demanda de productos hogareños, tienen mucho cuidado, cautela y precaución con los parámetros de calidad que requieren sus procesos y productos, con el fin de alcanzar sus objetivos y la satisfacción de sus clientes. Además todos sus productos deben estar estandarizados bajo una normatividad nacional e internacional, para así poderse comercializar dentro del mercado local e internacional.

El proyecto consiste en estudiar el comportamiento de un recipiente de presión y proponer diferentes alternativas de diseño para este producto, llegando así a un posible diseño óptimo, teniendo en cuenta los requerimientos que debe cumplir el producto establecidos según la norma. Para dicho estudio se contará con el apoyo de un software CAD/CAM/CAE, que es una herramienta de alta ingeniería

que posee tres aplicaciones diferentes: CAD (Diseño Asistido por Computador), CAM (Manufactura Asistida por Computador) y CAE (Ingeniería Asistida por Computador). Este programa permite analizar el ciclo completo de un producto, que incluye: su modelación y diseño, la programación y control del proceso de producción, y los estudios y pruebas de ingeniería para conocer el comportamiento de éste; con el fin de optimizar el desarrollo, mejorar la calidad y consecuentemente los costos de producción (se reducen los gastos en prototipos), además, permite reducir al máximo las pruebas para la obtención del producto deseado. Con la reducción de las pruebas, se logran evitar pérdidas de tiempo y de material implícitos en éstas, lo cual, beneficia a la empresa en su parte financiera. Algunas de estas pruebas, que se realizaban anteriormente y hoy en día, son las siguientes: pruebas con aceite para explosión del recipiente, resistencia del mango y los elementos de sujeción, presión de trabajo, entre otras.

La metodología que se empleará consta de diferentes etapas, tales como: la investigación y recolección de información para conocer el problema; estudio del material para conocer sus diferentes propiedades (físicas, mecánicas y térmicas); identificación de las condiciones de frontera en el recipiente, tanto para el estudio térmico como para el estructural; realización de los diferentes análisis para observar el comportamiento del producto, y así poder comparar los resultados obtenidos con lo que se puede esperar del modelo real; validación de resultados por parte de personas conocedoras del tema, con el fin, de tener seguridad y buena fiabilidad en los estudios realizados; finalmente, proponer alternativas de diseño que presenten un mejor comportamiento que el diseño propuesto actualmente.

En cuanto a la importancia del proyecto, cabe anotar el valor agregado que genera para la empresa manufacturera del producto, saber mediante el software de ingeniería como se comporta el diseño propuesto, como también, obtener un mejor diseño al realizarle unas modificaciones en algunas variables geométricas,

sin afectar las propiedades mecánicas de éste y las especificaciones que exige la norma.

Como se mencionó anteriormente, este estudio produce beneficios a la empresa manufacturera del producto. Además, presenta beneficios: a las universidades que emplean estos software en las cátedras, puesto que, pueden mostrar con un ejemplo de carácter industrial la aplicación de éstos y presentar una mayor comprensión académica del comportamiento de los productos ante las situaciones en que se exponen; y por otra parte, permite conocer a las empresas que prestan servicios de ingeniería, un software integrado de gran utilidad para los diferentes proyectos que realicen éstas.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que aunque es una herramienta poderosa con la cual se pueden hacer pronósticos, presenta un bajo porcentaje de error, ya que emplea un método de solución aproximado y no exacto. Otra limitante que se debe tener en cuenta, es un fenómeno que se presenta en el proceso de embutición del recipiente, donde ocurre una deformación generada por una combinación de fuerzas de tensión y compresión, las cuales hacen que el espesor del material varíe y pierda su uniformidad, y esta variación en el producto no se realiza en el software de análisis, ya que allí se tiene como un valor constante. Por lo tanto, esto generará resultados con una buena aproximación a lo real, más no del cien por ciento, debido a este fenómeno.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el comportamiento y la geometría de un recipiente de presión a través de herramientas de ingeniería, teniendo en cuenta la normatividad existente del producto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar el producto en un software CAD.
- Analizar el comportamiento de las fuerzas y presiones involucradas en el producto, concentraciones de cargas en puntos específicos y desplazamientos y deformaciones del material.
- Evaluar el comportamiento térmico del producto según criterios básicos de transferencia de calor.
- Realizar un estudio combinado, tanto térmico como estructural al producto.
- Proponer diferentes alternativas de diseño sin alterar las especificaciones que requiere el producto indicado por la normatividad.
- Conclusiones, recomendaciones y nuevas líneas de trabajo.

3. MARCO TEORICO

3.1 GENERALIDADES DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS

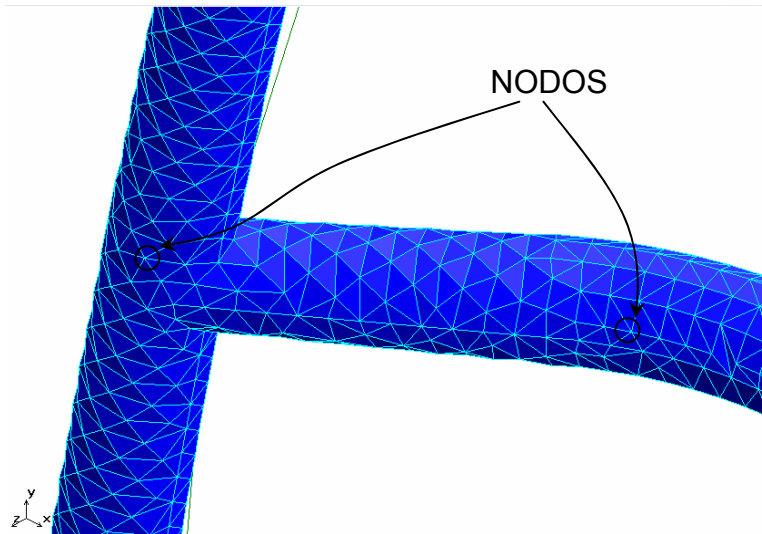
El Método de Elementos Finitos (MEF) es uno de tantos métodos existentes, para solucionar un problema de contorno de manera aproximada. Como es difícil de resolver exactamente, o no puede encontrarse la solución exacta, entonces se encuentra una solución aproximada aceptable.

El MEF se basa en lo siguiente:

- Se utiliza una división del problema en nodos siendo las incógnitas el valor de la función de los nodos.
- El dominio se subdivide en un conjunto de subdominios (elementos finitos) definidos por los nodos que conecta. Para cada elemento se define localmente la función de prueba, en general polinómica, aproximando la función incógnita dentro del elemento en función del valor de la misma en los nodos (interpolación local).
- Considerando la condición de estacionariedad de un funcional o un método de residuos ponderados se plantean las ecuaciones algebraicas correspondientes (ecuaciones de comportamiento aproximadas). Las incógnitas en este caso son el valor de la función en los nodos.

A continuación se presenta una gráfica donde se muestra dos barras unidas divididas en una serie de elementos y la conexión de cada uno de los elementos mediante nodos.

Ilustración 1. Subdivisión en elementos definidos por los nodos



Las ecuaciones de comportamiento aproximadas pueden calcularse mediante el ensamblado de las ecuaciones de comportamiento de cada elemento finito. Esto es una gran ventaja del método, ya que permite realizar gran parte de los cálculos de forma sistematizada.

El análisis mediante elementos finitos, FEA (Finite Element Analysis), lleva asociado usualmente un gran volumen de datos y resultados, y la resolución de sistemas de ecuaciones, que no se pueden resolver sin la ayuda de un computador.

3.1.1 Fases del FEA (Finite Element Analysis). La solución de un problema con el método de Elementos Finitos se divide en tres partes: preprocesamiento, solución y postprocesamiento.

- Preprocesamiento

En el preprocesamiento se define toda la información referente al modelo: el material (propiedades) y condiciones de frontera (restricciones de movimiento y cargas), principalmente. En algunos programas se debe definir adicionalmente: tipo de elementos y construcción de la malla (nodos y elementos); estos dos últimos, en otros software se encuentran definidos por defecto, por lo tanto, no es necesario que el usuario los defina, sin embargo, se tiene la posibilidad de modificarlos si se desea o si es necesario. Con respecto a la geometría del modelo se tienen las siguientes posibilidades: realizarla en un software CAD (Computer Aided Design) y exportarla a un software CAE (Computer Aided Engineering); realizarla directamente en un software CAE si ésta no es muy compleja; o también, realizarla en un software CAD/CAM/CAE, donde se tiene la opción de realizarla en el módulo CAD y cambiarse al módulo CAE para realizar el análisis. Esta es la fase más costosa del proceso de análisis por ser la que más tiempo de usuario requiere.

- Solución o procesamiento

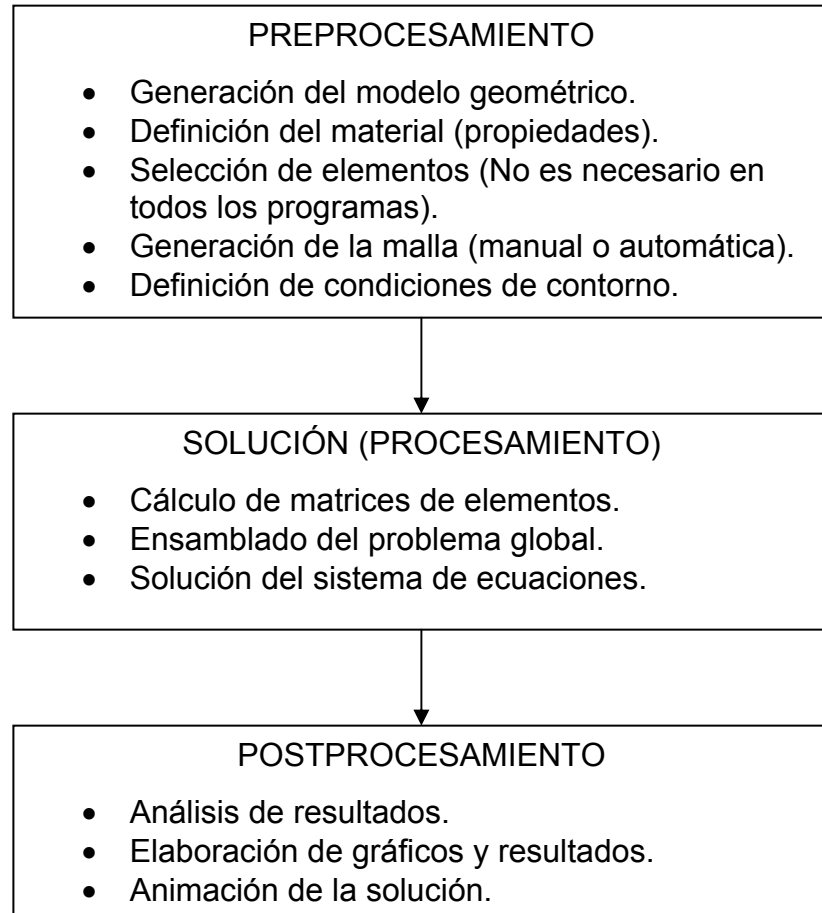
En la solución del problema se construyen las matrices del comportamiento para cada elemento, (estático, dinámico, vibraciones, transferencia de calor, etc.), se ensambla el sistema global de ecuaciones y se resuelve. Por ejemplo, en el caso del problema estático se encuentran los desplazamientos de cada uno de los grados de libertad del modelo y las tensiones correspondientes. La solución del problema es relativamente rápida, dependiendo lógicamente del modelo y de las especificaciones en algunos casos de ciertas opciones de solución, es decir, del tipo de análisis que se desea realizar y del porcentaje de error al que se desea llegar en los resultados (convergencia). En esta fase se requiere poco tiempo de usuario.

- Postprocesamiento

En esta fase final se elaboran listados, gráficos y animaciones del comportamiento del modelo, donde se pueden observar los diferentes resultados según el estudio realizado (deformaciones, esfuerzos, desplazamientos para el caso del estático, mientras que para el térmico las distribuciones de la temperatura en el modelo, etc.). En esta fase se analiza el comportamiento, se concluye y se toman decisiones sobre el diseño del modelo.

A continuación se muestra el proceso mediante un diagrama de bloques.

Ilustración 2. Fases de un proceso de análisis con el MEF



Tutorial de Elementos Finitos 2004, Universidad EAFIT.

3.2 CAE

Son las siglas en inglés de Computer Aided Engineering, en español traduce Ingeniería Asistida por Computador. Se denomina así al conjunto de programas informáticos que analizan diseños de ingeniería realizados con el computador, o creados de otro modo e introducidos en el computador, por ejemplo, mediante una

digitalización de puntos (ingeniería inversa); para valorar sus características, propiedades, viabilidad y rentabilidad. Su finalidad es conocer el comportamiento del diseño, y así, optimizar el desarrollo, consecuentes costos de fabricación y reducir al máximo las pruebas para la obtención del producto deseado.

El CAE pertenece a un conjunto de herramientas, las cuales permiten el diseño asistido por computador. Dentro de este conjunto también se encuentran: las herramientas CAD (Computer Aided Design) y CAM (Computer Aided Manufacturing), las cuales se encargan del diseño y la manufactura de productos, respectivamente.

3.3 SOFTWARE PROENGINEER®

Es una herramienta que presenta una solución eficaz, fácil de usar y asequible; incluye herramientas de productividad líderes del sector que promueven prácticas recomendadas de diseño a la vez que aseguran la compatibilidad con los estándares de las compañías y sectores. Posee soluciones integradas CAD/CAM/CAE que permiten el diseño más rápido, y a su vez maximizan la innovación y calidad para la creación de productos excepcionales.

Dentro de las ventajas del PROENGINEER®, cabe resaltar las siguientes:

- Las aplicaciones totalmente integradas permiten desarrollar todo el proceso desde la concepción hasta la fabricación en una aplicación.
- La propagación automática de los cambios de diseño a todos los componentes de la cadena le permite diseñar con confianza.

- Las completas prestaciones de simulación virtual le permiten mejorar el rendimiento de los productos y superar los objetivos de calidad de los productos.
- La generación automática de diseño de herramientas asociativas, instrucciones de montaje y código máquina permiten aumentar al máximo la eficacia de la producción (ptc@2006).

Como una de sus principales características exhibe prestaciones de herramientas CAM y CAE eficaces (completa simulación estructural, térmica y de fatiga, además, dinámica de herramientas y fabricación).

3.3.1 Herramienta CAE en PROENGINEER®. Como se ha mencionado anteriormente la herramienta CAE con la que cuenta PROENGINEER® es muy eficiente, para esto se vale de una gama completa de aplicaciones como son:

- Advanced Mechanics: Permite evaluar y optimizar los diseños por completo para mejorar la calidad del producto y reducir los gastos en prototipos.

Prestaciones y ventajas:

- Resuelve análisis de gran desplazamiento no lineal, de pre-tensión, dinámicos y térmicos en régimen transitorio.
- Simula comportamientos de materiales avanzados, por ejemplo anisótropos, ortótropos y laminados compuestos.
- Soporte para entidades de modelado avanzado como idealizaciones de masa y muelle, y pernos precargados.
- Interfaz común, flujos de trabajo y conceptos de usuario como en las áreas de diseño principales de PROENGINEER®.
- Reduce la incertidumbre del rendimiento del producto mediante la simulación precisa de sistemas complejos (ptc@2006).

- Fatigue Advisor: impulsa a la fiabilidad del producto al permitir a los ingenieros predecir y mejorar el rendimiento de fatiga de los diseños, consecuentemente se reducen las iteraciones de diseño y los costosos programas de pruebas a la vez que aumentan la duración de producto.

Prestaciones y ventajas:

- Realice análisis de fatiga y evalúe medidas de rendimiento como la duración, los daños y el coeficiente de seguridad.
 - Utilice características de duración en estudios de diseño para optimizar la vida del producto.
 - Conozca mejor la duración del producto en condiciones reales mediante la especificación de cargas estándar repetidas.
 - Tome decisiones de diseño óptimas con la incorporación de consideraciones de obsolescencia programada.
 - Mejore la calidad del producto, reduzca los costes de garantía y servicio posventa, y elimine las costosas retiradas de productos (ptc@2006).
- **Mechanica:** permite conocer mejor el rendimiento del producto y adaptar en consecuencia el diseño digital. Como resultado se obtiene un conocimiento temprano del producto y proporciona productos de mayor calidad a un menor costo.

Prestaciones y ventajas:

- Realiza tipos de análisis estándar, incluidos estático lineal, modal, de torsión, de contacto y térmico de estado fijo.
- Obtenga datos de rendimiento reales mediante la aplicación directa de condiciones a la geometría de diseño sin necesidad de conversión de datos.

- Convergencia de soluciones rápida y automática, asignada con precisión a la geometría CAD subyacente; salida a un solver de terceros.
- Aumente la innovación mediante el diseño simultáneo y la simulación de los resultados de las variaciones de diseño.
- Reduce los costes de desarrollo mediante la disminución o eliminación de prototipos físicos y una interfaz de usuario productiva que se puede utilizar en ingeniería (ptc@2006)

Además posee otras dos aplicaciones que son: Behavioral Modeling y Mechanism Dynamics.

3.3.2 ProMechanica. El proceso de solución consiste en sustituir el modelo con una malla de elementos finitos con la cual se realiza el análisis del modelo. El análisis del modelo es presentado al procesador para ser solucionado empleando leyes físicas.

Las ecuaciones físicas son relativamente sencillas, pero el mecanismo para solucionarlas es muy complejo. Cada elemento finito es tratado como una pieza sencilla de material que interactúa con elementos adyacentes. Las relaciones básicas de fuerza, temperatura y deformación son aplicadas para cada elemento en las tres principales direcciones de un sistema coordenado (X, Y y Z). El resultado es un gran conjunto de términos de ecuaciones diferenciales que requieren una alta velocidad de procesador y mucha memoria de computador.

3.4 PRINCIPIOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas (INCROPERA, 1999, P 2). Siempre que exista una diferencia de temperatura en un cuerpo o entre cuerpos, debe presentarse una transferencia de

calor desde la partícula o cuerpo más caliente hacia el más frío hasta que se alcance el equilibrio térmico (ley cero de la termodinámica).

Existen diferentes modos de transferir calor, que son: conducción, convección y radiación.

3.4.1 Conducción. La conducción se considera como la transferencia de calor de las partículas (electrones, átomos o moléculas) más energéticas a las menos energéticas debido a las interacciones entre las mismas.

Para determinar la rapidez de transferencia de calor por conducción se utiliza un modelo conocido como la Ley de Fourier:

$$q_x = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

q = rapidez de transferencia de calor en determinada dirección, en (W)

K = conductividad térmica del medio conductor (es una propiedad del material), en (W/m·K)

A = área normal a la dirección de transferencia de calor, en (m²)

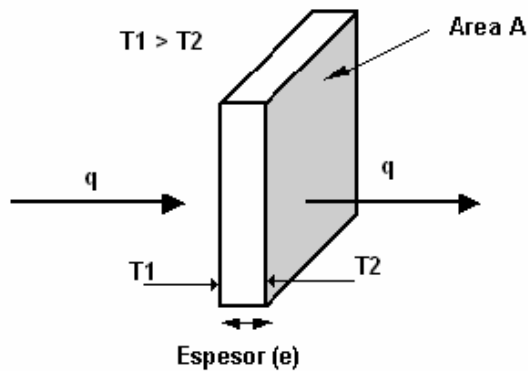
$\frac{dT}{dx}$ = Gradiente de temperatura en la dirección x , en (K/m).

El signo menos es consecuencia del hecho de que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente.

Escrita de una forma más sencilla, la fórmula se puede expresar de la siguiente manera:

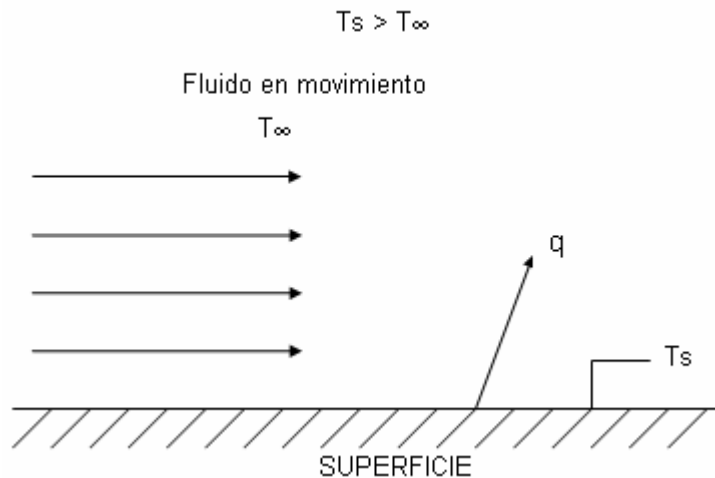
$$q = k \cdot A \frac{T_1 - T_2}{L}$$

Ilustración 3. El modo de transferencia de calor por conducción



3.4.2 Convección. Es la transferencia de calor que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas. Grandes números de moléculas del fluido se mueven de forma colectiva, y este movimiento en presencia de un gradiente de temperatura contribuye a la transferencia de calor. La transferencia total de calor se debe entonces a una superposición de transporte de energía por el movimiento aleatorio de las moléculas y por el movimiento global del fluido.

Ilustración 4. El modo de transferencia de calor por convección



La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del movimiento del fluido en convección natural o libre y convección forzada (flujo provocado por medios externos, como: un compresor, una bomba, un ventilador vientos atmosféricos, etc.).

La rapidez de transferencia de calor se determina utilizando un modelo conocido como ley de enfriamiento de Newton:

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

q = rapidez de transferencia de calor por convección, en (W)

h = coeficiente convectivo de transferencia de calor, ($W/m^2 \cdot K$)

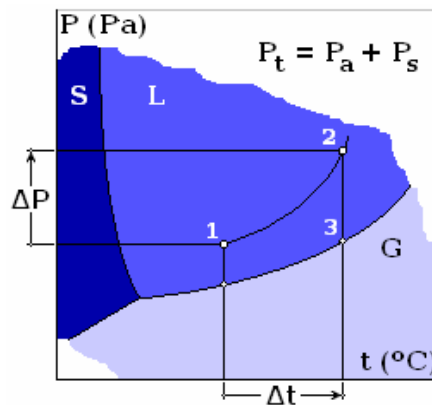
A = área normal de transferencia (área de contacto entre el fluido y la superficie), en (m^2)

T = Gradiente de temperatura entre la superficie y el fluido, en (K).

3.5 RECIPIENTES A PRESIÓN

Entre los diferentes tipos de recipientes de presión se encuentra las ollas de presión, las cuales son un recipiente hermético que se emplea en el uso doméstico para la cocción más rápida de los alimentos. Este recipiente no permite la salida del aire o líquido por debajo de una presión establecida, esto es, porque el punto de ebullición del agua aumenta cuando se incrementa la presión. La presión dentro de la olla permite subir la temperatura de ebullición por encima de $100\text{ }^\circ\text{C}$ ($212\text{ }^\circ\text{F}$). Por lo anterior, los alimentos se cocinan más rápido y se reducen los tiempos de cocción tradicionales en una tercera o cuarta parte de lo normal.

Ilustración 5. Diagrama termodinámico



Wikipedia@2006

Las condiciones de presión y temperatura en el interior de la olla a presión (1→2) no permiten la ebullición del líquido, salvo si se enfría rápidamente el vapor de agua provocando un rápido descenso de la presión (2→3).

Si se observa el diagrama de la ilustración 5, la ebullición se logrará siempre y cuando se consiga atravesar la denominada «línea de cambio de estado», la que separa las zonas de líquido (L) y gas (G) en el diagrama termodinámico. Sin embargo, cuando se cierra la tapa de la olla la mayoría del gas contenido en su interior será aire, no vapor de agua, de modo que en todo momento la presión en el interior será la suma de la debida al vapor de agua, cuya cantidad se va incrementando por efecto de la evaporación a medida que aumenta la temperatura, y al aire, cuya presión parcial es la responsable de que a medida que se calienta la olla la presión en el interior se aleje más y más de la de saturación, lo que impide la ebullición del agua en el interior de la olla, es decir, la línea de cambio de estado no corta nunca a la línea 1→2 que representa la evolución de las condiciones de presión y temperatura en el interior de la olla.

Del mismo modo, una vez alcanzada la presión máxima que determina la válvula (por su peso o por un muelle) en el interior de la olla, ésta no puede modificarse, y

mantenerla a fuego fuerte no acelera la cocción si no que simplemente incrementa la evaporación de agua y las pérdidas de vapor por la válvula.

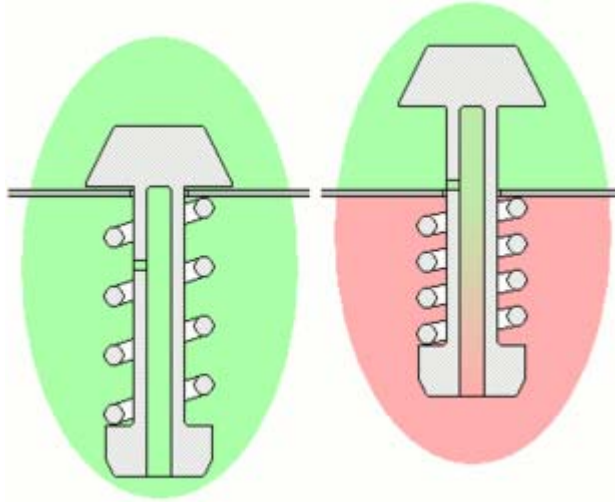
Únicamente puede producirse la ebullición de darse un enfriamiento rápido de la mezcla de aire y vapor de agua; por ejemplo cuando se coloca bajo un chorro de agua con el fin de abrirla lo más pronto posible. El chorro de agua lo que hace es enfriar las paredes del recipiente y provoca la condensación del vapor de agua, además, disminuye rápidamente la presión del interior de la olla hasta que llegue a la línea de cambio de estado (2→3), produciendo la ebullición súbita del agua.

La presión atmosférica varía con la altitud, son inversamente proporcionales, puesto que a medida que aumenta la altura la presión atmosférica es menor. Por otra parte, la temperatura de ebullición esta relacionada con la presión atmosférica, y a medida que la presión atmosférica disminuye por la altura, la temperatura de ebullición también disminuye.

Curiosamente cuanto mayor sea la altitud más rápidamente se cocina en una olla a presión, ya que si el punto de partida (1) está más abajo, la línea 1→2 alcanzará una mayor temperatura a la presión de trabajo de la olla.

La válvula libera el vapor cuando la presión llega al límite establecido; normalmente, la presión levanta un tope permitiendo que el vapor escape. En la siguiente ilustración se muestra el funcionamiento de la válvula.

Ilustración 6. Esquema de funcionamiento de la válvula de la olla



Wikipedia@2006

En condiciones normales el muelle mantiene la válvula cerrada. A medida que la olla se calienta la presión interior aumenta y empuja la válvula hasta que la espita queda libre, lo que permite la salida de los gases (aire y vapor de agua) al exterior y limita la presión en el interior. El pequeño tamaño del orificio de salida es responsable del característico silbido de las ollas antiguas. (Wikipedia@2006)

4. PREPROCESAMIENTO

Es la primera fase del FEA donde se define toda la información referente al modelo. Después de tener el producto o artefacto modelado, lo siguiente es pasar al módulo CAE, el cual se encuentra en PROENGINEER® por la barra de menús (Aplicaciones→Mechanica), sin necesidad de tener que guardar el modelo bajo alguna extensión y exportarlo, como se realiza en otros programas.

Teniendo el modelo en el módulo de ProMechanica, es indiferente el orden en que se continúe el preprocesamiento, es decir, no importa si primero se le asigna el material y luego las condiciones de frontera, o viceversa. Sin embargo, en el desarrollo del preprocesamiento de este trabajo se asignará primero el material con todas sus propiedades y luego las condiciones de frontera (cargas y restricciones).

4.1 MODELO

En el mundo de la modelación de los elementos finitos se simula la realidad, sin embargo, la idea es utilizar el modelo más sencillo que provea al usuario una muy buena y confiable solución, para a partir de ésta, tomar las respectivas decisiones de diseño que se requieran.

En algunas ocasiones es importante suprimir algunos elementos, componentes o detalles del modelo que no son relevantes en el momento del análisis, y mucho menos que afecta en las decisiones de diseño. Estos detalles a los que se hace referencia, son por ejemplo: algunos redondeos y chaflanes. Sin embargo, en el caso de los redondeos, es importante diferenciar el tipo de redondeo, ya que puede ser: redondeos en borde internos o filetes, los cuales sirven para aliviar concentración de esfuerzos; o redondeos en borde externo, que sirven para

suavizar bordes agudos o afilados. Los redondeos en borde interno deben permanecer en el modelo al ser presentado para un análisis CAE, puesto que son relevantes en los resultados finales, mientras que los redondeos en borde externo si pueden ser suprimidos cuando se vaya a realizar el análisis, ya que no interfieren en los resultados.

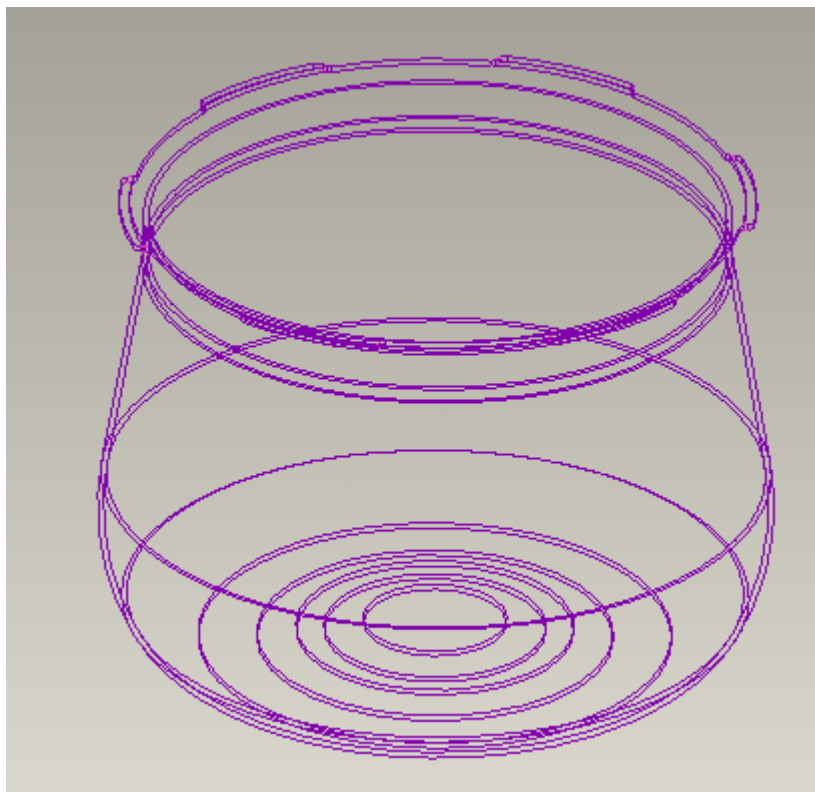
El hecho de simplificar el modelo en los software CAE, no significa que éstos presenten debilidades o limitaciones, sino que ayuda al procesador del computador a resolver con mayor rapidez el problema planteado, y además evita errores, ya que si la pieza es muy compleja y no se simplifica, el procesador no va a ser capaz de realizar todas las operaciones internas y puede sacar un error.

Otra simplificación del modelo que es comúnmente usada y recomendada por las personas que tienen suficiente conocimiento de estos programas, es trabajar las piezas simétricas a la mitad, en caso de tener simetría en un solo eje, o trabajar un cuarto de la pieza en caso de presentar simetría en los dos ejes. No obstante, se debe tener un buen conocimiento y un adecuado cuidado de esta simplificación, puesto que las condiciones de frontera (cargas y restricciones) se deben modificar. Lógicamente, si la carga se encuentra distribuida en un modelo que se va a analizar la mitad por tener simetría con respecto a un eje, el valor de la carga debe disminuir a la mitad. Pero con las restricciones si se debe tener mayor precaución, puesto que los grados de libertad de una pieza partida a la mitad no van a ser los mismos que los presentes en un modelo entero.

El recipiente de presión a analizar se encuentra modelado en el software Rhinoceros, y además se tienen de soporte los planos de éste en AutoCAD. Por las ventajas expuestas del software PROENGINEER®, se selecciona éste para realizar los estudios de comportamiento. Para poder realizar los diferentes análisis, es necesario exportar el modelo del software Rhinoceros a PROENGINEER®. Sin embargo, en algunas ocasiones el modelo en este proceso

de traspaso, no llega al software definitivo como se requiere. Puesto que la necesidad es tener al modelo como un sólido, y éste en el proceso de traspaso llega como una superficie (Ilustración 7). Además, cuando el modelo se encuentra en PROENGINEER® no presenta ninguno de los datos de referencia (*datums*), como: planos, ejes y sistemas coordenados. Por lo tanto, puede ser posible llevar el modelo de superficie a sólido, aunque sería un proceso muy engorroso.

Ilustración 7. Problema de importación desde Rhinoceros



Por las razones anteriores, se procede a copiar el boceto del producto desde AutoCAD, exportarlo a PROENGINEER®, y teniéndolo allí, se realizan las diferentes operaciones que se requieren para tener el modelo definitivo, y así, poderlo analizar. Es conveniente, realizar verificaciones dimensionales entre el

modelo definitivo y el que se encuentra en los software del proveedor, para tener una mayor confiabilidad de la pieza a analizar.

