

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS  
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**UNIDAD QUERETARO**

**“Análisis mecánico de estructura de estufa de 30”**

Tesis que presenta

Ing. Oscar Barrios Flores

Para obtener el Grado de

Maestro en Ciencias

en la Especialidad de

Materiales

CINVESTAV I.E.N.  
SECCIÓN DE ACQUISICIÓN  
Y DOCUMENTACIÓN

Director de tesis: Luis Gerardo Trápaga Martínez

**CINVESTAV**  
IPN  
Santiago de Querétaro, Qro. **ADQUISICION  
DE LIBROS**

Noviembre 2005

CLASIF.: TA404.2.B37815
ADQUIS.: JA-068
FECHA: 29 MAYO 2006
PROCED. DON. - 2006
\$

I.D. 124595-2001

## *AGRADECIMIENTOS.*

*A Dios, por darme la vida y permitirme llegar hasta donde ahora estoy y sobre todo por manifestarme su amor mediante todas las personas que me han apoyado en mi vida personal y profesional.*

*A MABE y CINVESTAV, que a través del Convenio de Maestrías me dieron la oportunidad de crecer en mi vida profesional y además, por todo el apoyo que me brindaron para concluir con mis estudios de postgrado.*

*A mi mamá Soledad, a mi tía Guadalupe y a mi papá Alberto, porque gracias a sus oraciones, sacrificios, consejos y persistencia han hecho de mi lo que ahora soy.*

*A mis hermanos Claudia y Diego, por contagiarme de su alegría y su optimismo, porque fue algo fundamental para alcanzar este logro.*

*A mi esposa Adriana y a mi futuro bebe, por darme su corazón y porque me han impulsado en todo momento a ser mejor en todos las áreas de mi vida.*

*A mi director de tesis, Dr. Luis Gerardo Trápaga por creer en mis ideas y sobre todo por apoyarlas.*

*A mis amigos Luis, Cervando, Silvia, Carlos, Filiberto, Gabriela, Ángeles, Carlos, Angélica y Alfredo que han sido totalmente solidarios y que me animaron en momentos difíciles.*

**ANÁLISIS MECÁNICO DE ESTRUCTURA DE ESTUFA DE 30".**

**ÍNDICE**

<b>SIMBOLOGÍA.....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>III</b>

**CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.**

1.1.- Antecedentes de la investigación.	
1.1.1 Desarrollo actual de nuevos productos.....	1
1.1.2 Proceso actual de diseño.....	2
1.1.3 Conocimiento del producto.....	4
1.1.4 Pruebas estructurales y análisis de resultados.....	5
1.2.- Objetivos de desarrollo.....	8
1.3.- Justificación del proyecto.....	9

**CAPÍTULO 2.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS.**

2.1.- Comportamiento mecánico de los materiales.	
2.1.1 Tipos de materiales.....	11
2.1.2 Propiedades de los materiales.....	12
2.1.3 Enlaces metálicos.....	13
2.1.4 Rigidez y deformación en cristales.....	14
2.1.5 Energía de deformación.....	15
2.1.6 Deformación elástica.....	17
2.1.7 Hipótesis de la resistencia de materiales.....	19
2.1.8 Estado general de esfuerzos.....	20
2.1.9 Esfuerzos normales principales.....	21
2.1.10 Esfuerzos principales de corte.....	22
2.1.11 Relación esfuerzo deformación.....	23
2.1.12 Teorías de falla en materiales dúctiles.....	23
2.2.- Proceso de diseño en la ingeniería.	
2.2.1 Proceso de diseño y desarrollo de nuevos productos.....	28
2.2.2 Materiales en el proceso de diseño.....	31
2.3.- Tecnología avanzada en el desarrollo de nuevos productos (CAD, CAE, CAM y Análisis Experimentales de Esfuerzos).	
2.3.1 Sistemas CAD, CAE y CAM.....	34
2.3.2 Modelación y simulación aplicados en la ingeniería de diseño.....	35
2.3.3 Análisis experimentales de esfuerzo.....	37
2.3.4 Técnicas de análisis experimentales de esfuerzo.....	38

## CAPÍTULO 3.- METODOLOGÍA DEL DESARROLLO (DFSS).

3.1.- Tecnología avanzada en el análisis estructural de la estufa.	
3.1.1.- Análisis de esfuerzos a través del método del elemento finito.	
3.1.1.1.- El método del elemento finito y sus fundamentos.....	42
3.1.1.2.- Generalidades del método del elemento finito.....	43
3.1.1.3.- Tipos de elementos finitos.....	44
3.1.1.4.- Elemento cascaron (SHELL63).....	46
3.1.1.5.- Formulación del método del elemento finito.....	47
3.1.1.6.- Ventajas y limitaciones del método del elemento finito.....	47
3.1.1.7.- Análisis estructural mediante el método del elemento finito.....	48
3.1.1.8.- Selección del tipo de modelado (2D, 3D).....	49
3.1.1.9.- Preproceso, Proceso y Postproceso.....	49
3.1.1.10.- Modelado y revisión de resultados.....	50
3.1.1.11.- Discretización.....	51
3.1.1.12.- Condiciones de frontera.....	51
3.1.1.13.- Cargas mecánicas.....	52
3.1.1.14.- Análisis estático.....	52
3.1.2.- Análisis de esfuerzos a través de extensometría eléctrica.	
3.1.2.1.- Extensometría eléctrica y sus fundamentos.....	54
3.1.2.2.- Principio de funcionamiento.....	54
3.1.2.3.- Medición de deformaciones.....	59
3.1.2.4.- Selección de extensómetros.....	60
3.1.2.5.- Método de instalación.....	61
3.1.2.6.- Extensómetro utilizado en el análisis.....	62
3.1.2.7.- Medición de deformaciones principales y sus direcciones con roseta.....	64
3.2.- Aplicación de la tecnología avanzada en el desarrollo de nuevos productos.	
3.2.1 Metodología de diseño DFSS.....	66
3.2.2 Aplicación de la tecnología avanzada en la metodología de diseño.....	67
3.3.- Identificación “Requerimientos de desempeño mecánico”.	
3.3.1.- Descripción del problema.....	69
3.3.2.- Definición del problema.....	70
3.3.3.- Desarrollo del proceso DFSS.....	71
3.3.4.- Causas potenciales de falla (X’s).....	72
3.3.5.- Definición de “Y”.....	74
3.4.- Medición “Línea base y validación del modelo FEA a través del análisis Experimental”.	
3.4.1.- Análisis experimental de esfuerzos bajo pruebas estructurales.....	76
3.4.1.1 Procedimiento de medición.....	77
3.4.1.2 Criterios de medición.....	79
3.4.1.3 Obtención de datos.....	79
3.4.1.4.- Resultados experimentales obtenidos.....	81
3.4.2.- Análisis de esfuerzos a través del método del elemento finito bajo pruebas estructurales.	
3.4.2.1.- Desarrollo del modelo de elementos finitos, aplicación de carga y condiciones de frontera.....	82

3.4.2.2.- Criterio de obtención de resultados.....	84
3.4.2.3.- Resultados numéricos obtenidos.....	85
3.4.3.- Correlación de resultados numéricos y experimentales.....	86
3.4.4.- Línea base (resultados de la primera propuesta de diseño).....	90
3.5.- Diseño “Acciones de mejora a través de la ingeniería predictiva”.....	91
3.6.- Optimización “DOE Superficie de respuesta”.....	98
3.7.- Validación “Pruebas de laboratorio”.....	101

## **CAPÍTULO 4.- RESULTADOS Y BENEFICIOS.**

4.1.- Evaluación y discusión de Resultados.	
4.1.1.- Estructura en prueba de carga en cubierta 136 kg.....	103
4.1.2.- Estructura en prueba de fuerzas diagonales 159 kg.....	106
4.1.3.- Estructura en prueba de fuerzas diagonales 125 kg.....	108
4.1.4.- Estufa en las tres pruebas de carga.	
4.1.4.1.- Estufa bajo carga en cubierta 136 kg.....	110
4.1.4.2.- Estufa bajo carga de fuerzas diagonales 159 kg.....	111
4.1.4.3.- Estufa bajo carga de fuerzas diagonales 125 kg.....	111
4.2.- Impacto al costo del proyecto y del producto.	
4.2.1 Impacto al costo por método de análisis.....	113
4.2.2 Impacto al costo por método de trabajo.....	114
4.3.- Impacto al tiempo de desarrollo de un producto.....	115
4.4.- Impacto a la calidad del producto.....	116

## **CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES.**

5.1.- Aportaciones generales.....	118
5.2.- Futuras líneas de desarrollo.....	122

<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>IV</b>
-------------------------	-----------

**SIMBOLOGÍA.**

<b>Símbolo</b>	<b>Denominación</b>
U	Energía potencial
r	Distancia entre átomos
A	Constante proporcional de atracción
B	Constante proporcional de repulsión
n	Exponente de atracción
m	Exponente de repulsión
$\varepsilon$	Deformación
l	longitud deformada
$\eta$	Cambio fraccional en espacios interatómicos
$F_o$	Fuerza interatómica
S	Rigidez
$\sigma$	Esfuerzo
E	Modulo de Young
F	Fuerza
J	Momento polar de inercia
T	Momento torsionante
G	Modulo de corte
$\delta$	Deformación lineal
$\gamma$	Deformación de corte
$\tau$	Esfuerzo de corte
$\nu$	Relación de Poisson
$\sigma_n$	Esfuerzo normal
$U_h$	Energía hidrostática
$U_d$	Energía de distorsión
$\sigma_y$	Esfuerzo de cedencia
$\sigma_u$	Esfuerzo último
$\sigma_{ys}$	Esfuerzo de cedencia a corte
{F}	Vector de fuerzas
{U}	Matriz de desplazamientos
{K}	Matriz de rigidez
R	Resistencia eléctrica
$\rho$	Resistividad
V	Voltaje
$\sigma_T$	Esfuerzo de trabajo

## RESUMEN.

En este trabajo, se presenta el análisis del diseño de una estructura de estufa de 30", el cual formara parte del proceso de desarrollo de nuevos productos (NPI, New Product Introduction) que actualmente se utiliza en nuestra empresa. En este análisis se contempla el uso de herramientas numérico-experimentales que ayuden a ampliar el conocimiento de nuestros productos y que permiten ahorrar tiempo y costo en el desarrollo de los mismos, además de reforzar la metodología de diseño que actualmente se tiene en nuestra empresa.

El desarrollo de este proyecto iniciará con el conocimiento general de las partes que integran la estructura de una estufa así como su principal función. Además, será necesario describir las pruebas nacionales e internacionales bajo las cuales estará sujeta la estructura y que serán de suma importancia para decidir si la estructura es satisfactoria.

Posteriormente se estudiarán los fundamentos teóricos de los materiales sólidos y la dependencia de sus propiedades mecánicas debido a sus diferentes arreglos geométricos atómicos y a sus diferentes interacciones atómicas y moleculares. También se analizará la deformación y el esfuerzo en un material sólido producido por cargas estáticas, así como las teorías de falla para los diferentes materiales.

El estudio de la evolución de los procesos de diseño dentro de las industrias será objeto de estudio, así como las herramientas de análisis y diseño fundamentados en Métodos Numéricos y Métodos Experimentales que vienen a ser parte de la tecnología avanzada en el desarrollo de nuevos productos.

La etapa fundamental de este proyecto consistirá en el desarrollo y la integración de los métodos numéricos y experimentales en la metodología que actualmente se tiene dentro del proceso de diseño. Esta metodología es conocida como Diseño para Seis Sigma, la cual consiste en etapas muy específicas tales como Identificación, Medición, Diseño, Optimización y Validación. Actualmente es una de las metodologías más usadas a nivel mundial por las grandes empresas debido a la visión de tener 3.4 fallas por 1 millón de oportunidades.

Por último, se evaluarán y discutirán los resultados del análisis realizado con el nuevo proceso de diseño y se compararán con el proceso que antes de este proyecto se tenía. Así mismo se evaluará la eficacia de la aplicación de las herramientas numérico-experimentales en el proceso de diseño a través de su impacto en tiempo de desarrollo del producto, el impacto en la calidad del producto y en el impacto en el costo del proyecto y del producto.



---

## ABSTRACT.

This work presents the analysis of the design of the structure of a 30" stove, part of the development process of new products (NPI, New Product Introduction) currently used at our company. In this analysis the use of numerical-experimental tools that help to extend the knowledge of our products and that allow to gain time and cost in its development are crucial, besides this tools reinforce the design methodology currently used at our company.

This project starts with the general knowledge of the parts that integrate the structure of a stove as well as their main function. In addition, it will be necessary to describe the national and international tests under which the structure will be subject and that will be of extreme importance to decide if the structure is satisfactory.

Later the theoretical foundations of the solid materials and the dependency of their mechanical properties due to their different atomic geometric patterns and to their different atomic and molecular interactions are study. Also the deformation and the effort from a solid material produced by static loads are analyzed, as well as the failure theories for the different materials.

The evolution of the design processes in the industries will be study, as well as the analysis and design tools based on Numerical Methods and Experimental Methods that are part of the state of the art technology in the development of new products.

The fundamental stage of this project will consist on the development and the integration of the numerical and experimental methods in the methodology that is currently used on the design process. This methodology is well-known as Design for Six Sigma, which consists on specific stages such as Identification, Measurement, Design, Optimization and Validation. It is one of the preferred methodologies for world-wide level industries due to the vision that this particular methodology offers, to have 3.4 fail every 1 million opportunities.

Finally, the results of the analysis with the new process of design were evaluated and will be discussed. These results were compared against the results obtained with the current process. Also the effectiveness of the application of the numerical-experimental tools in the process of design was evaluated, by measuring its impact in time of development of the product, the impact in the quality of the product and the impact in the cost of the project and the product.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN.

### 1.1 Antecedentes.

#### 1.1.1 Desarrollo actual de nuevos productos.

La forma de crear un nuevo producto consta de una serie de pasos importantes (figura 1.1) donde el primero de ellos es la necesidad del mercado expresada a través del usuario final, competencia, tendencias mundiales, etc. Una vez que se tiene detectada la necesidad se comunica a personas de marketing y a su vez se estudian las innovaciones tecnológicas que desembocan al inicio del desarrollo del nuevo producto a través del diseño, validación, verificación y certificación. Posteriormente, terminada la fase de desarrollo se inicia con la producción y finalmente se hace llegar al usuario final [1].

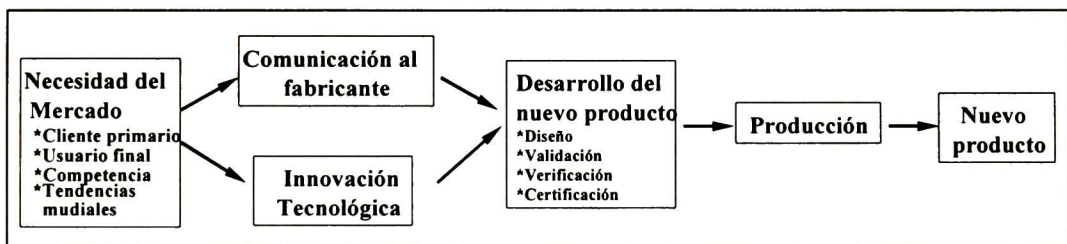
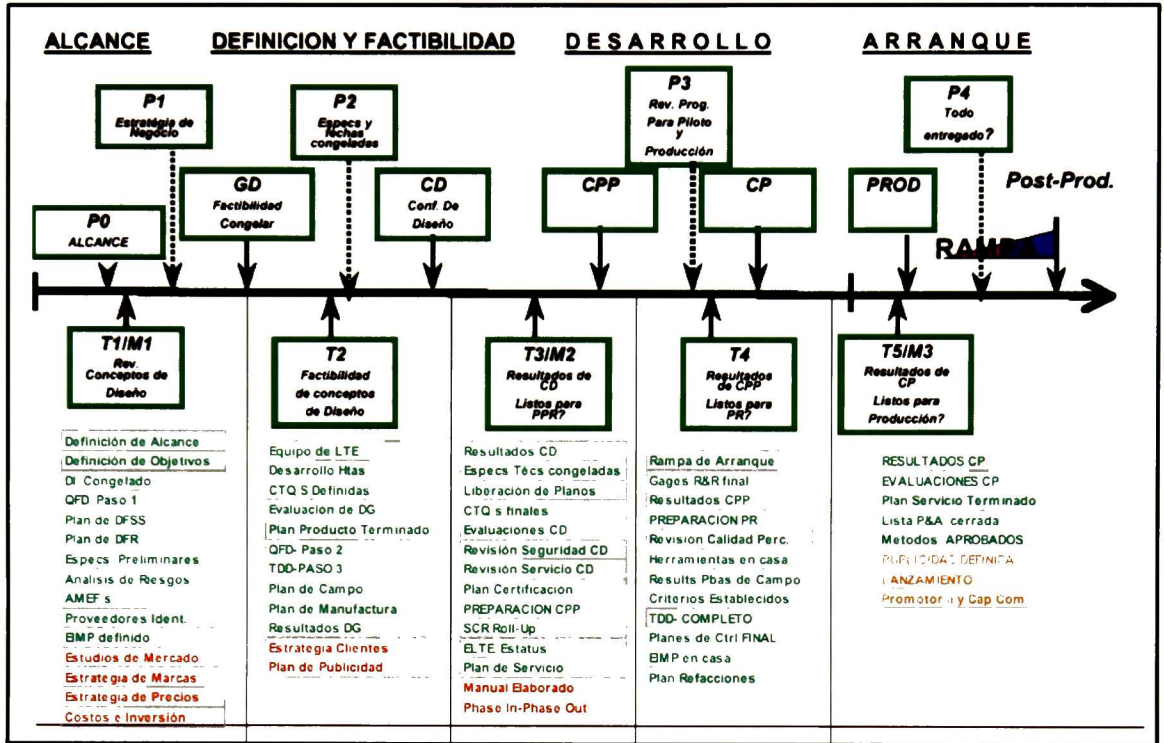


Figura 1.1. Nacimiento de nuevo producto.