A continuación se muestra el procedimiento descrito en los párrafos anteriores.

Ilustración 8. Procedimiento para el modelo.

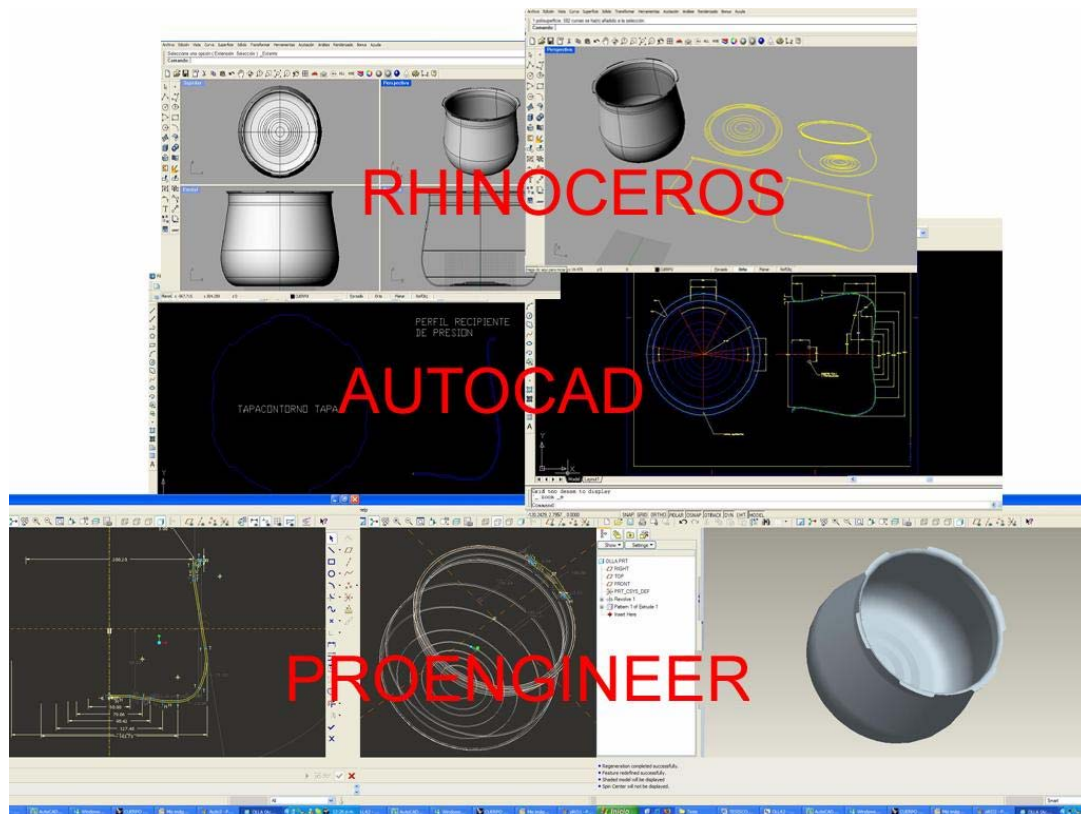
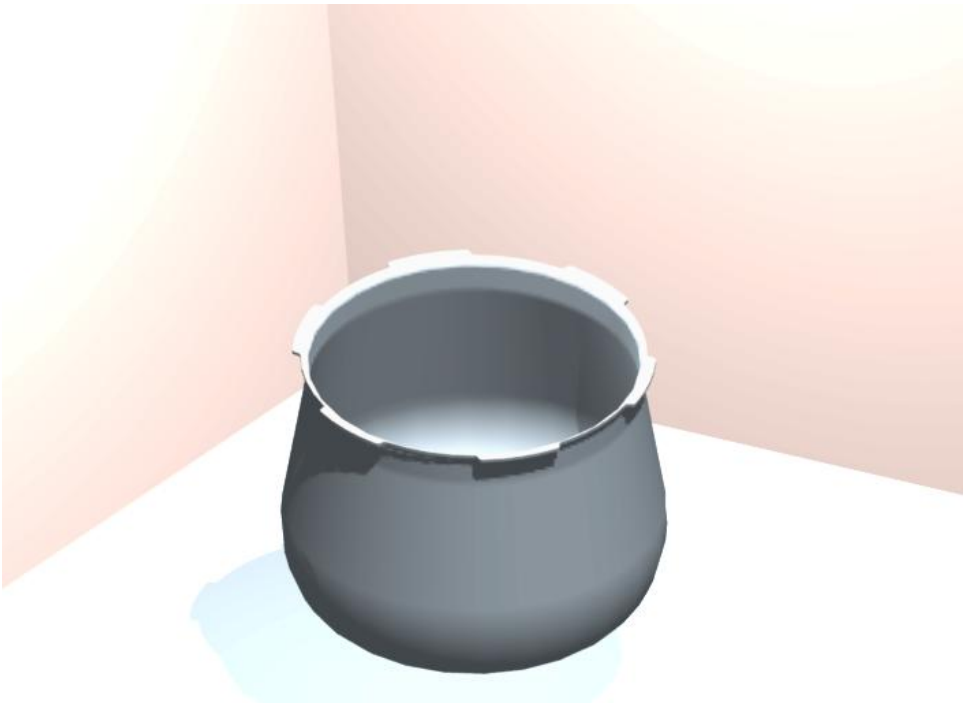
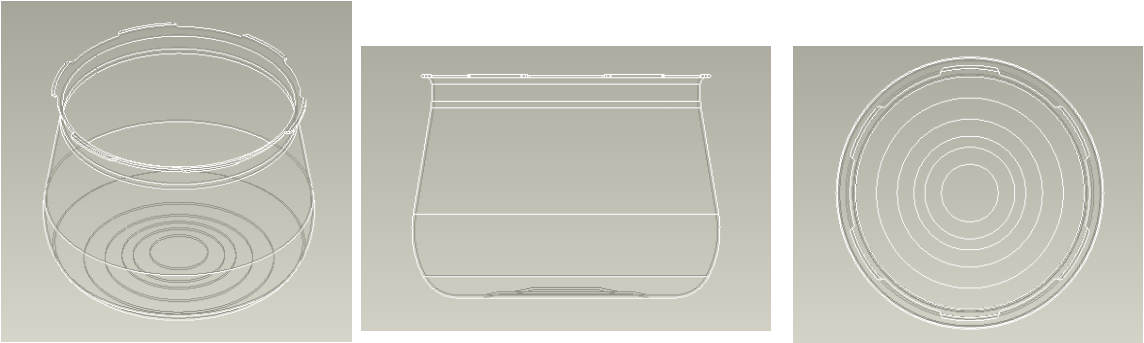


Ilustración 9. Isométrico y vistas del modelo.



Sin embargo, para analizar el recipiente se debe tener en cuenta la tapa, puesto que ésta es parte del sistema. La tapa es la que se encarga de cerrar el recipiente dándole la característica de hermeticidad. Además, como es un recipiente de presión de cierre externo, el contacto entre la tapa y el recipiente ocurre entre las pestañas de ambos (Ilustración 10), donde se presenta una fuerza de reacción generada por la presión interna. En la Ilustración 11 se muestra todo el conjunto que conforma el recipiente de presión.

Ilustración 10. Contacto entre las pestañas del recipiente y la tapa.

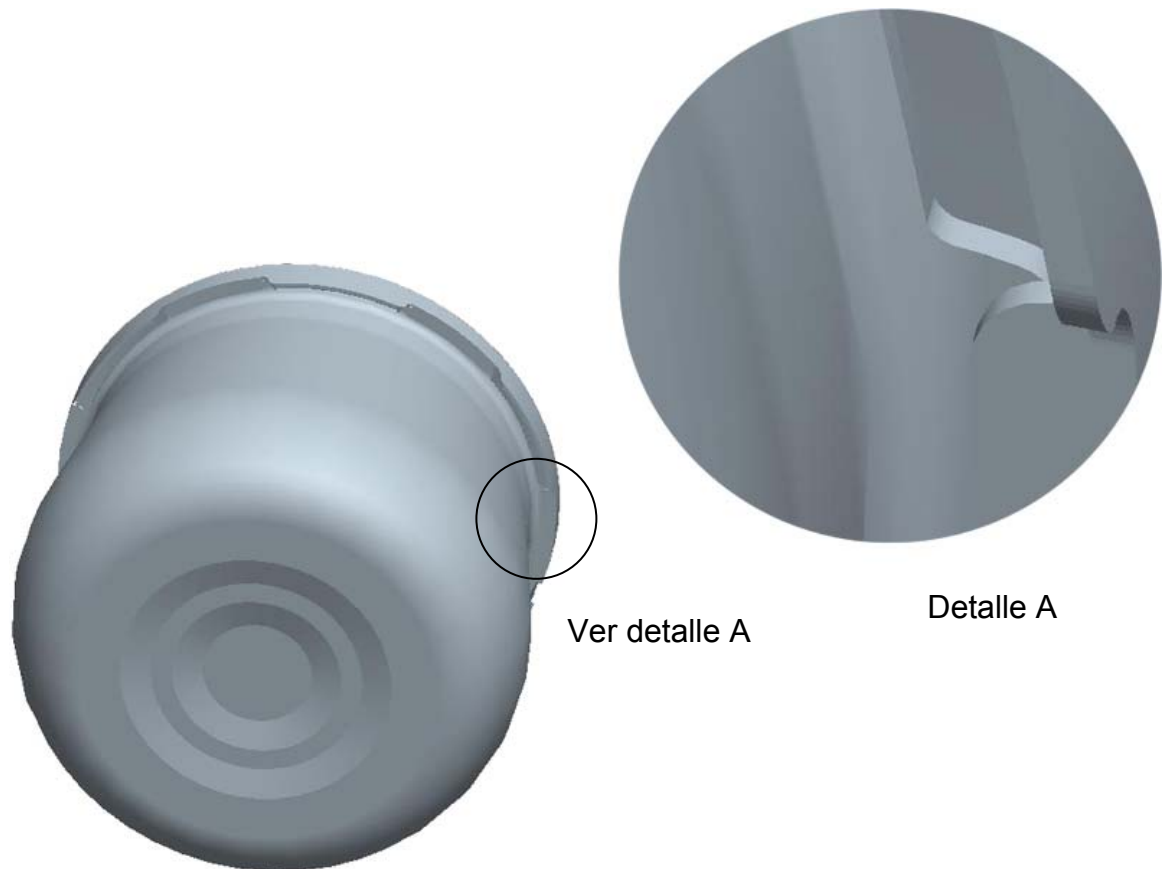
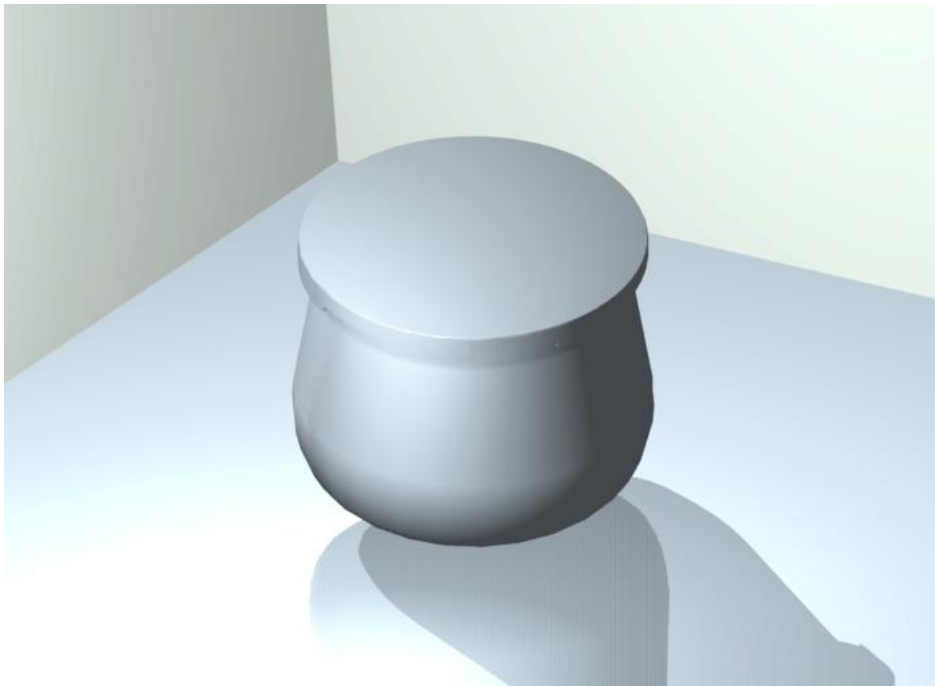


Ilustración 11. Recipiente de presión.



4.2 MATERIAL

El aluminio es el segundo material más abundante en el planeta, exhibe una gran variedad de aplicaciones en diferentes sectores (doméstico, químicos, automotriz, aeroespacial, entre otros) y presenta muy buenas propiedades: térmicas, eléctricas y mecánicas.

El aluminio tiene una densidad aproximada de $2,70 \text{ g/cm}^3$, sin embargo, entre las diferentes aleaciones de aluminio puede variar ésta entre $0,01$ y $0,02 \text{ g/cm}^3$. Aunque las aleaciones de aluminio presenten propiedades a la tensión relativamente bajas en comparación con las del acero, su resistencia específica (relación resistencia-peso) es excelente. Se caracteriza también por: buena maleabilidad y ductilidad, ser apto para el mecanizado y la fundición, la alta

conductividad eléctrica y térmica, comportamiento no magnético, y excelente resistencia a la oxidación y a la corrosión. Además, por su baja temperatura de fusión (660° C), no trabaja bien a temperaturas elevadas.

El material del recipiente de presión es un aluminio 3104 H 0. Éste pertenece a la aleación de aluminio de la serie 3000. El primer número (tres) indica que los principales elementos de la aleación son: el aluminio (Al) y el manganeso (Mn), el resto de números indican la composición específica de la misma. A continuación se muestra la composición química del aluminio 3104.

Tabla 1. Composición química del aluminio 3104

Aluminio 3104			
			Wt. %
Componente	Valor	Min	Max
Aluminio, Al		95	98.4
Cobre, Cu		0.05	0.25
Hierro, Fe			0.8
Galio, Ga			0.05
Magnesio, Mg		0.8	1.3
Manganeso, Mn		0.8	1.4
Otro			0.05
Otros, total			0.15
Silicio, Si			0.6
Titanio, Ti			0.1
Vanadio, V			0.05
Zinc, Zn			0.25

MATWEB@2006

La letra que sigue después de los números indica el grado de endurecimiento, que en este caso es la letra H, que significa endurecida por deformación, es decir, mediante un trabajo en frío.

En la ficha técnica facilitada por proveedores de este material, se tiene la misma especificación de composición química mostrada en la tabla anterior, un rango de resistencia máxima (22000 psi – 29000 psi) y un porcentaje mínimo de elongación del material (18%). En un lote de este material suministrado, el proveedor midió una resistencia máxima de 24315 psi y una elongación de 19%, lo cual cumple con los rangos especificados.

Aunque se tengan la composición química, la resistencia máxima y la elongación del material en la ficha técnica (Data sheet), se requieren el resto de propiedades térmicas y mecánicas para realizar los estudios de comportamiento en el software CAE. Con respecto a las propiedades térmicas no se tiene mayor dificultad la obtención de éstas en la bibliografía y cibergrafía, ya que ellas no se alteran notablemente entre las diferentes aleaciones de la serie 3000 o entre la misma aleación 3104 con diferentes grados de templado. Por lo tanto, estas propiedades se pueden obtener de la aleación 3104 H19 como se lista a continuación.

Tabla 2. Propiedades térmicas del Aluminio 3104 H19

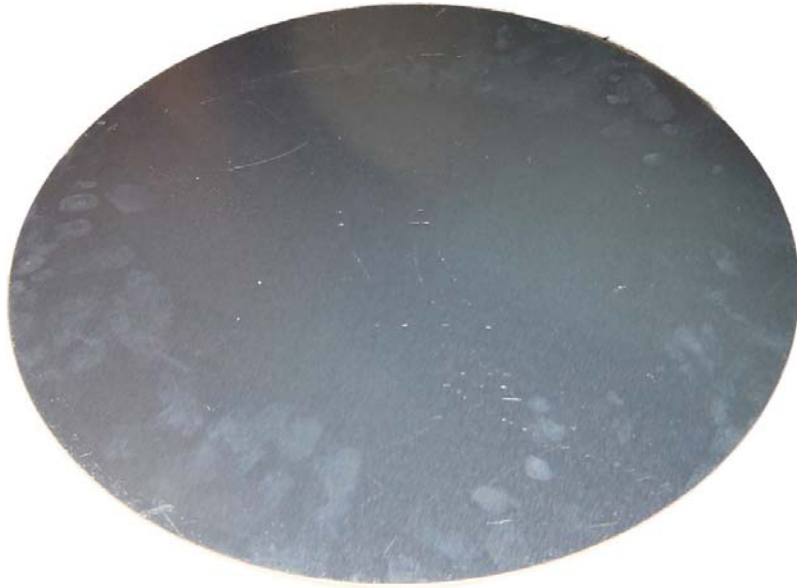
MatWeb Ficha Tecnica				
Aluminio 3104-H19				
SubCat: Aleación de Aluminio, Metales No Ferrosos, Serie 3000				
Propiedades	Valor	Min	Max	Comentarios
Termicas				
CTE, lineal 20°C, $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	23.8	--	--	Estimado de Tendencias de Aleaciones de Aluminio Similares. 20-100°C.
CTE, lineal 250°C, $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	25.4	--	--	Estimado de Tendencias de Aleaciones de Aluminio Similares. 20-300°C.
Capacidad de Calor Especifico, $\text{J}/\text{g}\cdot^\circ\text{C}$	0.88	--	--	Estimado de Tendencias de Aleaciones de Aluminio Similares.
Conductividad Termica, $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	170	--	--	Estimado de Tendencias de Aleaciones de Aluminio Similares.
Punto de Fundición, °C	--	630	655	Estimado de Tendencias de Aleaciones de Aluminio Similares.
Solido, °C	630	--	--	Estimado de Tendencias de Aleaciones de Aluminio Similares.
Liquido, °C	655	--	--	Estimado de Tendencias de Aleaciones de Aluminio Similares.

MATWEB@2006

A diferencia de las propiedades térmicas, las mecánicas si varían considerablemente entre las variadas aleaciones de aluminio y con las aplicaciones de los diferentes grados de templado. Por lo tanto, para estar seguro de las propiedades mecánicas y ser verídicos con sus valores, se realizaron ensayos de tracción con diferentes probetas del material en estudio.

4.2.1 Ensayo de tracción. Para la realización de este ensayo, los proveedores de este material suministraron una lámina en forma de disco con las siguientes dimensiones: diámetro 450mm y espesor 2mm. Esta lámina es la que se utiliza en el proceso de embutición para sacar el producto final.

Ilustración 12. Lámina para el proceso de embutición



Con esta lámina se realizaron cinco probetas para realizar los ensayos de tracción. La lámina en forma de disco se cortó inicialmente en la cizalladora con sobredimensiones y luego se maquinaron en la fresadora las cinco probetas, teniendo en cuenta la norma ASTM E 8M para ensayos de tracción, dándole las medidas y las tolerancias definitivas. A continuación se muestra el proceso y las medidas definitivas de cada probeta en las dos siguientes ilustraciones (Ver videos en Anexo E.).

Ilustración 13. Elaboración de probetas para ensayos de tracción

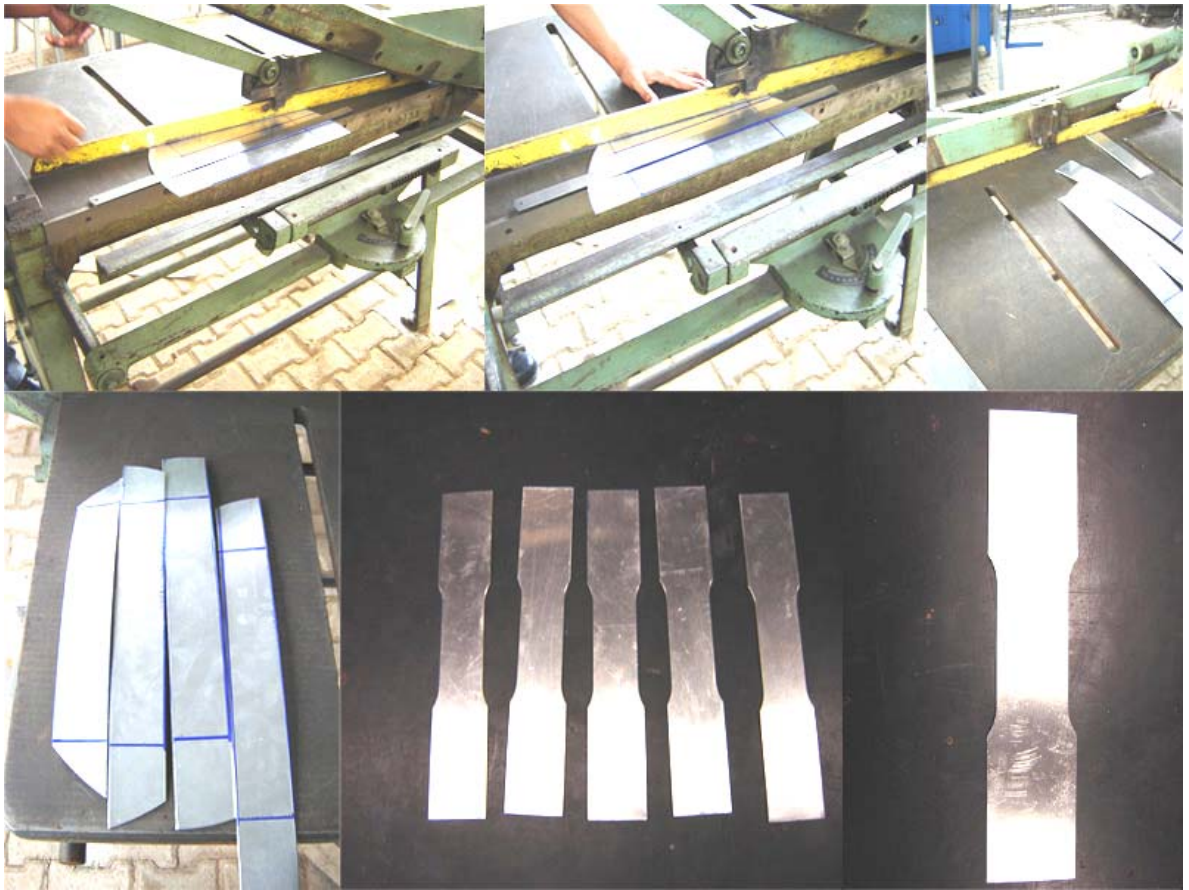
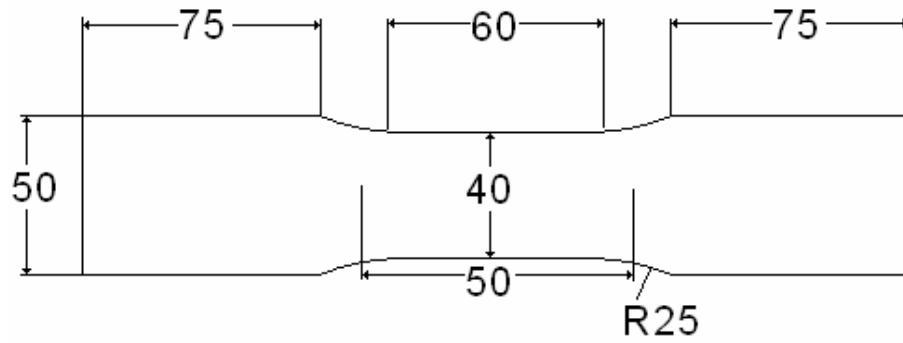


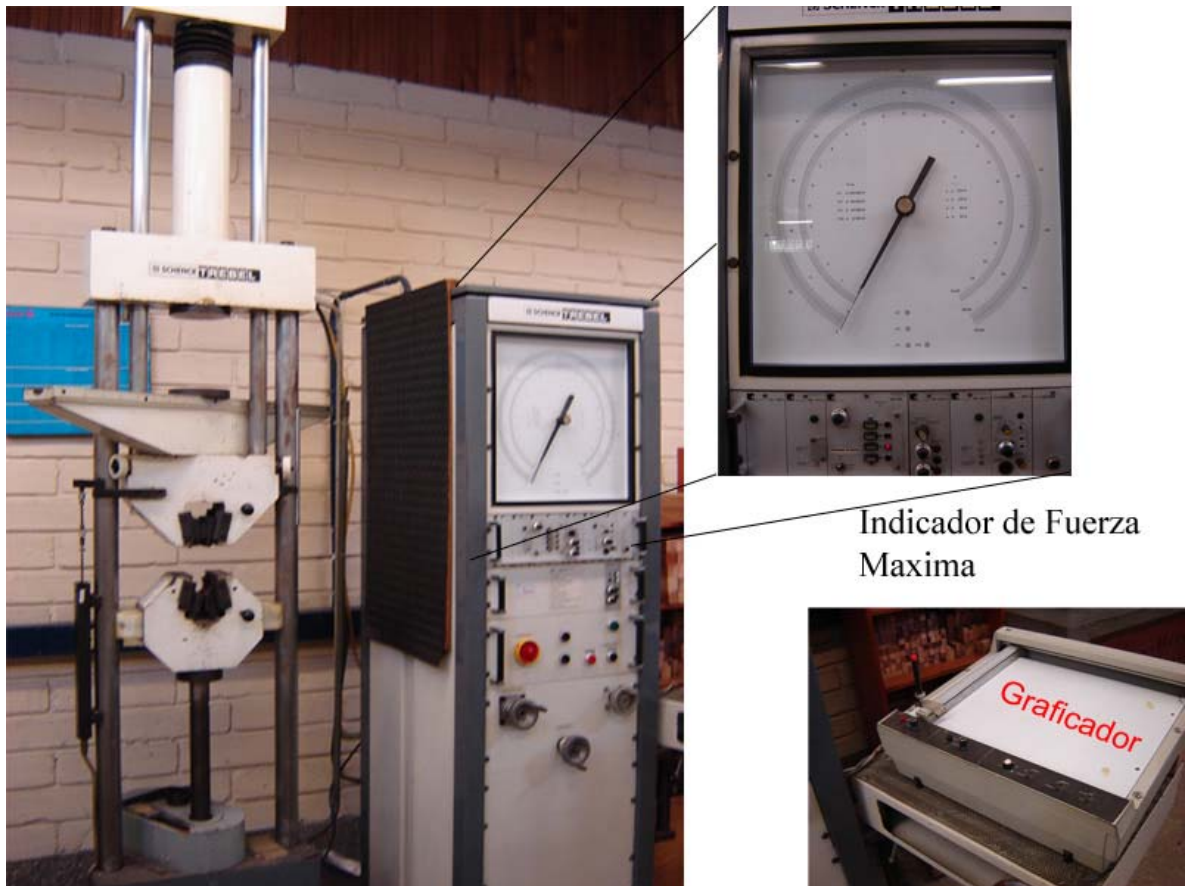
Ilustración 14. Dimensiones de cada probeta



Se les realizaron ensayos de tracción a tres de las cinco probetas mecanizadas, en la máquina universal de ensayos, marca: Schenk Trebel, modelo UPM 120, de la cual se pueden obtener los siguientes datos:

- Fuerza máxima (F_{\max}): Se puede leer directamente en el indicador de la máquina.
- Gráfica de la curva de ingeniería (σ vs. ϵ) que se construye a partir de la gráfica de F vs. ΔL obtenida en el graficador, utilizando las relaciones
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ y } \epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}.$$
- Cálculos del esfuerzo último (σ_u) y el esfuerzo de cedencia (σ_y), a partir de los resultados de la prueba y mediciones realizadas, o basándose en la gráfica construida en el ítem anterior.
- Módulo de elasticidad (E): pendiente de la recta: $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$
- Porcentaje de reducción de área.
- Elongación (%): cálculo que mide la ductilidad del material.
- Resiliencia.

Ilustración 15. Máquina universal de ensayos Schenk Trebel UPM 120



Indicador de Fuerza Maxima

Cortesía Laboratorio de Materiales de la Universidad EAFIT.

Los resultados obtenidos en las tres probetas fueron los siguientes:

- Probeta No 0: $F_{\max} = 13,15 \text{ KN}$
- Probeta No 1: $F_{\max} = 13,15 \text{ KN}$
- Probeta No 2: $F_{\max} = 13,15 \text{ KN}$

Observando las fuerzas máximas y las curvas graficadas, se nota un comportamiento muy similar en las tres primeras probetas; éste fue el motivo que se tuvo para no realizar más ensayos, y realizar las operaciones y promedios con los resultados de estas tres probetas (Ver anexo A).

De igual forma sucedió con la medición de la fuerza para medir el módulo de elasticidad; estas pruebas dieron como resultado una fuerza de 1500N.

4.2.2 Cálculos de las propiedades mecánicas.

- Módulo de elasticidad.

$$A_o = 2mm \cdot 40mm = 80mm^2$$

$$A_o = 80mm^2 \text{ (Para todas las probetas)}$$

$$F = 1500N \text{ (Resultado obtenido del equipo)}$$

Amplificación = 2000 (Se emplea para mejorar la lectura del dato en la gráfica)

$$\sigma = \frac{F}{A_o} = \frac{1500N}{80mm^2} = 18,75MPa$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{28mm/2000}{50mm} = 2,8 \times 10^{-4}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{18,75MPa}{2,8 \times 10^{-4}} = 66,96GPa \approx 67GPa$$

- Esfuerzo máximo.

$$F_{\max} = 13,15 \text{ KN (Resultado obtenido del equipo en las tres probetas)}$$

$$A_o = 80mm^2$$

$$\sigma_U = \frac{F_{\max}}{A_o} = \frac{13150N}{80mm^2} = 164,375MPa$$

El esfuerzo último es igual en todas las probetas ensayadas

$$\sigma_u = 164,375 \text{ MPa} = 23857,04 \text{ psi}$$

Este dato obtenido por el ensayo se encuentra muy aproximado al dato suministrado en la ficha técnica del material, que es $\sigma_u = 24315 \text{ psi} = 167,64 \text{ MPa}$.

Además se encuentra dentro del rango de la resistencia máxima de la ficha técnica (22000psi - 29000psi).

- Elongación

$$\text{Porcentaje de elongacion (\%)} = \frac{L_F - L_O}{L_O} \times 100\%$$

En la probeta No. 0

$$L_F = 64 \text{ mm}$$

$$\text{Porcentaje de elongacion (\%)} = \frac{64\text{mm} - 50\text{mm}}{50\text{mm}} \times 100\% = 28\%$$

En la probeta No. 1

$$L_F = 62.7 \text{ mm}$$

$$\text{Porcentaje de elongacion (\%)} = \frac{62,7\text{mm} - 50\text{mm}}{50\text{mm}} \times 100\% = 25,4\%$$

En la probeta No. 2

$$L_F = 63 \text{ mm}$$

$$\text{Porcentaje de elongacion (\%)} = \frac{63\text{mm} - 50\text{mm}}{50\text{mm}} \times 100\% = 26\%$$

$$\text{Pr omedio del porcentaje de elongacion (\%)} = \frac{28\% + 25,4\% + 26\%}{3} = 26,466\%$$

Todos los resultados de elongación y el promedio de éstos se encuentran por encima del mínimo de porcentaje de elongación (18%) de la ficha técnica que suministró el proveedor, por lo tanto, se observa la veracidad de los resultados en los ensayos.

- Esfuerzo de cedencia

Para calcular el esfuerzo de cedencia se tienen dos opciones: mirarlo en la gráfica de la curva de ingeniería (σ vs. ϵ) construida a partir de la gráfica de F vs. ΔL , o

realizar una relación en la gráfica de F vs. ΔL graficada en el papel milimetrado entre la fuerza máxima y la fuerza que corresponde al esfuerzo de cedencia, la cual se encuentra donde ocurre un cambio de pendiente en la curva.