Para la introducción de cualquier producto al mercado nacional o internacional, Mabe cuenta con un Proceso de Desarrollo de Nuevos Productos (NPI, New Product Introduction) donde se asegura un desarrollo exitoso y una adecuada implementación de los nuevos proyectos soportado por un sistema de gestión de calidad. También son identificadas expectativas de mercados, tendencias tecnológicas e información de benchmarking del producto y del proceso como punto de referencia para poder asegurar el desarrollo de productos exitosos con una demanda comercial real.

El NPI (figura 2.1) es un proceso basado en la ingeniería concurrente a través del cual se da seguimiento y control a programas o proyectos por medio de listas de verificación técnicas, de programas y comerciales en donde varias actividades son realizadas de manera simultánea a través de lograr la comunicación efectiva entre diferentes áreas con la formación de equipos multidisciplinarios con objetivos comunes. De esta manera se logra la introducción de productos de alta calidad y tecnología, en tiempos y costos de desarrollo competitivos [1].

Figura 1.2. Proceso NPI.



Las principales etapas del NPI son alcance, factibilidad, definición de contrato, confirmación de diseño, corrida prepiloto, corrida piloto, inicio de producción y posproducción. A través de todas estas etapas se realizan revisiones técnicas ( T's ), de programa y de mercadotecnia. Las revisiones T's se enfocan principalmente al diseño del producto y al proceso de manufactura. El impacto al negocio es evaluado a través de las revisiones de programa ( P's ) y finalmente se realizan revisiones de mercadotecnia donde se evalúa el programa comercial del producto.

1.1.2 Proceso actual de diseño.

Dentro del proceso del NPI se encuentran las revisiones T's, que a través de todo el desarrollo del proyecto se realizan 6 revisiones. En la revisión T1 se establecen los conceptos de diseño, en la T2 se presentan las factibilidades de los conceptos de diseño siendo en esta etapa donde se elige uno de ellos. Las revisiones T3, T4 y T5 se evalúan las cuestiones técnicas de manufactura, desempeño y confiabilidad del diseño, y por ultimo se realiza la revisión T6 enfocada totalmente a la producción.

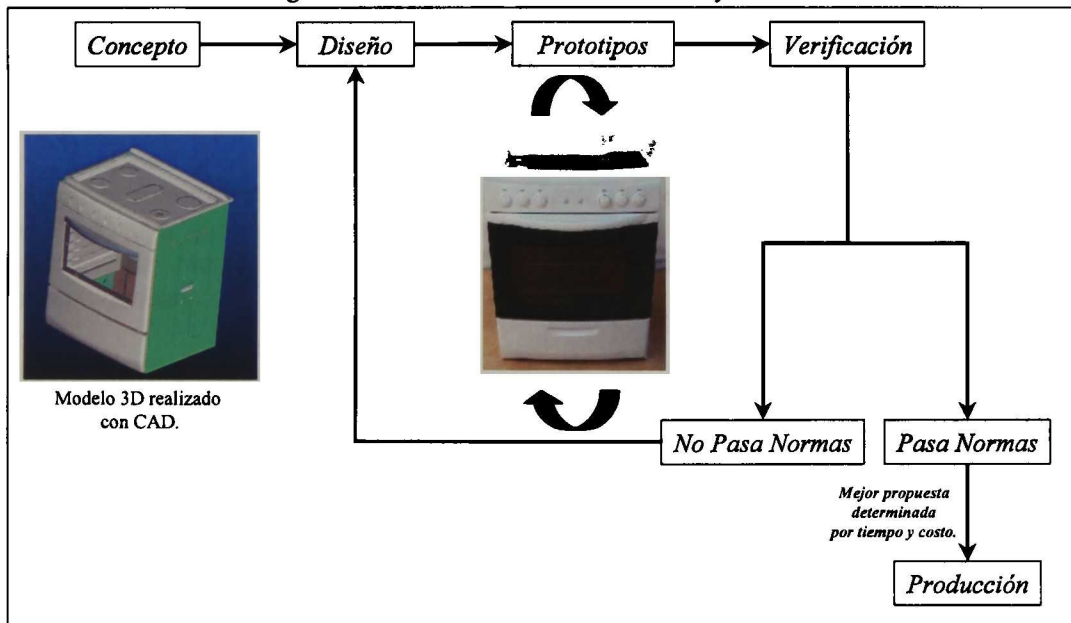
En las revisiones T1 y T2 se explora la factibilidad técnica del diseño y se congelan las especificaciones del nuevo producto así como tambien se elaboran prototipos para ser sujetos a un plan de pruebas y confiabilidad, los resultados de las

pruebas se evalúan en la revisión T3, después de esta revisión ya no debe construirse ningún prototipo si no es a través de herramental de producción.

En la actualidad, la forma de diseñar una estructura y cavidad de horno es básicamente a prueba y error (figura 1.3), donde primeramente se maneja un concepto definido por las tendencias que marca el consumidor y posteriormente se elabora un diseño preliminar. Este primer concepto únicamente es analizado desde el punto de vista de costos, apariencia y manufactura dejando a un lado los análisis que las normas nacionales e internacionales establecen para la aceptación del producto en el mercado. El diseño de la estructura y cavidad de horno desde el punto de vista estructural solo es realizado con la experiencia de los diseñadores, una vez terminado el diseño se construyen prototipos que son sometidos a pruebas estructurales de laboratorio. Posteriormente se verifica si el prototipo acredita las pruebas, si es así, se lleva a producción directamente, pero si el prototipo no pasa las pruebas, se realiza este ciclo “n” veces hasta que llega a pasar las pruebas de laboratorio. Además, cuando surge algún problema de diseño en alguna etapa avanzada del proyecto, nos obliga a crear prototipos de distintas geometrías para explorar si el nuevo diseño cumple con nuestras expectativas y necesidades, claro esta, si el tiempo nos lo permite.

Es demasiada la cantidad de prototipos que se elaboran teniendo como resultado muchas perdidas en costo y tiempo, debido a que se le puede acertar a la primera o quizás hasta la quinta vez. Otro problema que es causa de esta metodología de desarrollo es el desconocimiento de los principios físicos, la influencia de los procesos de manufactura, las propiedades de los materiales y su variación estadística, que por sencillos o complicados que sean, se necesitan conocer para mejorar el producto.

Figura 1.3. Proceso actual de diseño “Prueba y Error”



Es notorio que el proceso de diseño muestra desventaja en calidad, tiempo y costo, dentro de un mercado competitivo y globalizado, además de que se considera imposible llegar a la optimización debido al desconocimiento del comportamiento del material, de la geometría, ensambles, etc. Por lo cual dentro de este proyecto se pretende cambiar este proceso con la finalidad de tener mas ventajas de desarrollo mejorando la calidad, el tiempo de respuesta y sobre todo el costo de producción. Para lograr esto es necesario tener el conocimiento necesario para entender los fenómenos y manipularlos a nuestra conveniencia.

### 1.1.3 Conocimiento del producto.

En la actualidad existe una gran variedad de estufas para el hogar que van desde una estufa con solo quemadores hasta estufas muy modernas con hornos electrónicos programables. Además, otra característica que las define es su tamaño que varía de 16 pulgadas hasta 30 pulgadas. Estas características son establecidas por el mercado al que va dirigido, tales como región del país y nivel socio-económico.

Es necesario acotar que este estudio es dirigido a la estructura y cavidad de horno de una estufa de 30" económica y que su diseño inicial fue inspirado por el diseño anterior a este proyecto. Una estufa actual consta de los siguientes subsistemas: copete, capelo, cubierta, frente de mandos, sistema de gas, cavidad de horno, cuerpo chasis, puerta horno, accesorios y faldón. Además, cada uno de estos subsistemas están formados a su vez por una cantidad de componentes que varía de acuerdo a las necesidades del diseñador.

La figura 1.4 muestra de una manera general los subsistemas que conforman a la estufa así como las funciones de cada uno de ellos y sus relaciones. En amarillo se encuentra los subsistemas chasis y cavidad de horno los cuales están conformados por los siguientes componentes: lateral de estufa, respaldo de estufa, piso estufa, marco frontal, aislantes, caja quemadores, soportes transversales, patas niveladoras y piso de horno, laterales de horno, techo de horno, respaldo de horno, parrillas de horno, respectivamente.

Algunas de las funciones importantes del subsistema chasis son: proveer estructura a la estufa, soportar y localizar puerta/horno/cajón/asador, soportar distribución de gas, soportar cavidad de horno, soportar sistema eléctrico, direccionar flujos de aire caliente/frío y aislar calor de la cavidad de horno. Por otra parte, algunas de las funciones de la cavidad de horno son distribuir calor, soportar parrillas, contribuir a proporcionar estructura a la estufa, localizar foco y direcciona gases de combustión.

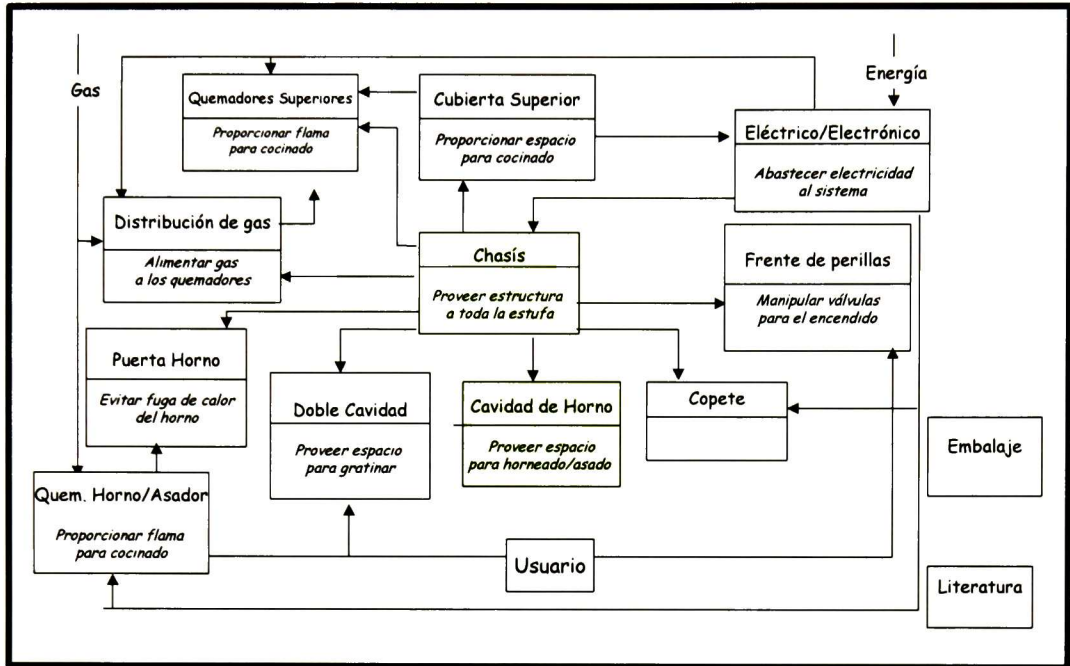


Figura 1.4. Diagrama funcional general de subsistemas de Estufa.

### 1.1.4 Pruebas estructurales y análisis de resultados.

El cumplimiento de la buena respuesta estructural de la estufa es totalmente responsabilidad del subsistema chasis y en parte de la cavidad de horno. Este es un punto muy importante debido a que la estufa no deben de constituir un riesgo para la seguridad de las personas. La evaluación de la respuesta estructural es realizada a través de la norma oficial mexicana NOM-019-SEDG-2002 [2], la cual trata de aparatos domésticos para cocinar alimentos que utilizan gas L.P. y gas natural, esta norma aplica para nuestro país. Otra norma que debe cumplirse debido a la exportación de nuestro producto es la establecida por la American National Standards Institute, ANSI Z21.1a 2003 [3].

Las normas mencionadas anteriormente especifican 3 pruebas necesarias para evaluar la estructura de la estufa, la cuales son:

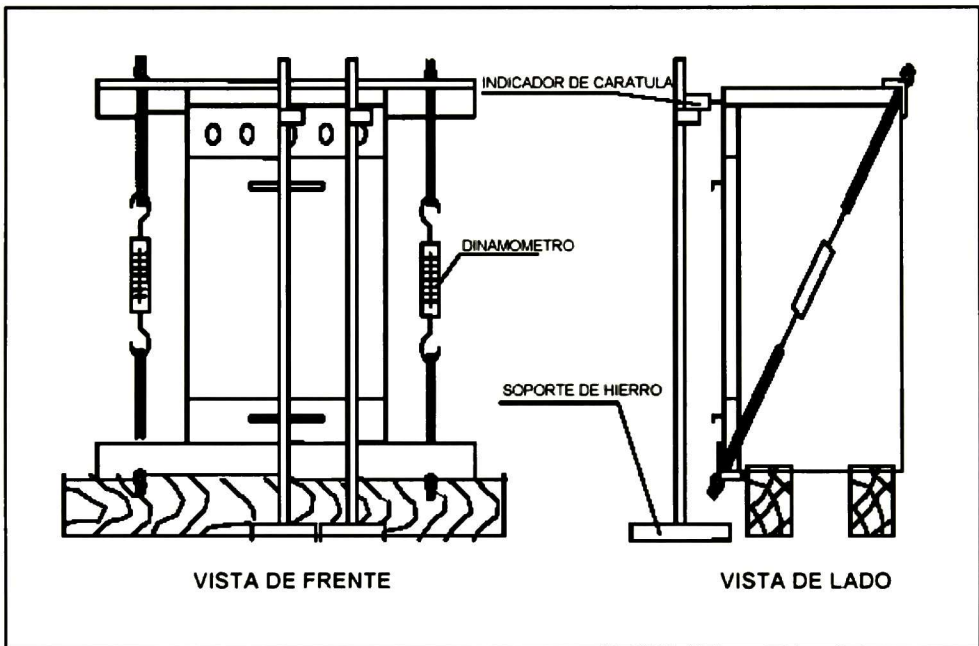
- Resistencia a fuerzas diagonales 159 kg y 125 kg.  
Los materiales usados en la construcción y ensamble del cuerpo de una unidad de piso debe ser capaces de resistir la aplicación de una fuerza diagonal de 159 kg (figura 1.5) aplicada del frente hacia atrás y una fuerza diagonal de 125 kg (figura 1.6) de lado a lado sin que se presente una deformación permanente superior a los 0.012 in en la dirección con el plano del componente horizontal de la fuerza.

diagonal. Las secciones o paneles que no contribuyan a dar rigidez al marco estructural principal deben de eliminarse durante esta prueba.

- Carga en cubierta 136 kg.

La estructura de la base, el frente y la superficie o su equivalente, al ser expuestas a una carga no menor a 136 kg aplicada durante 5 minutos (figura 1.7), no debe presentar ruptura o daño permanente en ninguna de las partes ni una deformación permanente que no exceda de 0.020 in. Si la cubierta superior no forma parte de la estructura debe de removerse y la carga debe ser aplicada en las partes estructurales superiores.

Figura 1.5. Pruebas de resistencia a fuerzas diagonales del frente hacia atrás.



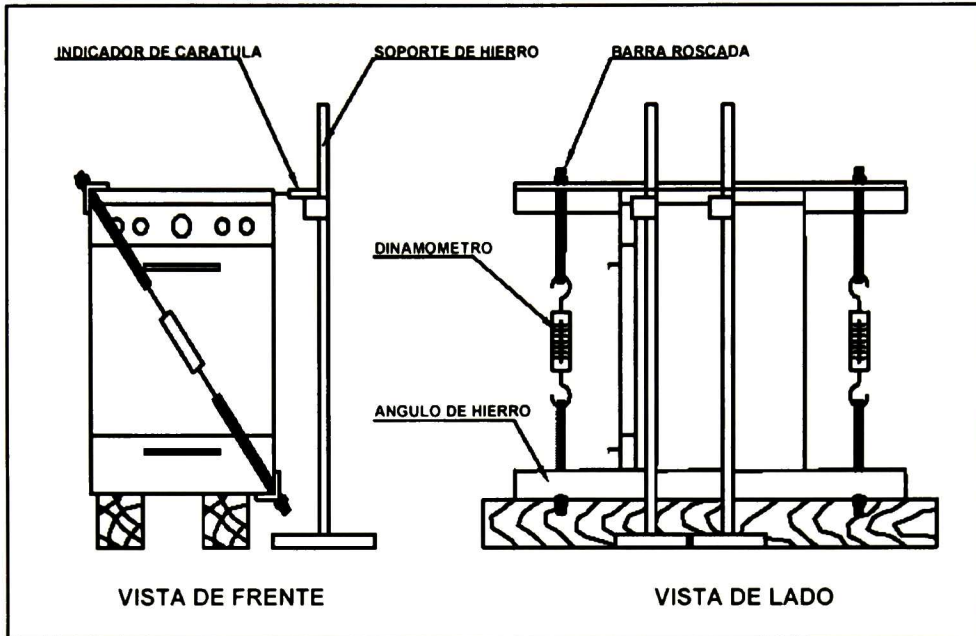


Figura 1.6. Pruebas de resistencia a fuerzas diagonales entre costados.