- Para la probeta No. 0

$$F_{\max} = 13,15 \text{ KN} \quad \longrightarrow \quad 13,7 \text{ (eje y del papel milimetrado)}$$

$$F_{\text{punto de cedencia}} = ? \quad \longrightarrow \quad 4,8 \text{ (eje y del papel milimetrado)}$$

$$F = \frac{13,15 \text{ KN} \times 4,8}{13,7} = 4,6073 \text{ KN}$$

$$\sigma_y = \frac{F}{A_o} = \frac{4607,3 \text{ N}}{80 \text{ mm}^2} = 57,59 \text{ MPa}$$

- Para la probeta No. 1

$$F_{\max} = 13,15 \text{ KN} \quad \longrightarrow \quad 13,65 \text{ (eje y del papel milimetrado)}$$

$$F_{\text{punto de cedencia}} = ? \quad \longrightarrow \quad 5,5 \text{ (eje y del papel milimetrado)}$$

$$F = \frac{13,15 \text{ KN} \times 5,5}{13,65} = 5,2985 \text{ KN}$$

$$\sigma_y = \frac{F}{A_o} = \frac{5298,53 \text{ N}}{80 \text{ mm}^2} = 66,23 \text{ MPa}$$

- Para la probeta No. 2

$$F_{\max} = 13,15 \text{ KN} \quad \longrightarrow \quad 13,65 \text{ (eje y del papel milimetrado)}$$

$$F_{\text{punto de cedencia}} = ? \quad \longrightarrow \quad 4,9 \text{ (eje y del papel milimetrado)}$$

$$F = \frac{13,15KN \times 4,9}{13,65} = 4,7205KN$$

$$\sigma_y = \frac{F}{A_o} = \frac{4720,51N}{80mm^2} = 59MPa$$

$$Esfuerzo\ de\ cedencia\ promedio = \frac{57,59 + 66,23 + 59}{3} = 60,94MPa$$

- Porcentaje de reducción de área

$$\frac{A_o - A_F}{A_o} \times 100\%$$

$$A_F = W \times e$$

- Probeta No. 0

$$A_F = 30,5mm \times 1,7mm = 51,85mm^2$$

$$\frac{80 - 51,85}{80} \times 100\% = 35,1875\%$$

- Probeta No. 1

$$A_F = 30,65mm \times 1,5mm = 45,975mm^2$$

$$\frac{80 - 45,975}{80} \times 100\% = 42,53\%$$

- Probeta No. 2

$$A_F = 30,5mm \times 1,7mm = 51,85mm^2$$

$$\frac{80 - 51,85}{80} \times 100\% = 35,1875\%$$

- Resiliencia

$$\frac{\sigma_y \times \epsilon_1}{2}$$

Amplificación = 5 veces el eje x (Se emplea para mejorar la lectura del dato en la gráfica)

- Probeta No. 0

$$\frac{57,59MPa \times \frac{9}{5}}{2} = 51,831MPa = 51'832.116,79 J/m^3$$

- Probeta No. 1

$$\frac{66,23MPa \times \frac{10}{5}}{2} = 66,23MPa = 66'231.684,98 J/m^3$$

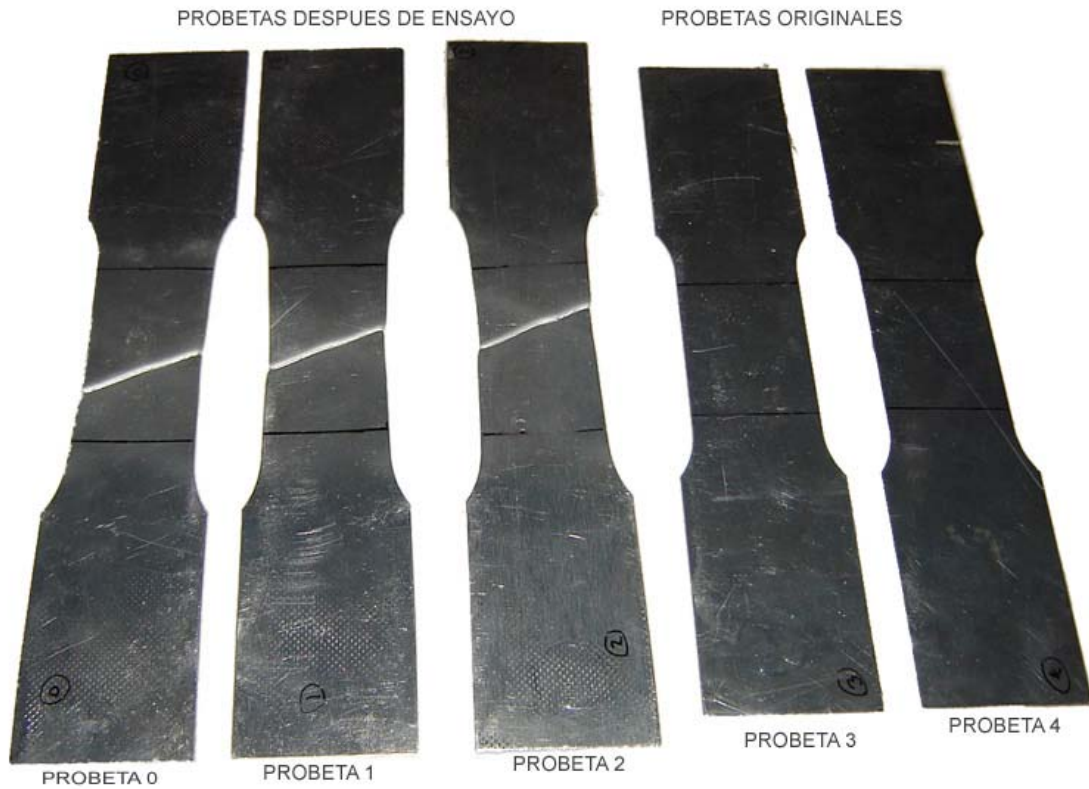
- Probeta No. 2

$$\frac{59MPa \times \frac{11,5}{5}}{2} = 67,85MPa = 67'857.371,8 J/m^3$$

$$Re\ siliencia\ promedio = \frac{51'832.116,79 + 66'231.684,98 + 67'857.371,8}{3} = 61'973.724,52 J/m^3$$

Observando los resultados de los ensayos se puede notar que este material presenta un buen porcentaje de elongación y buena reducción de área. En la siguiente gráfica se puede observar lo recién mencionado, la elongación y la reducción de área en las probetas No 0., No. 1 y No.2; además se ve la diferencia con las probetas con las que no se realizaron ensayos.

Ilustración 16. Elongación y reducción de área



Realizados los ensayos, se obtuvieron algunas propiedades mecánicas, sin embargo, como se observó en los resultados, algunas de ellas presentaban unas pequeñas diferencias en los resultados entre las tres probetas ensayadas. Por esta razón, se tomó la decisión de solicitarle al proveedor nuevamente que suministrara la ficha técnica del material pero más completa, donde incluya todo lo que se requiere para el análisis FEA. Esto se logró efectivamente, y a continuación se muestra en una tabla la información con las propiedades del aluminio 3104 H 0.

Tabla 3. Propiedades del aluminio 3104

ALUMINIO 3104			
Propiedades	Valor		
Físicas			
Densidad		2.72 g/cc	0.0983 lb/m ³
Mecánicas			
Esfuerzo de Cedencia		55, 158 MPa	8000 PSI
Esfuerzo Ultimo		151,68-200 MPa	22000-29000 PSI
Modulo de elasticidad		69 GPa	10000 KSI
Relación de Poisson	0,34		
Térmicas			
Capacidad de calor específico		0.88 J/g-C	0.21BTU/lb-F
Conductividad Térmica		170W/m-K	1180 BTU*IN/hr-pie ² -F

Cortesía proveedor del material.

Comparando los resultados de los ensayos con los datos del proveedor, se observa que es muy poca la diferencia y que se presentan unos porcentajes de error muy pequeños. Solamente el esfuerzo de cedencia presenta un error un poco más alto que los otros, ya que éste, fue hallado mediante un método gráfico, siendo un método más inexacto.

$$\text{Porcentaje de error (\%)} = \frac{\text{Valor Teorico} - \text{Valor Real}}{\text{Valor Teorico}} \times 100\%$$

Tabla 4. Comparación entre valores teóricos y valores reales

PROPIEDADES	VALOR TEORICO	VALOR REAL	PORCENTAJE DE ERROR
Esfuerzo de cedencia, MPa	55,158	60,94	10,483%
Esfuerzo máximo, MPa	167,64	164,375	1,948%
Modulo de elasticidad, GPa	69	67	2,899%

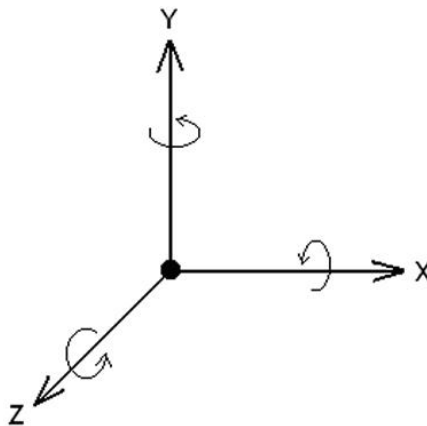
4.2.3 Definición del material en el software. El sistema de unidades es lo primero que se debe seleccionar en el momento de iniciar un proceso FEA, ya que de acuerdo con éste, se definen las diferentes propiedades del material (físicas, mecánicas, eléctricas y térmicas). En un software CAD esto no es tan relevante, puesto que en éste, únicamente interesa la unidad de longitud, mientras que un software CAE, si intervienen otras unidades de medida básicas (temperatura, masa y tiempo) y las que se derivan de éstas, como: densidad, aceleración, presión, fuerza, entre otras.

4.3 CONDICIONES DE FRONTERA

Las condiciones de frontera están conformadas por: las restricciones y las cargas.

4.3.1 Restricciones. Se encargan de evitar la libertad de movimiento de alguna entidad geométrica (superficie, curva o punto) del modelo, fijándola en uno o más de los grados de libertad, ya sean traslacionales y/o rotacionales. En total son seis grados de libertad, tres traslacionales y tres rotacionales, en cada uno de los ejes de un sistema coordenado cartesiano (x, y, z).

Ilustración 17. Seis grados de libertad

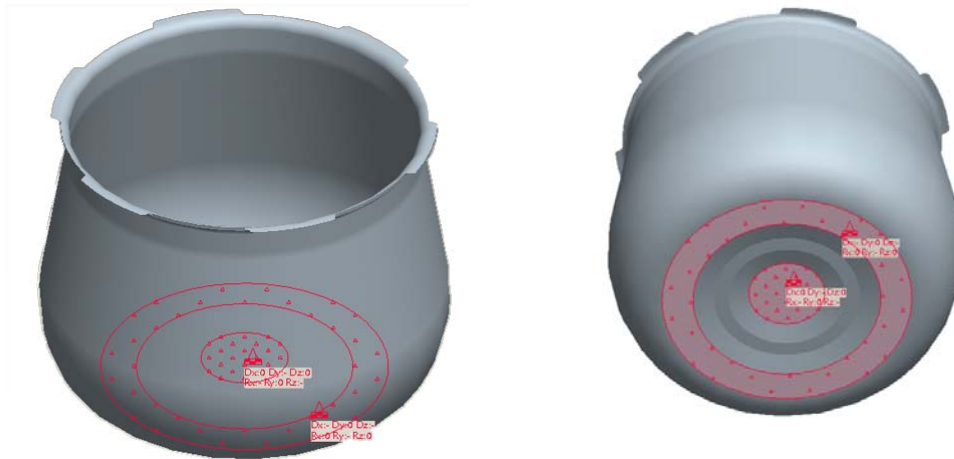


Para poder realizar un análisis estático en un software CAE, el modelo debe estar restringido en los seis grados de libertad, no necesariamente en una sola entidad geométrica, sino que se tiene la posibilidad de restringirlo en diferentes entidades pero que en la totalidad no quede ningún grado de libertad sin restringir. Cabe aclarar, que en algunas ocasiones al restringir un grado de libertad en una entidad tiene como efecto la prevención de movimiento en otros dos grados, por ejemplo: cuando se restringe una superficie en el grado traslacional normal a la superficie, consecuentemente se restringen los dos grados rotacionales paralelos a la superficie.

Uno de los mejores métodos para revisar si las restricciones del modelo fueron las apropiadas, es realizando una animación de los resultados y observar como se deforma y se desplaza el modelo, de esta forma, se compararía con un comportamiento esperado en la realidad, y si es razonable, se puede afirmar que el modelo está correctamente restringido.

Para el análisis estático las restricciones en el modelo son las siguientes: la superficie inferior que se apoya sobre la parrilla eléctrica o de llama de gas se le restringe el grado traslacional en la dirección Y, y como se explicó en párrafos anteriores, por efecto de esta restricción también se restringen los dos grados rotacionales paralelos a esta superficie, que corresponden a los rotacionales en los ejes X y Z. Sin embargo, aún queda faltando por restringir dos grados traslacionales (X y Z) y uno rotacional (Y), para que el software CAE permita realizar posteriormente el análisis. Debido a esto, se debe seleccionar una entidad y asumir que se encuentra restringida en los grados de libertad faltantes. No obstante, debe ser una selección precavida que no altere los resultados y los aleje del comportamiento esperado en la realidad. Entonces se tomó la decisión de escoger la superficie inferior central, ya que se consideró la más conveniente para dichas restricciones. La siguiente ilustración presenta en el modelo las restricciones mencionadas para el análisis estático.

Ilustración 18. Restricciones para el análisis estático



En los análisis estáticos, como se ha dicho, las restricciones se encargan de impedir el movimiento del modelo; para un análisis térmico, la analogía de esto, son: temperaturas prescritas, que son temperaturas con valor constante, y/o condiciones de convección, que son controles del flujo de calor de una superficie sólida a un fluido (líquido o vapor).

La transferencia de calor por convección depende directamente del coeficiente de transferencia de calor por convección, que se designa con la letra h ($W/m^2 \cdot K$). Y éste a su vez, depende de las condiciones en la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y de transporte. Esto muestra, que en cualquier estudio donde esté presente la transferencia por convección se deben investigar los medios para determinar el valor de h . A continuación se muestran unos rangos de valores típicos del coeficiente de transferencia de calor.

Tabla 5. Coeficientes de transferencia de calor por convección

Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección	
Proceso	h (W/m ² .K)
Convección libre	
Gases	2-25
Líquidos	50-1,000
Convección forzada	
Gases	25-250
Líquidos	50-20,000
Convección con cambio de fase	
Ebullición o condensación	2500-100,000

INCROPERA, 1999, P 8

Para el estudio térmico del recipiente, se deben tener en cuenta dos condiciones de convección que son: el aire del ambiente que rodea externamente al recipiente y el cambio de fase (ebullición) que ocurre en el interior de éste.

En el aire del ambiente la naturaleza del movimiento del fluido es libre o natural, puesto que no es inducida por ningún medio externo, por lo tanto, se espera que el coeficiente de convección se encuentre dentro del primer rango que muestra la tabla anterior. Sin embargo, como los rangos expuestos en la tabla son tan grandes, lo mejor, es calcular este coeficiente basándose en unos modelos matemáticos que gobiernan las condiciones de la capa límite, los cuales, presentan un alto grado de complejidad por la dependencia de una variedad de propiedades, por consiguiente, se simplifican y se aproximan con parámetros adimensionales. Por otra parte, la geometría del modelo es relevante en estas ecuaciones, ya que no es lo mismo analizar una placa plana horizontal que una placa plana vertical, o un cilindro o una esfera. Cada geometría presenta diferentes ecuaciones simplificadas de los modelos originales, por este motivo no se puede asumir cualquier ecuación. En el caso del recipiente, las condiciones de

geometría y comportamiento del fluido a las que más se puede asemejar son las que ocurren con una placa vertical o cilindro vertical corto, ya que el recipiente cuando se analiza se encuentra en posición vertical y cumple con la relación

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_L^{1/4}} \text{ como se muestra en los cálculos posteriores.}$$

En seguida se presentan los modelos matemáticos empleados en una placa vertical o cilindro vertical:

$$\bar{h} = \frac{k}{L} \bar{Nu}_L$$

$$Nu_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0,492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\alpha\nu}$$

Es importante reconocer, que este modelo matemático es empleado para objetos isotérmicos, es decir, con una temperatura superficial constante (T_s constante). A pesar de esto, cuando se presentan gradientes de temperatura a través del modelo, una excelente aproximación para el número Nusselt (Nu_L) y el número Rayleigh (Ra_L), es definiéndolos en términos de la diferencia de temperatura en el punto medio del objeto.

- Cálculo del coeficiente de convección del aire del ambiente.

Inicialmente se deben buscar las propiedades del aire a una temperatura media de la capa límite o temperatura de película (T_f)

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

T_s : Temperatura de la superficie.

T_∞ : Temperatura del fluido (aire).

$T_s = 120\text{ }^\circ\text{C}$ (Es la temperatura promedio del recipiente en la parte externa, puesto que al interior, existe una temperatura de ebullición del mismo valor y como el recipiente es de 2mm de espesor y la conductividad del aluminio es tan buena, se estima que la superficie externa se encuentra con este mismo valor)

$T_\infty = 24\text{ }^\circ\text{C}$ (Temperatura estimada del aire del ambiente que puede encontrarse normalmente entre un rango de: $20\text{ }^\circ\text{C}$ y $25\text{ }^\circ\text{C}$).

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = \frac{120^\circ\text{C} + 24^\circ\text{C}}{2} = 72^\circ\text{C} = 345\text{K}$$

Las propiedades del aire a una $T_f = 345\text{K}$ (ver Anexo B.) son las siguientes:

Tabla 6. Propiedades del aire a una $T_f = 345\text{ K}$

T(K)	$\nu \cdot 10^6$ (m^2/s)	$K \cdot 10^3$ ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	$\alpha \cdot 10^6$ (m^2/s)	Pr
300	15,89	26,3	22,5	0,707
345	20,417	29,63	29,16	0,7007
350	20,92	30,0	29,9	0,700

Nota: Todos las propiedades se hallaron mediante interpolación lineal.

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{345\text{K}} = 2,8985 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$$

Ahora, se muestra como se cumple la relación en la que se asimila el recipiente de presión como un cilindro vertical corto.

D: diámetro externo del recipiente.

L: altura del recipiente.

Gr: número de Grashof.

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} = \frac{9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 2,8985 \times 10^{-3} K^{-1} \cdot (120 - 24)^\circ C \cdot (0.171m)^3}{\left(20,417 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}\right)^2} = 32,71 \times 10^6$$

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr_L^{1/4}}$$

$$\frac{0,2341}{0,171} \geq \frac{35}{(32,71 \times 10^6)^{1/4}}$$

$$\frac{0,2341}{0,171} \geq \frac{35}{(32,71 \times 10^6)^{1/4}}$$

$$1,369 \geq 0,46$$

Dado que se cumple la relación, se prosigue con la realización de los cálculos para hallar h

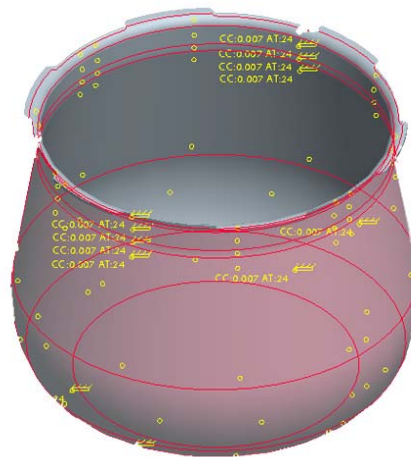
$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\alpha\nu} = \frac{9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 2,8985 \times 10^{-3} K^{-1} \cdot (120 - 24)^\circ C \cdot (0.171m)^3}{\left(20,417 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}\right) \cdot \left(29,16 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}\right)} = 22,903 \times 10^6$$

$$Nu_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot (22,903 \times 10^6)^{1/6}}{\left[1 + (0,492 / 0,7007)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 = 39,522$$

$$\bar{h} = \frac{k}{L} \bar{Nu}_L = \frac{29,63 \times 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}}{0,171\text{m}} \cdot 39,522 = 6,85 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Teniendo el coeficiente de convección del aire ambiente y la temperatura del aire, que es el fluido circundante alrededor del recipiente, se puede introducir esta condición de frontera en el software, como se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 19. Convección del aire ambiente



Al igual como se calculó el coeficiente de convección del aire ambiente, se debe calcular el coeficiente de la ebullición, aunque este cálculo se basa en otro modelo matemático por ser una convección con cambio de fase de un fluido. Además, los efectos del calor latente asociados con el cambio de fase son significativos. A causa de los efectos combinados del calor latente y del flujo impulsado por empuje, los coeficientes y las transferencias de calor por ebullición son por lo general mucho mayores que los característicos de la transferencia de calor por convección sin cambio de fase, teniendo en cuenta, que esto se puede presentar con pequeñas diferencias de temperaturas (ΔT).

El coeficiente de convección en este proceso, depende de la diferencia de temperaturas entre la temperatura de la superficie y la temperatura de saturación ($\Delta T = |T_s - T_{sat}|$), el calor latente h_{fg} , las propiedades termofísicas del líquido o del vapor y otras variables que se mostraran en los diferentes cálculos.

Es de esperar, que la temperatura de la superficie sea superior a la temperatura de saturación que corresponde al líquido, ya que el calor se transfiere de la superficie sólida al líquido, y de esta forma ocurre la ebullición.

La temperatura de saturación, se ha mencionado en cálculos posteriores y corresponde a 120° C. En cuanto a la temperatura de la superficie interna del recipiente se determina midiendo la temperatura inferior externa de éste, ya que la diferencia de temperaturas entre ambas es despreciable.

Se midió la temperatura externa del recipiente con una sonda de contacto conectada a un transductor marca HANNA referencia HI 9063, el cual tiene un rango de medición de -50 °C a 150 °C, con una precisión de una décima (Ilustración 20).

Ilustración 20. Transductor y sonda de contacto



Cortesía Laboratorio de Operaciones Unitarias.

El ensayo consistió en medir la temperatura en varios puntos de un recipiente de presión que aunque era de cierre interno, presentaba el mismo material (aluminio 3104 H 0) del recipiente bajo estudio. El recipiente se calentó en una parrilla eléctrica de 110 V y 1100 W, a fuego alto. Entre la toma de datos que se realizó se encuentran los que corresponden a la superficie inferior que se listan a continuación.

Tabla 7. Temperatura de la superficie inferior externa del recipiente

Medición	Temperatura
1	130
2	129,3
3	129,9
4	131,2
5	128,7
Promedio	129,82

Se observa que la temperatura promedio es aproximadamente 130° C, y a continuación se sustenta mediante cálculos, la afirmación que se mencionó en párrafos anteriores, sobre la diferencia de temperaturas entre la superficie inferior externa y la inferior interna del recipiente de presión.

- Cálculo de la diferencia de temperaturas o gradiente (ΔT)

Entre la superficie interna y externa se da un flujo de temperatura por el modo de transferencia de conducción.

$$q = k \cdot A \frac{\Delta T}{L}$$

L: espesor de la lámina, que es 2mm.

A: área de la superficie inferior del recipiente

K: conductividad del material, que se obtiene de la Tabla 3.

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} (0,1638m)^2 = 0,02107m^2$$

$$q'' = 170 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 0,02107m^2 \frac{\Delta T}{0,002m}$$

$$q'' = 1791,17 W/K \cdot \Delta T$$

Por lo general, las parrillas tienen una potencia de 1100 W, sin embargo, algunas presentan mayores valores tales como: 1400 W, 1800 W, hasta 2000 W. Si se hace la suposición de que todo este consumo de potencia eléctrica se transformara en una carga térmica aprovechable para el recipiente sin pérdidas de calor, tendríamos lo siguiente:

- Cuando $q'' = 1100 W$ $1100W = 1791,17 W/K \cdot \Delta T$
 $\Delta T = 0,61^\circ C$
- Cuando $q'' = 2000 W$ $2000W = 1791,17 W/K \cdot \Delta T$
 $\Delta T = 1,1166^\circ C$

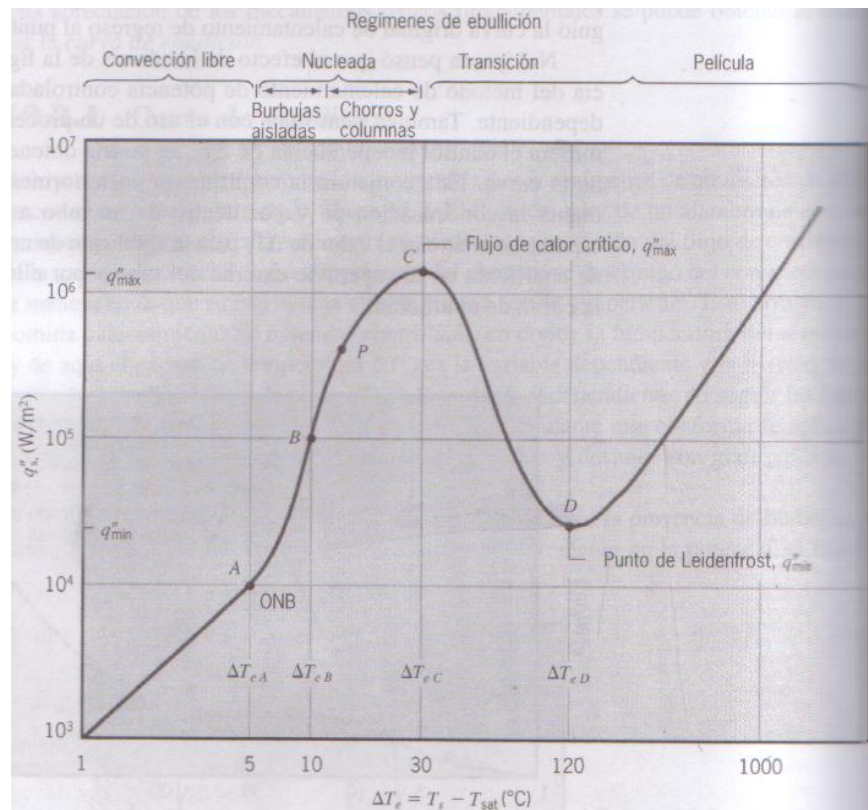
En ambas situaciones, se puede notar que así se aprovechara todo el calor generado por la parrilla, el gradiente de temperatura es despreciable, como se había mencionado anteriormente.

Volviendo nuevamente al coeficiente de convección por ebullición, éste se puede encontrar mediante un método gráfico o cálculos matemáticos. El método gráfico es muy sencillo pero puede ser inexacto, mientras que el cálculo mediante las ecuaciones apropiadas es más exacto.

- Método gráfico.

Se tiene la curva de ebullición para agua a 1 atm, que relaciona el flujo de calor superficial (q_s'') y la función del exceso de temperatura ($\Delta T = T_s - T_{sat}$).

Ilustración 21. Curva típica de ebullición para agua a 1 atm



INCROPERA, 1999, P 540

Donde se tiene:

$$\Delta T = T_s - T_{sat} = 130^\circ C - 120^\circ C = 10^\circ C$$

Se puede leer claramente en la gráfica que a este valor de exceso de temperatura se tiene un flujo de calor superficial de 100.000 W/m^2 . En este caso se obtiene un

valor confiable, ya que las divisiones de la gráfica cortan sobre 10 °C y 100.000 W/m² precisamente, y estos datos son los que están relacionados. Teniendo estos dos valores se puede calcular el coeficiente de convección de ebullición con la ley de enfriamiento de Newton:

$$q'' = h \cdot \Delta T_e$$

$$h = \frac{q''}{\Delta T_e} = \frac{100.000 \text{ W/m}^2}{10 \text{ K}} = 10.000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Este coeficiente presenta un resultado común dentro de los valores típicos que se presentaron en la tabla 5.

- Cálculo mediante modelo matemático.

Lo primero que se hace en este método es identificar a que régimen de ebullición pertenece el caso en estudio. Según las características presentes en esta situación (5 °C < ΔT_e < 30°C) y observando la gráfica, se puede afirmar que la ebullición es de régimen nucleada, la cual, se caracteriza porque la mayor parte del intercambio de calor es a través de la transferencia directa de la superficie al líquido en movimiento en la superficie, y no a través de burbujas de vapor que se elevan de la superficie. Luego de la identificación se calcula el flujo de calor y mediante la ley de enfriamiento de Newton se determina el coeficiente de convección. La ecuación para determinar el flujo es:

$$q_s'' = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g \cdot (\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{C_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} \text{Pr}_l^n} \right)^3$$

Se pueden obtener todas las diferentes propiedades de la tabla de las propiedades termofísicas del agua saturada (Anexo C), como se visualiza en la siguiente tabla.

Tabla 8. Propiedades del agua saturada a 120°C (373K)

T (K)	$v_f \cdot 10^3$ (m ³ /kg)	v_g (m ³ /kg)	h_{fg} (KJ/Kg·K)	$C_{p,f}$ (KJ/Kg·K)	$C_{p,g}$ (KJ/Kg·K)	$\sigma \cdot 10^3$ (N/m)
390	1,058	0,980	2212	4239	2104	55,6
393	1,0607	0,9053	2203,3	4244,1	2120,2	55
400	1,067	0,731	2183	4256	2158	53,6

T (K)	$\mu_f \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\mu_g \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$K_f \cdot 10^3$ (W/m·K)	$K_g \cdot 10^3$ (W/m·K)	Pr _f	Pr _g
390	237	12,69	686	26,3	1,47	1,013
393	231	12,798	686,6	26,57	1,431	1,019
400	217	13,05	688	27,2	1,34	1,033

Nota: Todas las propiedades con subíndice *f*, tienen el mismo valor de las variables que se encuentran en la ecuación de flujo de calor con subíndice *l*. Por otra parte, cabe aclarar que todas las propiedades del agua saturada a 120 °C, fueron halladas mediante interpolación lineal.

$$\rho_l = \frac{1}{v_f} = \frac{1}{1,0607 \times 10^{-3}} = 942,77 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_v = \frac{1}{v_g} = \frac{1}{0,9053} = 1,105 \text{ Kg/m}^3$$

$$q_s'' = 231 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \times 10^{-6} \cdot 2203,3 \times 10^3 \text{ J/Kg} \cdot \left[\frac{9,8 \text{ m/s}^2 \cdot (942,77 \text{ Kg/m}^3 - 1,105 \text{ Kg/m}^3)}{55 \times 10^{-3}} \right]^{1/2} \cdot \left(\frac{4244,1 \times 10^3 \cdot 10^\circ \text{ C}}{0,0130 \cdot 2203,3 \times 10^3 \text{ J/Kg} \cdot 1,431} \right)^3$$

$$q_s'' = 231,4 \text{ KW} / \text{m}^2$$

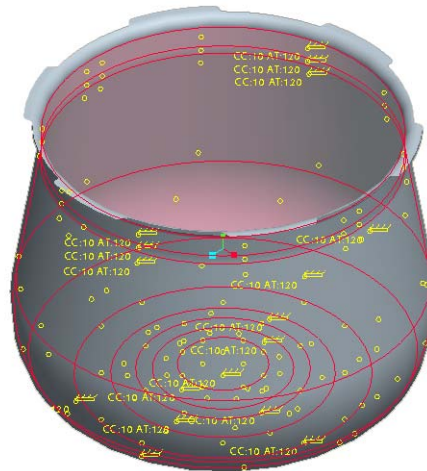
$$q'' = h \cdot \Delta T_e$$

$$h = \frac{q''}{\Delta T_e} = \frac{231447,5 \text{ W/m}^2}{10 \text{ K}} = 23.144,75 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Teniendo los coeficientes de convección calculados mediante modelos matemáticos y la curva de regímenes de ebullición, se observa una diferencia entre ellos. Sin embargo, ambos se encuentran dentro del rango de valores típicos de coeficientes de convección cuando hay cambio de fase, que se exponen en la tabla 5. Por otra parte, en ambas situaciones se presenta un flujo de calor del orden de 10^5 (en el método gráfico el resultado fue $1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$, mientras que en las ecuaciones el valor fue $2,31 \times 10^5 \text{ W/m}^2$), que son valores lógicos cuando se presenta ebullición nucleada. La diferencia entre estos dos resultados puede radicar en la precisión entre uno y el otro. Para este caso de estudio, se determina escoger el valor resultante del método gráfico, puesto que en esta ocasión la temperatura en exceso ($\Delta T_e = 10^\circ \text{C}$) se encuentra sobre una división de la gráfica y corta a la curva también en un punto donde hay división con respecto al flujo de calor, por tanto, se puede obtener una muy buena lectura. Mientras que el resultado por el método de cálculos numéricos se adquiere de una variedad de propiedades del agua saturada a una temperatura que no se encuentra en la tabla de propiedades, por lo tanto, se realiza una interpolación lineal, lo cual induce a un pequeño porcentaje de error en las magnitudes definitivas, y además, como estos valores se encuentran elevados a unos exponentes altos y en la ecuación hay diferentes operaciones matemáticas, tales como: producto, división, potenciación y radicación, los errores se incrementarán.

Teniendo el coeficiente de convección de la ebullición se puede introducir esta condición de frontera en el software, como se muestra a continuación.

Ilustración 22. Convección de cambio de fase (ebullición)



4.3.2 Cargas. Existen diferentes tipos de cargas: las fuerzas que actúan a lo largo de la línea de acción y las que se derivan de ésta, como son: la presión, que es una cantidad de fuerza sobre un área; y el momento, que es una fuerza aplicada por la distancia perpendicular a ésta.

Al igual que las restricciones, las cargas se pueden encontrar sobre cualquier entidad geométrica (superficie, curva o punto), exceptuando la presión que sólo se puede ejercer sobre una superficie.

Las propiedades del material, que se mencionaron en numerales anteriores, describen las características de elasticidad del modelo, o también como se deformará cuando se someta a la aplicación de una carga. Bajo condiciones estáticas, la deformación es proporcional a la carga que está siendo aplicada.

Cuando se introducen las cargas a las cuales está sometido el cuerpo, es fundamental, ser consistente con el mismo sistema de unidades que se está trabajando, ya sea SI (Sistema Internacional), CGS (Sistema Cegesimal), sistema ingles, u otro. Anteriormente, cuando se introdujo el material, el sistema de unidades se definió previamente, puesto que los valores de las propiedades difieren entre los diferentes sistemas de unidades, y aunque las medidas derivadas y los cálculos que se realicen con las diferentes medidas lleven el mismo cálculo matemático, el resultado variará entre los diferentes sistemas de unidades.