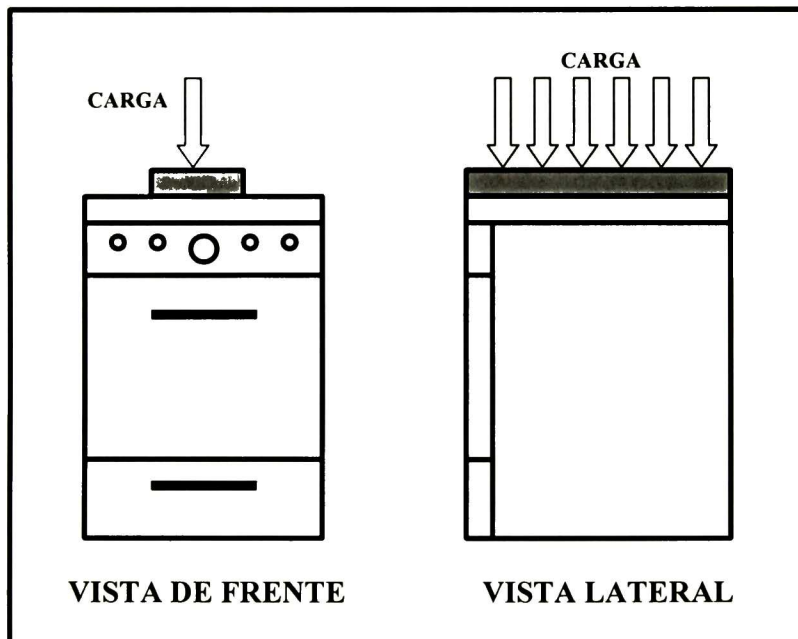


Figura 1.7. Prueba de carga en cubierta.



El proceso de prueba para evaluar la estructura de la estufa bajo las consideraciones anteriores se realiza por el laboratorio de estufas iniciando con la preparación detallada por la norma en cuanto a posición de estufa, componentes, forma de aplicación de carga, etc. Una vez realizada la prueba se inspecciona la estufa de manera visual y se reporta cualquier deformación permanente que haya sufrido algún componente de la estufa, se toman fotografías (evidencia) y se elabora un reporte mencionando las fallas encontradas. La manera en que el laboratorio realiza las pruebas no es muy apegada a la norma debido a que no se cuantifica exactamente los desplazamientos ni las deformaciones inducidas debido a la ausencia de micrómetros, sin embargo si cumple con los requisitos de la norma.

La manera actual de evaluar la estructura no nos permite conocer el comportamiento estructural de los componentes internos, contribuyendo al desconocimiento de nuestro producto y a no identificar áreas de oportunidad para la reducción de material o la aplicación de materiales alternos, de tal manera de llegar a la optimización del producto.

## 1.2.- OBJETIVOS DEL DESARROLLO.

El desarrollo de este proyecto busca crear un producto competitivo en desempeño (satisfacción del cliente), costo (reducción del 30%) y tiempo (mas opciones de diseño en menos tiempo) mediante una nueva técnica numérico-experimental que fortalezca el proceso de diseño y nos permita conocer el desempeño y los fenómenos físicos involucrados en nuestro producto de una manera cualitativa y cuantitativa.

La propuesta de diseño conceptual deberá ser muy próxima a lo que será el diseño final, tal que con dicha propuesta inicial se pueda realizar una estimación del costo del producto y de cada una de las etapas del proceso de desarrollo del mismo, para así determinar de manera inmediata si la propuesta de desarrollo del nuevo producto será competitiva. En forma concreta, los objetivos que se buscan son:

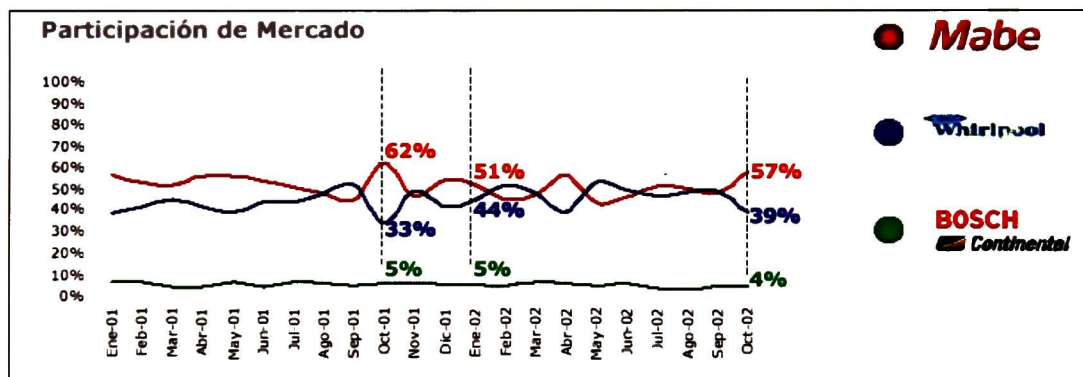
- Apoyo en el desarrollo de una nueva plataforma de estufas de piso de 30” para mercado nacional con enfoque de mejorar la competitividad en costos y apariencia.
- Fortalecer nuestro proceso de diseño a través de un nuevo sistema de análisis que nos permita obtener un diseño optimo, con el menor costo y en el menor tiempo posible.
- Implementar nueva técnica de análisis numérico-experimental que permita la creación de un modelo numérico validado experimentalmente, el cual sea de utilidad en diseños futuros de Electrodomésticos.
- Incrementar el conocimiento necesario para optimizar el comportamiento estructural del la Cavidad de Horno y el Chasis.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.

Durante muchos años nuestro país solo participaba en el ramo industrial con empresas únicamente de producción dejando de lado el desarrollo y la tecnología, pero en los últimos años y debido a la creación de su Centro de Tecnología y Proyectos, actualmente es reconocida a nivel internacional como una empresa que desarrolla e impulsa la tecnología, una prueba de esto es el liderazgo que tiene en el mercado nacional (figura 1.8) y la gran participación que tiene en el mercado latinoamericano y norteamericano, además de la obtención del Premio Nacional de Tecnología del año 2003.

Dentro de las necesidades que despiertan el interés por el desarrollo de este proyecto es mantener el liderazgo en el mercado nacional y consolidarse líder en los mercados latinoamericanos, así como ampliar la participación en el mercado americano e incursionar a futuro en el mercado europeo.

Figura 1.8. Gráfico de participación en el mercado nacional de Estufas de 30"

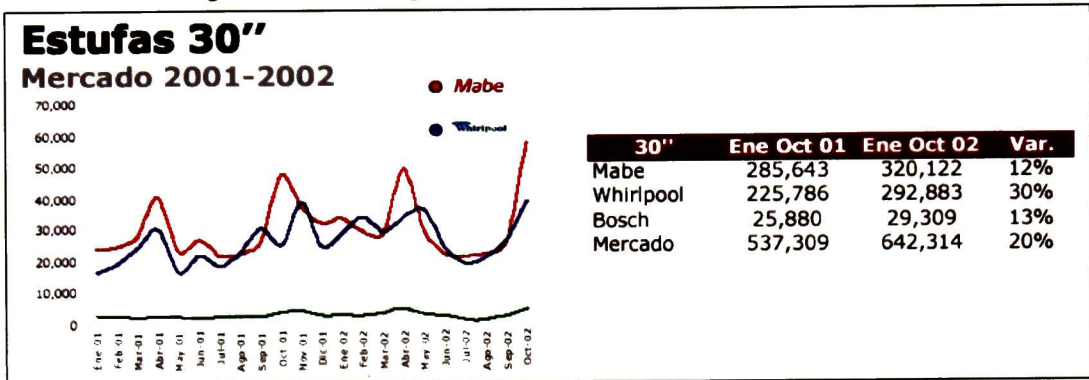


La gran capacidad de producción de electrodomésticos que tienen nuestras plantas y la gran inversión que se genera en la entrada de una nueva línea hace que se demande un buen diseño del producto porque de este depende la manufactura, las instalaciones y la mano de obra.

En la Ciudad de San Luis Potosí, se cuenta con una planta maquiladora de estufas, la cual tiene grandes capacidades de producción de estufas al año (figura 1.9), pero específicamente se tiene programado a través de este proyecto producir 500,000 estufas por año.

Debido a los grandes volúmenes de producto que se manejan y a la competencia tan agresiva es necesario desarrollar productos innovadores y más competitivos lo cual nos exige integrar nuevas herramientas de análisis y mejorar nuestros procesos de desarrollo con la visión de reducir costos, mejorar calidad y reducir tiempos de fabricación y lanzamiento para mantenernos en el mundo competitivo.

Figura 1.9. Gráfico de productos en el mercado nacional de Estufas de 30".



---

# CAPÍTULO 2

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Comportamiento mecánico de los materiales.

#### 2.1.1 Tipos de materiales.

El interés de analizar los diferentes tipos de materiales en el presente trabajo, es con el objetivo de tener bases sólidas que nos permitan conocer el material desde sus propiedades microestructurales hasta la relación con sus propiedades macroestructurales. Por el interés de analizar una estructura que será sometida a diferentes tipos de carga, nos enfocaremos a las propiedades de los materiales en estado sólido.

Algunas de las propiedades importantes de los sólidos dependen de sus arreglos geométricos atómicos, y también de las interacciones que existen entre los átomos o moléculas que los constituyen. Los materiales sólidos se clasifican en tres grupos básicos: metales, cerámicos, y polímeros [4]. Este sistema está basado primeramente en propiedades químicas y estructuras atómicas, y la mayoría de los materiales caen dentro de cualquiera de estos grupos, aunque hay algunos que son intermedios.

#### Metales

Los materiales metálicos normalmente son combinaciones de elementos metálicos. Estos tienen grandes números de electrones; muchas propiedades de los metales son directamente atribuidas a estos electrones. Los metales son extremadamente buenos conductores de electricidad y calor, además de no ser transparentes y tener apariencias superficiales aceptables como después de un pulido. Además, los metales son resistentes y poco deformables, lo cual los hace muy adecuados a las aplicaciones estructurales.

#### Cerámicos

Los cerámicos están formados entre elementos metálicos y no metálicos. La gran cantidad de materiales que caen dentro de la clasificación de los cerámicos están compuestos por minerales, cementos y vidrios. Estos materiales son típicos aislantes de la electricidad y calor, ya que son más resistentes a altas temperaturas y ambientes severos que los metales y los polímeros. Con respecto al comportamiento mecánico, los cerámicos son duros y por lo tanto muy frágiles, por lo cual no los hace buenos candidatos a aplicaciones estructurales.

#### Polímeros

Los polímeros incluyen la familia de los plásticos y hules. Muchos de ellos son compuestos orgánicos que tienen bases químicas como el carbón, hidrógeno y otros elementos no metálicos; además, tienen estructuras moleculares muy largas. Estos materiales tienen bajas densidades y son extremadamente flexibles.

## Compuestos

Han sido desarrollados un buen número de materiales compuestos que consisten de más de un tipo de material. La fibra de vidrio es un buen ejemplo, en el cual las fibras de vidrio son incrustadas dentro de un material polimérico. Un compuesto es diseñado para conseguir una combinación de propiedades de los distintos materiales que se usan para su fabricación. Por ejemplo, la fibra de vidrio tiene resistencia debido al vidrio y flexibilidad debida al polímero.

Basándose en las características de los tres grupos de materiales, aseguramos que los mejores materiales para la fabricación de las estructuras del subsistema chasis y cavidad de horno, son los materiales metálicos. El trabajo de justificar la selección se realizará en los capítulos posteriores.

### 2.1.2 Propiedades de los materiales.

La selección de los materiales esta basada en sus propiedades. La mayoría de las propiedades de los materiales estan listados en la figura 2.1. Estas propiedades se clasifican en:

**Propiedades Químicas**, son características del material que relacionan la estructura del material con los elementos que lo componen.

**Propiedades Físicas**, son características que pertenecen a la interaccion de los elementos con varias formas de energia y con otras formas de la materia. La densidad es una propiedad física; puede ser determinada por el peso y el volumen de un objeto.

**Propiedades Mecánicas**, son características de un material que son manifestadas cuando una fuerza es aplicada a un material. Son usualmente relacionadas con el comportamiento elástico y plástico del material. Se requiere de la de la destrucción del material para realizar la medicion. El término mecánico es aplicado a esta categoría de propiedades debido a que son usadas para indicar su utilidad en aplicaciones mecánicas, componentes de carga, absorbedores de impacto, resistencia al desgaste, etc.

**Propiedades Dimensionales**, la forma, el acabado y la disponibilidad de tamaño son generalmente los factores de selección mas importantes. La rugosidad de la superficie es una propiedad dimensional.

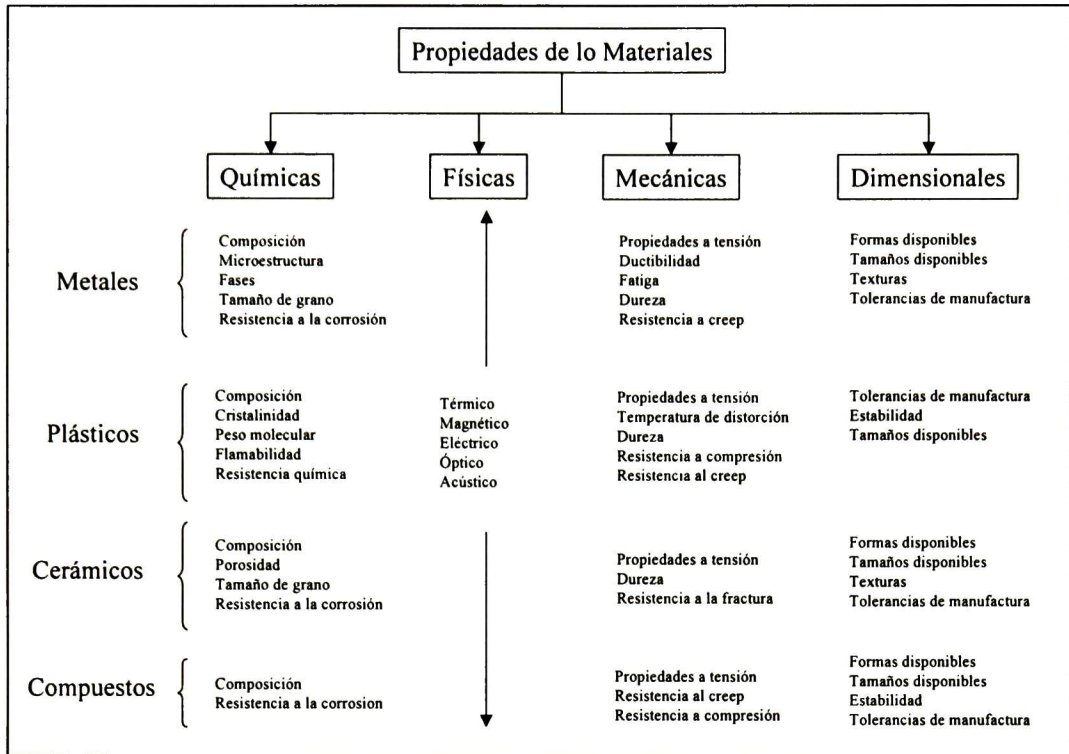


Figura 2.1 Propiedades generales de los materiales.

### 2.1.3 Enlaces Metálicos.

La rigidez y la resistencia del material son dos propiedades de suma importancia en el análisis estructural del chasis y la cavidad de horno. Estas propiedades del material son producidas por las fuerzas que existen en sus enlaces atómicos y que producen estructuras cristalinas características de cada material [5,6]. En un material metálico el enlace que se forma es un enlace metálico y la fórmula que describe la energía de su enlace atómico está dada como (Ec 1):

$$U = -\frac{A}{r^m} + \frac{B}{r^n} \quad (m < n)$$

- U = Energía potencial
- r = Distancia entre átomos
- A = Constante proporcional de atracción
- B = Constante proporcional de repulsión
- n = Exponente de atracción
- m = Exponente de repulsión

En un sólido, la energía de los electrones es muy grande y tienden a salir para unirse con otros electrones libres, no se juntan como cualquier ion en particular (Figura 2.2). El movimiento fácil de los electrones da una alta conductividad eléctrica en los metales. El enlace metálico no tiene dirección, y tienden a empacarse de una manera simple, lo cual da una alta densidad en su estructura cristalina.

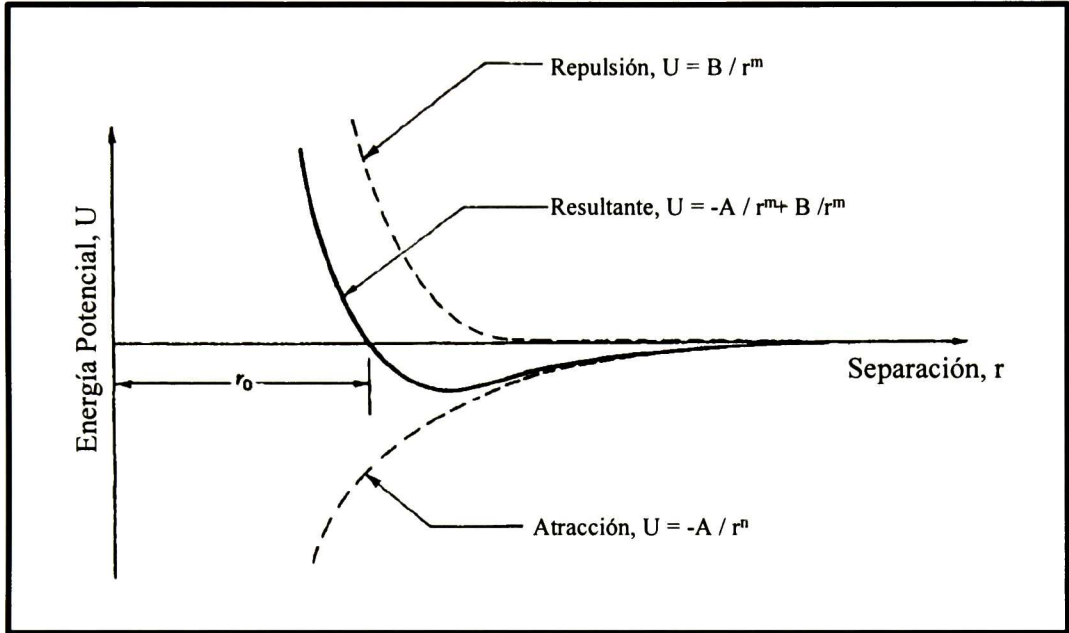


Figura 2.2. Formación de enlace metálico, visto en términos de energía.