Para el recipiente de presión se tienen las siguientes cargas estáticas: una presión interna, que es la suma de la presión del aire que quedó contenido al momento de cerrar el recipiente, y el vapor de agua; y una fuerza que se genera por el contacto que ocurre entre los pliegues, tanto del recipiente como de la tapa.

La presión interna se midió con un manómetro en un laboratorio de pruebas, y el resultado promedio fue de 80KPa manométricos, es decir, que la presión total es:

$$P_T = P_{atm} + P_{man}$$
$$P_T = 101.325Pa + 80.000Pa = 181.325Pa$$

Y la otra carga estática que es la fuerza en los pliegues, se calcula a partir de esta presión recién hallada. Esto es, porque cuando el recipiente de presión de cierre externo se encuentra funcionando a esta presión anterior, los componentes de la presión en la dirección X y Z se anulan, mientras que la componente en Y genera una fuerza sobre la tapa que tiende a moverla hacia arriba, y en este instante, los pliegues del recipiente no permiten que esto suceda porque obstaculizan el ascenso de los pliegues de la tapa, por esta razón, se genera esa fuerza de contacto que se mencionó. El cálculo de esta fuerza es el siguiente:

$$F = P_T \cdot A$$

$$P_T = 181,325 \text{ KPa (Presión total en el recipiente)}$$

$$d = 223 \text{ mm} = 0,223 \text{ m (Diámetro interno de la tapa)}$$

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,223 \text{ m})^2}{4} = 0,039 \text{ m}^2$$

$$F = 181.325 \text{ Pa} \cdot 0,039 \text{ m}^2 = 7082,02 \text{ N [Fuerza Total]}$$

$$F = \frac{7082,02 \text{ N}}{6 \text{ pestañas}} = 1180,33 \text{ N [Fuerza en cada pestaña]}$$

Teniendo los resultados de las cargas estáticas, se introducen en el software como se muestran en las siguientes ilustraciones:

Ilustración 23. Presión interna

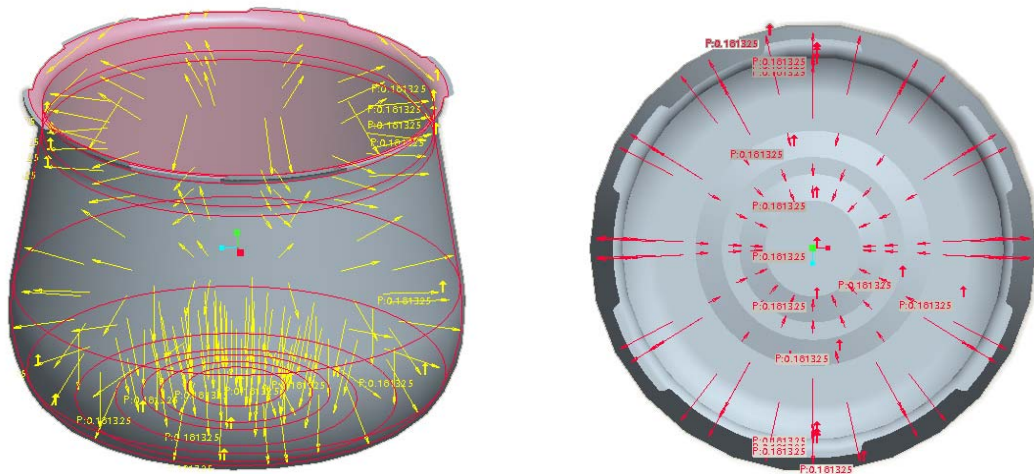
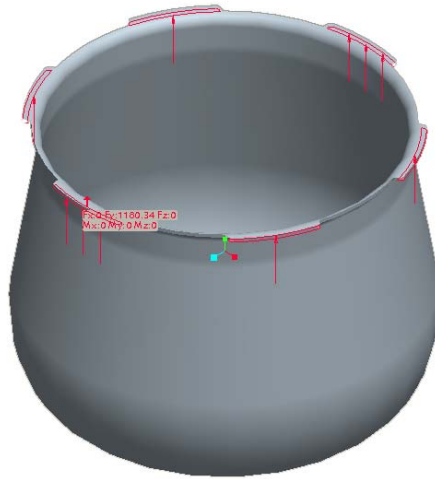


Ilustración 24. Fuerza ejercida en cada pliegue

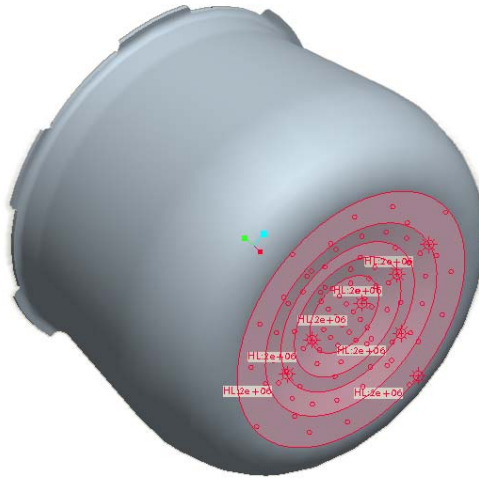


Al igual que en el ítem anterior correspondiente a las restricciones, donde se mostró la analogía entre las restricciones estáticas y las térmicas, con las cargas sucede lo mismo. La equivalencia de una carga estática en el estudio térmico es una carga térmica, medida en Watts.

En este caso, únicamente se presenta una carga térmica, que corresponde, a la fuente de calor que se le aplica al modelo, que puede provenir de una parrilla eléctrica o térmica.

Esta carga térmica se aplica en la superficie inferior exterior del recipiente (Ilustración 25) y como se mostró en párrafos anteriores, el valor promedio de la temperatura en esta superficie es 130 °C.

Ilustración 25. Fuente de calor en la superficie inferior



4.4 SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS

Los elementos son las pequeñas piezas que pueden ser de diferentes formas geométricas, tridimensionales o bidimensionales, para dividir al modelo en una cantidad finita.

Como se mencionó en capítulos anteriores, la modelación se puede simplificar, igualmente, la selección del tipo de elementos que van a representar el modelo también.

Shells y *Beams* son los elementos que simplifican los modelos. Son elementos bidimensionales que simplifican objetos tridimensionales.

Los diferentes tipos de elementos finitos pueden ser vistos como una jerarquía, donde los elementos sólidos se encuentran en el nivel superior, mientras que los elementos *shells* y *beams* se encuentran en grados inferiores, respectivamente. A continuación se muestra la jerarquía:

- Elementos sólidos (Solid): cuadrado (brick), cuña (wedge), tetraedro (tetrahedron). En estos elementos se genera la malla entre volúmenes.
- Elementos Shell: cuadrado (quad), triángulo (tri). En estos elementos se genera la malla entre superficies.
- Elementos Beam: La malla se genera entre curvas o puntos.

La gran ventaja de utilizar elementos simplificados es que demora menos tiempo el computador en realizar el procesamiento del análisis.

Aunque los elementos simplificados presenten ventajas también presentan desventajas como son:

- La manera de mostrar los resultados en las gráficas. Puesto que los sólidos son elementos tridimensionales, para algunas características o detalles sólidos al mostrarlos en elementos bidimensionales, como *Shells*, el detalle o la característica no va a ser visto en 3D.
- No se pueden graficar esfuerzos a través de espesores de una parte si se están empleando elementos *Shells*, puesto que ellos son superficies, y aparentemente tienen espesor igual a cero.

El usuario debe saber las limitaciones que presentan los elementos simplificados, por lo tanto, el uso de estos corre bajo su criterio y depende de lo que éste desee observar en los resultados, ya que a medida que se desciende en los grados de la jerarquía, los elementos van presentando mayores limitaciones.

- Elementos *Shell*: son elementos simplificados con apariencia de espesor igual a cero. Estos elementos se trabajan principalmente en sólidos de espesor delgado, como por ejemplo: láminas, perfiles, entre otros.

Cuando se tiene un sólido, la superficie creada por los elementos *Shell* se aloja dentro del sólido, ubicándose en toda la mitad, entre la cara interna y externa de éste.

Para emplear los elementos *Shell* se deben considerar las dos siguientes condiciones:

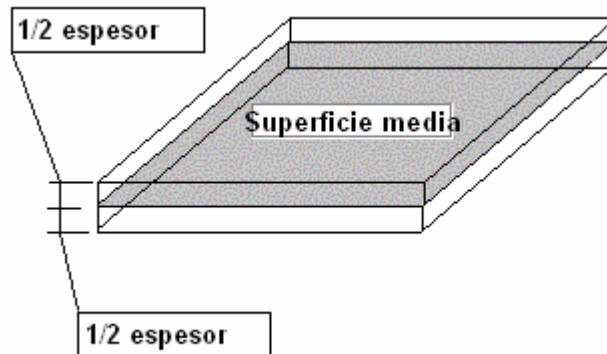
- El modelo debe tener las condiciones para emplear los *Shells*. Y como se ha explicado anteriormente, aplica principalmente para sólidos de espesor delgado.
- Los resultados con los elementos *Shells*, también como se mencionó anteriormente presentan unas desventajas, y el usuario es el que sabe cual es el nivel de detalle que espera en los resultados.

Aunque bajo la primera condición, más de un usuario se preguntará: ¿Cuál es el espesor máximo que permita trabajar elementos *Shell*?; ante esta pregunta, las respuestas pueden variar entre los diferentes programas CAE, no obstante, en PROENGINEER® la regla general que permite el empleo de Shells, es tener una relación entre espesor y longitud de uno en diez ($\frac{\text{espesor}}{\text{longitud}} = \frac{1}{10}$); todos los sólidos

más gruesos, es decir, que se encuentre por encima de esta relación, deberán ser modelados utilizando elementos sólidos.

Los *Shells* deben presentar un espesor constante, se pueden unir áreas de diferente espesor, pero cada área deberá poseer un espesor constante. El espesor de los *shells*, corresponde a la mitad de éste en cada lado de la superficie media, como se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 26. Espesor de la superficie media



El último paso del preprocesamiento es la selección de elementos. Para este estudio se requiere un alto nivel detalle en los resultados y una malla muy fina de elementos, con el fin de tener una alta veracidad y confiabilidad en los resultados de los análisis.

Se escoge el elemento sólido, puesto que se encuentra en el mayor rango de la jerarquía y no presenta desventajas frente a los otros elementos simplificados. Aunque este estudio se hubiera podido realizar con elementos *Shell*, puesto que es apto para la geometría del modelo, sus desventajas presentadas en párrafos anteriores los excluyen de la selección.

5. PROCESAMIENTO

Esta es la fase donde se soluciona el problema. Se construyen las matrices de comportamiento para cada elemento, se ensamblan las ecuaciones generales y se resuelven. En esta fase se muestran los resultados y en el postprocesamiento, fase final del proceso FEA, se analizan, se concluye y se toman decisiones sobre el diseño del producto.

Lo más importante en esta fase es definir un tipo de estudio que tenga una muy buena aproximación y un porcentaje de error pequeño en los resultados que son más relevantes para los posteriores análisis.

Para este estudio se hicieron inicialmente análisis sencillos con un porcentaje de error alto en los resultados, con el fin de conocer: los rangos entre los que se encontraban los resultados, las zonas afectadas en el recipiente y la coherencia del comportamiento cuando el modelo se somete a las diferentes cargas y restricciones. Luego de tener conocimiento de lo anterior y no se requieran realizar más modificaciones en los diferentes requerimientos del preprocesamiento, se procede a realizar los estudios con un mejor tipo de análisis, donde se tenga una convergencia a un porcentaje de error muy pequeño, lo que deduce la confiabilidad en los valores de los resultados.

Cuando se utiliza un tipo de análisis *Multi-Pass Adaptive*, se tiene la opción de correr los análisis con polinomios de grado nueve; minimizar la convergencia del error hasta uno por ciento (1%), apuntándole a que converja en las variables que el usuario desee, es decir, que el análisis termine cuando encuentre los valores deseados, como: esfuerzos, desplazamientos, y entre otros (para el caso del estudio estático), asegurando que sólo se presente el porcentaje de error que el usuario seleccionó.

Con el análisis estático se encuentran: los desplazamientos, las reacciones y esfuerzos del modelo. Para el caso en estudio, las características y los resultados del análisis estático fueron los siguientes:

Tabla 9. Características del estudio estático

CARACTERISTICA	VALOR	OBSERVACIONES
Memoria RAM	728 MB	Se asignó para el análisis un computador con 1GB de RAM y se le asignó al estudio 728MB de RAM.
Tiempo de duración	37'29"	
Malla	Automática	Se creó por defecto, automáticamente.
Sistema de unidades	mm-N-s-C	Longitud: mm, Fuerza: N, Tiempo: s, Temperatura: °C
Elementos	Sólidos	Elementos tridimensionales.
Cantidad de elementos	6845	
Tipo de análisis	-	Multi-Pass Adaptive.
Porcentaje de error	2%	Resultados muy confiables. El mínimo porcentaje de error es 1%.
Variables	-	Las variables seleccionadas para que los resultados converjan en el porcentaje de error ingresado, son: Esfuerzo de Von Mises, Desplazamientos y Energía de distorsión
Resolución de resultados	9	Excelente resolución, el valor máximo es 10.
Número de pasos para la convergencia de los resultados.	5	Realizó 5 fases de cálculo para poder converger al porcentaje de error en las variables seleccionadas.

Tabla 10. Resultados del análisis estático

RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO			
VARIABLES		VALOR	PROCENTAJE DE CONVERGENCIA (%)
REACCIONES (N)	Reacción resultante en X	1,00945E-06	-
	Reacción resultante en Y	-5206,518	-
	Reacción resultante en Z	1,64854E-06	-
DESPLAZAMIENTOS (mm)	Magnitud	0,1941903	0,5
	En la dirección X	-0,0293207	0
	En la dirección Y	-0,1941903	0,5
	En la dirección Z	0,0371079	0,2
ESFUERZOS (N/mm = MPa)	Máximos principales	50,97178	9,3
	Máximos de Von Mises	57,67079	0,2
	Máximos XX	-63,46439	9,2
	Máximos XY	-14,98149	1,7
	Máximos XZ	-24,93525	1,7
	Máximos YY	-69,7341	28
	Máximos YZ	16,24896	3,7
	Máximos ZZ	-57,60888	4,2
	Mínimos principales	-73,83884	19,1
ENERGÍA DE DEFORMACIÓN		256,5551	0,4

La alta resolución con que se muestran los resultados no afecta la aproximación de los resultados, pero si permite una mejor visualización de ellos. A todos los estudios realizados para el recipiente (estático, térmico, estático por resultados térmicos y fatiga), se les colocó una excelente resolución de resultados (*Plotting Grid = 9*), para poder observar mejor las regiones afectadas.

Definidas también todas las condiciones en el preprocesamiento del análisis térmico, se procedió a realizarlo y las características y resultados fueron los siguientes:

Tabla 11. Características y resultados del estudio térmico

CARACTERISTICA	VALOR	OBSERVACIONES
Memoria RAM	728 MB	Se asignó para el análisis un computador con 1GB de RAM y se le asignó al estudio 728MB de RAM.
Tiempo de duración	23'29"	
Malla	Automática	Se creó por defecto, automáticamente.
Sistema de unidades	mm-N-s-C	Longitud: mm, Fuerza: N, Tiempo: s, Temperatura: °C
Elementos	Sólidos	Elementos tridimensionales.
Cantidad de elementos	6768	
Tipo de análisis	-	Multi-Pass Adaptive.
Porcentaje de error	2%	Resultados muy confiables. El mínimo porcentaje de error es 1%.
Variables	-	Las variables seleccionadas para que los resultados converjan en el porcentaje de error ingresado, son: Temperatura máxima, gradiente de temperatura máximo y flujo de calor máximo.
Resolución de resultados	9	Excelente resolución, el valor máximo es 10.
Número de pasos para la convergencia de los resultados.	9	No se obtuvo la convergencia esperada porque se alcanzó el polinomio de mayor grado (9), sin embargo, se llegó hasta un porcentaje del 2,2% en las variables deseadas, el cual es un buen valor.

RESULTADOS DEL ANÁLISIS TERMICO			
VARIABLES		VALOR	PROCENTAJE DE CONVERGENCIA (%)
TEMPERATURA (°C)	Máxima	130,8766	0
	Mínima	119,7671	0
GRADIENTE (°C/mm)	Magnitud	1,607703	2,2
	Máximo en X	1,378613	2,7
	Máximo en Y	-0,7204246	23,4
	Máximo en Z	1,371735	2,9
FLUJO DE CALOR (N/mm-s)	Magnitud	273,3096	2,2
	Máximo en X	-234,3642	2,7
	Máximo en Y	122,4722	23,4
	Máximo en Z	-233,195	2,9

Después de realizar el estudio térmico y tener la distribución de temperatura y el flujo de calor a través del modelo, se realiza un estudio estructural para observar como la temperatura afecta las variables estructurales del modelo, es decir, como se alteran: los desplazamientos, las reacciones y los esfuerzos.

Tabla 12. Características del análisis estático partiendo de los resultados del estudio térmico

CARACTERISTICA	VALOR	OBSERVACIONES
Memoria RAM	728 MB	Se asignó para el análisis un computador con 1GB de RAM y se le asignó al estudio 728MB de RAM.
Tiempo de duración	30'31"	
Malla	Automática	Se creó por defecto, automáticamente.
Sistema de unidades	mm-N-s-C	Longitud: mm, Fuerza: N, Tiempo: s, Temperatura: °C
Elementos	Sólidos	Elementos tridimensionales.
Cantidad de elementos	6351	
Tipo de análisis	-	Multi-Pass Adaptive.
Porcentaje de error	2%	Resultados muy confiables. El mínimo porcentaje de error es 1%.
Variables	-	Las variables seleccionadas para que los resultados converjan en el porcentaje de error ingresado, son: Esfuerzo de Von Mises, Desplazamientos y Energía de distorsión
Resolución de resultados	9	Excelente resolución, el valor máximo es 10.
Número de pasos para la convergencia de los resultados.	7	Realizó 7 fases de cálculo para poder converger al porcentaje de error en las variables seleccionadas.

Y los resultados de este estudio se listan a continuación:

Tabla 13. Resultados del análisis estático partiendo de los resultados del análisis térmico

RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO POR DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA			
VARIABLES		VALOR	PROCENTAJE DE CONVERGENCIA (%)
REACCIONES (N)	Reacción resultante en X	5,90275E-18	-
	Reacción resultante en Y	1,27146E-18	-
	Reacción resultante en Z	-8,5416E-18	-
DESPLAZAMIENTOS (mm)	Magnitud	0,4787348	0,3
	En la dirección X	-0,2625755	2
	En la dirección Y	0,4752371	0,4
	En la dirección Z	-0.262898	2,3
ESFUERZOS (N/mm = MPa)	Máximos principales	8,39E-07	8,2
	Máximos de Von Mises	1,0884E-06	1,5
	Máximos XX	6,7530E-07	9,2
	Máximos XY	5,0768E-07	2,7
	Máximos XZ	2,7844E-07	1,4
	Máximos YY	-1,6492E-07	11
	Máximos YZ	-4,875E-07	3,7
	Máximos ZZ	5,67703E-07	4,2
	Mínimos principales	-4,7848E-07	14,4
ENERGÍA DE DEFORMACIÓN		2,41662E-06	0,8

Como se puede observar los esfuerzos que se generan debido a la temperatura en el modelo son despreciables con respecto a los que se generan por los resultados del análisis estático debido a la presión interna y la fuerza de contacto entre los pliegues, por lo tanto, cuando se realiza un estudio estructural combinado los resultados de los esfuerzos son los mismos resultados del análisis estructural. Por esta razón, no se listarán los resultados del estudio combinado.

6. POSTPROCESAMIENTO

Es la fase final del proceso FEA, donde se gráfica y realizan animaciones del comportamiento en los diferentes estudios realizados (estructural y térmico), para observar los resultados según el tipo de estudio. Se analiza y se concluye sobre los resultados, para poder así, tomar decisiones en cuanto al diseño del producto.

6.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO TÉRMICO

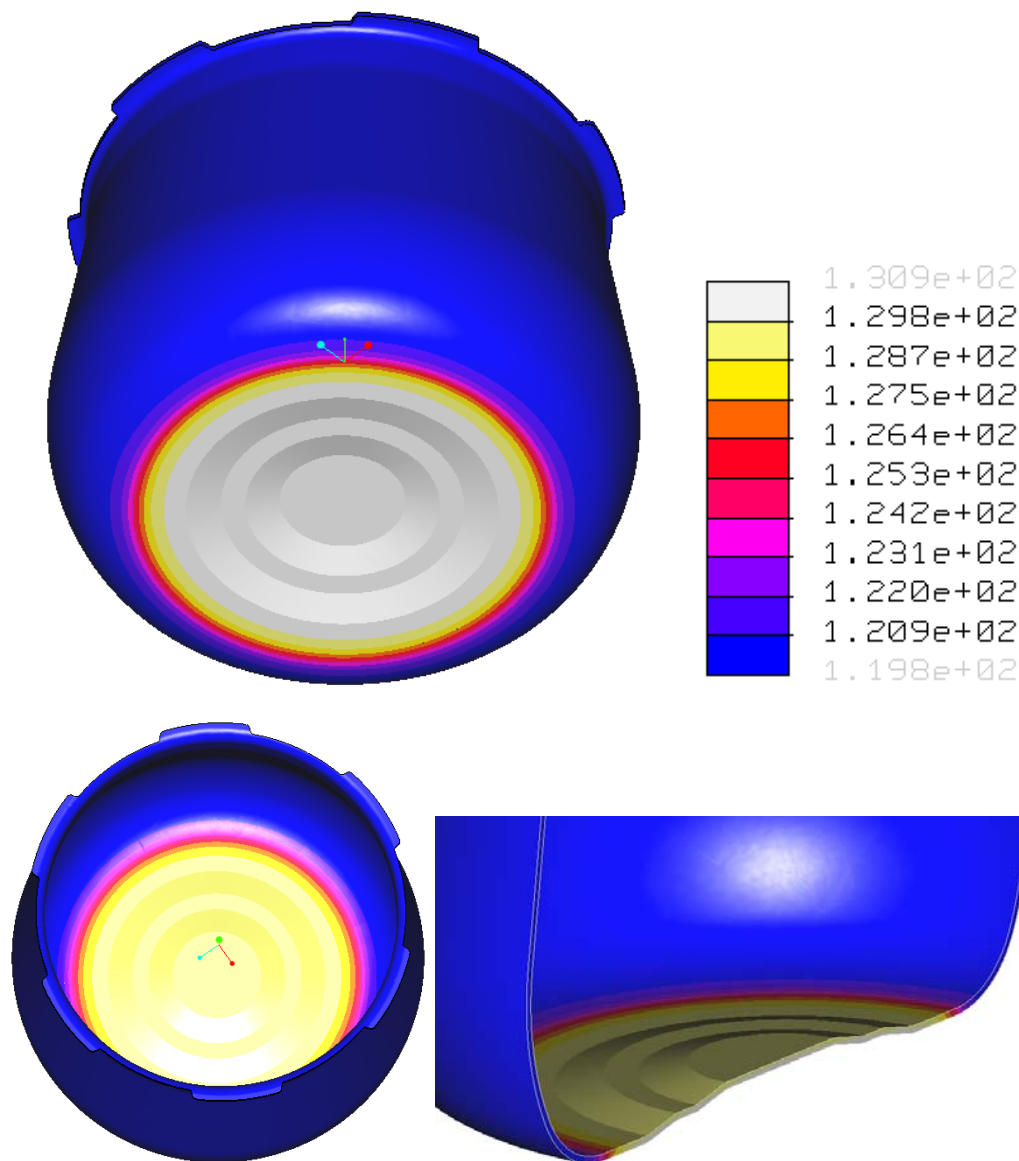
En el procesamiento se mostró en la tabla 11, los resultados de las tres variables más importantes a considerar en un estudio térmico que son: la temperatura, los gradientes de temperatura y el flujo de calor. En esta tabla se encontraban los valores máximo y mínimo de la temperatura en el modelo, los gradientes de temperatura y el flujo de calor en las tres direcciones del sistema coordinado y la magnitud resultante.

6.1.1 Resultados de temperatura. La temperatura se encuentra entre un rango de 119,8 °C y 130 °C. La temperatura máxima (130 °C) se encuentra en la superficie inferior externa del recipiente, puesto que ésta es la que se encuentra en contacto con la fuente de calor, que es la parrilla (eléctrica o de gas). En la superficie interior inferior del recipiente se presenta un rango de temperatura entre: 127,5 °C y 129,8 °C, esto se debe, a que la lámina del recipiente es de un espesor muy delgado, y además como ésta es de aluminio, la transferencia de calor por conducción es muy alta, presentando así, una pequeña diferencia de temperaturas entre la superficie inferior externa y la superficie inferior interna. Finalmente, el resto del recipiente presenta una temperatura que se encuentra en un rango de 120,9 °C y 119,8 °C, que se debe al vapor de agua interno que se encuentra a una temperatura de 120 °C, y como se explicó recientemente, debido al espesor y a la

buena conductividad del aluminio, tanto las paredes internas como las externas se encontrarán alrededor de esta temperatura.

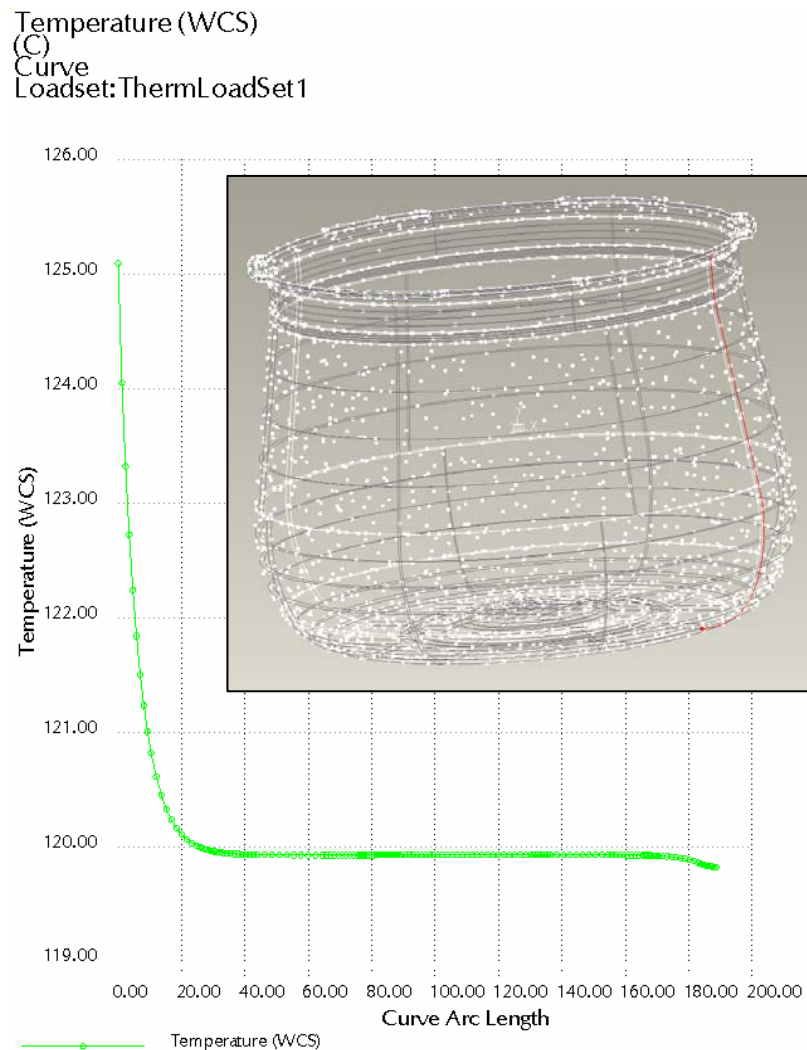
Ilustración 27. Resultados de temperatura en el recipiente

Temperature (WCS)
(C)
Loadset:ThermLoadSet1



Observando las graficas anteriores se muestra la distribución de la temperatura a través de todo el recipiente de presión, a continuación se muestra una curva para visualizar el decrecimiento de la temperatura desde la zona inferior hasta la zona superior. La gráfica verde muestra la temperatura de la curva roja que se encuentra en la pared externa del recipiente. Se puede observar que cuando la curva roja sobrepasa la superficie inferior, inmediatamente la temperatura tiende a estabilizarse en toda la pared externa, y al final, en la región superior, disminuye un poco la temperatura.

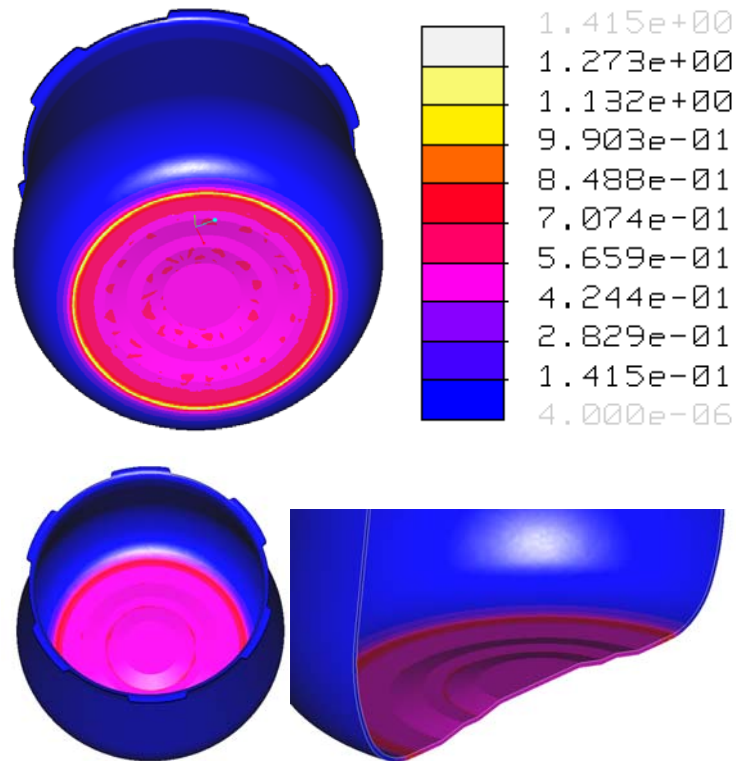
Ilustración 28. Curva de temperatura de las paredes externas del modelo



6.1.2 Resultados de gradientes de temperatura. En estos resultados se percibe lo que se explicó en los resultados anteriores, donde se expresaba que la temperatura de las paredes del recipiente era muy pareja, por lo tanto, los gradientes de temperatura en estas zonas son demasiado bajos (el valor que predomina del gradiente de temperatura en las paredes es $3,865 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/mm}$), como se puede visualizar en la siguiente gráfica. En la zona inferior se presentan gradientes con valores más altos que los anteriores, sin embargo, siguen siendo gradientes muy pequeños que se encuentran dentro de un rango de: $5,50 \times 10^{-1}$ y $5,59 \times 10^{-1} \text{ }^\circ\text{C/mm}$. El valor mayor de los gradientes de temperatura se presenta en la transición entre la superficie inferior externa y las paredes externas del modelo, debido a que las anteriores no se encuentran en contacto con la fuente de calor.

Ilustración 29. Resultados de gradientes de temperatura en el recipiente

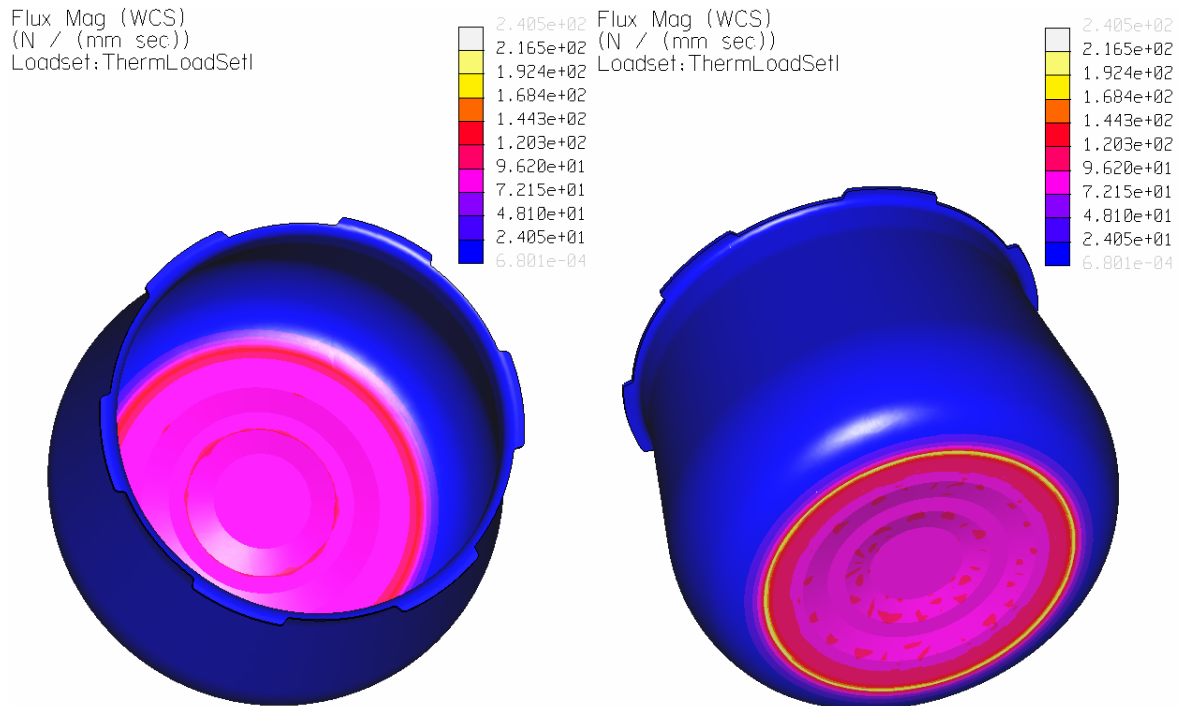
Temp Gradient Mag (WCS)
(C / mm)
Loadset:ThermLoadSet1



6.1.3 Resultados del flujo de calor. Los resultados en este ítem están expresados en unas unidades poco comunes para representar el flujo de calor (N/mm·s), por lo tanto, se convierten a la unidad más conocida (W/m^2) con que se describe éste. El factor de conversión entre la unidad suministrada en los resultados del software y la unidad a la que se desea llegar, es de mil.

El valor promedio de flujo de calor en la zona inferior es de $72150 W/m^2$, mientras que en la mayoría del recipiente, es decir, en las paredes, se presenta un flujo de calor de $680 W/m^2$.

Ilustración 30. Resultados de flujo de calor en el recipiente



6.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTRUCTURAL

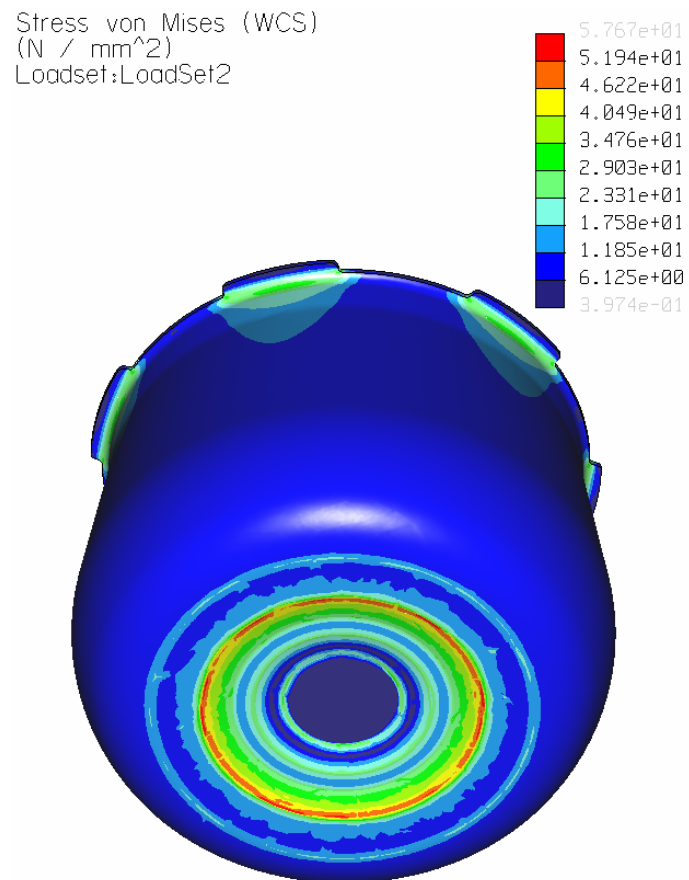
6.2.1 Esfuerzos Von Mises. Es un criterio de fluencia ampliamente aceptado para materiales isotrópicos dúctiles que se basa en los conceptos de energía y se utiliza con frecuencia en aplicaciones de diseño.

La fluencia es la zona límite a partir de la cual el material se comienza a deformar plásticamente. Ésta ocurre cuando los esfuerzos presentes en un material superan el esfuerzo de cedencia del mismo.

Para el caso del recipiente, el esfuerzo de cedencia del material bajo estudio se presentó en capítulos anteriores. Su valor teórico es 8000 psi (55,158 MPa) y calculado mediante ensayos presentó un valor promedio de 60, 94 MPa, el cual, es superior al valor teórico, y esto se demostró con las tres probetas ensayadas. El esfuerzo de cedencia que se introdujo en el software CAE fue el valor real de éste.

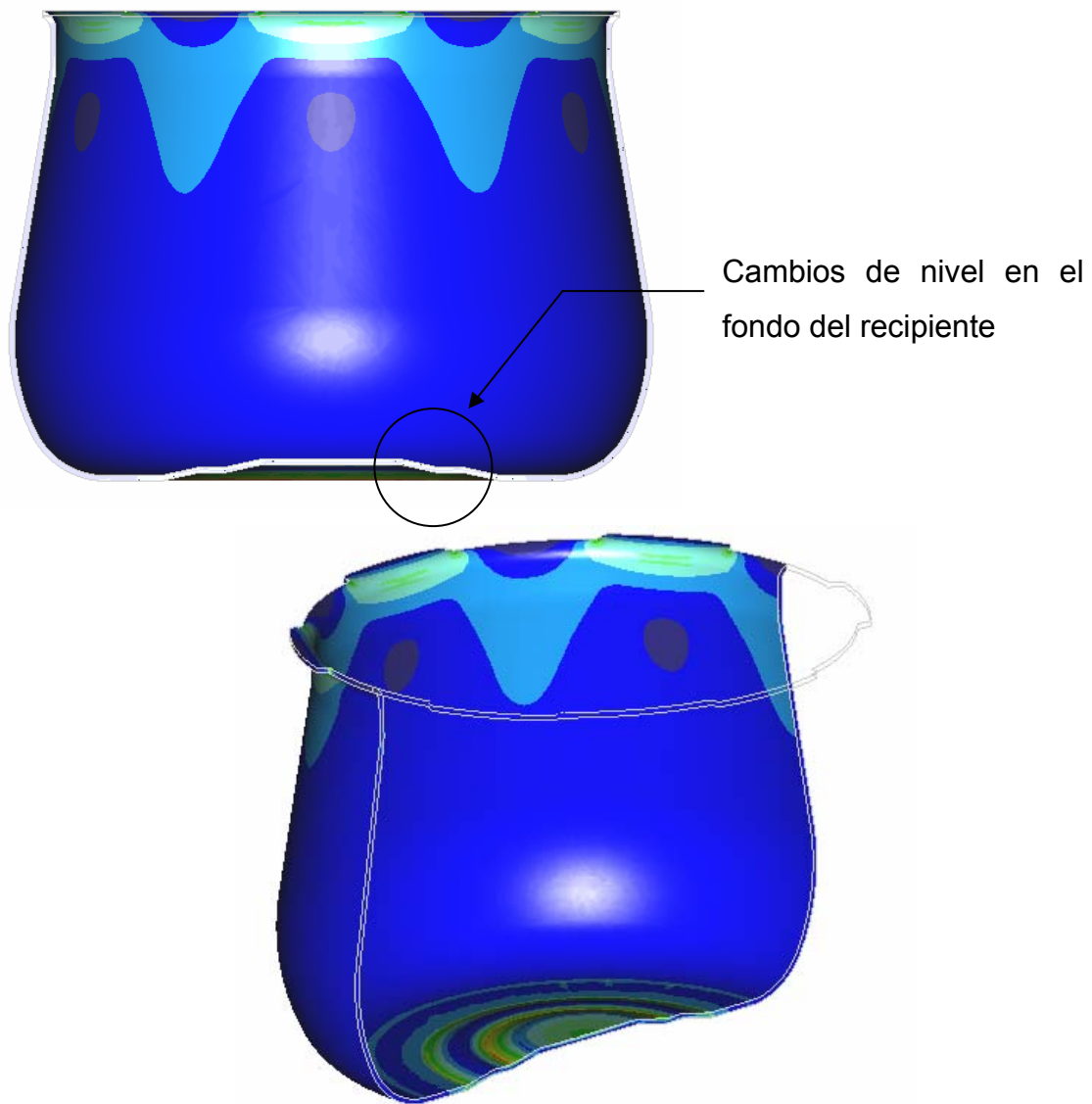
A continuación se muestra en la ilustración los esfuerzos de Von Mises calculados para el recipiente de presión.

Ilustración 31. Esfuerzos Von Mises en el recipiente.



Como se aprecia en la anterior ilustración, la zona de mayor esfuerzo se encuentra en el fondo del recipiente en los lugares donde cambia de nivel. Esto se debe, a la concentración de esfuerzos que se presenta en los cambios bruscos de nivel a nivel, puesto que éstos son un obstáculo para el flujo de energía.

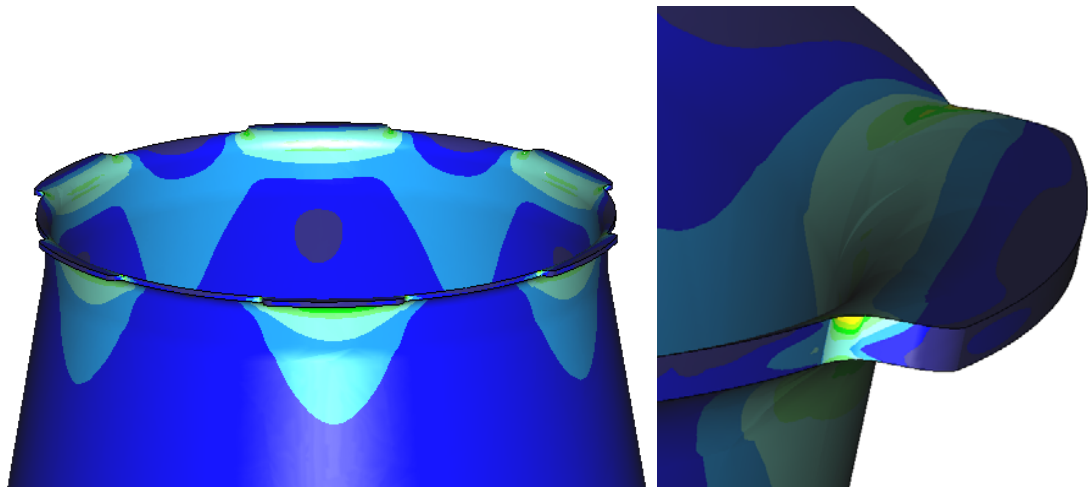
Ilustración 32. Esfuerzos máximos en el fondo del recipiente



Por otra parte, en las paredes del recipiente se presentan pequeños esfuerzos comparados con los del fondo de éste y se encuentran en un rango de: 6MPa a 11MPa, exceptuando las zonas aledañas a las pestañas, donde se incrementan un poco los esfuerzos debido a la fuerza de contacto que ocurre con las pestañas de la tapa. En esta región los esfuerzos oscilan alrededor de: 11 MPa a 30 MPa. Por la misma razón anterior, en el radio que está entre el borde y los pliegues del

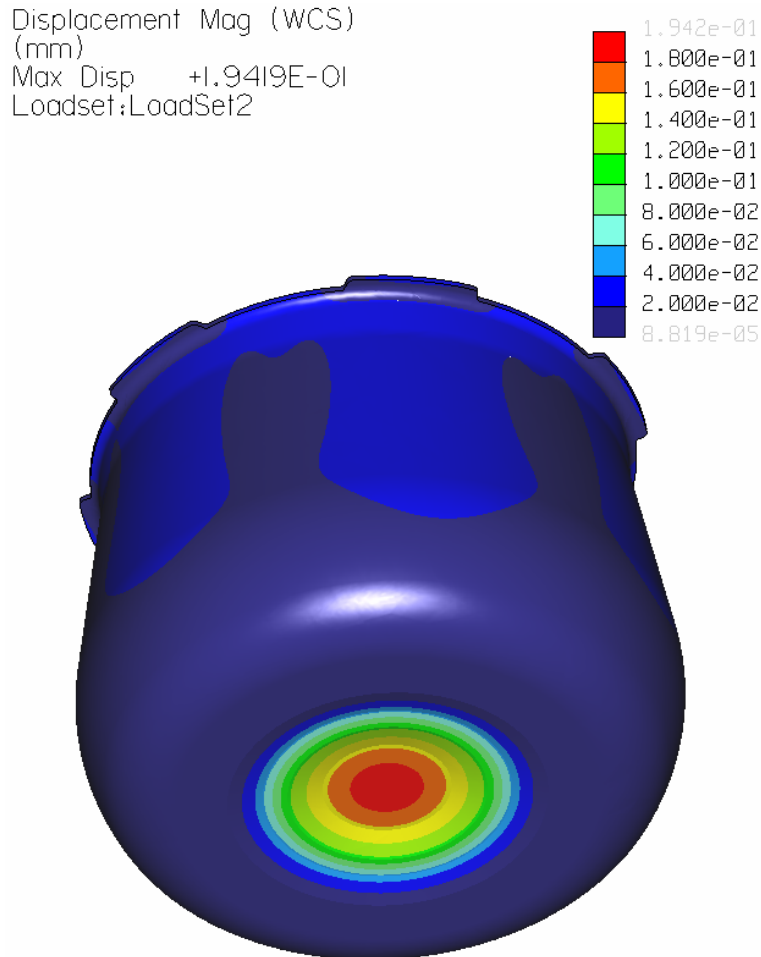
recipiente, se presentan también unos esfuerzos con valores altos, que están entre: 30 MPa y 45MPa, siendo los esfuerzos más altos después de los localizados en el fondo.

Ilustración 33. Esfuerzos en las paredes y pliegues del recipiente



6.2.1 Desplazamientos. Todos los desplazamientos presentes en el recipiente están por debajo de 1 mm. y se encuentran en un rango de $8,82 \times 10^{-5}$ mm. a 0,194 mm., ubicándose el máximo en todo el centro de la superficie inferior del recipiente.

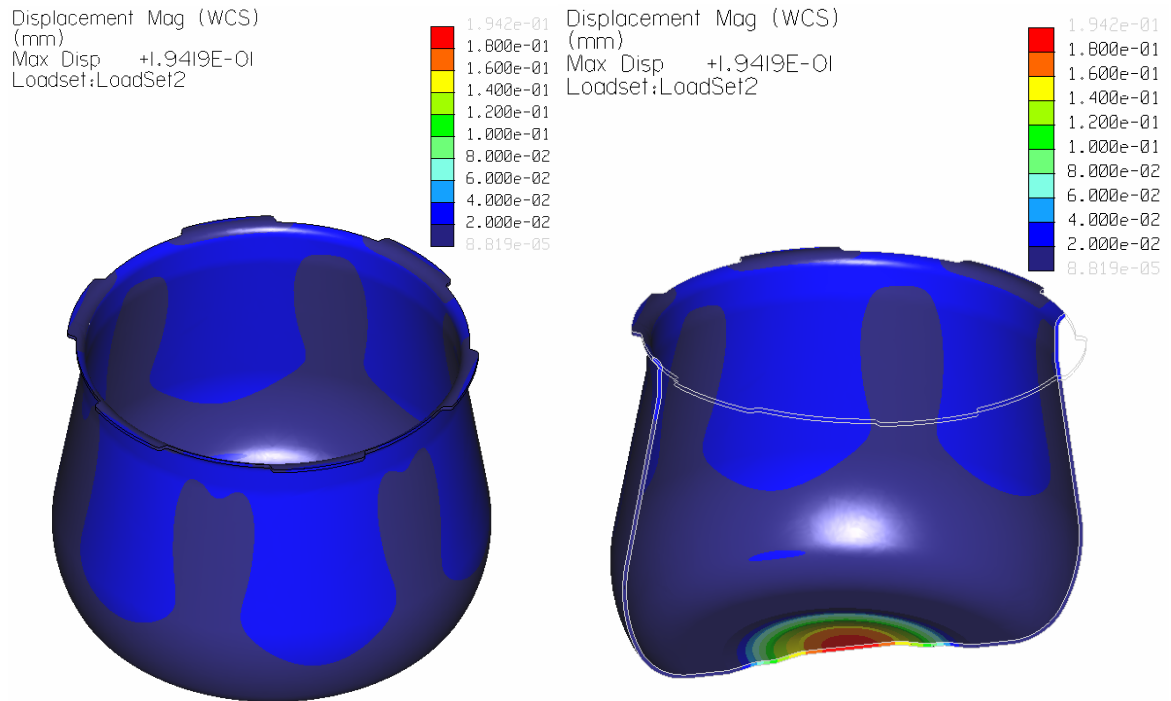
Ilustración 34. Desplazamientos en el recipiente



La presión interna del recipiente ocurre en todas las direcciones, y tanto las componentes en la dirección X como en la dirección Z , se contrarrestan, por lo tanto, el modelo permanece en equilibrio en estas direcciones y por eso se visualiza en la gráfica de resultados que los desplazamientos más pequeños ocurren en las paredes del recipiente. Caso contrario ocurre con el fondo, las componentes en X y Z se anulan, pero la componente Y de la presión genera una fuerza que ocasiona los mayores desplazamientos en esta zona. Aunque este desplazamiento, ocurre en los dos anillos interiores del fondo, puesto que el

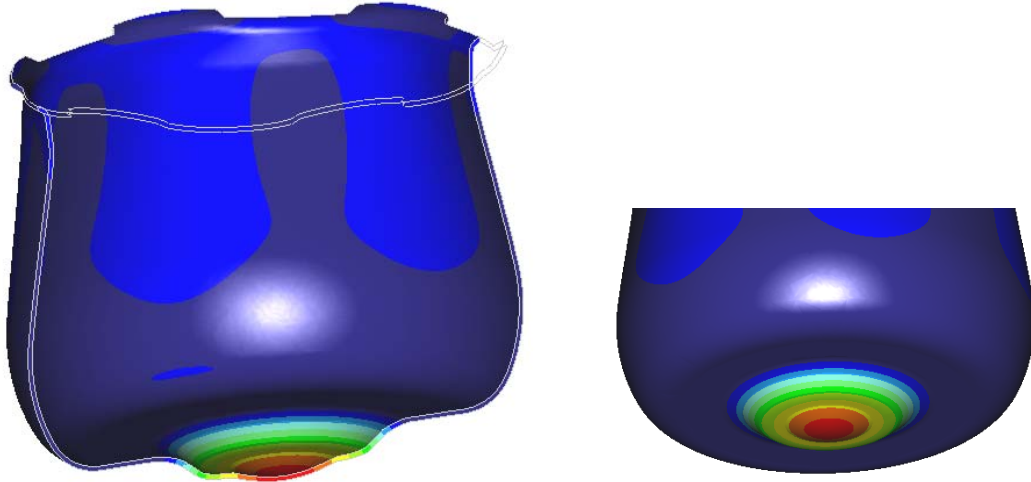
tercero, el más externo, se encuentra apoyado sobre la parrilla, lo que impide su desplazamiento en la dirección vertical.

Ilustración 35. Desplazamiento máximo del recipiente



Para una mayor ilustración del comportamiento del recipiente ante las diferentes cargas a las que se somete, a continuación se procede a mostrar como serían los desplazamientos del modelo, pudiendo visualizar el desplazamiento del fondo hacia abajo como se explicó anteriormente, y el desplazamiento de los pliegues hacia arriba debido a la fuerza de contacto entre los pliegues de la tapa y del recipiente.

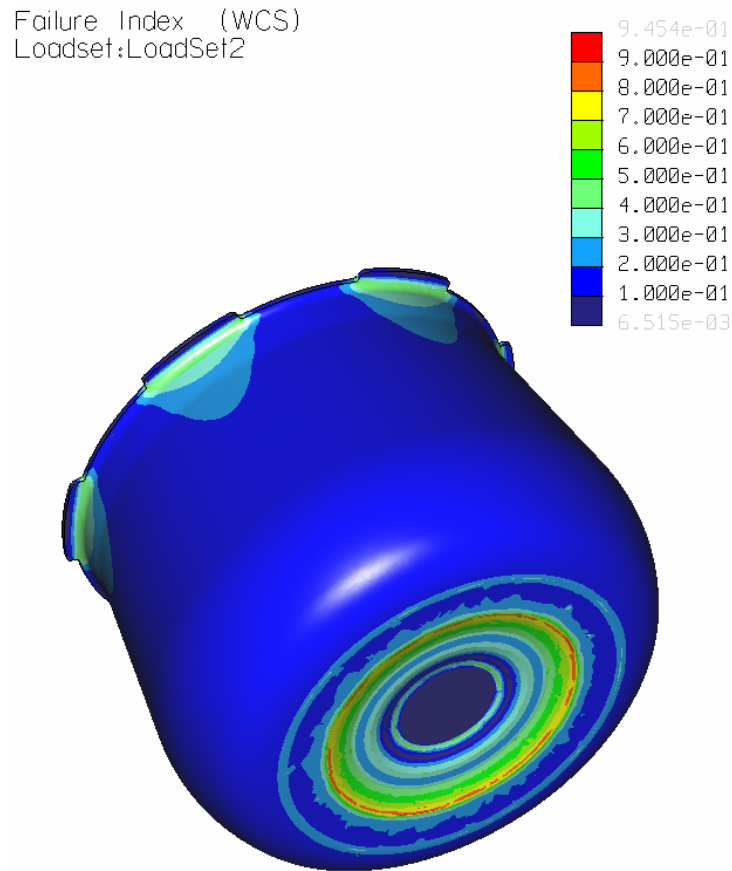
Ilustración 36. Desplazamientos en un corte del recipiente



6.2.4. Índice de falla (Failure index). Este resultado en el estudio estático determina únicamente si el recipiente falla o no falla. El criterio de falla lo determina el esfuerzo de cedencia, ya que para el software, cuando los esfuerzos calculados superan el esfuerzo de cedencia se considera que ha fallado, aunque esto en realidad no es cierto, ya que cuando el material supera el esfuerzo de cedencia sobrepasa la zona elástica y entra en la zona plástica, donde hay una deformación plástica pero no se ha fracturado el material. La fractura ocurre cuando los esfuerzos son superiores al esfuerzo máximo.

El recipiente presenta un índice de falla inferior a la unidad (0,945), lo que indica que aún el material no ha entrado en la zona plástica y toda su deformación será recuperable cuando se remuevan las cargas. Para el software el material ha fallado cuando el índice de falla es igual a la unidad, o si la sobrepasa.

Ilustración 37. Índice de falla del recipiente.

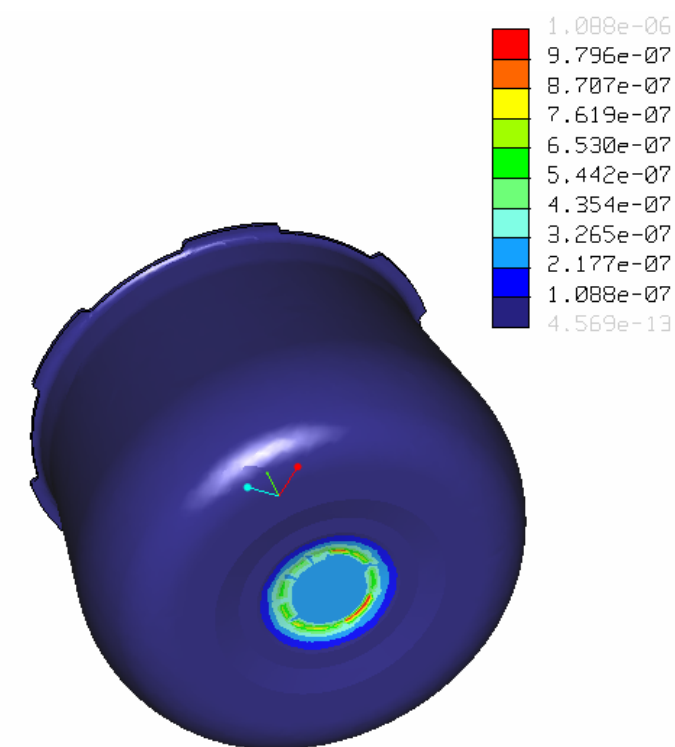


6.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO ESTÁTICO REALIZADO CON LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA DEL ESTUDIO TÉRMICO.

Cuando se realiza el estudio térmico se obtiene la distribución de temperaturas en el modelo, sin embargo, es importante analizar, como estas temperaturas afectan la estructura del modelo, por lo tanto se procedió con dicho estudio y sus resultados fueron expuestos en la tabla 13.

Los esfuerzos generados en este estudio son esfuerzos despreciables con respecto a los esfuerzos que se generan en el estudio estático, debido a la presión interna y la fuerza en los pliegues. Como se observa en la siguiente gráfica se tiene esfuerzos entre: $4,569 \times 10^{-13}$ a $1,088 \times 10^{-6}$ MPa, mientras que en el estudio estático anterior, se tenían esfuerzos cercanos al esfuerzo de cedencia del material. Por ende, con esto se puede concluir que un análisis combinado arrojaría prácticamente los mismos esfuerzos que arroja el estudio estático por fuerzas y presiones.

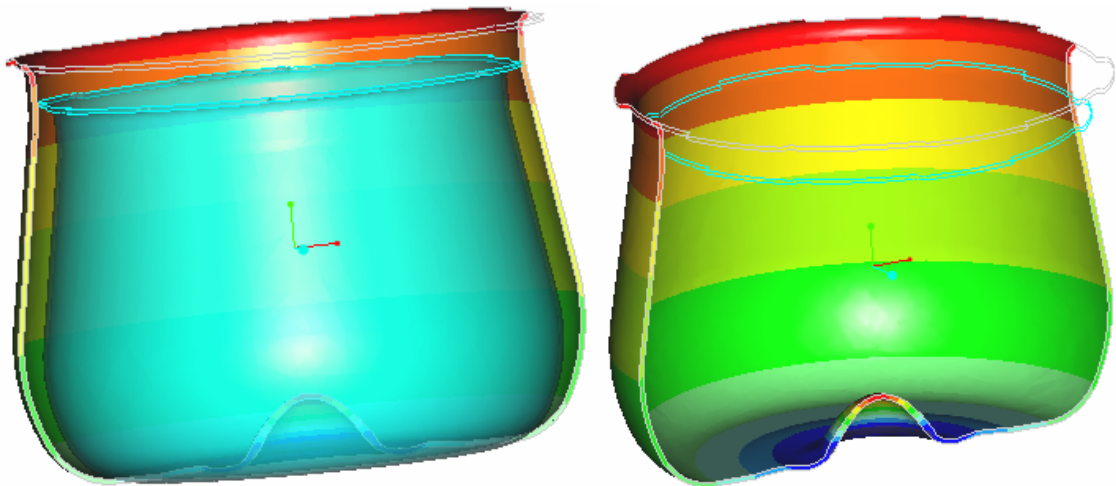
Ilustración 38. Esfuerzos de Von Mises causado por la temperatura



En cuanto a los desplazamientos del modelo, estos ocurren en todas las direcciones, y esto se debe, a que el recipiente se dilata con el cambio de temperatura. En la siguiente ilustración se observa como ocurren los

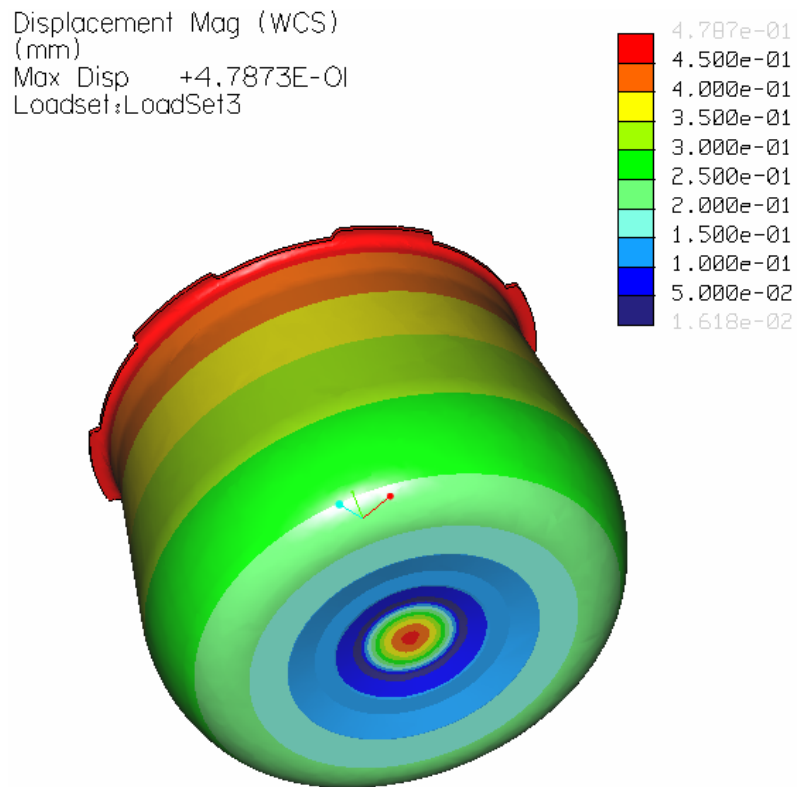
desplazamientos del modelo, expandiéndose en las diferentes direcciones. Sin embargo, es importante aclarar que en la superficie central del fondo se presenta una inconsistencia en el desplazamiento, ya que ésta fue restringida en el preprocesamiento en las direcciones X y Z, lo cual, no ocurre en la vida real. Como se explicó en capítulos anteriores, esta restricción se realizó para poder proceder a realizar los cálculos en los estudios estáticos, y esta superficie se seleccionó, debido a que ésta es la que menos interferencia iba a presentar en los resultados. No obstante, en este estudio si se afectan los resultados, ya que esta superficie no se puede expandir en las direcciones X y Z, por las limitaciones de movimiento, y tiene como única vía libre de expansión la dirección vertical (Y), lo cual no es cierto. En la ilustración, el modelo azul representa el recipiente antes de ser sometido a funcionamiento, mientras que el coloreado corresponde al recipiente con desplazamientos por causa de la distribución de temperatura.

Ilustración 39. Simulación de los desplazamientos



Todos los desplazamientos que ocurren en el modelo se encuentran por debajo de 1mm. Los desplazamientos van aumentando desde la parte inferior de las paredes hasta la parte superior.

Ilustración 40. Desplazamientos por causa de la temperatura



Los desplazamientos en el anillo exterior del fondo deben ser muy pequeños, ya que esta superficie se encuentra limitada por el apoyo en la parrilla.

7. FATIGA

Fatiga se puede definir como la disminución de la resistencia mecánica de los materiales al someterlos a esfuerzos repetidos. La fatiga se visualiza con el paso del tiempo, puesto, que las cargas variadas a que se somete cualquier componente nunca alcanzan un nivel suficiente como para causar la falla en una simple aplicación.

Es más factible, que la fatiga se ocasione por cargas dinámicas cíclicas que por cargas estáticas. Se requieren menos fuerzas para provocar rotura con cargas dinámicas que con cargas estáticas. La principal razón de esto es que la aparición de grietas y el aumento de éstas, propenden a que el material falle por fatiga, sobretodo cuando éstas con el paso del tiempo alcanzan un tamaño crítico. Por lo tanto, es normal que con cargas dinámicas las grietas aumenten su tamaño en menor tiempo que con cargas estáticas.

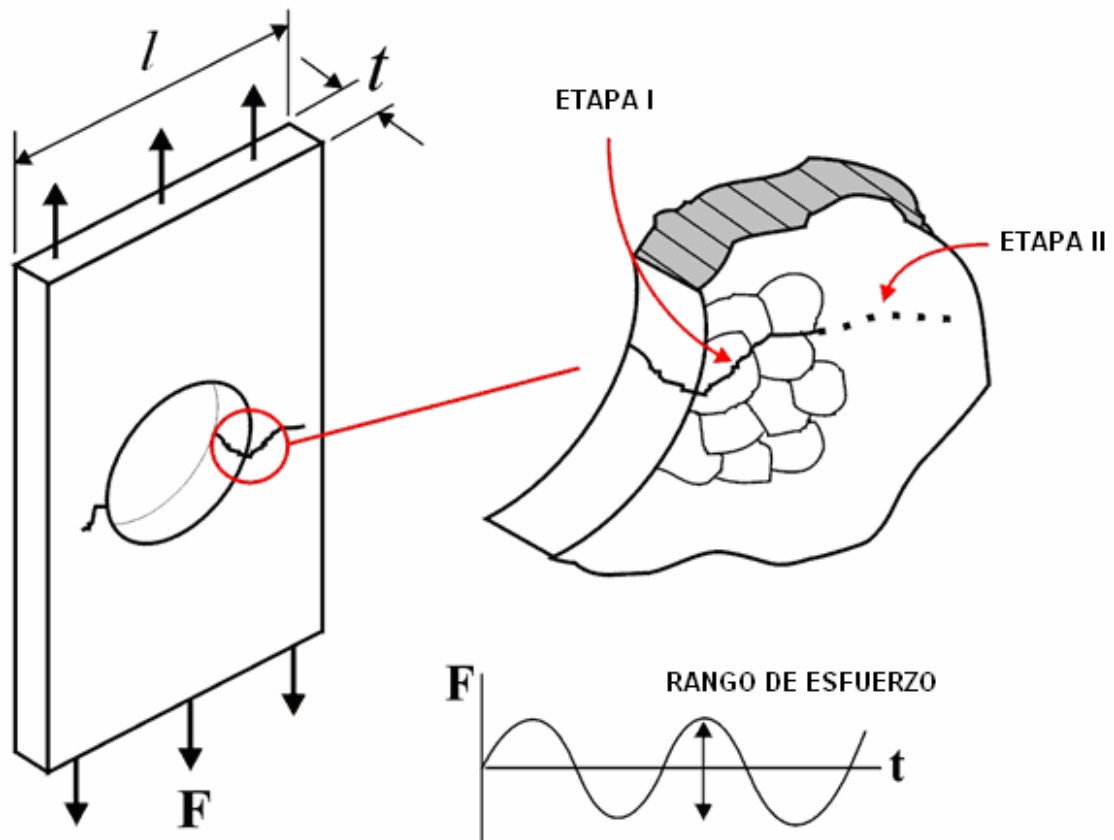
En datos estadísticos, se tiene que la causa entre el 80% y el 90% de las fallas estructurales se debe a la fatiga. Las fallas por fatiga, especialmente en las estructuras, ocurren inadvertidamente, produciendo severos daños y grandes catástrofes.