#### 2.1.4 Rigidez y deformación en cristales.

Pequeños cambios en los espacios interatómicos de un material manifiestan microscópicamente una deformación elástica [6,7]. La definición de ingeniería de la deformación es (Eq. 2.2)

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

donde  $\varepsilon$  es la deformación macroscópica de ingeniería,  $l_0$  es la longitud original y  $l$  es la longitud deformada del miembro. Esta deformación macroscópica es igual al promedio fraccional del cambio en los espacios interatómicos en la misma dirección, o (Eq. 2.3)

$$\eta = \frac{r - r_0}{r_0}$$

donde  $\eta$  es el cambio fraccional en los espacios interatómicos,  $r_0$  es el espacio en equilibrio y  $r$  es el espacio deformado. Esto puede, sin embargo, producir que el módulo de Young de elasticidad debe ser proporcional a la pendiente de la curva en la vecindad

de  $r_0$ . El rango normal de deformación elástica observada en los materiales cristalinos raramente excede del 0.5 %.

Para definir la rigidez en términos de energía potencial y fuerza interatómica, tenemos que si hacemos una segunda derivada a  $F$  con respecto a  $r$  obtenemos la rigidez  $S$  de la unión atómica, entonces (Eq. 2.4):

$$F_o = \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)_{r=r_o} \quad S_o = \left( \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right)_{r=r_o}$$

Para pequeñas deformaciones, la fuerza entre 2 átomos es, (Eq. 2.5):

$$F = S_o(r - r_o)$$

Este es el comportamiento de la unión en el rango lineal-elástico, este es el origen físico de la ley de Hooke. El concepto de rigidez de unión, basada en las curvas de energía-distancia, va enfocada a explicar el origen del modulo elástico.

Ahora, si la fuerza total entre los dos planos del sólido por unidad de área que los están separando una distancia  $(r-r_0)$  es definida como esfuerzo, con (Eq. 2.6):

$$\sigma = NS_o(r - r_o)$$

$N$  es el número de uniones por área, igual a  $1/r_o^2$  ( $r_o^2$  es el promedio de área por átomo). Convertimos el desplazamiento  $(r-r_0)$  en deformación  $\epsilon_n$  dividiéndolo por su espacio original,  $r_o$ , entonces (Eq. 2.7),

$$\sigma = \left( \frac{S_o}{r_o} \right) \epsilon_n$$

Entonces obtenemos el Modulo de Young (Eq. 2.8)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_n} = \frac{S_o}{r_o}$$

### 2.1.5 ENERGIA DE DEFORMACION.

La energía potencial almacenada en un elemento deformado elásticamente en una distancia  $y$ , es igual al producto de la fuerza media y la deformación total, o sea (Ec. 2.9)

$$U = \frac{F}{2} y = \frac{F^2}{2k}$$



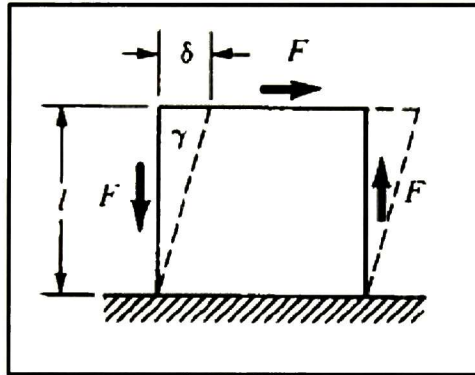
Esta ecuación es general en el sentido de que la fuerza  $F$  es también un momento torsionante o flexionante siempre que, desde luego, se utilicen unidades constantes para  $k$ . Mediante la sustitución de expresiones adecuadas para  $k$ , pueden obtenerse formulas de la energía de deformación para diversos tipos de cargas simples [8]. Este es el caso de la tensión, compresión y torsión simples, por ejemplo, se emplean las ecuaciones 2.10 y 2.11 se obtiene así

$$U = \frac{F^2 l}{2AE} \quad \text{Tensión y Compresión}$$

$$U = \frac{T^2 l}{2GJ} \quad \text{Torsión}$$

A fin de obtener una expresión para la energía de deformación debida a cortante directo, se considera que el elemento esta fijo por uno de sus lados, según se indica en la figura 2.3.

Figura 2.3 Elemento dujeto a fuerzas de corte.



La fuerza  $F$  somete al elemento a cortante puro, y el trabajo efectuado es  $U = F\delta/2$ . Como la deformación angular o por cortante es  $\gamma = \delta/l = \tau/G = F/AG$ , se tiene (Ec. 2.12)

$$U = \frac{F^2 l}{2GJ} \quad \text{Corte directo}$$

A veces la energía de deformación almacenada en un volumen unitario es una cantidad útil, al dividir las ecuaciones de la 2.10 a la 2.12 entre el volumen total  $lA$ , se obtiene la energía almacenada.

$$U = \begin{array}{ccc} \frac{\sigma^2}{2E} & \frac{\tau^2}{2G} & \frac{\tau_{\max}^2}{4G} \\ \text{Tensión y} & \text{Torsión} & \text{Corte} \\ \text{Compresión} & & \text{directo} \end{array}$$

### 2.1.6 DEFORMACIÓN ELÁSTICA.

El grado en el que una estructura se deforma depende de la magnitud de la tensión a la que se someta. Para la mayoría de los metales que se someten a un esfuerzo bajo tensión y a niveles relativamente bajos, el esfuerzo y la tensión son directamente proporcionales bajo la siguiente relación (Ec 2.13),

$$\sigma = E\varepsilon$$

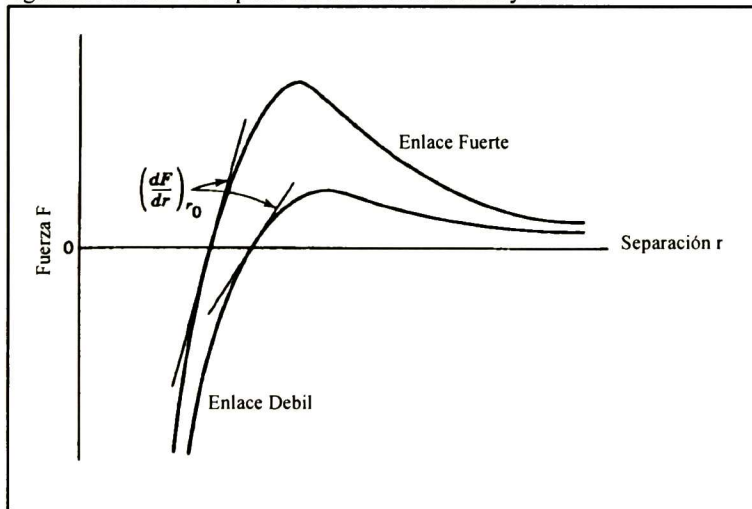
Esto es conocido como la ley de Hooke, y la constante de proporcionalidad  $E$  (GPa o psi) es el módulo de elasticidad o módulo de Young. La deformación en la que el esfuerzo y la tensión son proporcionales es conocida como *deformación elástica*.

La deformación elástica no es permanente, lo que significa que en cuanto la carga aplicada se retira, la pieza regresa a su forma original. Como se muestra en la gráfica esfuerzo-deformación la aplicación de la carga equivale a moverse desde el origen hacia arriba y a lo largo de la línea de deformación. Hasta retirar la carga, la línea atraviesa en dirección contraria, regresando al origen.

En una escala atómica, la deformación elástica macroscópica se manifiesta con pequeños cambios en el espaciamiento interatómico y el estiramiento de los enlaces interatómicos. Como consecuencia, la magnitud del módulo de elasticidad es una medida de la resistencia a la separación entre átomos adyacentes, esto es, las fuerzas de los enlaces interatómicos. Además, estos módulos son proporcionales a la pendiente de la curva de fuerza-separación interatómica al espaciamiento del equilibrio [8]:

La figura 2.4 muestra la curva de fuerza-separación para materiales que tienen fuerzas de enlace fuertes y débiles; la pendiente  $r_0$  lo indica para cada una de ellas.

Figura 2.4 Fuerza de separación en enlaces débiles y fuertes



Los valores del módulo de elasticidad para materiales cerámicos son mayores que para los metales; para polímeros son menores. Estas diferencias son una consecuencia directa de los distintos tipos de enlaces atómicos en los tres tipos de materiales.

Como debería de esperarse, la aplicación de esfuerzos de compresión, corte o torsional también evoca comportamiento elástico. Las características de esfuerzo-deformación a niveles bajos de esfuerzo son básicamente los mismos para situaciones de tensión y compresión, para incluir la magnitud del modulo de elasticidad. Esfuerzo de corte ( $\tau$ ) y deformación de corte ( $\gamma$ ) son directamente proporcionales por la expresión (Ec. 2.14)

$$\tau = G\gamma$$

Donde G es el modulo de elasticidad al corte, la pendiente de la región lineal elástica de la curva esfuerzo-deformación de corte.

Cuando un material es sometido a esfuerzos de tensión, sufre una elongación acompañada por una deformación  $\epsilon$  en dirección de la aplicación de los esfuerzos. Como resultado de esta elongación habrá constricción en los laterales (“x” y “y” ) que son direcciones perpendiculares a la aplicación de los esfuerzos. Si aplicamos un esfuerzo uniaxial, y el material es isotropico, tendremos que  $\epsilon_x = \epsilon_y$  . Un parámetro llamado Relación de Poisson  $\nu$  es definido como (Ec. 2.15)

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

Para la mayoría de los metales, la relación de poisson esta entre 0.25 y 0.35. En otras palabras, el modulo de Poisson es la relación entre el esfuerzo lateral y el esfuerzo longitudinal. Para los materiales isotropicos, el modulo elástico y de corte esta relacionado de la siguiente manera (Ec 2.16 y Ec. 2.17):

$$E = 2G(1 + \nu) \qquad G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

En la mayoría de los materiales G esta alrededor de 0.4E.

### 2.1.7 Hipótesis Principales de la Resistencia de Materiales.

Para desarrollar la teoría de la Resistencia de Materiales, son aceptadas una serie de hipótesis sobre la estructura y las propiedades de los materiales, lo mismo que sobre el carácter de las deformaciones [9,10] .

- 1) Hipótesis sobre la continuidad del material.- Se supone que el material llena totalmente el volumen que ocupa.
- 2) Hipótesis sobre la homogeneidad e isotropía.- Se supone que las propiedades del material son iguales en todos los puntos, y en cada punto, en todas las direcciones.
- 3) Hipótesis sobre la pequeñez de las deformaciones.- Se supone que las deformaciones son pequeñas en comparación con las dimensiones del cuerpo deformado. Por tanto las ecuaciones de la estática se hacen en base a un cuerpo no deformado.
- 4) Hipótesis sobre la elasticidad perfecta del material.- Se suponen todos los cuerpos absolutamente elásticos. En la práctica los cuerpos reales pueden considerarse elásticos, solo hasta ciertos valores de carga.
- 5) Hipótesis sobre la dependencia lineal entre las deformaciones y las cargas.- Se supone que para la mayoría de los materiales es válida la Ley de Hooke, que establece la dependencia proporcional directa entre las deformaciones y las cargas.

Como consecuencia de las hipótesis sobre la pequeñez de las deformaciones la dependencia lineal entre las deformaciones y los esfuerzos, durante la solución de la mayoría de los problemas de resistencia de materiales es aplicable el Principio de Superposición. En otras palabras, las deformaciones en cualquier elemento de la estructura producidas por diferentes factores (fuerzas, temperaturas, etc...) son iguales a la suma de las deformaciones producidas por cada uno de esos factores y no dependen del orden de su aplicación.

### 2.1.8 Estado general de esfuerzos y deformaciones.

En un cuerpo solido de tamaño, figura y material arbitrario actúa un sistema de fuerzas que se encuentran en equilibrio a las cuales el cuerpo responderá con fuerzas internas que también estarán en equilibrio en cualquier punto dentro del cuerpo (figura 2.5). El estado de esfuerzo en el que se encuentra un determinado punto en tres dimensiones con referencia a un plano en específico esta dado por el siguiente sistema de ecuaciones 2.18

$$\begin{aligned} F_x &= A_x \sigma_x + A_y \tau_{xy} + A_z \tau_{xz} \\ F_y &= A_x \tau_{xy} + A_y \sigma_y + A_z \tau_{yz} \\ F_z &= A_x \tau_{xz} + A_y \tau_{yz} + A_z \sigma_z \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= l & A_x &= Al \\ \cos \beta &= m & A_y &= Am \\ \cos \gamma &= n & A_z &= An \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_x &= \frac{F_x}{A} \\ S_y &= \frac{F_y}{A} \\ S_z &= \frac{F_z}{A} \end{aligned} \quad \text{Ec 2.19}$$

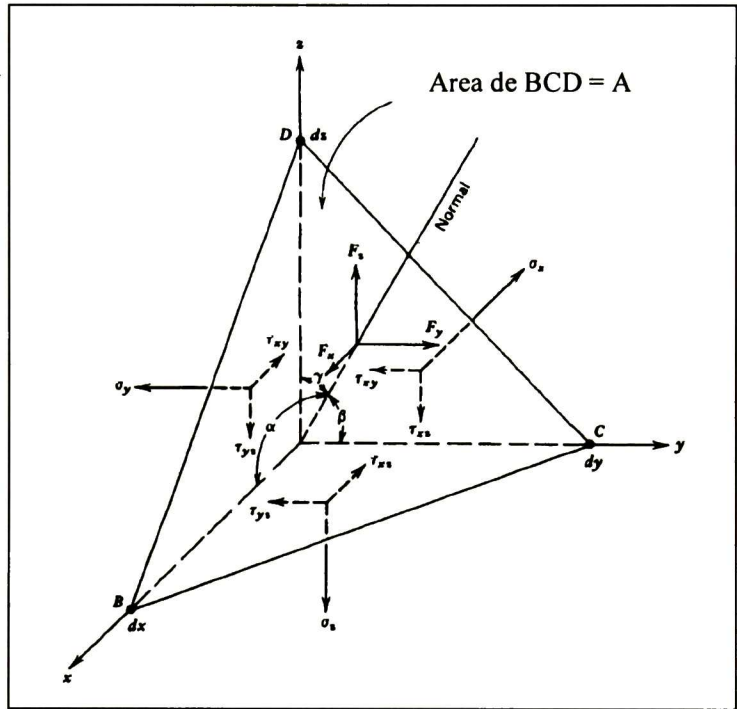


Figura 2.5 Fuerzas de equilibrio en un elemento diferencial de volumen.

Sustituyendo las ecuaciones 2.19 en las ecuaciones 2.18 escribimos las expresiones de los tres componentes de esfuerzo que actuan en el plano BCD como (Ec. 2.20)

$$S_x = l\sigma_x + m\tau_{xy} + n\tau_{xz} \quad S_y = l\tau_{xy} + m\sigma_y + n\tau_{yz} \quad S_z = l\tau_{xz} + m\tau_{yz} + n\sigma_z$$

Las expresiones de los componentes del esfuerzo normal  $S_{xn}$ ,  $S_{yn}$  y  $S_{zn}$  de cada uno de los esfuerzos  $S_x$ ,  $S_y$  y  $S_z$  como (Ec. 2.21)

$$S_{xn} = lS_x \quad S_{yn} = mS_y \quad S_{zn} = nS_z$$

Si sustituimos las ecuaciones 2.20 en las ecuaciones 2.21 obtenemos (Ec 2.22)

$$S_{xn} = l(l\sigma_x + lm\tau_{xy} + n\tau_{xz}) \quad S_{yn} = m(l\tau_{xy} + m\sigma_y + n\tau_{yz}) \quad S_{zn} = n(l\tau_{xz} + m\tau_{yz} + n\sigma_z)$$

La resultante del esfuerzo normal  $\sigma_n$  en el plano BCD es (Ec. 2.23)

$$\sigma_n = S_{xn} + S_{yn} + S_{zn}$$

O sustituyendo las ecuaciones 2.22 en las ecuaciones 2.23, tenemos (Ec. 2.24)

$$\sigma_n = l^2 \sigma_x + m^2 \sigma_y + n^2 \sigma_z + 2(lm \tau_{xy} + nl \tau_{xz} + mn \tau_{yz})$$

Esta expresión nos da el valor del esfuerzo normal  $\sigma_n$  en un plano específico a través de cualquier punto en términos de seis distintos componentes de esfuerzo y sus direcciones en el plano. El mismo análisis es realizado para obtener el estado general de deformaciones [10,11].

### 2.2.9 Esfuerzos normales principales.

Los esfuerzos principales son esfuerzos normales donde los esfuerzos de corte son cero. Los planos en los cuales están actuando los esfuerzos principales se llaman planos principales. Los esfuerzos principales son valores máximos de esfuerzo normales que ocurren en cualquier plano y a través de un punto. La falla en el módulo de elasticidad está relacionada con los esfuerzos principales o con los esfuerzos máximos de corte, por lo tanto los esfuerzos principales están dados (Ec 2.25)

$$\sigma_1 = \sigma_{x'}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{y'} + \sigma_{z'}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{y'} - \sigma_{z'}}{2}\right)^2 + \tau_{y'z'}^2}$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_{y'} + \sigma_{z'}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{y'} - \sigma_{z'}}{2}\right)^2 + \tau_{y'z'}^2}$$

Los planos principales en los cuales  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  actúan son perpendiculares al plano en el cual actúa  $\sigma_1$ . Hay un infinito número de planos perpendiculares al plano de  $\sigma_1$  pero los únicos de interés son los planos donde los esfuerzos de corte son cero.