La vida total de un componente o estructura, se encuentra representado por el tiempo que demora en aparecer una grieta, más el tiempo que necesita ésta, para propagarse por la sección transversal. Por lo tanto, para aumentar el tiempo de vida del artefacto o estructura, se debe:

- Minimizar los defectos iniciales, en especial los defectos de superficie: tener cuidado y proteger superficies lisas antes de ponerlas en servicio.

- Maximizar el tiempo de iniciación: los esfuerzos residuales aparecen por medio de procesos de manufactura o por tratamientos superficiales.
- Maximizar el tiempo de propagación: las propiedades de los sustratos, especialmente las que retardan el crecimiento de las grietas.
- Maximizar la longitud crítica de la grieta: la tenacidad a la fractura es un ingrediente esencial.

Ilustración 41. Aparición y aumento de grietas.



Introducing ProMechanica Fatigue Advisor, PTC Company.

Los factores que influyen en la fatiga son:

- Tipo de carga: normalmente las cargas se encuentran dentro de dos categorías, que pueden ser de: amplitud constante (*Constant Amplitude*) o amplitud variable (*Variable Amplitude*); la primera hace referencia a una variación tal que la secuencia se repite. Los cuatro patrones que más frecuentemente se emplean en la amplitud constante son: completamente alternante ($\sigma_m = 0$), esfuerzo medio diferente de cero, tensión liberada (no hay esfuerzo mínimo y el esfuerzo medio es la mitad del máximo), y compresión liberada (no hay esfuerzo máximo y el esfuerzo medio es la mitad del mínimo).

Ilustración 42. Carga de amplitud constante.

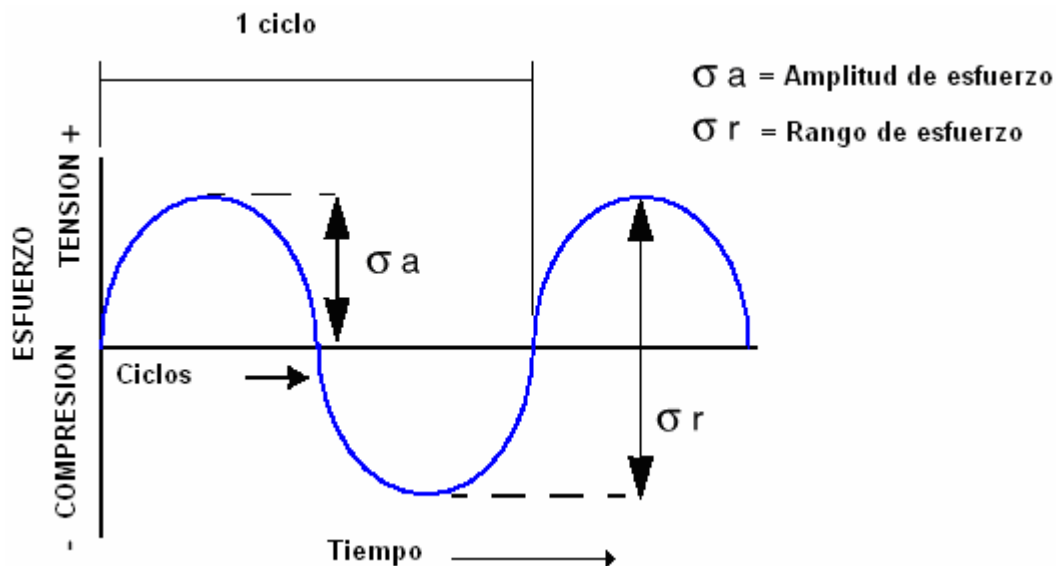
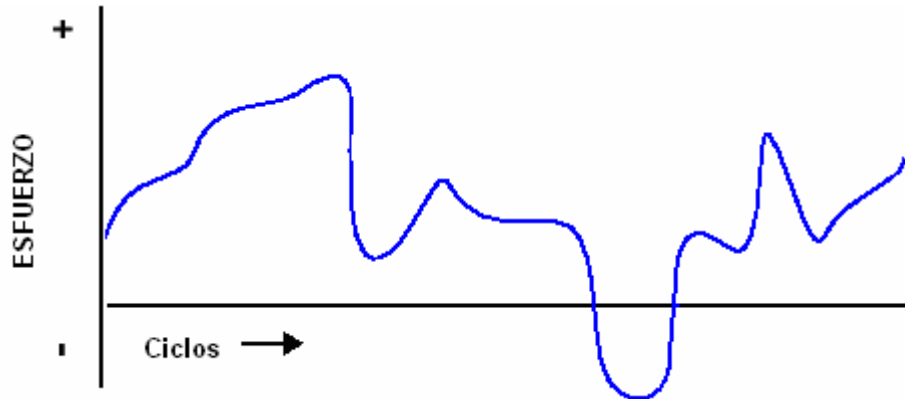


Ilustración 43. Carga de amplitud variable.



Introducing ProMechanica Fatigue Advisor, PTC Company.

- Acabado superficial: entre mejor sea el acabado superficial se disminuyen la presencia de concentradores de esfuerzo, lo cual prolonga la vida del material.
- Tratamientos: los diferentes tratamientos son causantes de que la fatiga se presente en una menor o mayor cantidad de tiempo. Por ejemplo los tratamientos de endurecimiento superficial retardan la aparición de grietas, por lo tanto, evita y prorroga la falla del material por fatiga, mediante el deslizamiento de dislocaciones dificultando el movimiento de estas últimas.

Las aleaciones no ferrosas, como el aluminio, no presentan límite a la fatiga. El límite a la fatiga (S_e') indica el mayor esfuerzo fluctuante que no causará la falla para un número infinito de ciclos. Para el aluminio, la resistencia a la fatiga continúa disminuyendo con el incremento de los ciclos. De esta manera, la fatiga ocurrirá sin importar la amplitud de los esfuerzos. La resistencia a la fatiga para estos materiales es el nivel de esfuerzo en el cual se presenta la falla para un

número determinado de ciclos, por ejemplo 10^5 ciclos. Como las aleaciones de aluminio no presentan un límite de fatiga, éstas no pueden ser diseñadas para un tiempo de vida infinito, por lo tanto requiere, que el diseñador estime un tiempo de vida para el producto.

7.1 FATIGUE ADVISOR

Este modulo de PROENGINEER® permite: entender claramente la durabilidad del producto, y visualizar y comprender el impacto que tiene los cambios de diseño sobre la vida del componente. Además, provee herramientas que permiten un diseño con durabilidad y calidad, ya que permite estimar el inicio de la grieta.

Es un módulo optimizado, en el cual se puede obtener una rápida indicación sobre la sensibilidad del modelo a la fatiga, sin tener que ingresar una serie de datos que normalmente se requieren en la solución de estos problemas. La información solicitada al usuario es muy sencilla y el resto de información la tiene el software por defecto.

Es fácil para el usuario poner a evaluar al modelo bajo el criterio de fatiga. Primero debe cerciorarse que el tipo de material seleccionado sea isotrópico, ya que únicamente se pueden emplear este tipo de materiales para los análisis de fatiga. Después de esto se tienen dos opciones: importar las propiedades de fatiga si se encuentran disponibles; o simplemente necesita adicionar en las propiedades del material los siguientes datos: esfuerzo último, tipo de material, acabado superficial y el factor de reducción de la resistencia a la fatiga (K_f), que debe ser mayor que la unidad, ya que se emplea para reducir el límite de duración, al informar concentraciones de esfuerzos no modeladas, como éstas encontradas en soldaduras. Luego se debe realizar un análisis estático donde se simula un ciclo de actividad del producto. Finalmente, se realiza el análisis de fatiga donde se deben tener en cuenta: los ciclos de vida para los cuales fue diseñado el producto,

el tipo de carga (constante o variable), y el tipo de amplitud. Respecto al tipo de amplitud, ésta depende del tipo de carga, ya que si es constante pueden ser: pico-pico (peak-peak), cero-pico (zero-peak), o definida por el usuario (user-defined); o si es variable puede ser: elaborada manualmente o importada de un archivo.

A continuación se muestra en un diagrama, el flujo de trabajo de Fatigue Advisor.

Ilustración 44. Flujo de trabajo de Fatigue Advisor



Introducing ProMechanica Fatigue Advisor, PTC Company

Realizado el estudio, se pueden visualizar los siguientes resultados: vida del producto, daños ocasionados, factor de seguridad y confiabilidad en la vida del producto. Esta última, la confiabilidad de la vida del producto, viene dada por una relación entre la simulación de la vida del componente contra la vida deseada por el diseñador.

De cada uno de los resultados que se mencionaron anteriormente se pueden concluir diferentes aspectos. En el primero, se predice acertadamente la vida del producto mediante la determinación del número de ciclos que se requieren para

fallar. En el segundo, resultado de los daños ocasionados, se expresa el daño del producto como la relación entre el número de ciclos hasta la falla acumulativa y el número total de ciclos para fallar; un valor mayor que la unidad indica falla del artefacto, mientras que un valor, por ejemplo de 0.5, indica un 50% en la vida útil del modelo. El tercer resultado que se puede presentar, permite observar los resultados del factor de seguridad para mirar hasta que punto puede ser incrementada la amplitud de la carga sin comprometer la vida para la cual fue diseñado el producto; cuando la vida de fatiga para el modelo, es mayor que la vida para la cual fue diseñado, el software cumple con realizar un cálculo para determinar un factor de seguridad permisible para la entrada de las cargas. Finalmente, el último resultado disponible representa la confiabilidad de la vida útil como un gráfico coloreado mostrando la relación entre la vida calculada y el tiempo de vida diseñado; entre mayor sea la confiabilidad mucho mejor para los fabricantes y el producto; en la escala de los resultados se tiene contemplado la calificación, entre un rango de uno a tres, por lo tanto, valores que se encuentren debajo de la unidad indican falla, mientras que valores que sean superiores a tres expresan una adecuada confiabilidad en la vida que se estimó en el diseño. Como consecuencia de esto, el gráfico coloreado da una visión general de donde el modelo fallará inicialmente y donde el modelo fallará finalmente o donde resistirá más ciclos de los estimados. En el gráfico el rojo indica una confiabilidad de 0 ciclos adicionales según el dato entrado por el usuario, como vida de diseño. El color amarillo indica una confiabilidad de vida, desde una a tres veces más la vida deseada por el diseñador. Esa diferencia entre esos cálculos es considerado la vida marginal. Y por último, el verde indica cualquier número de ciclos adicionales por encima de la vida marginal del producto, es decir, la vida de éste es superior al triple de ciclos para el cual se diseñó.

El recipiente de presión se diseñó para 2000 ciclos de vida y en la tabla que se muestra a continuación, se listan todos los datos del producto necesarios para realizarle un análisis de fatiga.

Tabla 14. Información requerida para el análisis de fatiga

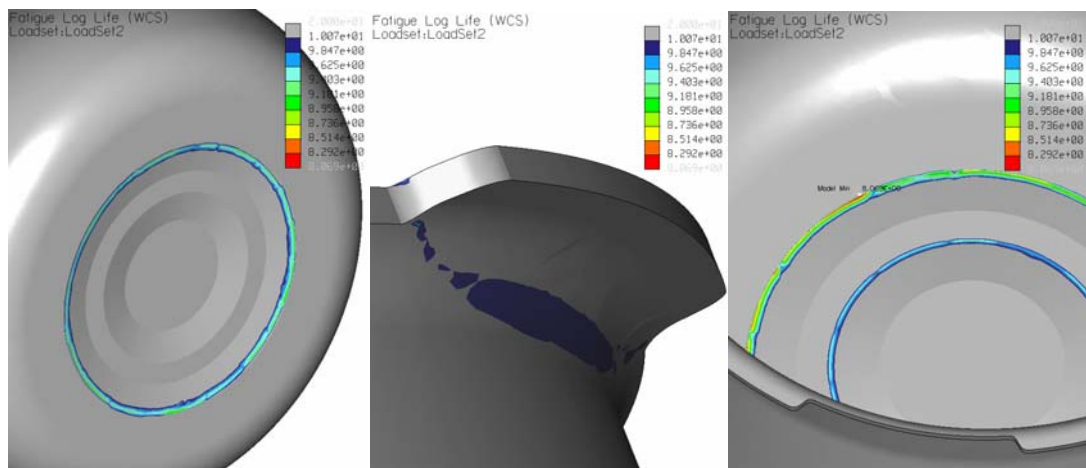
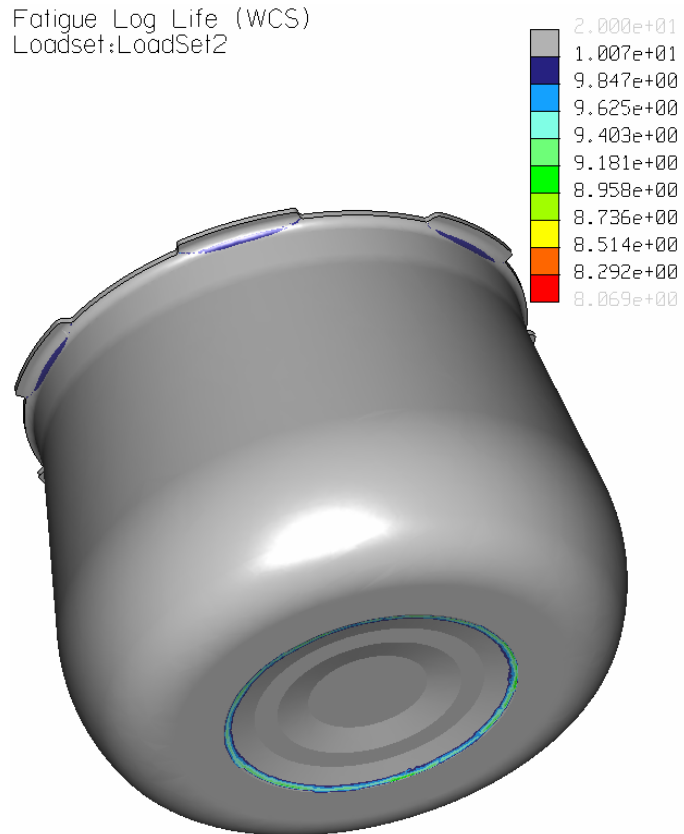
DATOS	VALORES	OBSERVACIONES
Dirección de las propiedades del material	isotrópico	Propiedades iguales en todas las direcciones
Resistencia última	24315 psi 167,64 MPa	-
Tipo de material	Aleación de aluminio	-
Acabado superficial	Pulido	Excelente acabado
Factor de reducción de la resistencia a la fatiga (Kf)	1	Se escoge este valor para que no se modifique la resistencia a la fatiga, ya que no hay concentraciones de esfuerzos no modeladas
Ciclos de vida	2000	Seleccionados por el diseñador
Tipo de amplitud	Constante	-
Tipo de carga	Tensión liberada (<i>zero-peak</i>)	-

7.1.1 Análisis de los resultados del estudio de fatiga

- Vida del producto (*Log Life*): los resultados del estudio de fatiga, arrojan el valor acertado de la vida del producto. La vida del recipiente supera los ciclos deseados por el diseñador, ya que se requiere como mínimo la aplicación de 8.069 ciclos para que falle en la superficie inferior. Sin embargo, el resto del modelo demuestra que puede llegar hasta 20.000

ciclos de vida para presentar el inicio de una grieta, exceptuando el lugar de doblez interno de los pliegues y los radios de éstos, como se muestra en las siguientes ilustraciones.

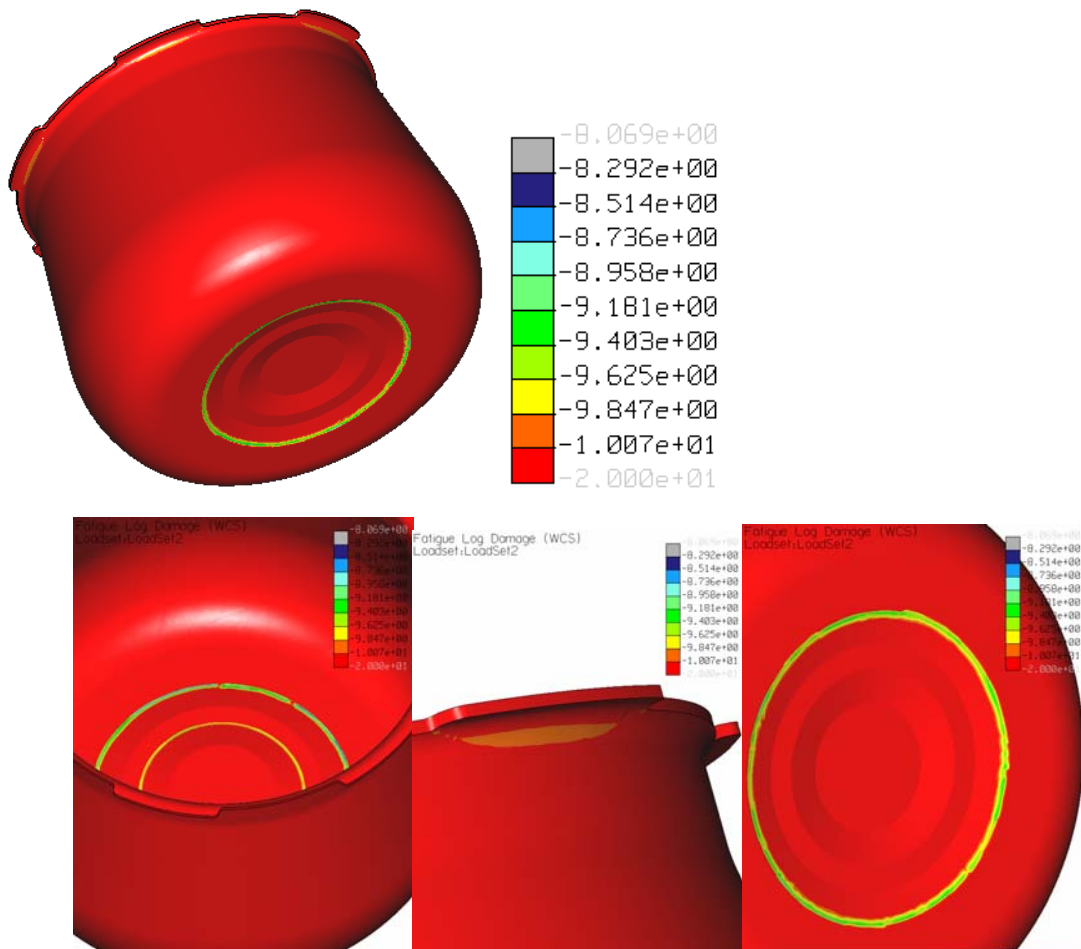
Ilustración 45. Vida del producto del recipiente



- Daños ocasionados (*Log Damage*): los resultados adquiridos en el análisis de fatiga, expresan que el recipiente no ha presentado síntomas de daños en los 2000 ciclos de vida proporcionados por el diseñador. Como se expresó anteriormente, la unidad indica falla en el producto y números decimales entre cero y uno, significan el porcentaje en la vida útil del modelo, sin embargo, para el caso del recipiente todas las regiones presentaron números negativos, lo cual demuestra que ni siquiera se ha afectado el mínimo de porcentaje en la vida útil de éste.

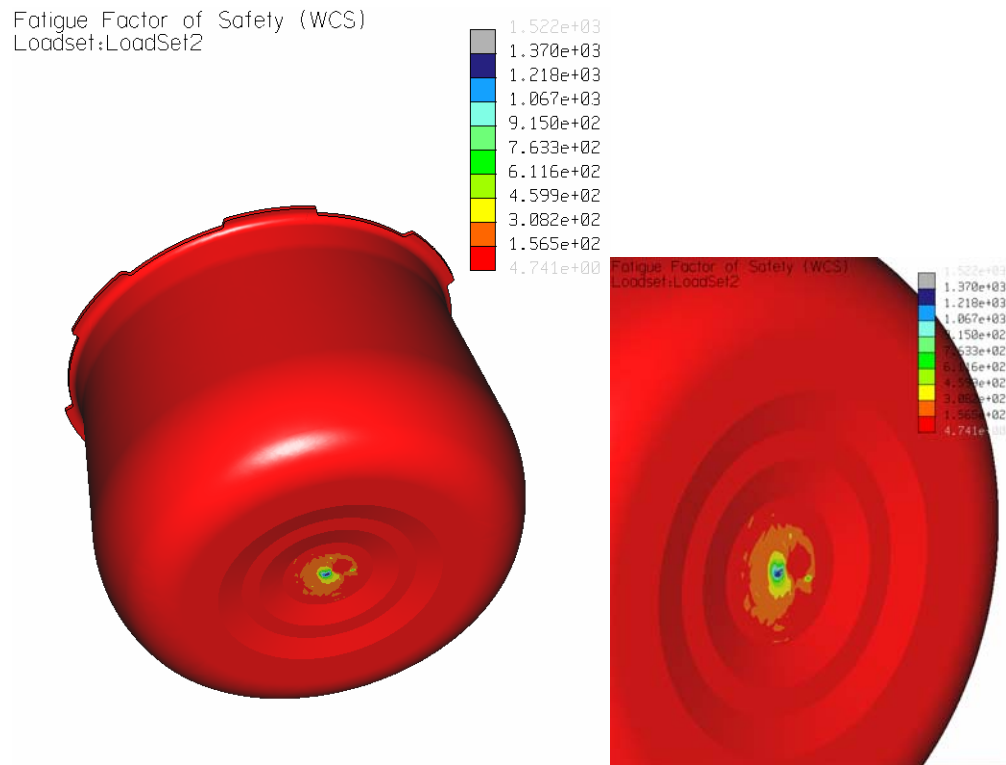
Ilustración 46. Daños ocasionados en el recipiente

Fatigue Log Damage (WCS)
Loadset:LoadSet2



- Factor de seguridad (Factor of safety): después de observar los resultados obtenidos en el análisis y la gráfica resultante, se deduce que la amplitud de la carga a la que trabaja el recipiente de presión es supremamente segura, ya que ésta puede ser incrementada sin comprometer la vida para el cual fue diseñado el producto. El rango de incremento de la carga se encuentra entre 4,74 y 1.522 veces la amplitud de la carga, sin embargo, este valor máximo únicamente aplica en una pequeña región de la olla (zona inferior), por lo cual, en una interpretación adecuada de resultados se debe seleccionar el valor mínimo (4, 74 veces), ya que cumple con todas las regiones del recipiente.

Ilustración 47. Factor de seguridad en el recipiente

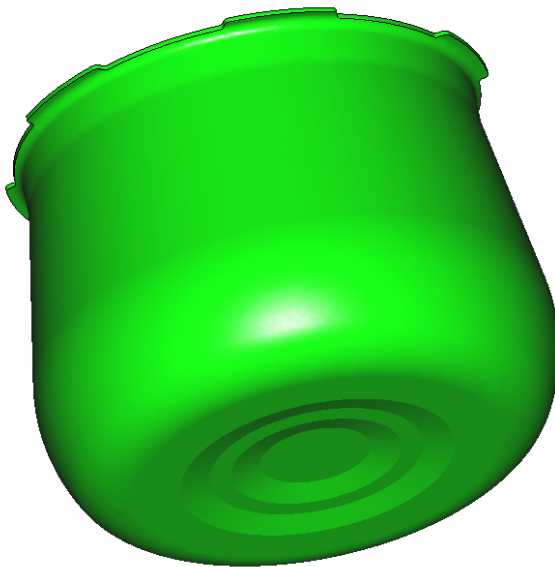


- Confiabilidad de vida (*Confidence of life*): analizando los resultados obtenidos, se puede observar en la siguiente ilustración que el recipiente

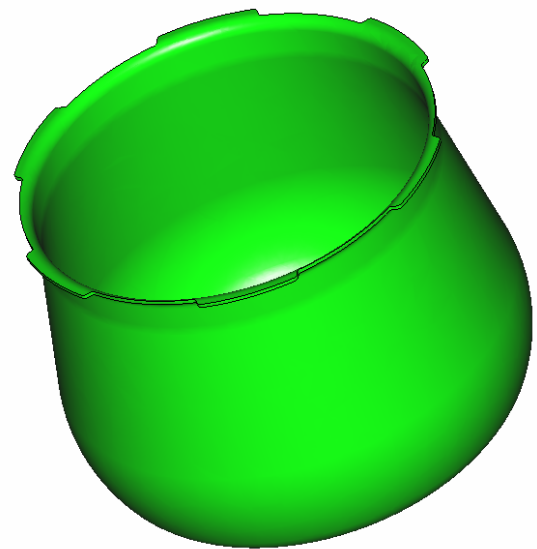
presenta en su totalidad un color verde, que según lo expresado en párrafos anteriores, significa que la vida de éste es superior al triple de ciclos para el cual se diseñó. Por lo tanto, se presenta una alta confiabilidad en la vida del recipiente en cuanto a su funcionamiento, lo cual, es una excelente noticia para el diseñador y el fabricante, que garantiza con certeza su calidad en el mercado.

Ilustración 48. Confiabilidad de vida del recipiente

Fatigue Confidence of Life (WCS)
Loadset:LoadSet2



Fatigue Confidence of Life (WCS)
Loadset:LoadSet2



8. ALTERNATIVAS DE DISEÑO

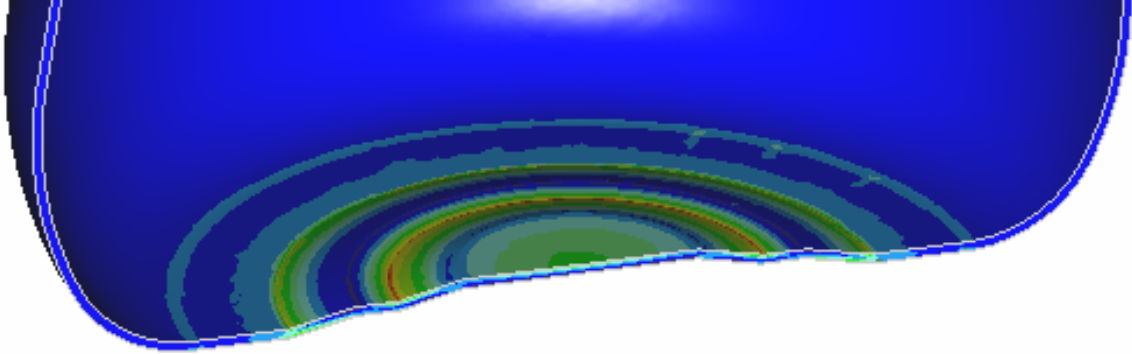
Realizados los diferentes estudios y analizando los resultados obtenidos, se observa que los resultados más críticos en el modelo se obtuvieron en el estudio estático, ya que los esfuerzos que se presentaban se encuentran muy cerca al límite elástico. Los estudios de fatiga y el estático que se realizó por las diferencias de temperatura, arrojan muy buenos resultados para el diseñador y el fabricante. Como consecuencia de esto, es necesario tomar decisiones en el diseño que reduzcan los esfuerzos presentes, y así de esta manera alejarse del límite elástico.

En capítulos anteriores se identificaron las zonas críticas en el modelo, por consiguiente, estas son las regiones en las que se procede a proponer cambios alternos en el diseño del producto.

8.1 PRIMERA ALTERNATIVA DE REDISEÑO

Para esta primera alternativa, el enfoque se realizó esencialmente en la parte inferior del recipiente, que es hasta el momento la zona más crítica, donde se tienen los mayores esfuerzos. En este rediseño, se analizó con sutileza las posibles mejoras que se podrían realizar, llegando a la conclusión que se debía modificar el fondo del recipiente, ya que al ser escalonado, presenta concentraciones de esfuerzos en los quiebres de los escalones, como se observa en la siguiente ilustración.

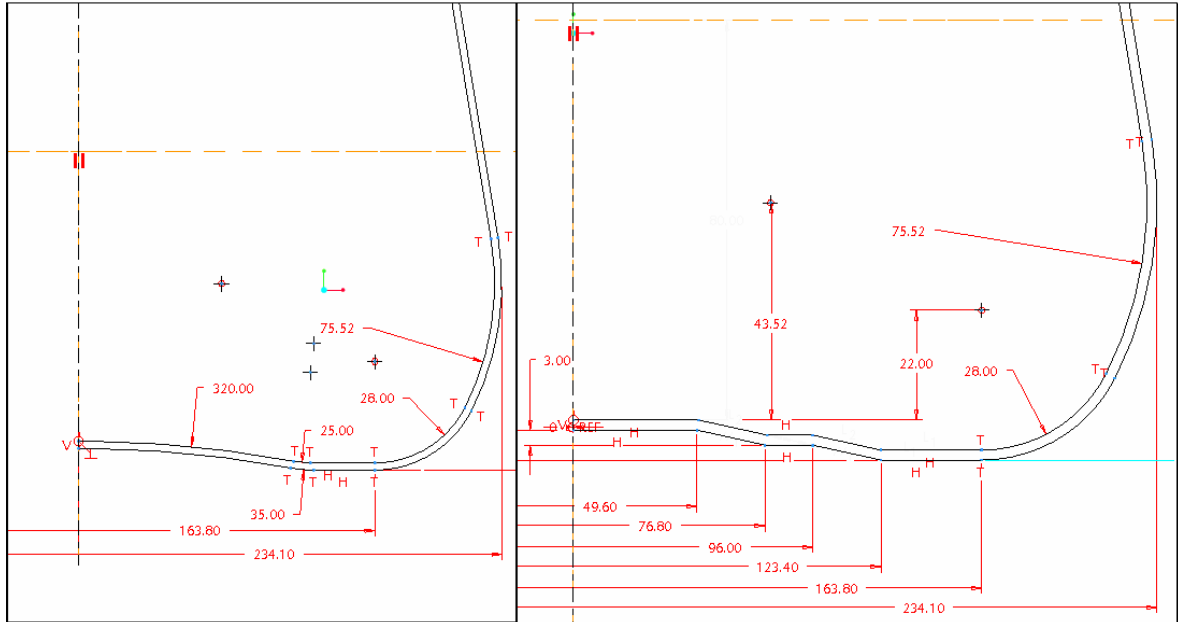
Ilustración 49. Concentración de esfuerzos en el fondo del recipiente



Para mejorar esta influencia de los esfuerzos, se le hizo una reforma al fondo del recipiente, la cual, consiste en eliminar los escalones de éste, buscando de cierta forma una geometría redondeada que cumpliera tanto con las alturas de los escalones como con los diámetros exteriores del recipiente.

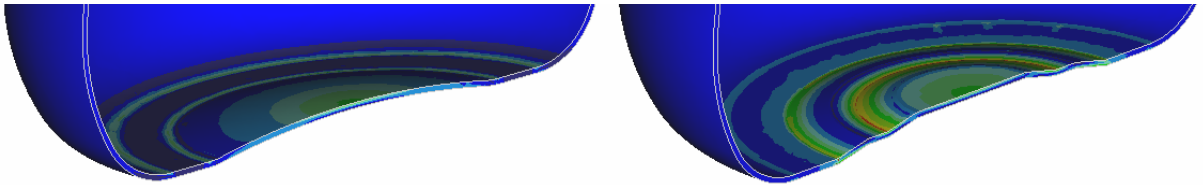
Con esta modificación, se busca suavizar el fondo para aliviar las concentraciones de esfuerzos, y así de esta manera, permitir un mejor flujo de energía. Igualmente, se mejora la estética de la geometría externa del producto.

Ilustración 50. Nueva alternativa de la geometría del fondo



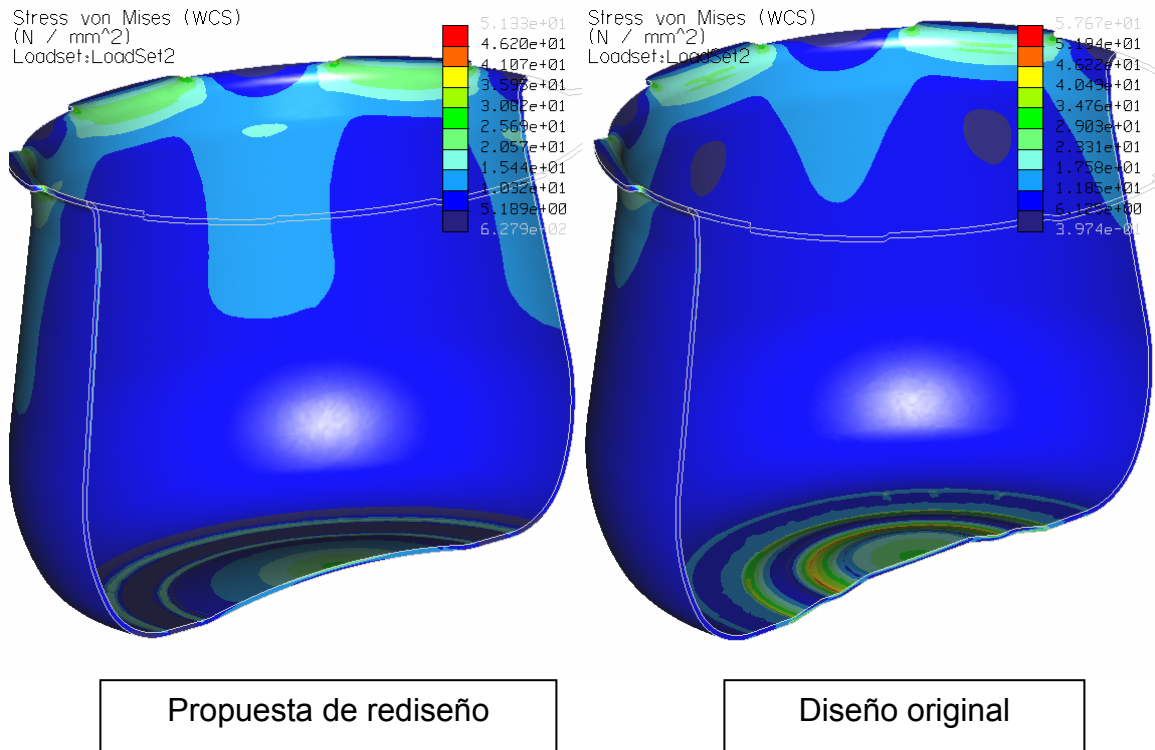
Propuesta de rediseño

Diseño original



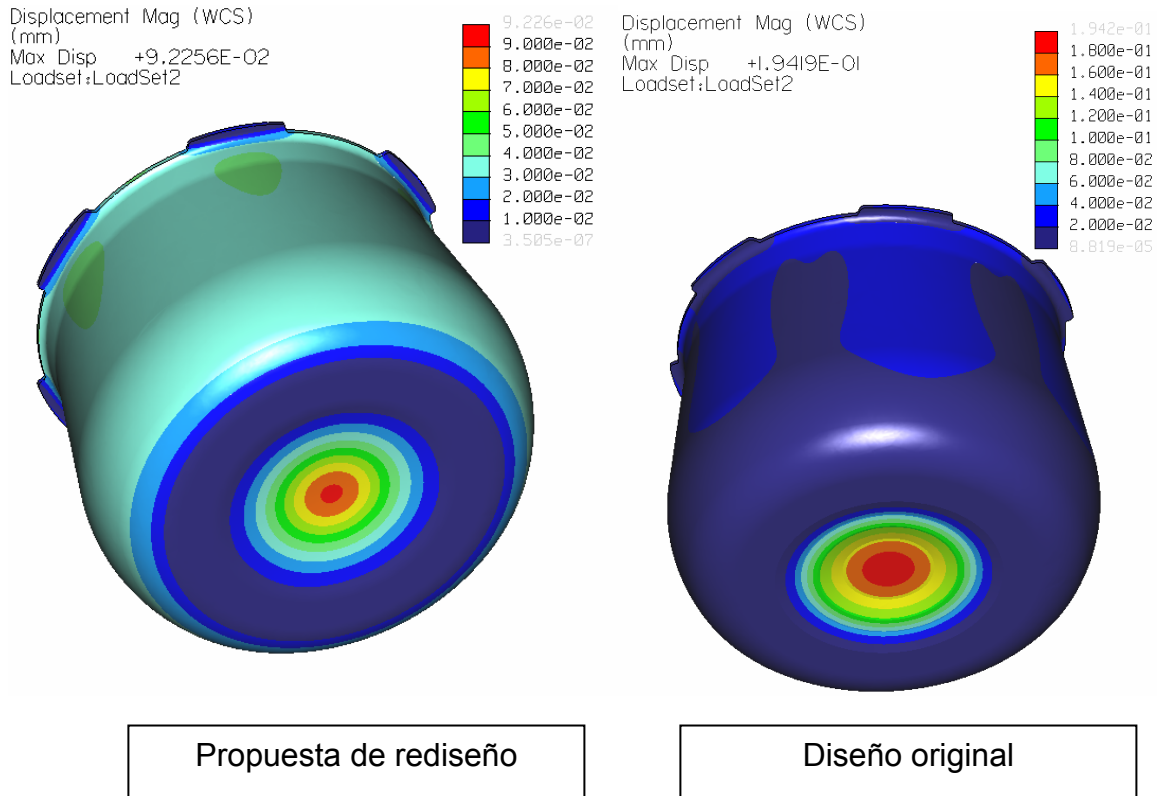
Después de realizar este cambio, se pudo encontrar una mejora significativa en el fondo del recipiente demostrado por los resultados (ver ilustración 51), donde se observa una diferencia entre los esfuerzos máximos del diseño original y la nueva alternativa, de 6,34 MPa, alejándose de esta forma, del esfuerzo de cedencia del material.

Ilustración 51. Paralelo de esfuerzos Von Mises entre el diseño original y la primera propuesta.



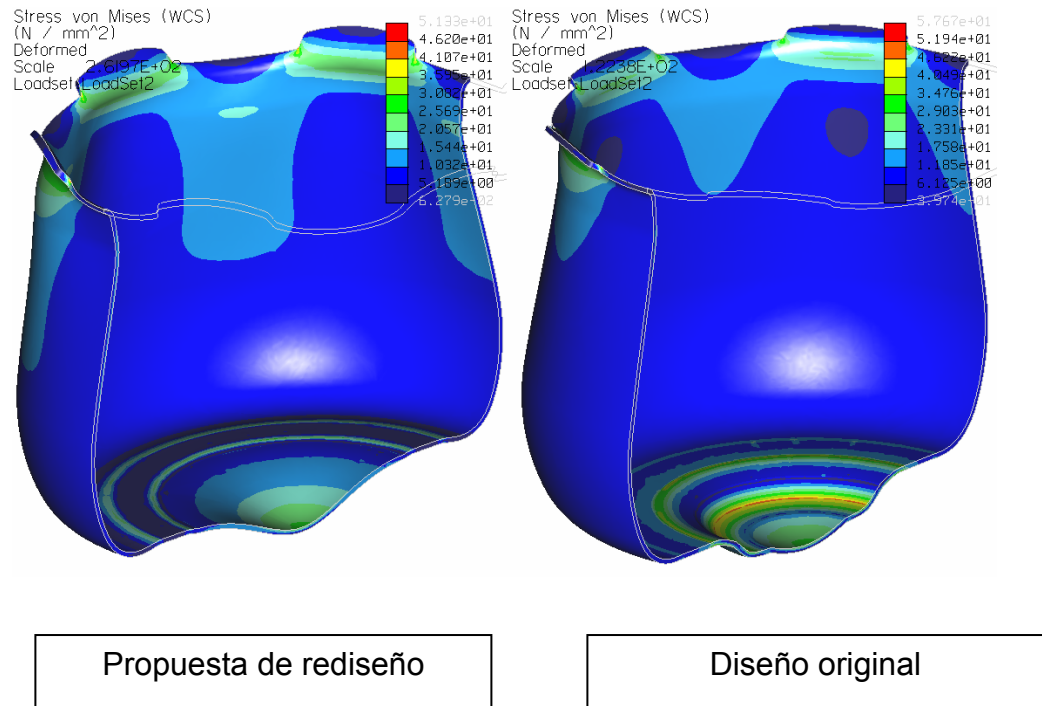
Aunque esta modificación se realizó pensando en mejorar los esfuerzos presentes en el producto, adicionalmente, se logró reducir los desplazamientos. Gracias a este cambio, el desplazamiento del fondo del recipiente disminuyó en 0,10194 mm con respecto al desplazamiento máximo que existe en el diseño original.

Ilustración 52. Paralelo de los desplazamientos entre el diseño original y la primera propuesta.



Analizando detenidamente el estudio anterior se nota que el fondo del recipiente exhibe mejores condiciones para el funcionamiento de éste (Ilustración 53), sin embargo, los esfuerzos calculados en el modelo siguen siendo un poco altos, por lo cual, se procede a examinar la zona a la que se trasladó el esfuerzo máximo. Buscando detenidamente la localización de este último, se encuentra su presencia en los radios entre el borde y las pestañas de cierre del recipiente.

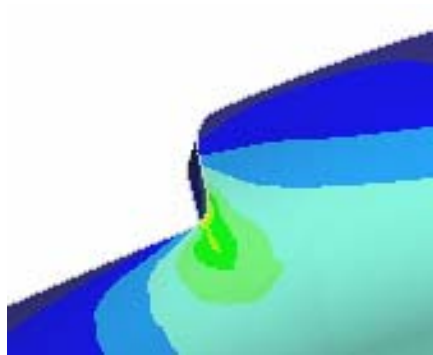
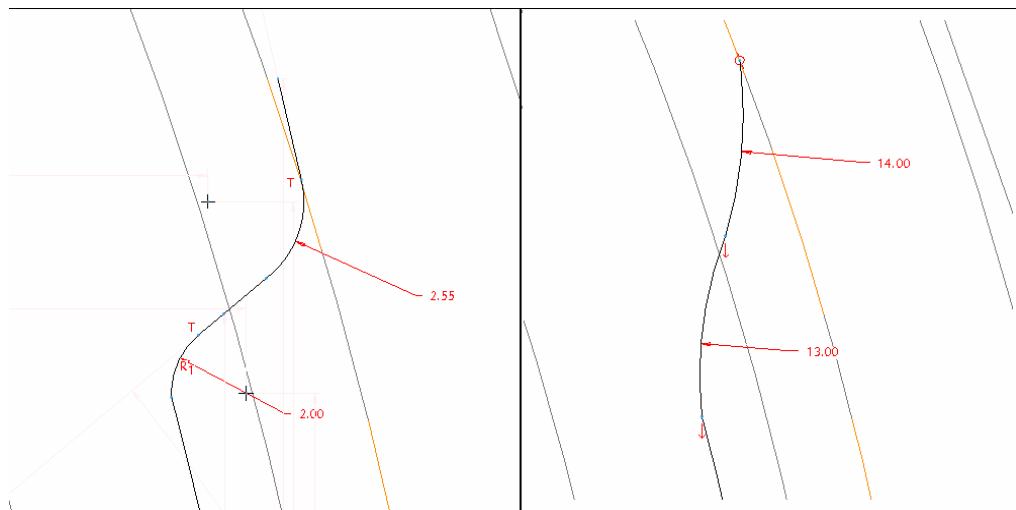
Ilustración 53. Paralelo de la deformación simulada del diseño original y la primera propuesta.



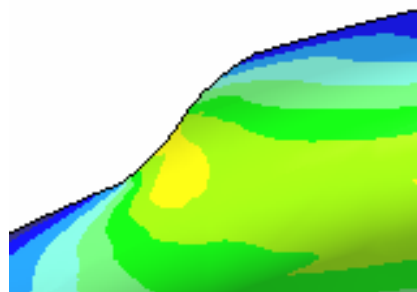
8.2 SEGUNDA ALTERNATIVA DE REDISEÑO

La segunda alternativa se centraliza en la pestañas, obviamente siguiendo el modelo del primer rediseño, donde se disminuyeron los esfuerzos del fondo. Para este caso se pudo observar, como las pestañas sufrían concentraciones de esfuerzos en los radios existentes entre éstas y el borde del recipiente, por lo cual, se procede a realizar un cambio mínimo en la geometría de las pestañas que suavice el radio, de tal manera, que alivie los esfuerzos y permita un flujo de energía con mayor libertad.

Ilustración 54. Nueva geometría de los pliegues



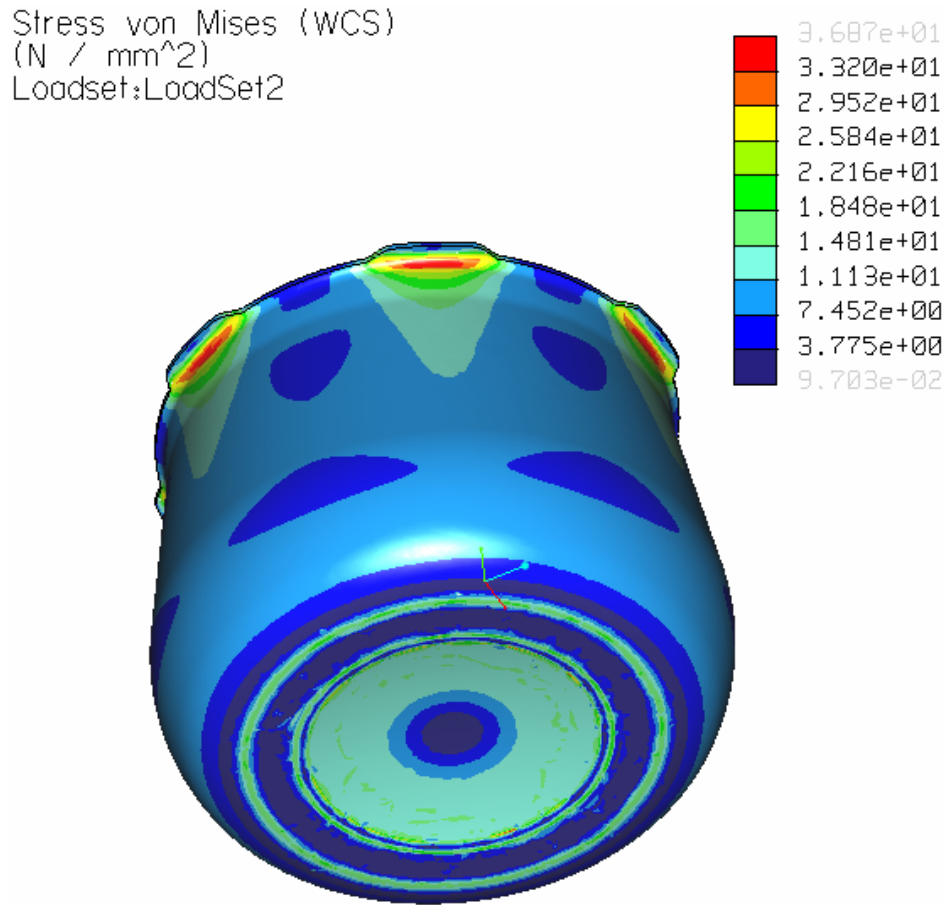
Diseño original



Propuesta de rediseño

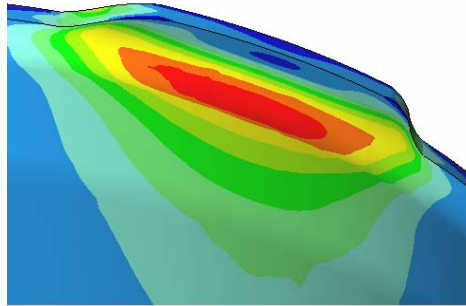
Con este rediseño se logro mejorar significativamente el esfuerzo máximo que se generaba en el recipiente, logrando así una reducción de 20,8 MPa con respecto al diseño original, que garantiza un buen comportamiento del producto cuando se coloca en funcionamiento.

Ilustración 55. Esfuerzos Von Mises de la segunda alternativa de diseño



Reduciendo los esfuerzos presentes en el radio de los pliegues, el esfuerzo mayor se trasladó de zona, ubicándose en el radio de la superficie externa de la pared y del pliegue.

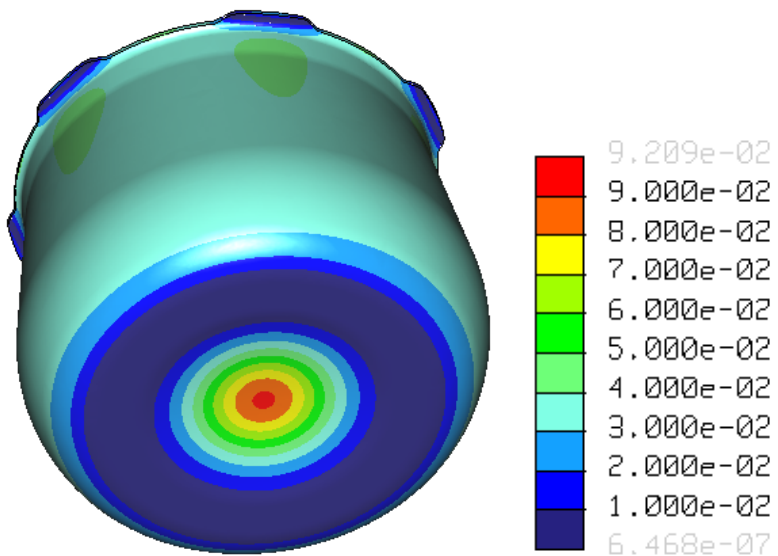
Ilustración 56. Nueva ubicación del esfuerzo máximo calculado



Por otra parte, los desplazamientos aún siguen disminuyendo. Entre la primera y la segunda alternativa de diseño se presenta una diferencia donde se reduce el desplazamiento mayor en $1,7 \times 10^{-4}$ mm.

Ilustración 57. Desplazamientos en la segunda alternativa de diseño.

Displacement Mag (WCS)
(mm)
Max Disp +9.2095E-02
Loadset:LoadSet2



9. CONCLUSIONES

En los resultados y análisis del estudio térmico, se muestra una distribución muy pareja de la temperatura con reducidas diferencias en los gradientes de temperatura. El recipiente, en su mayoría, se mantiene a la misma temperatura del vapor de agua (120 °C), y esto se debe al espesor delgado de la lámina del recipiente (2mm) y a la alta conductividad térmica que caracteriza a las aleaciones de aluminio.

En el recipiente la mayor parte de transferencia de calor es a través de la superficie en contacto con el líquido, y no a través de las burbujas de vapor que se elevan de esta superficie.

Los resultados y análisis del estudio estructural, indican que el recipiente únicamente presenta deformación elástica cuando se coloca en funcionamiento, por lo tanto, toda su deformación es recuperable, sin embargo, en el fondo del recipiente se presentan esfuerzos muy elevados que tienen una mínima diferencia con respecto al esfuerzo de cedencia del material, significando que con un aumento de los esfuerzos puede alcanzar a entrar en la zona plástica donde el material fluye y no recupera toda su deformación.

Obteniendo los resultados de ambos estudios estáticos, tanto el generado por las presiones y las fuerzas como el ocasionado por las diferencias de temperatura, se puede afirmar que los esfuerzos generados por las diferencias de temperatura son despreciables, puesto que se encuentran en un rango del orden de: 10^{-13} a 10^{-6} . Por lo tanto, el estudio combinado prácticamente arroja los mismos resultados que el estudio estático debido a las fuerzas y presiones.

Los resultados y análisis del estudio de fatiga, muestran evidentemente como el recipiente no falla por este criterio, ya que se calculó un mayor número de ciclos que los propuestos por el diseñador y se presenta una confiabilidad de vida alta en el producto. La razón de esto, se debe a que los esfuerzos calculados en el estudio estático ni siquiera superan el esfuerzo de cedencia (60,94 MPa), es decir, no sobrepasan el límite elástico, por lo tanto, no hay deformación plástica del material. Además, el inicio de una grieta se da cuando un esfuerzo supera el esfuerzo máximo del material (167,64 MPa), que se encuentra muy alejado del esfuerzo de cedencia y los esfuerzos calculados.

Realizados todos los diferentes estudios que analizan el comportamiento del recipiente (estático, térmico y fatiga), se tienen los resultados más críticos en el estudio estático realizado con la presión interna y la fuerza que se encuentra en los pliegues del recipiente. Por esta razón, las decisiones en cuanto a los cambios de diseño se deben soportar en estos resultados. La zona crítica en el diseño original, se halla en el fondo del recipiente, debido a la concentración de esfuerzos que allí se presentan, por lo tanto, la primera propuesta de diseño es modificar éste por un fondo con geometría elíptica, que suaviza el fondo y alivia la concentración de esfuerzos. Sin embargo, aún se sigue presentando un esfuerzo alto, en el radio entre el borde y cada pliegue, por lo tanto, en la segunda alternativa de diseño, se pretende disminuir los esfuerzos, que se consigue, suavizando los radios del pliegue. De esta manera se redujeron significativamente los esfuerzos en 20,8 MPa, y consecuentemente, los desplazamientos en 0,102mm.

Finalizado todo el proceso de estudio del recipiente y con la propuesta de las diferentes alternativas de rediseño, se demuestra el potencial de los software de ingeniería, evitando desperdicios de tiempo y realización de pruebas que conducen a gastos en prototipos. Y aunque no se tienen resultados exactos, la aproximación de éstos es lo suficientemente buena para apoyarse en ellos, ya que

únicamente se presentan errores entre: 2% y 5% de las variables más importantes a analizar, como: esfuerzos, desplazamientos, temperaturas y flujos de calor.

10. RECOMENDACIONES

Es importante evaluar el fondo del recipiente, ya que es una zona donde se presentan concentración de esfuerzos por el escalonamiento entre los diferentes niveles, por ende, es conveniente realizar un cambio de la geometría del fondo, ya sea, suavizando los quiebres entre los diferentes niveles o suavizando el fondo entero mediante una curva, consiguiendo aliviar las concentraciones presentes.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el estudio de fatiga, el diseñador tendría la posibilidad de aumentar los ciclos de vida del producto hasta cuatro veces más de los propuestos por él.

La empresa manufacturera del producto, debe considerar la posibilidad de seguir realizando evaluaciones de los diseños de los productos con software de ingeniería, puesto que demuestra, una alta confiabilidad en los resultados y la posibilidad de realizar una variedad de propuestas alternantes que no implican dedicar una gran cantidad de tiempo. Además, el software provee la posibilidad de llegar a una alternativa que se considere la mejor para el producto, sin la necesidad de realizar ensayos con prototipos entre cada una de las diferentes propuestas.

11. NUEVAS LÍNEAS DE TRABAJO

Realizado el estudio del comportamiento del recipiente de presión con el material aluminio 3104 H 0, y al proponer dos alternativas de rediseño con respecto al diseño original, basándose en la reducción de esfuerzos; se podría continuar las alternativas de rediseño, teniendo en cuenta el criterio de costos del material, y para esto, se pueden realizar diferentes propuestas logrando de esta manera reducir el costo del producto.

Por otra parte, de la misma forma como se elaboró un estudio detallado del recipiente se podría realizar un proceso minucioso a la tapa del recipiente.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CLÁSICA

ASKELAND, Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales. 3 ed. México : Internacional Thomson Editores, 1998. ISBN 968-7529-36-9

INCROPERA, Frank P y DEWITT, David P. Fundamentos de transferencia de calor. 4 ed. México: Prentice Hall, 1999. ISBN 970-17-0170-4

HAMROCK, Bernard J.; JACOBSON Bo O. y SCHMID, Steven R. Elementos de máquinas. 1 ed. México, D.F.: McGraw Hill. Interamericana Editores, S.A. de C.V., 2000. ISBN 970-10-2799-X

Tutorial ProE : MECHANICA STRUCTURE.

INTERNET

PTC @

The Product Development Company. Biblioteca de recursos de formación [En línea] [Citado el 20 de Septiembre del 2005]. Disponible en:

<http://www.ptc.com>

MATWEB @

Material Property Data. Propiedades del Aluminio 3104 [En línea] [Citado el 03 de Septiembre del 2006]. Disponible en:

<http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA3104H19>

Wikipedia@

Wikipedia la enciclopedia libre. Olla a presión [En línea] [Citado el 02 de Agosto del 2006]. Disponible en:

http://es.wikipedia.org/wiki/Olla_a_presi%C3%B3n

Wikipedia @

Wikipedia la enciclopedia libre. Definición de CAD, CAE y Fatiga [En línea] [Citado el 28 de Septiembre del 2005]. Actualizado el 26 de Septiembre del 2005. Disponible en:

<http://es.wikipedia.org/wiki/CAD>

<http://es.wikipedia.org/wiki/CAE>

<http://es.wikipedia.org/wiki/Fatiga>

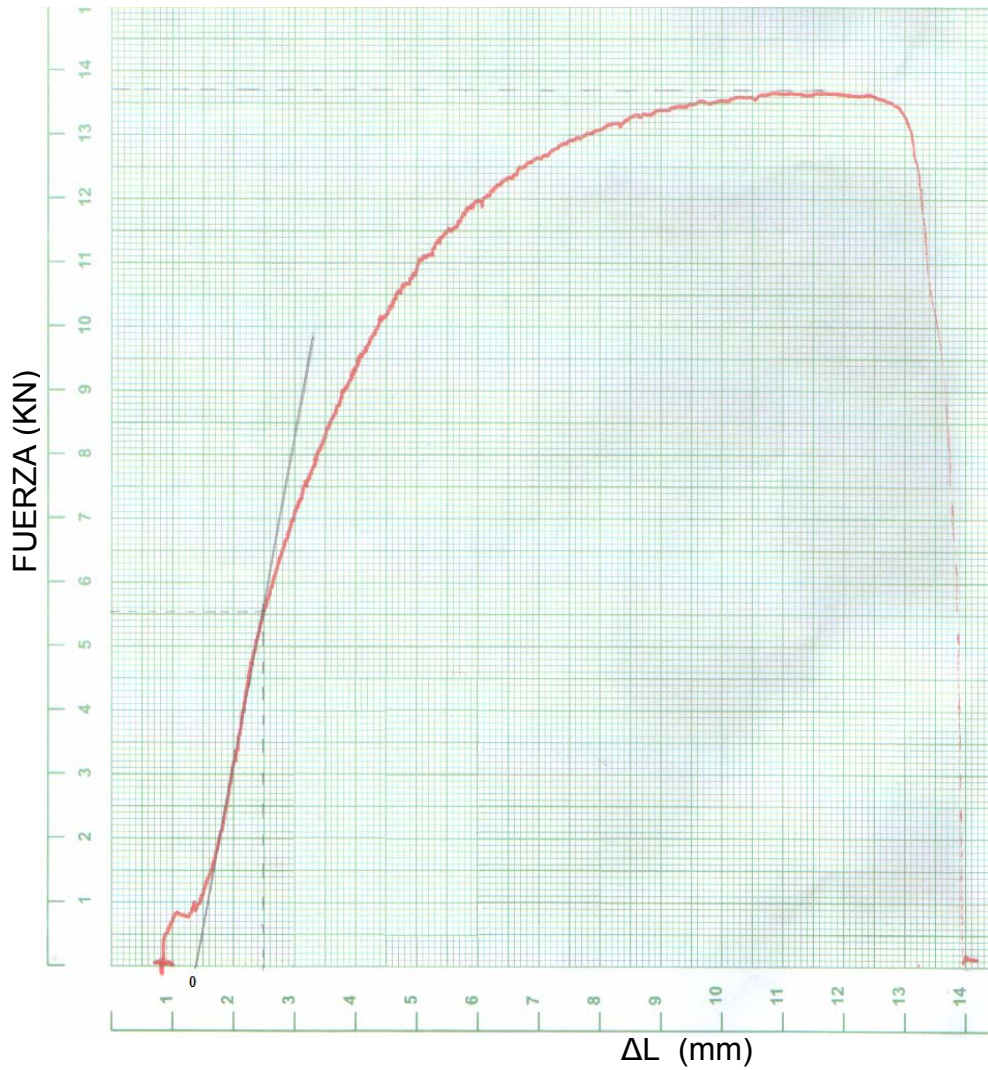
Wikipedia @

Wikipedia la enciclopedia libre. Definición de calor latente [En línea] [Citado el 15 de Septiembre del 2006]. Actualizado el 25 de Mayo del 2006. Disponible en:

http://es.wikipedia.org/wiki/Calor_latente

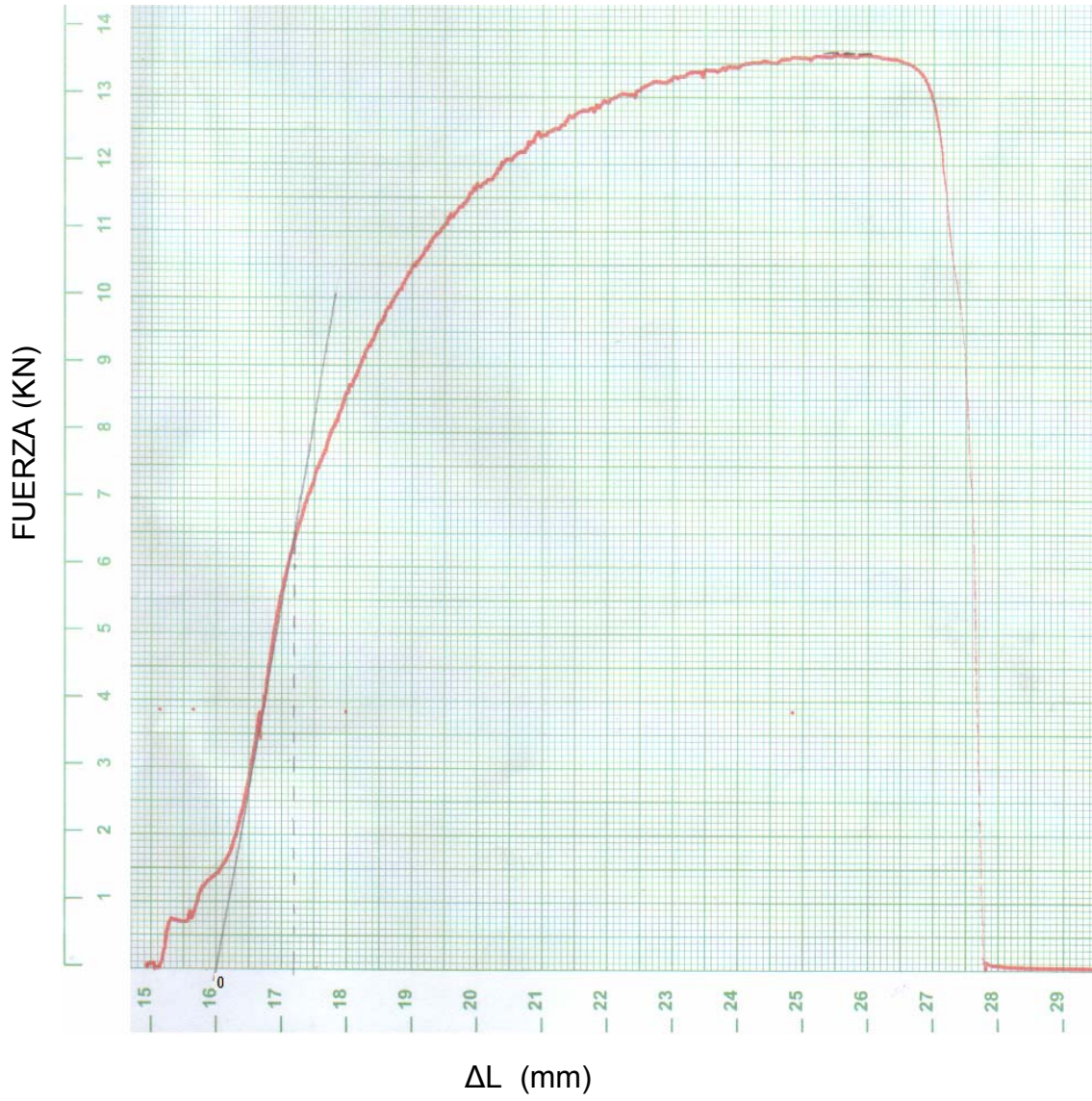
Anexo A. Gráficas de F vs. ΔL

Ensayo Probeta No. 0

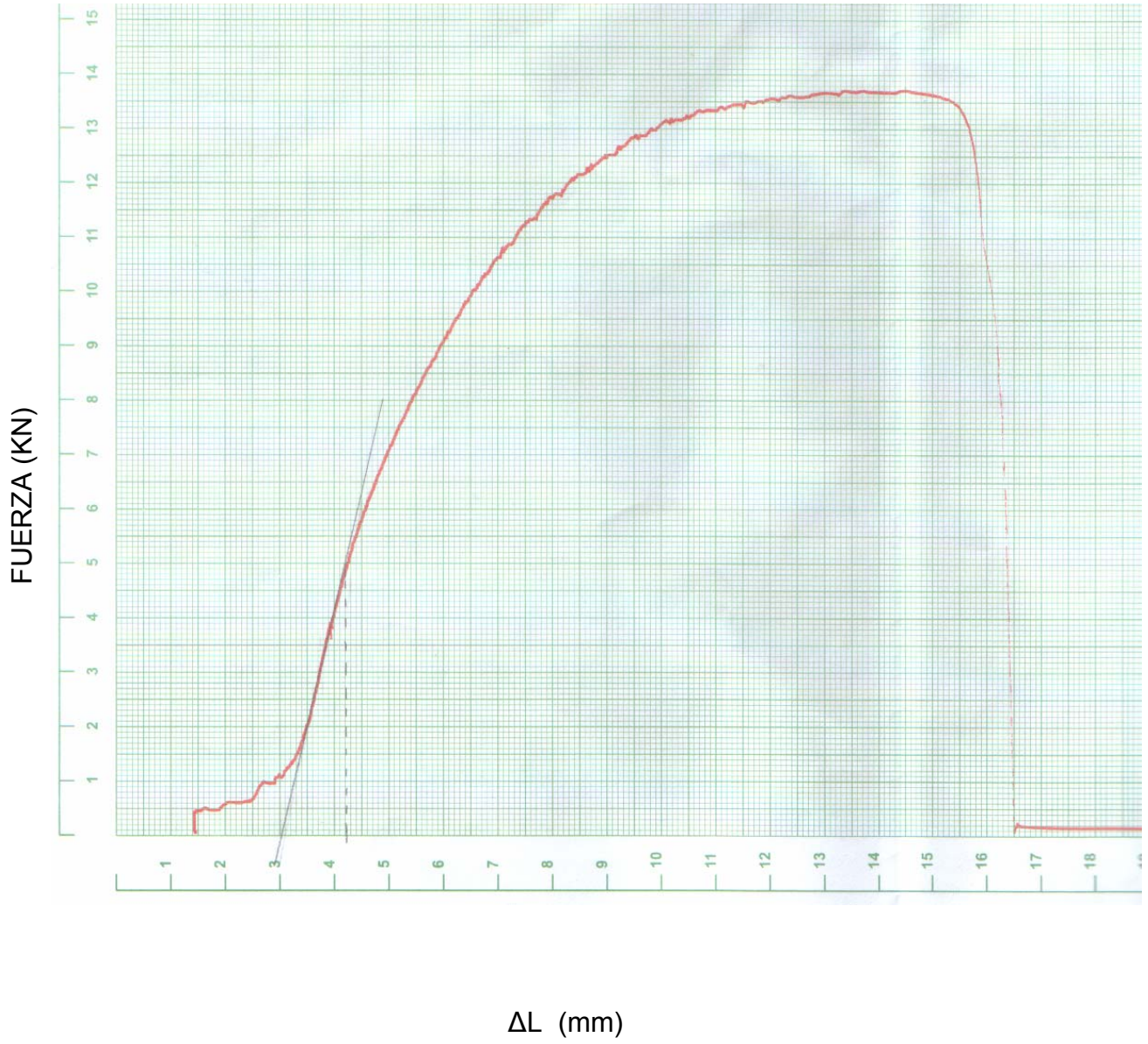


- EL eje X (ΔL) para todas las gráficas se amplió en 5 veces, para mejorar la lectura de datos en la gráfica.
- La gráfica no inicia correctamente debido al ajuste inicial de la máquina, por lo tanto se debe reubicar el punto cero en todas las gráficas.