La gran importancia es reconocer que el máximo valor de los esfuerzos principales es el máximo esfuerzo normal que puede ocurrir en cualquier plano y pasar a través de cualquier punto.

### 2.1.10 Esfuerzos principales de corte.

Los planos principales fueron definidos como los planos donde los esfuerzos cortantes son cero. La resultante de esfuerzos en el plano principal es solamente esfuerzo normal, pero en cualquier otro plano existen componentes de esfuerzo normal y componentes de esfuerzos de corte. Existe también un plano donde los esfuerzos de corte son máximos y se les llama esfuerzos principales de corte y los planos donde estos actúan se les llama planos principales de corte.

La resultante de los esfuerzos  $\sigma_r$  puede expresarse como el vector suma de sus componentes normales de esfuerzo  $\sigma_n$  y sus componentes de esfuerzo de corte  $\tau$ , entonces (Ec. 2.25)

$$\sigma_r^2 = \sigma_n^2 + \tau^2$$

Sustituyendo esta ecuación en la ecuación 2.24 y resolviendola para  $\tau^2$  tenemos (Ec. 2.25),

$$\tau^2 = l^2\sigma_1^2 + m^2\sigma_2^2 + n^2\sigma_3^2 - (l^2\sigma_1 + m^2\sigma_2 + n^2\sigma_3)^2$$

Esta expresión define los esfuerzos de corte en cualquier plano que pase a través de un punto en terminos de los esfuerzos principales normales y los cosenos directores definen el plano en el cual los esfuerzos de corte actúan, referenciados a los ejes principales.

Los siguientes valores (tabla 2.1) de los cosenos directores sustituidos en la ecuación anterior nos dan como resultado el valor máximo de esfuerzo de corte. Además, cada una de estos tres juegos de cosenos directores, define la dirección del plano en el cual los esfuerzos de corte son máximos.

Tabla 2.1 Planos donde los esfuerzos de corte alcanzan su máximo valor.

Dirección	Plano					
Coseno	1	2	3	4	5	6
$l$	0	$\pm\sqrt{1/2}$	$\pm\sqrt{1/2}$	$\pm 1$	0	0
$m$	$\pm\sqrt{1/2}$	0	$\pm\sqrt{1/2}$	0	$\pm 1$	0
$n$	$\pm\sqrt{1/2}$	$\pm\sqrt{1/2}$	0	0	0	$\pm 1$

Si los cosenos directores de la columna uno, dos y tres de la tabla son substituidos en la ecuación 2.25, el correspondiente valor para  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  y  $\tau_3$  son (Ec.2.26):

$$\tau_1 = \pm \frac{1}{2(\sigma_2 - \sigma_3)} \quad \tau_2 = \pm \frac{1}{2(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad \tau_3 = \pm \frac{1}{2(\sigma_1 - \sigma_2)}$$

De estas últimas tres expresiones podemos deducir que los máximos esfuerzos de corte son en magnitud iguales a la mitad de la diferencia entre el esfuerzo normal máximo y el esfuerzo normal mínimo.

### 2.1.11 Relaciones entre esfuerzos y deformaciones.

Las relaciones lineales entre esfuerzo normales y deformaciones normales para el caso tridimensional en el rango elástico del diagrama esfuerzo-deformación es conocido como la ley de Hook y están dadas por las siguientes ecuaciones 2.27,

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)] \quad \varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)]$$

Por otro lado, las relaciones lineales entre esfuerzos de corte y deformación de corte en el rango elástico están dadas por las ecuaciones 2.28,

$$\gamma_1 = \pm \frac{\tau_1}{G} = \pm \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2G} \quad \gamma_2 = \pm \frac{\tau_2}{G} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2G} \quad \gamma_3 = \pm \frac{\tau_3}{G} = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2G}$$

Recordemos que un estado de deformaciones es directamente análogo a un estado de esfuerzos, el cual está compuesto por 6 componentes de esfuerzo, 3 componentes de esfuerzos normales y 3 componentes de esfuerzos de corte.

### 2.1.12 Teorías de falla en materiales dúctiles bajo carga estática.

El mecanismo microscópico de fluencia se entiende que se debe al deslizamiento relativo de los átomos del material dentro de su estructura de red. Este deslizamiento es causado por esfuerzos cortantes acompañados por distorsión en la forma de la pieza. La energía almacenada en la pieza por causa de esta distorsión es un indicador de la magnitud del esfuerzo cortante presente.

La estructura de la estufa estará sujeta a cargas estáticas, que no varían con el tiempo y no son alternantes ni transientes y que sus magnitudes son definidas por norma. El material del que está hecha la estructura es de acero bajo carbón el cual se comporta como un material dúctil. La falla de un material se presenta porque las cargas produjeron esfuerzos mayores a su resistencia. Por lo tanto el análisis de falla se enfocará para materiales dúctiles bajo carga estática [7,12,13].

#### a) Teoría de Von Mises o de energía de distorsión.

Suponiendo que la curva esfuerzo-deformación es en esencia lineal hasta el punto de fluencia y que el área bajo esta línea es la energía, tenemos (Ec. 2.29):

$$U = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon$$



y para un estado de esfuerzos tridimensional en términos de los esfuerzos y deformaciones principales actuando en el plano de cortantes cero (Ec. 2.30),

$$U = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3)$$

esta expresión se puede poner en términos de esfuerzos principales, tal que (Ec. 2.31)

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2 - \nu\sigma_3) \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1 - \nu\sigma_3) \quad \varepsilon_3 = \frac{1}{E}(\sigma_3 - \nu\sigma_1 - \nu\sigma_2)$$

y sustituyendo las ecuaciones 2.31 en la ecuación 2.30 tenemos, una expresión en términos de esfuerzos principales (Ec. 2.32).

$$U = \frac{1}{2E}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3))$$

Esta teoría establece que la energía de deformación en una pieza cargada se puede considerar como formada por dos componentes, uno por carga hidrostática, que cambia su volumen, y el otro por distorsión, que modifica su forma, por lo tanto (Ec. 2.33),

$$U = U_h + U_d$$

En donde (Ec. 2.34),

$$U_h = \frac{1-2\nu}{6E}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3))$$

y para determinar  $U_d$  (Ec. 2.35)

$$U_d = U - U_h$$

sustituyendo y simplificando, tenemos (Ec. 2.36)

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3))$$

posteriormente se compara la energía de distorsión por volumen unitario contra la energía de distorsión por volumen unitario presente a la falla en una probeta a prueba a tensión. El esfuerzo a la falla es el límite de fluencia elástico  $\sigma_y$ . La prueba a tensión es un estado de esfuerzos uniaxial donde, a la fluencia,  $\sigma_1 = \sigma_y$  y  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ , por lo tanto sustituyendo tenemos (Ec. 2.37),

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_y^2$$

y para obtener el criterio de falla, tenemos que (Ec. 2.38)

$$\frac{1+\nu}{3E} \sigma_y^2 = U_d = \frac{1+\nu}{3E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3))$$

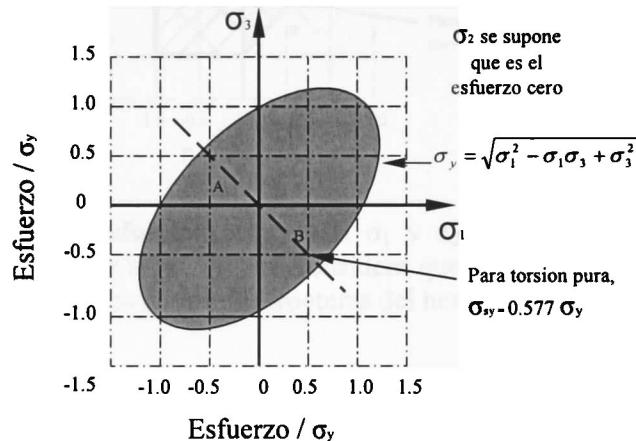
y aplica al estado de esfuerzos tridimensionales (Ec. 3.39).

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3}$$

Para el caso de esfuerzo en dos dimensiones (Ec. 3.40),

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2}$$

y describe una elipse tal como,



El interior de este elipse define la región de esfuerzos combinados y axiales en dos dimensiones, segura contra fluencia bajo carga estática.

Ahora, el esfuerzo efectivo de Von Mises es el esfuerzo a tensión uniaxial que generaría la misma energía de distorsión que la que se produciría por la combinación real de los esfuerzos aplicados.

Para cortante puro tenemos (Ec. 2.41),

$$\sigma_y^2 = \sigma_1^2 + \sigma_1\sigma_1 + \sigma_1^2 = 3\sigma_1^2 = 3\tau_{\max}^2$$

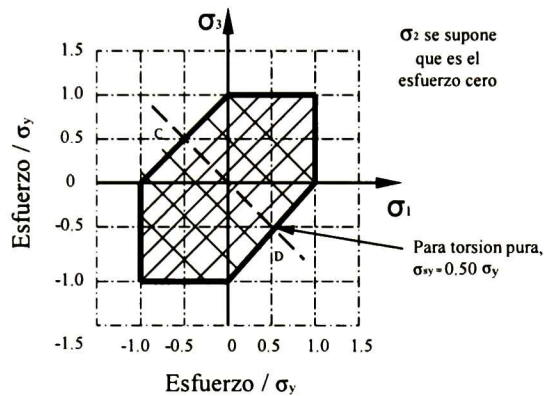
Despejando  $\tau_{\max}$  definimos el limite de fluencia elástico a cortante  $\sigma_{ys}$  de cualquier material dúctil, como una fracción de su limite de fluencia elástico a tensión  $\sigma_y$ , determinado por un ensayo a tensión (Ec. 2.42).

$$\sigma_{ys} = 0.577S_y$$

### b) Teoría del esfuerzo cortante máximo.

Esta teoría establece que la falla ocurre cuando el esfuerzo cortante máximo en una pieza excede el esfuerzo cortante en una probeta a tensión en el punto de fluencia (la mitad del límite de fluencia elástico a tensión). Esto indica que el límite de fluencia elástico a cortante de un material dúctil es (Ec. 2.43)

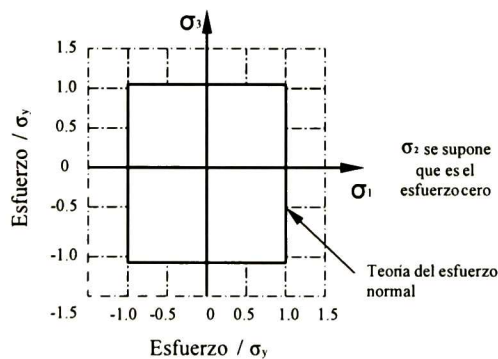
$$\sigma_{ys} = 0.50\sigma_y$$



Las combinaciones de los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  que ocurren dentro de este hexágono se consideran como seguros, y se considera que se presentara falla cuando el estado de esfuerzos combinados llega a las fronteras del hexágono.

### c) Teoría del esfuerzo normal máximo.

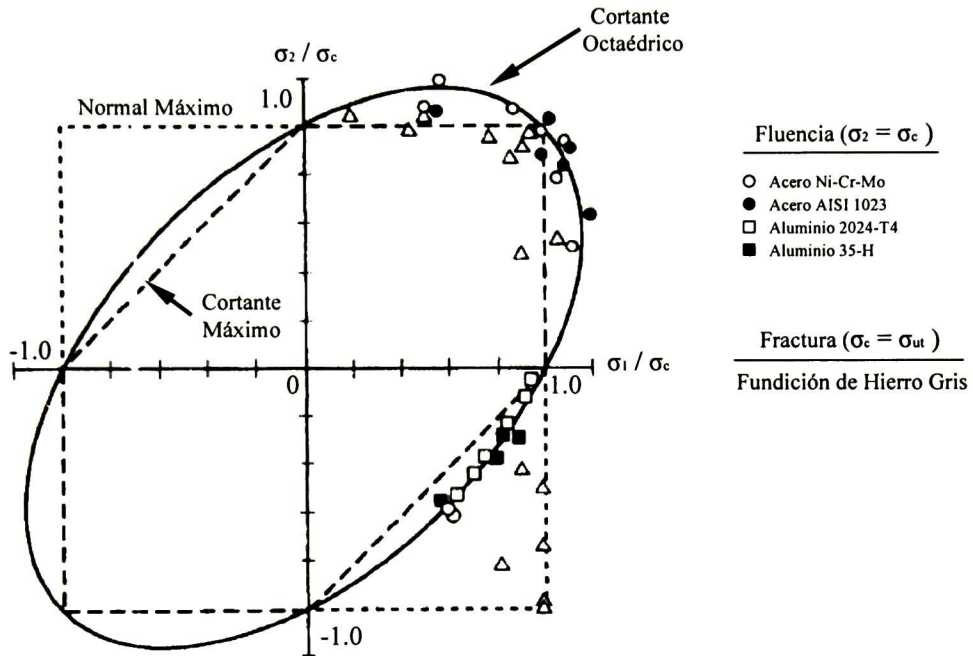
Esta teoría establece que ocurriera la falla cuando el esfuerzo normal en la probeta llegue a cierto límite de resistencia normal como el límite de fluencia elástico a tensión o la resistencia máxima a tensión.



Experimentalmente, esta teoría ha sido correlacionada para fracturas cuando el material es frágil. Por lo tanto no es adecuada para materiales dúctiles

### d) Comparación de datos experimentales con las teorías de falla.

Se han realizado muchas pruebas a tensión sobre diversos materiales. Los datos muestran una dispersión estadística, pero en lo general tienen tendencia a coincidir bastante bien con la elipse de energía de distorsión.



De estos datos típicos, podemos observar que la teoría de la energía de distorsión se acerca mucho más a los datos de fluencia dúctil. Y la teoría del esfuerzo cortante máximo proporciona un criterio más conservador, que queda con seguridad dentro de todos los puntos de datos de fluencia de materiales dúctiles. Tener incertidumbre en la respuesta de nuestro material a cargas nos genera un sobre costo y por otro lado tenemos que un buen conocimiento de la respuesta estructural del material no lleva a optimizar costo contra desempeño.

---

## 2.2 Proceso de diseño en la ingeniería.

### 2.2.1 Proceso de diseño y desarrollo de nuevos productos.

Un nuevo producto es frecuentemente parte vital de una estrategia de negocios. Tener el producto correcto para el mercado adecuado en el tiempo justo y con un precio correcto son características inevitables para el éxito del mismo.

Uno de los aspectos más importante para el desarrollo de un producto es su diseño. El diseño define y establece soluciones para problemas no resueltos con anterioridad o nuevas soluciones para problemas que previamente han sido resueltos por caminos diferentes [14].

La habilidad para diseñar debe ser ciencia y arte, la ciencia puede ser aprendida a través de técnicas y métodos, pero el arte únicamente se aprende haciendo diseño. También hay que tener la habilidad de realizar cálculos, y tanto como sea posible usar disciplinas propias de la ciencia y la ingeniería con el apoyo de herramientas computacionales.

El buen diseño requiere de los métodos de análisis y síntesis, el análisis generalmente involucra la simplificación del mundo real a través de modelos, esto concerniente al hecho de dividir el problema en partes que sean tratables; finalmente la síntesis involucra el unir elementos en un todo factible.

Él tener que realizar una serie de pasos para hacer diseño, ha sido llamado durante bastante tiempo, el proceso de diseño. Para Diter [15] el proceso de diseño consta de las siguientes fases (figura 2.6):

1. *Identificación de una necesidad.*- Las necesidades de una sociedad pueden ser identificadas por diferentes mecanismos y sistemas. Algunas organizaciones cuentan con centros de investigación y desarrollo para generar ideas y conceptos relevantes acerca de como satisfacer necesidades existentes.
2. *Definición del problema.*- Probablemente es el paso más crítico del proceso de diseño, ya que el problema real no siempre es el que se aprecia a simple vista. En la definición del problema deben expresarse tan específicamente como sea posible, los requerimientos de la necesidad a resolver, también deben incluirse en esta parte metas y objetivos, definición de términos especiales, restricciones del diseño y criterios que deberán ser usados para evaluar el diseño.
3. *Recolección de información.*- En este paso pueden suceder dos cosas, que no se encuentre información previa al respecto del problema a resolver o que se encuentre una gran cantidad de reportes de trabajos previos, en donde habrá que seleccionar lo que sea de real utilidad.

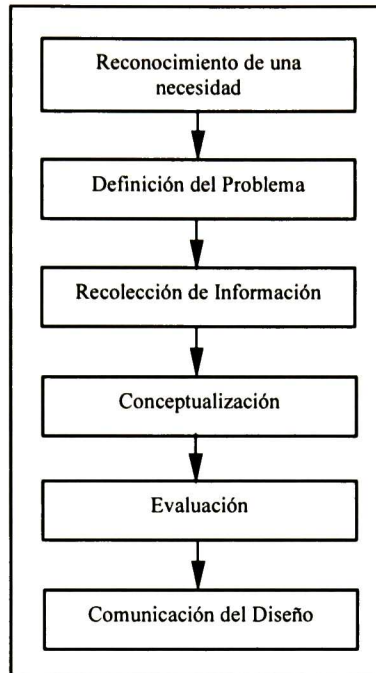


Figura 2.6 Proceso de diseño de Diter.