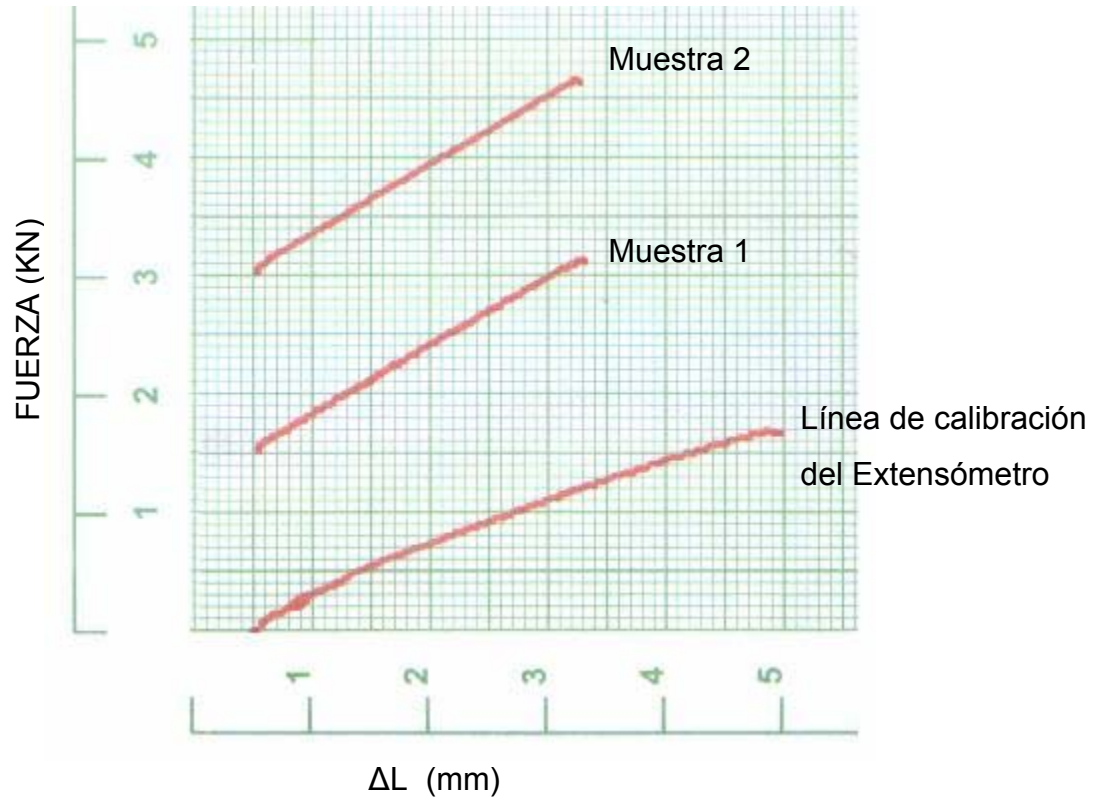
Ensayo Probeta No. 1



Ensayo Probeta No. 2



Módulo de elasticidad



- El eje X tiene una amplificación de 2000 veces, para mejorar la toma de datos en la grafica.

Anexo B. Propiedades termofísicas del aire a presión atmosférica

Apéndice A ■ Propiedades termofísicas de la materia

TABLA A.4 Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica^a

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Aire							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536
Amoniaco (NH₃)							
300	0.6894	2.158	101.5	14.7	24.7	16.6	0.887
320	0.6448	2.170	109	16.9	27.2	19.4	0.870
340	0.6059	2.192	116.5	19.2	29.3	22.1	0.872
360	0.5716	2.221	124	21.7	31.6	24.9	0.872
380	0.5410	2.254	131	24.2	34.0	27.9	0.869

Anexo C. Propiedades termofísicas de agua saturada

Tabla A.6 Propiedades termofísicas de agua saturada^a

Temperatura, T (K)	Presión P (bars) ^b	Volumen específico (m ³ /kg)		Entalpía de vaporización h_{fg} (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg · K)		Viscosidad (N · s/m ²)		Conductividad térmica (W/m · K)		Número de Prandtl		Tensión superficial $\sigma_f \cdot 10^3$ (N/m)	Coeficiente de expansión $\beta_f \cdot 10^6$ (K ⁻¹)	Temperatura T (K)
		$v_f \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_f \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	Pr_f	Pr_g			
273.15	0.00611	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1750	8.02	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05	273.15
275	0.00697	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1652	8.09	574	18.3	12.22	0.817	75.3	-32.74	275
280	0.00990	1.000	130.4	2485	4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04	280
285	0.01387	1.000	99.4	2473	4.189	1.861	1225	8.49	590	18.9	8.81	0.833	74.3	114.1	285
290	0.01917	1.001	69.7	2461	4.184	1.864	1080	8.69	598	19.3	7.56	0.841	73.7	174.0	290
295	0.02617	1.002	51.94	2449	4.181	1.868	959	8.89	606	19.5	6.62	0.849	72.7	227.5	295
300	0.03531	1.003	39.13	2438	4.179	1.872	855	9.09	613	19.6	5.83	0.857	71.7	276.1	300
305	0.04712	1.005	29.74	2426	4.178	1.877	769	9.29	620	20.1	5.20	0.865	70.9	320.6	305
310	0.06221	1.007	22.93	2414	4.178	1.882	695	9.49	628	20.4	4.62	0.873	70.0	361.9	310
315	0.08132	1.009	17.82	2402	4.179	1.888	631	9.69	634	20.7	4.16	0.883	69.2	400.4	315
320	0.1053	1.011	13.98	2390	4.180	1.895	577	9.89	640	21.0	3.77	0.894	68.3	436.7	320
325	0.1351	1.013	11.06	2378	4.182	1.903	528	10.09	645	21.3	3.42	0.901	67.5	471.2	325
330	0.1719	1.016	8.82	2366	4.184	1.911	489	10.29	650	21.7	3.15	0.908	66.6	504.0	330
335	0.2167	1.018	7.09	2354	4.186	1.920	453	10.49	656	22.0	2.88	0.916	65.8	535.5	335
340	0.2713	1.021	5.74	2342	4.188	1.930	420	10.69	660	22.3	2.66	0.925	64.9	566.0	340
345	0.3372	1.024	4.683	2329	4.191	1.941	389	10.89	668	22.6	2.45	0.933	64.1	595.4	345
350	0.4163	1.027	3.846	2317	4.195	1.954	365	11.09	668	23.0	2.29	0.942	63.2	624.2	350
355	0.5100	1.030	3.180	2304	4.199	1.968	343	11.29	671	23.3	2.14	0.951	62.3	652.3	355
360	0.6209	1.034	2.645	2291	4.203	1.983	324	11.49	674	23.7	2.02	0.960	61.4	697.9	360
365	0.7514	1.038	2.212	2278	4.209	1.999	306	11.69	677	24.1	1.91	0.969	60.5	707.1	365
370	0.9040	1.041	1.861	2265	4.214	2.017	289	11.89	679	24.5	1.80	0.978	59.5	728.7	370
373.15	1.0133	1.044	1.679	2257	4.217	2.029	279	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1	373.15
375	1.0815	1.045	1.574	2252	4.220	2.036	274	12.09	681	24.9	1.70	0.987	58.6	761	375
380	1.2869	1.049	1.337	2239	4.226	2.057	260	12.29	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788	380
385	1.5233	1.053	1.142	2225	4.232	2.080	248	12.49	685	25.8	1.53	1.004	56.6	814	385

Apéndice A ■ Propiedades termofísicas de la materia

Apéndice A ■ Propiedades termofísicas de la materia

390	1.794	1.058	0.980	2212	4.239	2.104	237	12.69	686	26.3	1.47	1.013	55.6	8.41	390
400	2.455	1.067	0.731	2183	4.256	2.158	217	13.05	688	27.2	1.34	1.033	53.6	8.96	400
410	3.302	1.077	0.553	2153	4.278	2.221	200	13.42	688	28.2	1.24	1.054	51.5	9.52	410
420	4.370	1.088	0.425	2123	4.302	2.291	185	13.79	688	29.8	1.16	1.075	49.4	10.10	420
430	5.699	1.099	0.331	2091	4.331	2.369	173	14.14	685	30.4	1.09	1.10	47.2	10.71	430
440	7.333	1.110	0.261	2059	4.36	2.46	162	14.50	682	31.7	1.04	1.12	45.1	11.36	440
450	9.319	1.123	0.208	2024	4.40	2.56	152	14.85	678	33.1	0.99	1.14	42.9	12.07	450
460	11.71	1.137	0.167	1989	4.44	2.68	143	15.19	673	34.6	0.95	1.17	40.7	12.83	460
470	14.55	1.152	0.136	1951	4.48	2.79	136	15.54	667	36.3	0.92	1.20	38.5	13.64	470
480	17.90	1.167	0.111	1912	4.53	2.94	129	15.88	660	38.1	0.89	1.23	36.2	14.51	480
490	21.83	1.184	0.0922	1870	4.59	3.10	124	16.23	651	40.1	0.87	1.25	33.9	15.44	490
500	26.40	1.203	0.0766	1825	4.66	3.27	118	16.59	642	42.3	0.86	1.28	31.6	16.43	500
510	31.66	1.222	0.0631	1779	4.74	3.47	113	16.95	631	44.7	0.85	1.31	29.3	17.47	510
520	37.70	1.244	0.0525	1730	4.84	3.70	108	17.33	621	47.5	0.84	1.35	26.9	18.56	520
530	44.58	1.268	0.0445	1679	4.95	3.96	104	17.72	608	50.6	0.85	1.39	24.5	19.70	530
540	52.38	1.294	0.0375	1622	5.08	4.27	101	18.1	594	54.0	0.86	1.43	22.1	20.88	540
550	61.19	1.323	0.0317	1564	5.24	4.64	97	18.6	580	58.3	0.87	1.47	19.7	22.10	550
560	71.08	1.355	0.0269	1499	5.43	5.09	94	19.1	563	63.7	0.90	1.52	17.3	23.43	560
570	82.16	1.392	0.0228	1429	5.68	5.67	91	19.7	548	76.7	0.94	1.59	15.0	24.87	570
580	94.51	1.433	0.0193	1353	6.00	6.40	88	20.4	528	76.7	0.99	1.68	12.8	26.41	580
590	108.3	1.482	0.0163	1274	6.41	7.35	84	21.5	513	84.1	1.05	1.84	10.5	28.05	590
600	123.5	1.541	0.0137	1176	7.00	8.75	81	22.7	497	92.9	1.14	2.15	8.4	29.78	600
610	137.3	1.612	0.0115	1068	7.85	11.1	77	24.1	467	103	1.30	2.60	6.3	31.59	610
620	159.1	1.705	0.0094	941	9.35	15.4	72	25.9	444	114	1.52	3.46	4.5	33.58	620
625	169.1	1.778	0.0085	858	10.6	18.3	70	27.0	430	121	1.65	4.20	3.5	35.63	625
630	179.7	1.856	0.0075	781	12.6	22.1	67	28.0	412	130	2.0	4.8	2.6	37.74	630
635	190.9	1.935	0.0066	683	16.4	27.6	64	30.0	392	141	2.7	6.0	1.5	39.91	635
640	202.7	2.075	0.0057	560	26	42	59	32.0	367	155	4.2	9.6	0.8	42.14	640
645	215.2	2.351	0.0045	361	90	—	54	37.0	331	178	12	26	0.1	44.43	645
647.3 ^c	221.2	3.170	0.0032	0	∞	∞	45	45.0	238	238	∞	∞	0.0	46.77	647.3 ^c

^aAdaptada de la referencia 19.

^b1 bar = 10⁵ N/m².

^cTemperatura crítica.

Anexo D. Reglamento Técnico RTC-003MDE

RESOLUCIÓN 0495

07/06/2002

Por la cual se expide el Reglamento Técnico RTC-003MDE para Ollas de Presión de uso doméstico y sus accesorios, que se fabriquen o importen para su uso en Colombia.

El Ministro de Desarrollo Económico (E.), en ejercicio de sus facultades legales, en especial de las que le confiere el Decreto 219 de febrero 15 de 2000, y

CONSIDERANDO:

- Que el artículo 78 de la Constitución Política de Colombia, dispone: “[...] Serán responsables, de acuerdo con la ley, quienes en la producción y en la comercialización de bienes y servicios, atenten contra la salud, la seguridad y el adecuado aprovisionamiento a consumidores y usuarios. [...]”;
- Que mediante la Ley 170 de 1994, Colombia adhirió al Acuerdo de la Organización Mundial del Comercio, el cual contiene, entre otros, el Acuerdo sobre Obstáculos Técnicos al Comercio;
- Que con la Ley 172 de 1994 se aprobó el Tratado de Libre Comercio con los Estados Unidos Mexicanos y con la República de Venezuela;
- Que la Comisión del Acuerdo de Cartagena, mediante la Decisión 376 de 1995, creó el Sistema Andino de Normalización, Acreditación, Ensayos, Certificación, Reglamentos Técnicos y Metrología, modificada por la Decisión 419 de 1997;
- Que la Decisión 506 de 2001 expedida por la Comisión de la Comunidad Andina decide sobre el reconocimiento y aceptación de certificados de productos a ser comercializados en la Comunidad Andina;
- Que tal como se contempla en el numeral 2.2 del artículo 2° del Acuerdo sobre Obstáculos Técnicos al Comercio de la Organización Mundial del Comercio; en el artículo 14-01 del Tratado de Libre Comercio con los Estados Unidos Mexicanos y la República de Venezuela; y, en el artículo 26 de la Decisión Andina 376 de 1995, los Reglamentos Técnicos se establecen para garantizar, entre otros, los siguientes objetivos legítimos: los imperativos de la seguridad nacional; la protección de la salud o seguridad humanas, de la vida o la salud

animal o vegetal, o del medio ambiente y la prevención de prácticas que puedan inducir a error a los consumidores;

- Que en desarrollo de las Leyes 155 de 1959, 170 y 172 de 1994 y de la Decisión 376 de la Comisión del Acuerdo de Cartagena, el Gobierno Nacional expidió el Decreto 1112 de junio 24 de 1996, *por el cual se crea el Sistema Nacional de Información sobre Medidas de Normalización y Procedimientos de Evaluación de la Conformidad, se dictan normas para armonizar la expedición de reglamentos técnicos y se cumplen algunos compromisos internacionales adquiridos por Colombia;*
- Que con base en lo establecido por el Decreto 2522 de diciembre 4 de 2000, la Superintendencia de Industria y Comercio expidió la Resolución 03742 de febrero 2 de 2001, señalando los criterios y condiciones que deben cumplirse para la expedición de Reglamentos Técnicos;
- Que el Ministerio de Desarrollo Económico, mediante la Resolución 0370 de mayo 4 de 2001, derogó el artículo 1° de la Resolución 022 de abril 3 de 1995 del Consejo Nacional de Normas y Calidades, eliminando la obligatoriedad de los numerales 3, 4, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.8 y 7 de la norma NTC 1798 (2ª revisión), “artículos de uso doméstico. Ollas de Presión” y derogó entre otros, el artículo 4° de la Resolución 005 de julio 1° de 1992 del Consejo Nacional de Normas y Calidades, eliminando la obligatoriedad de los numerales 3, 4 y 7 de la norma NTC 1982 (1ª revisión), “artículos de uso doméstico. Empaques para sellado de Ollas de Presión”;
- Que según el artículo 7° del Decreto 2269 de noviembre 16 de 1993, los productos o servicios sometidos al cumplimiento de una norma técnica colombiana obligatoria o un Reglamento Técnico, deben cumplir con éstos, independientemente que se produzcan en Colombia o se importen;
- Que mediante el Decreto 300 de febrero 10 de 1995, el Gobierno Nacional estableció el procedimiento para verificar el cumplimiento de las normas técnicas colombianas oficiales y los reglamentos técnicos en los productos importados;
- Que con el propósito de prevenir riesgos para proteger la vida, la salud y eliminar prácticas que puedan inducir a error a los consumidores, este Ministerio elaboró el presente Reglamento Técnico para las Ollas de Presión de uso doméstico, teniendo en cuenta los criterios y condiciones materiales y formales establecidos en la Resolución 03742 de febrero 2 de 2001, expedida por la Superintendencia de Industria y Comercio;
- Que el Reglamento Técnico que se adopta mediante esta resolución, se elaboró con un grupo de empresas representativas del sector, se consultó tanto con productores como con importadores, se publicó en la página WEB del Ministerio de Desarrollo Económico y su proyecto fue notificado el 20 de

diciembre de 2001 en cumplimiento de lo establecido en el artículo 5° de la Resolución 03742 de 2001;

- Que con base en los anteriores considerandos, este Ministerio,

RESUELVE:

Artículo 1°. Expedir el siguiente Reglamento Técnico para las Ollas de Presión de uso doméstico y sus accesorios.

1. Objeto: Este reglamento tiene por finalidad los siguientes objetivos: a) Prevenir riesgos para la salud y seguridad de los usuarios, y b) Prevenir prácticas que puedan inducir a error en el uso de las Ollas de Presión.

2. Campo de aplicación: Este Reglamento se aplica a aquellos utensilios de cocina para uso doméstico conocidos como ollas de presión que funcionan a una presión nominal de operación de máximo 140 kPa y que se fabriquen o importen para su uso en Colombia. También aplica a las partes de las Ollas de Presión.

3. Contenido:

3.1 *Definiciones y siglas:*

3.1.1 Definiciones: Para los efectos del presente Reglamento Técnico, además de las definiciones de los términos indicadas a continuación, son aplicables las contempladas en las normas técnicas que se referencian en el presente documento:

Capacidad nominal. Capacidad obtenida cuando el cuerpo de la olla de presión se llena hasta el borde con agua, permitiendo que se nivele completamente mientras descansa sobre una superficie horizontal.

Cualidades organolépticas. Se refiere a la permanencia del olor, sabor y percepción visual de los alimentos que se someten a cocción en la olla de presión.

Cuerpo. Parte componente de la olla de presión, que le permite actuar de forma abierta en cocción despresurizada e incluye base y lados, pero excluye la tapa.

Dispositivo automático para el alivio de presión. Dispositivo que opera por reacondicionamiento propio.

Dispositivo de seguridad para el alivio de presión. Elemento de control acoplado a la olla de presión para reducir la presión interna en forma segura cuando se presenta una falla en el dispositivo de regulación de presión.

Dispositivo desechable (destruible) para el alivio de presión. Dispositivo que no puede ser reutilizado para su operación, a menos que sea reemplazado por un nuevo componente.

Dispositivo para la regulación de presión. Elemento de control acoplado a la olla de presión, con el objeto de mantener una presión de cocción equivalente a la presión nominal de operación o a una presión inferior para las ollas diseñadas con el propósito de trabajar a más de una presión.

Dispositivo reposicionable para el alivio de presión. Dispositivo que puede ser reutilizado para su operación, por medio de un simple ajuste.

Olla de Presión. Recipiente hermético que cuece los alimentos por un efecto combinado de presión y temperatura, cuya presión se regula por una válvula de peso muerto o en algunos casos con válvulas de resorte precargado. La olla de presión que se utiliza en los hogares está regulada a una presión máxima de 1.4 bar. Por encima de esta presión, se considera de aplicación industrial.

Olla de Presión tipo Ovalo. Olla cuyo mecanismo de apertura y cierre consiste en una tapa ovalada que encaja internamente bajo la pestaña del cuerpo de la olla. La tapa se introduce dentro del cuerpo aprovechando la dimensión del diámetro menor de la primera frente al del segundo; posteriormente, se realiza el movimiento de deslizamiento de la tapa en relación con el cuerpo.

Olla de Presión cierre externo (tipo tijera o bayoneta). Olla en la cual el mecanismo de apertura y cierre consiste en un movimiento de deslizamiento de la tapa sobre el cuerpo, que permite que encajen las dos partes en forma de tijera.

Olla de Presión Tipo Palanca. Olla cuyo mecanismo de apertura y cierre consiste en una tapa que está conectada a una palanca diseñada para que encaje perfectamente, bajo las asas metálicas de sujeción.

Partes. Comprende cuerpo, tapa, mango, asas, perillas y medios de fijación, empaques para sellado, dispositivos de regulación de presión y de alivio de presión.

Presión nominal de operación. Presión de diseño para cocción.

3.1.2 Siglas y símbolos: Las siglas que aparecen en el texto del presente Reglamento Técnico tienen el siguiente significado y así deben ser interpretadas:

ISO International Organization for Standardization

kPa kilo Pascal

NTC Norma Técnica Colombiana

OMC Organización Mundial del Comercio

Pa Pascal (Unidad de Presión del Sistema Internacional de Unidades)

Pb Símbolo químico del Plomo

RT Reglamento Técnico

3.2 Requisitos:

3.2.1 Requisitos para prevenir riesgos a la salud:

3.2.1.1 Materiales: Todas las partes de la olla, incluyendo el cuerpo, tapa, empaques, controles de presión, dispositivos de seguridad y accesorios internos, que puedan estar en contacto con alimentos o vapor, deben fabricarse con materiales que cumplan los siguientes requisitos:

a) No cambiar o deteriorar el olor o sabor de los alimentos cocidos, o causar toxicidad;

b) Los alimentos cocidos no deben afectar los elementos de la olla de presión, de forma que deterioren su operación, eficiencia y seguridad.

Nota 1. La olla de presión debe fabricarse con materiales de tipo y pureza que bajo condiciones de uso normal, no presenten peligro de toxicidad, ni afecten de manera alguna las cualidades organolépticas de los alimentos en ella preparados.

Nota 2. En la manufactura de los empaques de caucho para sellado de ollas de presión, no se deben utilizar materiales de recuperación o desperdicios de material vulcanizado.

3.2.1.1.1 Contenido de Plomo (Pb). Cuando la olla de presión se fabrica con aluminio, el contenido máximo de plomo (Pb) en el aluminio debe ser de 0.05%.

3.2.2 Requisitos para eliminar y prevenir riesgos que atenten contra la seguridad:

3.2.2.1 Operación de los dispositivos para regulación de presión: El dispositivo de regulación de presión se accionará liberando el exceso de vapor presurizado, cuando la presión interna alcance como máximo el 125% de la presión nominal de operación.

3.2.2.2 Dispositivo de seguridad para el alivio de presión: El dispositivo de seguridad para el alivio de presión debe funcionar, liberando el exceso de presión, a una presión máxima de tres veces la presión nominal de operación.

3.2.2.3 Seguridad de la tapa para ollas de cierre externo: La tapa no se debe soltar del recipiente antes que la presión manométrica interna sea menor a 4 kPa +/- 1 kPa.

3.2.2.4 Presión de estallido: La presión de estallido de la olla de presión debe ser mínimo cinco (5) veces la presión nominal de operación.

3.2.2.5 Temperatura de los mangos, las asas y las perillas: La temperatura de los mangos, las asas y las perillas, en condiciones normales de funcionamiento, en ninguno de los casos, debe ser superior a 60° C.

3.2.2.6 Resistencia del mango, las asas y sus medios de fijación: En condiciones normales de funcionamiento, el mango, las asas y sus medios de fijación a la olla de presión, no deben presentar deformaciones permanentes visibles o aflojamiento de estos y de sus medios de fijación que puedan afectar la seguridad.

3.2.3 Requisitos para la prevención de prácticas que puedan inducir a error:

3.2.3.1 Marcado: Cada olla de presión debe marcarse clara, legible y permanentemente, como mínimo, con la siguiente información:

- Nombre del fabricante.
- País de fabricación.

- Presión nominal de operación.
- Capacidad nominal.

3.2.3.2 Rotulado:

3.2.3.2.1 Rotulado para las Ollas de Presión: Cada olla de presión debe llevar una etiqueta, colocada en lugar destacado y visible, con una nota que llame la atención sobre la necesidad de leer las instrucciones de funcionamiento antes de usarla, por ejemplo: “Importante. Lea las instrucciones antes de usar la olla”.

3.2.3.2.2 Rotulado para las unidades de reposición de las Ollas de Presión: Cada paquete o envoltura individual para las unidades de reposición de las ollas de presión, debe llevar impresa o en una etiqueta unida, como mínimo, la siguiente información de manera clara y legible:

- Denominación del producto.
- Nombre del fabricante.
- Marca del producto.
- Capacidad nominal de la olla de presión en donde se utiliza la unidad de reposición.
- Presión nominal de operación de la olla de presión en donde se utiliza la unidad de reposición.

3.2.3.3 Manual de instrucciones: El fabricante debe suministrar un manual de instrucciones para la operación segura de la olla de presión. Las instrucciones deben incluir detalles sobre el método de apertura y cierre de la olla, precauciones de seguridad, mantenimiento del producto y capacidad nominal.

Además, indicará cuáles dispositivos de seguridad pueden cambiarse por parte del usuario y cuáles deben ser reemplazados únicamente por personal experto. El manual de instrucciones debe indicar siempre la presión nominal de operación de la olla de presión, expresada en kPa.

3.3 Procedimiento para evaluar la Conformidad:

3.3.1 Contenido de plomo (Pb): Para evaluar el contenido de Plomo (Pb) contemplado en el numeral 3.2. 1. 1. 1 de este reglamento, deberá seguirse el método de ensayo indicado en el numeral 6.2 de la NTC 1798, 4ª actualización.

3.3.2 Ensayo de operación de los dispositivos para regulación de presión: Para evaluar el requisito de operación de los dispositivos para regulación de presión contemplado en el numeral 3.2.2.1 de este reglamento, deberá seguirse el método de ensayo indicado en el numeral 6.4 de la NTC 1798, 4ª actualización.

3.3.3 Ensayo de operación de los dispositivos de seguridad para el alivio de presión: Para evaluar el requisito de operación de los dispositivos de seguridad para el alivio de presión contemplado en el numeral 3.2.2.2 de este reglamento, deberá seguirse el método de ensayo indicado en el numeral 6.5 de la NTC 1798, 4ª actualización.

3.3.4 Ensayo de seguridad de la tapa para Ollas de Presión de cierre externo: Para evaluar la seguridad de la tapa para ollas de presión de cierre externo contemplada en el numeral 3.2.2.3 de este reglamento, deberá seguirse el método de ensayo indicado en el numeral 6.6 de la NTC 1798, 4ª actualización.

3.3.5 Ensayo de presión de estallido: Para evaluar la presión de estallido, requisito contemplado en el numeral, 3.2.2.4 de este reglamento, deberá seguirse el método de ensayo indicado en el numeral 6.7 de la NTC 1798, 4ª actualización.

3.3.6 Ensayo de temperatura de los mangos, las asas y las perillas: Para evaluar la temperatura de los mangos, las asas y las perillas, requisito contemplado en el numeral 3.2.2.5 de este reglamento, deberá seguirse el método de ensayo indicado en el numeral 6.8 de la NTC 1798, 4ª actualización.

3.3.7 Ensayo de resistencia del mango, las asas y sus medios de fijación: Para evaluar la resistencia del mango, las asas y sus medios de fijación, requisito contemplado en el numeral 3.2.2.6 de este reglamento, deberá seguirse el método de ensayo indicado en el numeral 6.9 de la NTC 1798, 4ª actualización.

3.4 Demostración de la conformidad: Previamente a su comercialización, los fabricantes, importadores o comercializadores de los productos sometidos a este Reglamento Técnico, deberán demostrar su cumplimiento a través de un Certificado de Conformidad expedido por un organismo acreditado o reconocido por la Superintendencia de Industria y Comercio, conforme a lo establecido por el

artículo 8° del Decreto 2269 de noviembre 16 de 1993 y demás normas legales vigentes.

No se podrá prohibir, limitar, ni obstaculizar la comercialización, ni la puesta en funcionamiento de las ollas de presión de uso doméstico que cumplan con las disposiciones del presente Reglamento Técnico.

3.5 Documentos de referencia o consultados:

- NTC 1798: 1999-08-25 (4ª actualización). Artículos de uso doméstico, ollas de presión.
- NTC 1982: 1998-10-28 (2ª actualización). Artículos de uso doméstico. Compuestos para la elaboración de empaques de caucho para sellado de ollas de presión.

4. Subpartidas arancelarias: Los productos objeto del presente Reglamento Técnico se clasifican en las siguientes subpartidas arancelarias:

76.15.19.11.00 Ollas de presión, de Aluminio.

76.15.19.20.00 Partes de Aluminio, para ollas de presión.

73.23.93.00.00 Ollas de presión y sus partes, de acero inoxidable.

40.16.93.00.00 Empaques, de caucho vulcanizado sin endurecer, para sellado de ollas de presión.

39.26.90.40.00 Empaques, de plástico, para sellado de ollas de presión.

Artículo 2°. *Entidad de vigilancia y control.* Compete a la Superintendencia de Industria y Comercio ejercer las tareas de vigilancia y control del presente Reglamento Técnico, de acuerdo con lo establecido en los Decretos 3466 de 1982, 2153 de 1992 y 2269 de 1993.

Artículo 3°. *Revisión y actualización.* Con el fin de mantener actualizadas las disposiciones de este Reglamento Técnico, el Ministerio de Desarrollo Económico lo revisará en un término no mayor a 5 años contados a partir de la fecha de su entrada en vigencia, o antes, si se detecta que las causas que motivaron su expedición fueron modificadas o desaparecieron o, si una de las normas en las que está basado, es actualizada o modificada y esa actualización o modificación afecta los requisitos establecidos por el Reglamento Técnico. En este caso, la

revisión debe hacerse dentro del año siguiente a la fecha de actualización o de modificación de la norma respectiva.

Artículo 4°. *Régimen sancionatorio.* El incumplimiento de lo establecido en el presente Reglamento Técnico, dará lugar a las sanciones previstas en los Decretos 3466 de 1982, 2153 de 1992, 2269 de 1993 y en las demás disposiciones legales aplicables.

Parágrafo. *Responsabilidad.* La responsabilidad civil, penal y/o fiscal originada en la inobservancia de las disposiciones contenidas en el presente reglamento, será la que determinen las disposiciones legales vigentes y recaerá en forma individual en los fabricantes, importadores, comercializadores o en el organismo de certificación que dio la conformidad a los productos objeto del presente Reglamento Técnico sin cumplir con los requisitos aquí previstos.

Artículo 5°. *Vigencia.* De conformidad con el numeral 9 del artículo 2° de la Resolución 03742 de 2001, el presente Reglamento Técnico empezará a regir una vez transcurrido un (1) mes contado a partir de la fecha de publicación de esta resolución en el *Diario Oficial*, para que los productores, importadores y comercializadores de los productos objeto de este reglamento técnico, y los demás sectores afectados, puedan adaptar sus procesos y/o productos a las condiciones establecidas por el reglamento.

Publíquese y cúmplase.

Dada en Bogotá, D. C., a 7 de junio de 2002.

El Viceministro de Desarrollo Económico, encargado de las funciones del Despacho del Ministro de Desarrollo Económico,

Luis Carlos Ramírez Múnera.

(C.F.)

Anexo E. Videos

Se presenta en formato digital (CD) los siguientes videos:

- Elaboración de probetas para los ensayos (corte de la lámina)
- Ensayo de tracción