4. *Conceptualización.*- Aquí son determinados los elementos, mecanismos, procesos y/o configuraciones que en combinación con otros resultados en un diseño satisfacen la necesidad. Un aspecto vital de la Conceptualización es la síntesis, que es el proceso de tomar los elementos del concepto e integrarlos en un orden apropiado, además de darle forma y dimensión a las cosas. Esta es una etapa clave para emplear la inventiva y la creatividad.
5. *Evaluación.*- Este paso involucra un profundo análisis del diseño conceptualizado, para lo cual pueden ser utilizados cálculos especializados que incluso tengan que realizarse con herramientas computacionales o a través de modelos analíticos, pruebas de simulación o experimentales de un prototipo real o a escala. También técnicas de optimización pueden usarse para seleccionar los mejores valores de los parámetros de diseño.
6. *Comunicación del diseño.*- Debe estar en la mente del diseñador, que la propuesta de diseño debe satisfacer ampliamente las necesidades de un cliente. Además el diseño final debe ser apropiadamente comunicado o puede perderse en el transcurso de la comunicación mucho de su impacto o significancia.

Tradicionalmente, lo propuesto por Dieter constituye el proceso de diseño o diseño primario; sin embargo, muchas otras decisiones técnicas y financieras deben realizarse. Es por lo anterior que de acuerdo a Asimov [16], el diseño toma otro concepto mucho más amplio en el cual es considerado el ciclo de vida del producto; y es a través de este concepto como nace el proceso de desarrollo de productos. Adicionalmente a lo

---

propuesto por Dieter, Asimov considera las siguientes fases una vez que el diseño ha sido comunicado.

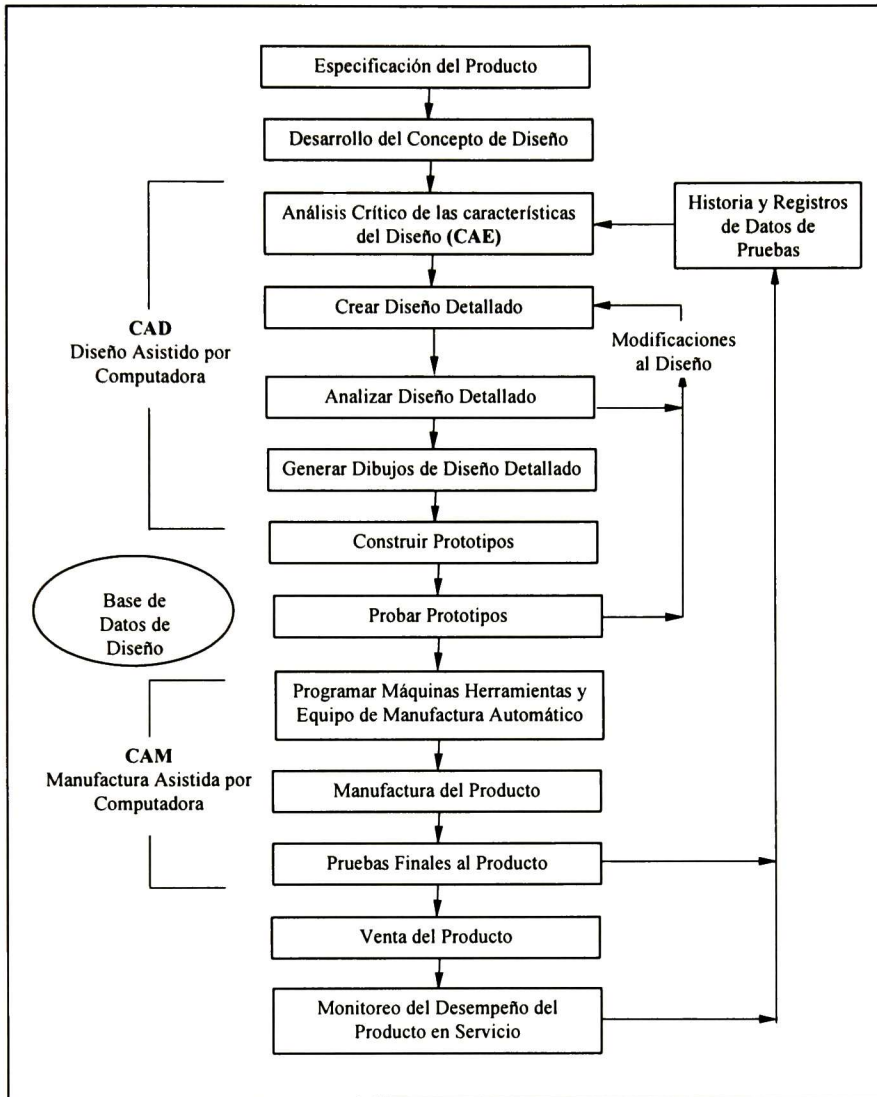
7. *Planeación para la manufactura.*- Un método de manufactura debe establecerse para cada componente de un sistema, un primer paso son las hojas de proceso las cuales contienen una secuencia lógica de operaciones que deben ser realizadas en un componente, también se especifica la forma y condición del material, así como las herramientas y maquinas de producción que serán utilizadas. La información de las hojas de proceso hace posible la estimación de los costos de producción de un componente, altos costos pueden indicar la necesidad de cambiar un material o realizar cambios básicos al diseño.
8. *Planeación para la distribución.*- Importantes decisiones técnicas y de negocios son hechas para una efectiva distribución del producto al consumidor, en términos estrictos el empaque de venta puede ser un factor crítico, además un sistema de distribución de productos debe ser diseñado; ya que el éxito económico de un producto regularmente depende de la puesta en mercado del mismo.
9. *Planeación para el uso.*- El uso del producto por el consumidor es completamente importante, además hay que considerar como el consumidor reacciona ante cada uno de los pasos del proceso de desarrollo del producto, en el sentido de que debe ser importante la orientación del proceso hacia la satisfacción del usuario. Fácil de mantener, rentable, seguro y estético, comodidad de uso, económico y durable en servicio.

Obviamente las características requeridas por el consumidor deben ser introducidas en el proceso de desarrollo desde que este esta iniciando, también hay que considerar que legislaciones de seguridad y de protección al medio ambiente están teniendo un mayor impacto en el diseño de un nuevo producto.

10. *Planeación para el retiro del producto.*- El paso final del proceso de desarrollo de un producto, es la disposición del mismo cuando este haya llegado a la etapa final de su vida en servicio. La vida en servicio de un producto puede ser determinada por el deterioro y desgaste, hasta el punto en el cual este ya no puede realizar su función.

Como se observa en la figura 2.7, son varias y muy sofisticadas las etapas del desarrollo de un nuevo producto, pero de acuerdo a Ullman [17] el diseño del producto debe ser la fase que más tiempo emplea dentro del proceso; ya que las decisiones hechas durante esta etapa tienen el impacto más grande en el costo de un producto (70%).

Figura 2.7 Proceso de desarrollo de un nuevo producto visto por Ullman.



### 2.2.2 Materiales en el proceso de diseño.

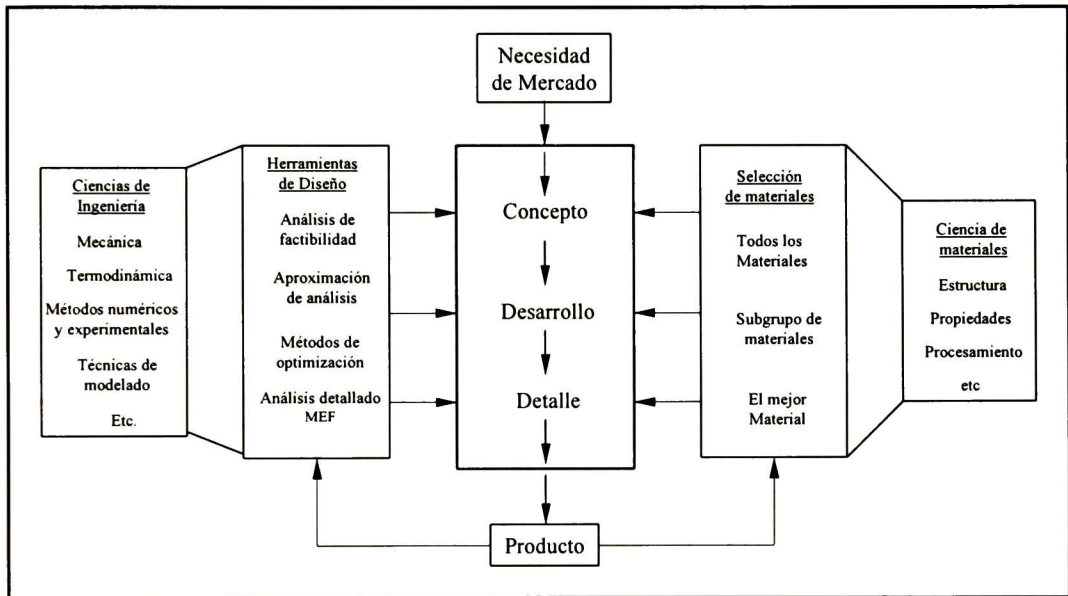
Ashby menciona que el diseño es un proceso iterativo (figura 2.8) donde el punto inicial es una necesidad de mercado o una idea y el punto final de este es un producto que satisfaga la necesidad del usuario o se vuelva tangible la idea. Se definen tres etapas como el proceso de diseño las cuales son: concepto de diseño, desarrollo de diseño y detalle de diseño, las cuales definen como el producto deberá ser elaborado. En la etapa de concepto de diseño se generan todas las propuestas posibles: el diseñador evalúa los diferentes principios físicos que satisfacerán su necesidad, esquemas de cómo trabajarán los sistemas y la implicación de cada una de las opciones en el desempeño y el costo.

En el desarrollo del diseño se evalúa y analizan los conceptos de diseño seleccionados a nivel de operación, tamaño de componentes, y selección de materiales los cuales deberán



de funcionar adecuadamente desde el punto de vista de esfuerzos, temperaturas y medio ambiente. El desarrollo del diseño termina con la entrega de un diseño en planos para posteriormente crear un diseño detallado. Aquí se crean las especificaciones de diseño, análisis mecánicos y térmicos mas precisos usando métodos de elementos finitos y métodos de optimización donde se busca maximizar su desempeño. Finalmente, la ruta de producción es analizada y se calcula el costo del diseño. Para alcanzar todo esto, es necesario la utilización de herramientas de diseño y las datos de los materiales [18,19]. A la izquierda de la figura 2.8 estan las herramientas de la ciencia de la ingeniería las cuales permiten análisis, modelado y optimización de los diseños; estos cuentan con los principios y ecuaciones de la mecánica, termodinámica, técnicas de modelado, etc. La rutina de diseño se facilita con el uso de herramientas de diseño computacionales (CAD).

Figura 2.8 Proceso de diseño de Ashby.



Los materiales son una restricción y juegan un papel importante debido a que se debe de tener el mejor desempeño del producto al menor costo posible. La selección de materiales es en base a los requerimientos del diseño y al que mejor se desempeñe, lo cual definitivamente esta relacionado con los tipos de materiales existentes tales como: metales, polímeros, cerámicos y compuestos.

Las características físicas, mecánicas, térmicas, etc de estos materiales tienen que ver con sus estructuras atómicas y que el diseñador debe tener en cuenta en el momento de su elección. La selección de un material no puede estar separada de la forma que tendrá dentro de la pieza o componente. Para alcanzar esta forma, el material esta sujeto a procesos de manufactura como maquinado, perforado, pulido, etc. La función, el material, la forma y el proceso interactúan, figura 2.9. La función dicta la forma del material. La figura es elegida para desempeñar la función usando el material. El proceso es influenciado por las propiedades del material, tales como formabilidad, maquinabilidad, tratamientos térmicos, etc.

El proceso obviamente interactúa con la forma, el proceso determina la forma, el tamaño, la precisión y sobre todo el costo. La interacción entre función, material, forma y proceso es el corazón del proceso de selección de los materiales. El proceso de diseño establecido por Diter y completado por Asimov nos lleva al proceso del desarrollo de nuevos productos. Así mismo, si integramos el proceso de diseño en ingeniería de materiales de Ashby nos lleva a un proceso de desarrollo de nuevos productos mas completo y con mas probabilidad de éxito (figura 2.10).

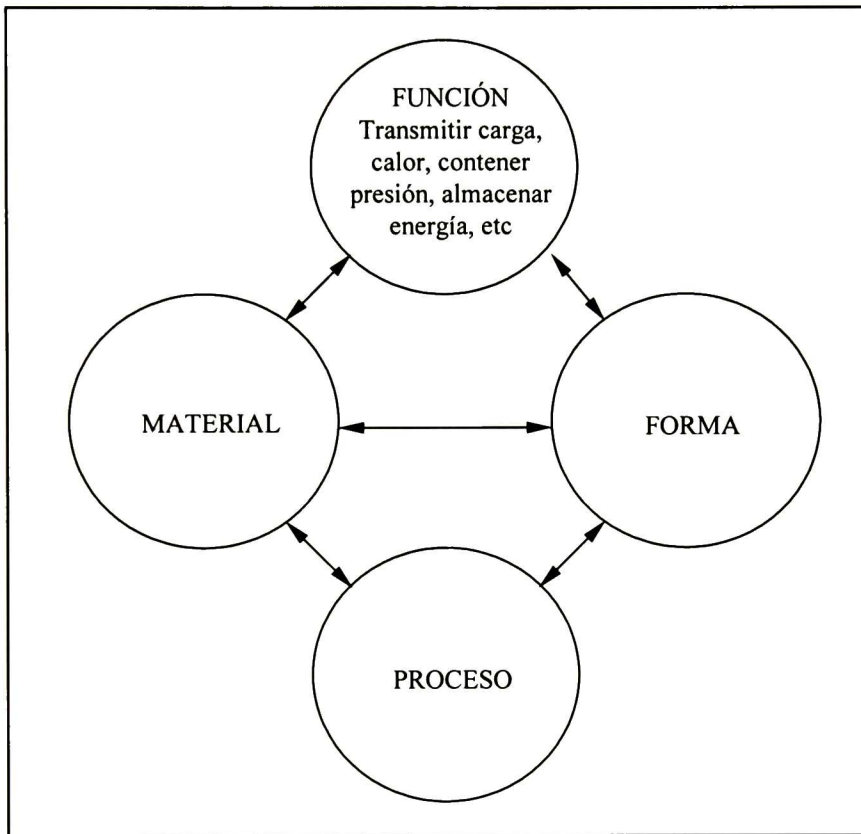


Figura 2.10 Proceso de desarrollo de un nuevo producto desarrollado en este proyecto.

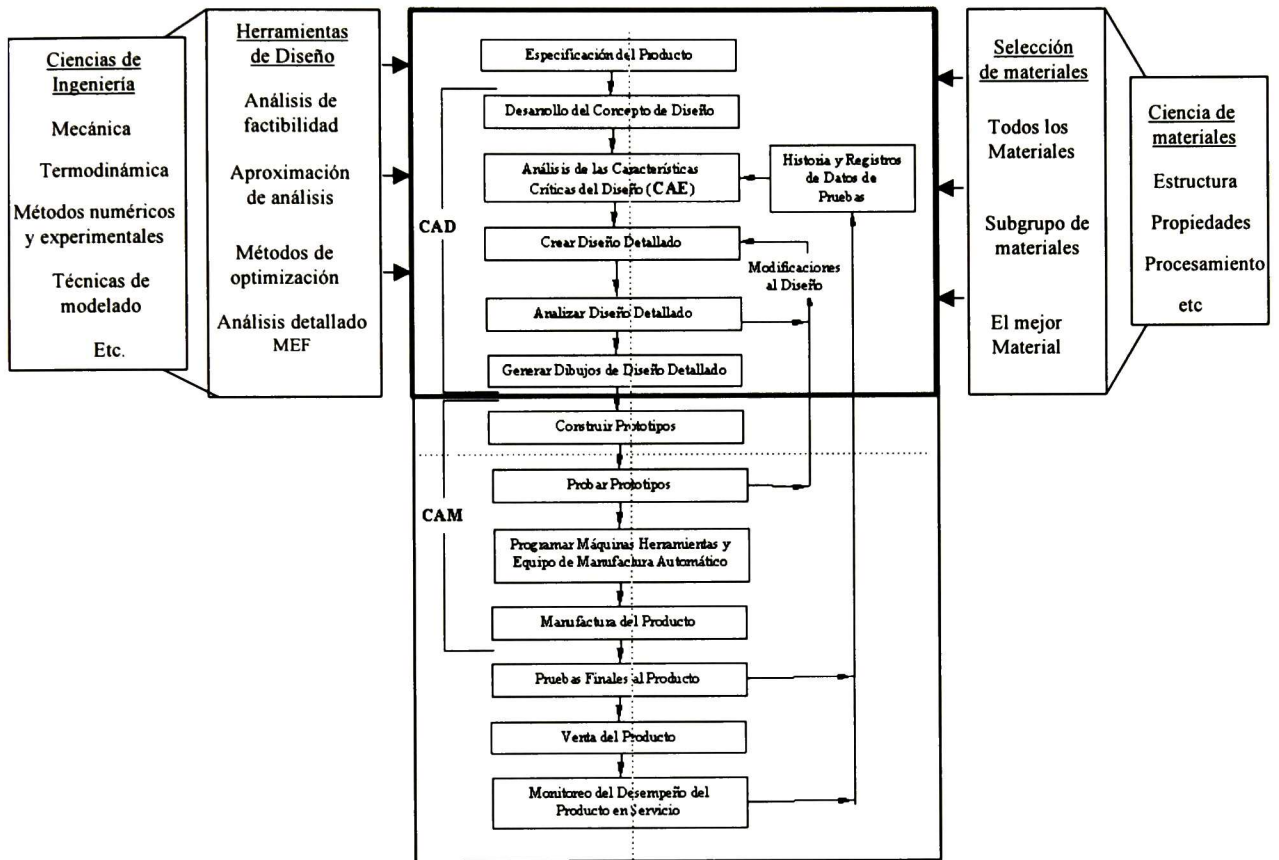


Figura 2.9 Interacción entre función, material, forma y proceso.

---

## 2.3 TECNOLOGÍA AVANZADA EN EL DESARROLLO DE NUEVOS PRODUCTOS (CAD, CAE, CAM Y MÉTODOS EXPERIMENTALES).

### 2.3.1 CAD, CAE y CAM.

Cambios fundamentales a los procesos de desarrollo de nuevos productos han ocurrido en los últimos años, estos han sido principalmente por presiones de mercados, la globalización, el desarrollo de nuevas tecnologías y la optimización en los procesos de producción; pero sobre todo la necesidad de reducir los tiempos de desarrollo e incrementar la calidad de los nuevos productos [20].

Dichos cambios han sido en el sentido de integrar a las herramientas computacionales, desde las fases iniciales de la conceptualización (CAD); las fases de análisis, síntesis, evaluación y optimización (CAE); hasta su manufactura (CAM).

El término diseño asistido por computadora (computer-aided design, CAD) es parte del lenguaje común actual y se refiere al uso de computadoras para dibujar y modelar los diseños de los productos. En cierto sentido, el CAD es la espina dorsal tecnológica que brinda oportunidades para la ingeniería que quiere participar en esta actividad y el uso posterior del CAE y CAM [21]. La industria del CAD ha tenido un desarrollo impresionante desde su inicio en los años 70 del siglo xx y continúa desarrollándose con avances tecnológicos y de integración de los productos de CAE y CAM. El CAD lo han abordado muchas empresas y desempeña un papel central en CAM y CAE. Al utilizar un sistema de CAD, el diseñador logra representar la parte que se va a manufacturar. El sistema CAD produce una representación de la forma del componente. Esta representación puede utilizarse para una variedad de futuras operaciones, entre ellas hacer rápidamente el prototipo, el análisis de CAE, la maquinación numérica, la comprobación de las tolerancias y del ensamblado.

La fabricación asistida por computadora (computer-aided manufacturing, CAM) se refiere a la producción o la modificación de los datos de control para la fabricación. Con frecuencia el término se utiliza para referirse específicamente al hecho de equipar con herramientas a la máquina controlada numéricamente por computadora (CNC). Algunas de las ventajas del CAM son:

- a) se reduce mucho el tiempo de demora para producir piezas nuevas. Los diseñadores pueden ver más pronto los resultados de su trabajo, evaluar los resultados e incluir los cambios necesarios desde el principio.
- b) Las piezas cuya producción no resulta económica con los métodos convencionales, si lo serán con CNC o NC.
- c) El control por computadora puede optimizar algunas condiciones del proceso, como los avances y velocidades de corte conforme avanza el trabajo.

- d) El diseño de los productos ayudado por computadoras puede proporcionar datos de forma directa para el control de los procesos, con lo cual se soslayan el costo y tiempo de demora requeridos para los planos de ingeniería y programación del proceso.

El termino ingeniería asistida por computadora (computer-aided engineering, CAE) describe el uso de computadoras para el analisis de un diseño en particular. Es usual que el termino CAE se use para referirse tanto a CAM como CAD, pero en sentido estricto solo se refiere a la etapa de analisis. Hoy existen muchos tipos de analisis disponibles. Entre los ejemplos tipicos se incluyen:

- a) Análisis estructural para la determinación de deflexiones y esfuerzos en un diseño sujeto a carga aplicada.
- b) Análisis termico, en el cual se calcula la distribución de la temperatura.
- c) Análisis de flujo, en el que se calcula el flujo de un material a través de una región definida.
- d) Análisis mecánico que determina el movimiento de un eslabon o de un sistema mecánico.

Cualquiera que sea el tipo de análisis, toda CAE comprende el uso de un modelado matemático que simula el proceso físico o las condiciones a las cuales se expone el diseño. El modelo matemático típicamente consiste en un conjunto de ecuaciones que aseguran una solución única. Con el fin de poner en practica el modelo matemático en un programa de computadora necesitamos usar métodos numéricos apropiados para solucionar cada una de las ecuaciones que forman el modelo matemático. Una de las características de todos los métodos numéricos es que el problema se debe convertir en discreto. Para el CAE esto significa producir un conjunto de puntos, que reciben el nombre de nodos, con los cuales se pueden calcular las cantidades (por ejemplo: temperatura, presión, esfuerzo) de interes. Uno de los métodos mas populares es el método de elemento finito. El análisis de elemento finito puede ser usado para evaluar diseños involucrando diferentes y variantes formas geométricas, incluso con propiedades de los materiales no homogéneas y variantes con la temperatura; además ofrece una gran flexibilidad para aplicar diferentes conjuntos de carga en diferentes condiciones. También es aplicado en problemas de conducción de calor, campos magnéticos y eléctricos y análisis de fluidos [22].

### 2.3.2 Modelación y simulación aplicados en la ingeniería de diseño.

Un modelo es una idealización de una situación del mundo real que ayuda en el análisis de un problema y puede ser descriptivo o predictivo. El modelo descriptivo solo permite entender el comportamineto de un sistema o de un fenómeno del mundo real, en cambio

---

el modelo predictivo es usado primeramente en la ingeniería de diseño porque ayuda a entender y predecir el desempeño de un componente o sistema [15].

Modelar es la representación de un sistema o parte de un sistema en forma física o matemática, lo cual es adecuado para demostrar y entender el comportamiento de dicho sistema.

Simular involucra modelos subjetivos con varios parámetros de entrada, o condiciones de trabajo y ambientales para observar como ellos se comportan a través de explorar la naturaleza de los resultados que pueden ser obtenidos del sistema del mundo real. La simulación es una manipulación del modelo.

A través del modelado los ingenieros expanden y enriquecen su visión, ejercitan su sensibilidad, formulan una única y personal interpretación, procesan y optimizan un gran número de alternativas de solución; originan innovaciones e incrementan su conocimiento acerca de los problemas físicos [20].

Hoy en día son utilizados diferentes métodos de simulación con aplicación en la solución de problemas de ingeniería, como:

1) El Método de Diferencias Finitas. Muchos problemas en la ingeniería de procesos están relacionados con fenómenos de la transferencia de calor, procesos como la combustión, la soldadura por fusión de dos metales y la solidificación de una fundición [23]. La formulación del modelo para simular este tipo de problemas emplea la técnica de las diferencias finitas, el cual es un método numérico de aproximación a la solución de las ecuaciones diferenciales parciales que se discuten en los cursos de transferencia de calor [24].

2) El Método de Elemento Finito. La estructura del método de elemento finito de un sólido continuo o de un fluido, puede estar representado por una malla de elementos interconectados en puntos nodales, en donde estos elementos pueden arreglarse de tal manera que puedan simular incluso formas complejas; así mismo las coordenadas de los nodos van acompañadas de las propiedades elásticas del material que en combinación con las cargas aplicadas, se pueden determinar los desplazamientos de los nodos y a partir de estos las deformaciones y los esfuerzos [25].

3) El Método de Monte Carlo. Es un método que genera información de eventos que ocurren al azar [26]. Utiliza muestras al azar ilimitadas (se escogen elementos de una población en la cual cada uno de estos tienen la misma probabilidad de ser seleccionados) en una simulación por computadora en la cual los resultados son corridos repetidamente para desarrollar respuestas estadísticamente confiables [27].

### 2.3.3 Análisis experimentales de esfuerzo.

La aplicación del Análisis Experimental de Esfuerzos al diseño y desarrollo estructural ha crecido en forma significativa en años recientes y las corrientes actuales indican que el análisis experimental de esfuerzos jugará un papel cada vez mas importante en el futuro [28].

El medir en la realidad los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos a los que están sujetas las estructuras como aeronaves, puentes, automóviles o electrodomésticos, (de hecho cualquier cosa que se pudiese fallar o romperse durante el uso), puede ser de ayuda cuando se trata de determinar su integridad en el diseño.

La falla de los productos puede ser muy costosa, ya sea en términos financieros o humanos. El propósito del análisis experimental es prevenir las fallas durante la vida útil de los elementos estructurales, suministrando información que ayude al ingeniero a desarrollar productos que sean seguros, confiables, durables y que tengan un costo económico.

El análisis experimental de esfuerzos puede ayudar a detectar posibles fallas en productos durante la etapa de planeación, asegurando de antemano la virtual inmunidad contra errores básicos de diseño. A pesar de que los métodos analíticos modernos ofrecen la posibilidad de resolver problemas de diseño de análisis de esfuerzos mas complejos, la necesidad de verificación experimental de condiciones de frontera e integridad en el diseño del producto terminado, aumentan a medida que se requiere eficiencia estructural mas alta.

La creciente preocupación por la conservación de las fuentes de energía y materiales, junto con las consideraciones económicas básicas, hacen imperativo que todos los objetos que soportan una carga, ya sea en una máquina o en una estructura, se sometan a un completo análisis de esfuerzo para llegar a una unidad con el mínimo peso y el mínimo costo; a la vez se asegura su integridad funcional y seguridad de acuerdo a las condiciones de servicio a lo largo de una vida especificada.

Cada vez y con mas frecuencia, normas de seguridad mas estrictas, responsabilidad por el producto y garantías de duración mas extensas, dictan la necesidad de diseños apropiadamente evaluados y probados. Un número cada vez mayor de especificaciones de producto incluyen requisitos de prueba que involucran técnicas de análisis experimentales de esfuerzo. Cada vez mas los fabricantes eligen el validar la confiabilidad de sus productos apoyándose en el análisis experimental de esfuerzos, y así lo hacen saber en la literatura y especificaciones de venta.

Las técnicas de análisis experimentales de esfuerzos en una y otra forma pueden ser aplicadas en todas las etapas de la vida de un producto. En la nueva ingeniería del producto, por ejemplo, se aplican desde el diseño preliminar para producción hasta la prueba del producto terminado.

### 2.3.4 Técnicas de análisis experimentales de esfuerzos.

El análisis experimental de esfuerzos involucra especialmente [1,28]:

- a) Análisis del diseño de una estructura o alguna de sus partes para determinar si puede o no soportar satisfactoriamente tanto las cargas aplicadas.
- b) La investigación de porque la estructura o sus partes se rompen y la prevención de las fallas subsecuentes por medio de cambios satisfactorios en el diseño.
- c) El monitoreo de esfuerzos, cargas, torsiones, presiones, etc. durante el servicio.

Esto se logra midiendo los efectos que se presentan debido a los esfuerzos sobre la parte en cuestión como resultado de las cargas a la que se le sujetará en varias condiciones. Existen sin embargo, un amplio rango de medidas y formas para las diferentes estructuras o partes de estructuras sometidas a sollicitaciones muy diversas, que además, operan en un medio muy diferente. Esto a su vez crea la necesidad de una amplia variedad de técnicas de medición. Existen 2 grupos de técnicas:

#### 1.- Técnicas puntuales.

- a) Extensometría eléctrica.

#### 2.- Técnicas de campo completo.

- b) Fotoelasticidad
- c) Lacas Frágiles
- d) Moire

Las técnicas puntuales son las de mayor precisión. Las técnicas de campo completo, por el contrario no alcanzan la misma precisión, pero en cambio permiten determinar el estado general de deformación de un cuerpo o modelo.

#### a) Extensómetros de resistencia eléctrica.

Básicamente, el extensómetro eléctrico es una resistencia extremadamente delgada, pequeña y sensible a las deformaciones que se adhiere a un material flexible, que le sirve de soporte el cual cuando se diera a la estructura o la parte sometida a pruebas, transforma las deformaciones de la superficie en esfuerzos, mediante cambios de resistencia eléctrica. Los cambios de resistencia tienen una salida lineal y pueden leerse directamente en el instrumento apropiado en términos de deformaciones, carga, presión, torsión. Los extensómetros eléctricos son producidos con una exactitud suficiente para ser usados en equipos de calibración y con una sensibilidad que llega a los límites de los instrumentos de lectura. Son capaces de una respuesta casi sin límites a la frecuencia y son tan ligeros en peso que no alteran la masa, la rigidez o la frecuencia natural de las partes a las que han sido adheridos.



### b) Fotoelasticidad.

La fotoelasticidad es una técnica visual de campo completo que permite determinar estados de esfuerzos sobre las estructuras o sus partes en oposición a los extensómetros eléctricos, los cuales da información punto a punto. Cuando un material fotoelástico es sujeto a sollicitaciones y se le observa un campo de luz polarizada, las fuerzas internas dan como resultado patrones de franjas multicolores. La interpretación de dichos patrones revelaran distribuciones de esfuerzo en todo el campo y permitiran la medición de la magnitud y dierección de los esfuerzos en cualquier punto. El principio básico da la fotoelasticidad se basa en el hecho de que cuando un material transparente (notablemente los plásticos) es sometido a sollicitaciones, se producen cambios en las propiedades ópticas que son proipocionales a los esfuerzos desarrollados y el material se torna birrefringente o sea, doblemente refringente.

Los recubrimientos fotoelásticos se usan como una herramienta de diseño para dar validez a un diseño dado o como guía para optimizar el peso de la estructura y/o para la eliminación de concentraciones de esfuerzos.

### b) Lacas Frágiles.

En esta técnica, un recubrimiento sensible a las deformaciones y formulado especialmente, es rociado sobre la superficie de la parte que va a ser examinada. Después de que se ha secado y que la parte ha sido cargada, en el recubrimiento aparecen una serie de grietas normales a la dirección de los esfuerzos principales en la superficie. Por lo tanto, es posible obtener una visión de campo completo de la distrubución de los esfuerzos con una indicación aproximada de la magnitud de los mismos y la dirección de los esfuerzos principales. Las lacas frágiles son muy útiles para dar una indicación rápida, de donde estan ocurriendo los esfuerzos a tensión máxima, o concentraciones de esfuerzos, en general no se les usa para hacer mediciones precisas, sino para determinar rápida y económicamente la localización exacta y la orientación de los ejes en los cuales posteriormente se instalarán extensómetros eléctricos.

### c) Moire.

Moire es el nombre que se da al efecto óptico que se observa a menudo cuando dos arreglos de líneas con espacios pequeños o mallas de líneas paralelas, se superponen, Si el espacio entre las líneas y su orientación no es identica en todas las partes para ambas mallas, ocurre interferencia mecánica periódica a la transmisión o reflexión de luz, produciendo un patrón de bandas alternas de luz y oscuridad, por lo que al análisis experimental de esfuerzos se refiere, se principia con dos mallas identicas una de las cuales se pega perfectamente a las estructura o miembro estructural a ser analizado y es observada a través de la segunda, sirviendo esta última como referencia. Si la malla que se adhiere a la parte a ser probada esa inicialmete libre de deformaciones y las mallas ser alinean en forma precisa, no se observaran franjas. Cuando la parte es cargada, las deformaciones superficiales producen desaplazamiento de las líneas de la rejilla que le ha sido adherida, haciendo que aparezcan franjas de Moire cuando se le ve a través de la rejilla de referencia.

---

Esta técnica se aplica principalmente para resolver problemas que no pueden ser resueltos práctica, precisa o económicamente por otros métodos. Ejemplos típicos son las mediciones a altas temperaturas, grandes deformaciones elásticas o plásticas, mediciones absolutas de deformación para medir propiedades de materiales, etc.

La aplicación inteligente del análisis experimental de esfuerzos puede llevar a mejoras significativas en el diseño y la confiabilidad, con las reducciones asociadas en el peso y costo.

Las técnicas de análisis experimentales de esfuerzos hoy en día son las herramientas del control de calidad de los ingenieros de diseño y desarrollo, así como las técnicas para pruebas no destructivas y herramientas de control de calidad de ingenieros de producción.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA DEL DESARROLLO (DFSS).

#### 3.1 Tecnología avanzada en el análisis estructural.

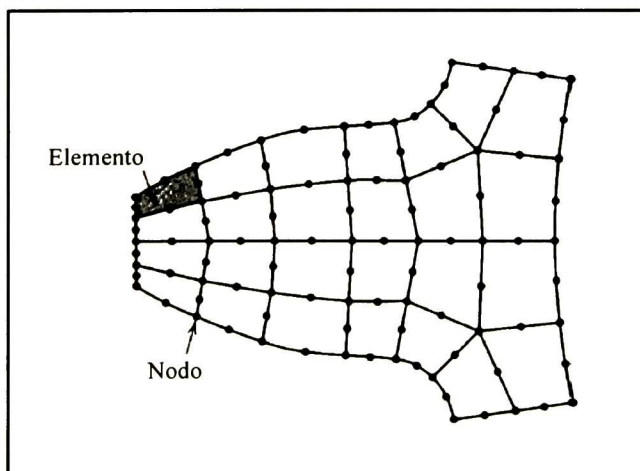
##### 3.1.1 Análisis de esfuerzo a través del método del elemento finito.

##### 3.1.1.1 El Método del Elemento Finito y sus fundamentos.

El Método del Elemento Finito fue desarrollado por ingenieros que usaron mas percepción física que por el uso de métodos abstractos que los matemáticos proponían. La primera aplicación fue en problemas de análisis de esfuerzos y desde entonces ha sido aplicado a otros problemas que involucran un medio continuo. En todas las aplicaciones los ingenieros calculan campos de resultados: en análisis de esfuerzos se calculan campos de desplazamiento y de esfuerzos; en análisis térmicos, etc. El método del elemento finito es una manera de obtener soluciones numéricas de un problema en específico [29].

Una descripción del método del elemento finito es que divide a una estructura en pequeños elementos (pedacitos de estructura), describiendo el comportamiento de cada elemento de una forma sencilla, las conexiones entre los elementos son llamados nodos y son los que mantienen unidos a los elementos (figura 3.1). El proceso de resultado es un conjunto simultaneo de ecuaciones algebraicas. En el análisis de esfuerzo estas ecuaciones son las ecuaciones de equilibrio de los nodos, donde pueden haber hasta cientos o varios miles de ecuaciones lo cual significa la obligación de usar una computadora.

Figura 3.1 Malla bidimensional del modelo del diente de un engrane.



El poder del método del elemento finito es muy versátil. Una estructura a analizar puede tener una figura arbitraria, apoyos arbitrarios, y cargas arbitrarias. Tales generalidades no existen en los métodos clásicos de análisis.

El método del elemento finito se basa principalmente en análisis matricial y su uso ha alcanzado las áreas de transferencia de calor, mecánica de fluidos, hidráulica, electromagnetismo, estructuras, entre otros problemas que no hace mucho eran intratables por su complejidad y que ahora con este método son resueltos rutinariamente [30].

Un análisis de elemento finito típico involucra los siguientes pasos:

- a) Discretizar (dividir) la estructura o medio continuo en elementos finitos.
- b) Formular las ecuaciones de cada elemento.
- c) Ensamble de elementos para obtener el modelo de elemento finito del sistema.
- d) Aplicación de condiciones de carga y frontera.
- e) Solución del sistema de ecuaciones algebraicas para determinar las respuestas.

El número de ecuaciones algebraicas a resolver está dado por el número de grados de libertad, el cual da el número de incógnitas. Para problemas pequeños de más o menos 1000 incógnitas, se puede usar una computadora personal. Para problemas moderados, de 10000 a 15000 ecuaciones, se usan una estación de trabajo o una superminicomputadora; arriba de 200000 incógnitas será necesario una central; de más de 500000 incógnitas, una supercomputadora. Todos estos sistemas dan acceso a una buena muestra gráfica.

### 3.1.1.2 Generalidades del Método del Elemento Finito.

El Método del Elemento Finito ha llegado a ser una herramienta poderosa en la solución numérica de un amplio rango de problemas de ingeniería. Las aplicaciones van desde el análisis por deformación y esfuerzo de estructuras tales como automóviles, aeronaves, edificios, recipientes a presión y diversos componentes de equipos hasta el análisis de campos del flujo de calor, de fluidos, magnéticos, filtraciones y otros problemas de flujo. Con los avances de la tecnología de las computadoras y de los sistemas CAD, se pueden modelar problemas más complejos con relativa facilidad. En una computadora pueden probarse varias configuraciones alternas antes de construir el primer prototipo. Todo esto sugiere que debemos modernizarnos empleando estos desarrollos para entender la teoría básica, las técnicas de modelado y los aspectos computacionales del Método del Elemento Finito. En este método de análisis, una región compleja que define un continuo se discretiza en formas geométricas simples llamadas Elementos Finitos. Las propiedades del material y las relaciones gobernantes son consideradas sobre esos elementos y expresadas en términos de valores desconocidos en los bordes del elemento. Un proceso de ensamble, cuando se consideran debidamente las cargas y restricciones, da lugar a un conjunto de ecuaciones, cuya solución nos da el comportamiento aproximado del continuo.

### 3.1.1.3 Tipos de elementos finitos.

Los análisis estructurales utilizando el MEF pueden realizarse por medio de cuatro tipos de elementos (1) estructurales, (2) elementos tipo viga, (3) elementos placa o cascaron y (4) elementos sólidos tridimensionales. Cada uno presenta ventajas y limitaciones. Los elementos estructurales tienen grados de libertad traslacionales, por lo que pueden únicamente transmitir las fuerzas directamente de elemento a elemento, con los nodos actuando como articulaciones. Una gama muy útil e importante que pueden transmitir tanto fuerzas y momentos, especificando grados de libertad rotacionales y traslacionales a sus nodos, son los elementos de tipo viga, placa y de cascaron [31].

Los elementos viga, placa y cascaron se categorizan frecuentemente como gruesas o delgadas, dependiendo si sus formulas incluyen tensiones cortantes transversales. Así, los elementos tipo cascaron grueso permiten la consideración de la deformación debido al cortante por lo que uno de sus usos es en recipientes sometidos a presión donde la relación de radio a espesor de pared es mayor de diez. Por otra parte, en el elemento tipo membrana (cascarón delgado) actúan solamente fuerzas normales y cortantes en el plano del elemento, puesto que por no tener ningún espesor significativo se desprecian los momentos aplicados. Esto trae como ventaja la reducción de los grados de libertad, disminuyendo a su vez la capacidad de cómputo requerida. Por el contrario, los elementos sólidos tridimensionales tienen un alto número de nodos y grados de libertad, con lo que se puede modelar adecuadamente la estructura; sin embargo, existe la desventaja al hacer un uso extensivo de la infraestructura computacional al utilizar este elemento.

Para realizar un modelado con una malla lo más óptimamente posible existen varios tipos de elementos y pueden ser combinados en más de alguna forma para lograr los objetivos deseados.

Los tipos de elementos finitos más comunes los podemos clasificar de la siguiente manera:

- a) Elementos Barra. Este es el elemento más común dentro de la familia de los elementos finitos. Cuando se combina con elementos del mismo tipo, describen estructuras como las armaduras y marcos. Cuando se emplean con elementos de otro tipo como los elementos placa, forman estructuras atiesadas.
- b) Elemento Placa. Los elementos finitos básicos son las placas delgadas cargadas en su propio plano (la condición de esfuerzo plano). Estos pueden ser triangulares y cuadrilátero. Muchas otras formas geométricas son factibles en esta clase de elementos, pero generalmente solo sirven para propósitos especiales. Se les conoce como los elementos básicos dentro del desarrollo del elemento finito, no solo por su uso en un amplio rango de análisis de diseño práctico, sino también por su prioridad en el desarrollo del análisis del elemento finito.

- 
- c) Elementos Sólidos. Los elementos sólidos son la generalización tridimensional de los elementos en esfuerzo plano. El tetraedro y el hexaedro son las formas mas comunes y son esenciales para modelos de problemas de mecánica de sólidos y estructurales.
  - d) Sólidos Axisimetricos. Uno de los campos de aplicación mas importantes dentro del método del elemento finito es el análisis con sólidos axisimetricos. Una gran variedad de problemas de ingeniería caen en esta categoría incluyendo tanques de acero y de concreto, recipientes nucleares, rotores, pistones, flechas y escapes de cohetes. En estos elementos tanto la carga como la geometría son axisimetricos.
  - e) Placa plana en flexión. Son usados no solo entre si, sino tambien junto con los cascarones y miembros de pared delgada. Las formas geométricas son análogas a las de los elementos en esfuerzo plano, con mayor énfasis tambien en las formas triangulares y cuadriláteras.
  - f) Cascaron Axisimetrico. Tienen la misma importancia e aplicaciones practicas que los sólidos axisimetricos, aunque aquí las formulaciones se derivan de la teoría de la membrana. Entro de esta formulación esta la diferencia con respecto a los elementos placa en flexión y tensión y sirven para identificar problemas claves.
  - g) Cascaron curvo. Cuando una estructura es curva, es preferible usar elementos cascaron curvo para los modelos numéricos. Dentro de las ventajas esta la habilidad para describir de forma mas adecuada la geometría de una superficie curva. Existe un gran número de alternativas para formular este tipo de elementos.

### 3.1.1.4 El elemento cascaron (SHELL 63).

El elemento Shell 63 tiene tanto las propiedades de un elemento viga como las del elemento membrana ya que permite tanto cargas en el plano como normalmente. Este elemento tiene 6 grados de libertad en cada nodo, es decir, tiene desplazamiento en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y además de tener rotaciones en los tres ejes [32].

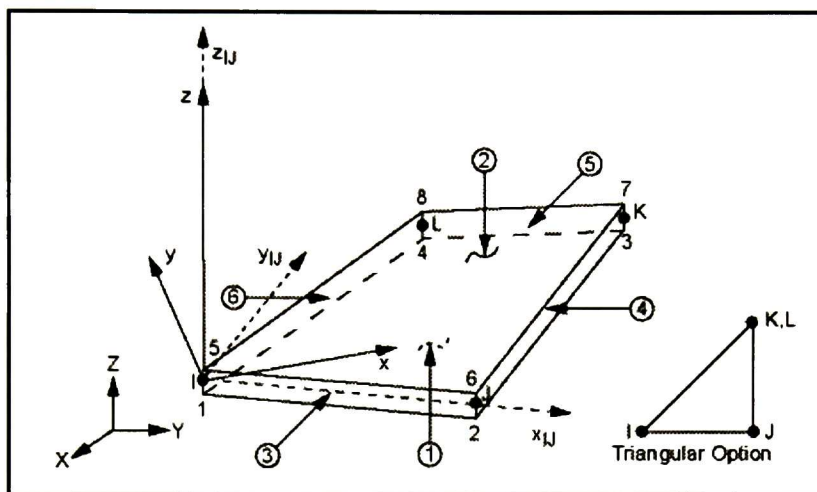


Figura 3.2 El elemento SHELL 63

Este elemento tiene la capacidad de mostrar esfuerzos y deformaciones, además es posible crearle una matriz de espesor constante o variable.

La geometría, la localización nodal y el sistema de coordenadas de este elemento se muestra en la figura 3.2. Este elemento puede estar formado por tres o cuatro nodos, un espesor y una rigidez determinada, además de poder determinarse como ortotrópico o isotrópico.

### 3.1.1.5 Formulación del Método del Elemento Finito.

La matriz característica del elemento finito tiene diferentes nombres en problemas de diferentes áreas. En mecánica estructural se le llama matriz de rigidez y relaciona fuerzas con desplazamientos en los nodos tomado en cuenta la relación constitutiva sobre los esfuerzos y deformaciones unitarias [30].

Hay tres maneras importantes de derivar la matriz característica del elemento:

- 1.- El método directo. Este está fundamentado en razones físicas. Limitado a elementos muy simples, pero tiene un valor de estudio debido a que este aumenta el entendimiento del concepto físico del método del elemento finito.
- 2.- El método variacional. Es aplicable a problemas que pueden ser establecidos por ciertas expresiones integrales tal como la expresión de la energía potencial.
3. Los métodos de los residuos ponderados. Son particularmente formulados para problemas en los cuales las ecuaciones diferenciales son conocidas pero no son funcionales para poder establecerse como variacional.

Desde el punto de vista matemático, el Método del Elemento Finito es una formulación integral, la cual puede ser establecida de las formas 2 y 3. Todas estas técnicas usan la misma metodología para generar el ensamble final de las ecuaciones algebraicas.

Para el análisis de esfuerzos y algunas otras áreas, el método variacional y el método de los residuos ponderados son los más usados y conducen a formulaciones idénticas del elemento finito.

### 3.1.1.6 Ventajas y limitaciones del Método del Elemento Finito.

Algunas de las principales ventajas que presenta el Método del Elemento Finito son:

- Sus aplicaciones se extienden a todo el dominio de la mecánica del medio continuo y problemas físicos en general, que son gobernados por ecuaciones diferenciales.
- Es posible analizar cuerpos por distintos materiales, cuyas propiedades puedan diferir, tales como: Módulo de Elasticidad, conductividad térmica, resistencia eléctrica, capacidad calorífica, calor específico y anisotropía, entre otros.
- La red o malla puede estar constituida de elementos de diferentes tamaños o forma, pudiéndose modelar exactamente la frontera del dominio de estudio.



- Se puede variar el tamaño y la forma de los elementos, de esta manera la malla de elementos finitos se puede afinar y/o expandir según se requiera, para evaluar cuidadosamente aquellas regiones consideradas como críticas.
- Este método posee la capacidad de analizar cuerpos con condiciones de frontera discontinúas o mixtas, sin problemas.
- Una de las ventajas, quizás mas importante, es la posibilidad de generar programas de computo de tipo general o para resolver una determinada clase de programas.

Entre las desventajas se puede mencionar que:

- Debido a la gran cantidad de calculo involucrado en la solución, aun en problemas simples, es necesario contar con algún programa de computo y una computadora.
- Los valores obtenidos deben evaluarse cuidadosamente con resultados experimentales o analíticos.
- En los casos donde es necesario cambiar varias veces la geometría del dominio de estudio se requiere generar para cada ajuste de geometría, una malla diferente, lo cual hace que el análisis sea mas lento y tedioso. Por ejemplo, cuando se optimizan los cambios de sección.
- Además, existen problemas complejos en los cuales el planteamiento es difícil, tal es el caso de grietas, fractura, contacto, filtración libre o transitoria, estudio de biomecánica, etc. En la mayoría de estas situaciones el problema se vuelve no lineal.

### 3.1.1.7 Análisis estructural mediante el Método de Elemento Finito.

El análisis estructural usando el método del elemento finito es una técnica numérica donde las geometrías complejas y las cargas son simplificadas reduciendo los problemas hacia subproblemas mas pequeños donde los métodos clásicos de análisis pueden ser aplicados. La técnica consiste en dividir una geometría estructural en pequeños elementos tales como triángulos, cuadriláteros o bloques sólidos.

El modelo estructural de la parte puede ser pensado como un sistema de resortes que se deforman cuando la carga es aplicada [29]. Las deformaciones son transmitidas por la carga aplicada a través de resortes hasta que se la estructura alcanza el equilibrio. En otras palabras, la subdivisión continua indefinidamente y el problema solo puede definirse haciendo uso del continuo matemático. Esto conduce a ecuaciones diferenciales o a expresiones equivalentes, las cuales, cuando son reales se pueden resolver de forma exacta mediante métodos matemáticos. Cada elemento en el modelo es combinado en una

---

larga matriz de ecuaciones de las cuales el esfuerzo y la deflexión de la estructura pueden ser calculadas.

La modelación apropiada de la estructura respecto a la geometría y al material, así como la exactitud de las cargas y las condiciones de frontera, son cruciales para la exactitud de los resultados. La experiencia es muy importante para entender los efectos de las consideraciones en los resultados del análisis.

Antes de iniciar cualquier análisis por el método del elemento finito, es importante tener previamente una estrategia, a continuación se proponen una serie de pasos para la obtención de resultados satisfactorios en un análisis estructural.

### 3.1.1.8 Selección del tipo de modelo (2D o 3D).

El modelo de elemento finito debe ser caracterizado como bidimensional o tridimensional y compuesto por key points (puntos de referencia), líneas, áreas o elementos sólidos.

Por supuesto, se pueden mezclar diferentes tipos de elementos según se requiera (teniendo cuidado de mantener una compatibilidad adecuada entre los grados de libertad). Por ejemplo, se debe modelar un espesor de placa estructural usando elementos SHELL en tres dimensiones para representar las paredes de una estructura y los elementos BEAM en tres dimensiones para representar vigas, columnas, varillas, etc. La elección dimensional del modelo y tipo de elemento determinará con frecuencia que método de generación de modelos será el idóneo para un determinado problema.

### 3.1.1.9 Preproceso, Proceso y Postproceso.

El análisis por elementos finitos implica tres etapas de actividad: preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento. Dentro de la etapa de preprocesamiento se crea y discretiza el dominio de la solución en elementos finitos, que es, subdividir el problema en nodos y elementos, se asume la función de forma que represente el comportamiento físico del elemento, se desarrollan las ecuaciones para cada elemento, se ensamblan los elementos y se construye la matriz de rigideces, y finalmente se aplican condiciones iniciales, condiciones de frontera y carga. La etapa de procesamiento implica la generación y la modificación de la rigidez, así como la solución de ecuaciones que resulta en la evaluación de las variables nodales. En el postprocesamiento se presentan los resultados. En general, en esta etapa se calculan y muestran la configuración deformada, las formas modales, la temperatura y la distribución de esfuerzos. Un análisis completo por elemento finito es una interacción lógica de las tres etapas.

3.1.1.10 Modelado y revisión de resultados.

El modelado es la simulación de una estructura física o un proceso físico a través de la construcción de un método analítico o numérico. No es simplemente la preparación de la malla, nodos y elementos. El modelado requiere que la acción física del problema sea entendida lo suficientemente bien para seleccionar los tipos de elementos, y los suficientes, para representar adecuadamente la acción física. Una vez que el modelo se ha finalizado y la computadora ha terminado de realizar los cálculos, se deben revisar los resultados con el objetivo de ver si son razonables. Revisar los resultados es muy importante porque es muy fácil cometer errores durante la etapa de modelación. El método de elemento finito calcula desplazamientos nodales, posteriormente (el software) usa los desplazamientos para calcular las deformaciones y finalmente los esfuerzos. Si los desplazamientos son incorrectos, las deformaciones y los esfuerzos también lo serán. Por lo tanto, se recomienda evaluar primeramente la forma desplazada del modelo.

Una practica muy útil para detectar errores en los resultados del análisis es visualizar el campo de esfuerzos (figura 3.3) con la intención de localizar discontinuidades en los valores de esfuerzos, sobre todo en los limites de los elementos. La figura 3.4 representa el procedimiento para el desarrollo de un análisis por medio del método de elemento finito.

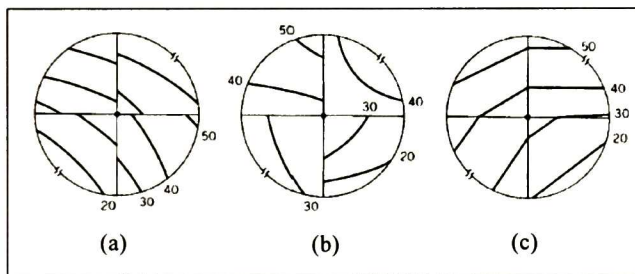


Figura 3.3 Discontinuidades en campos de esfuerzo.

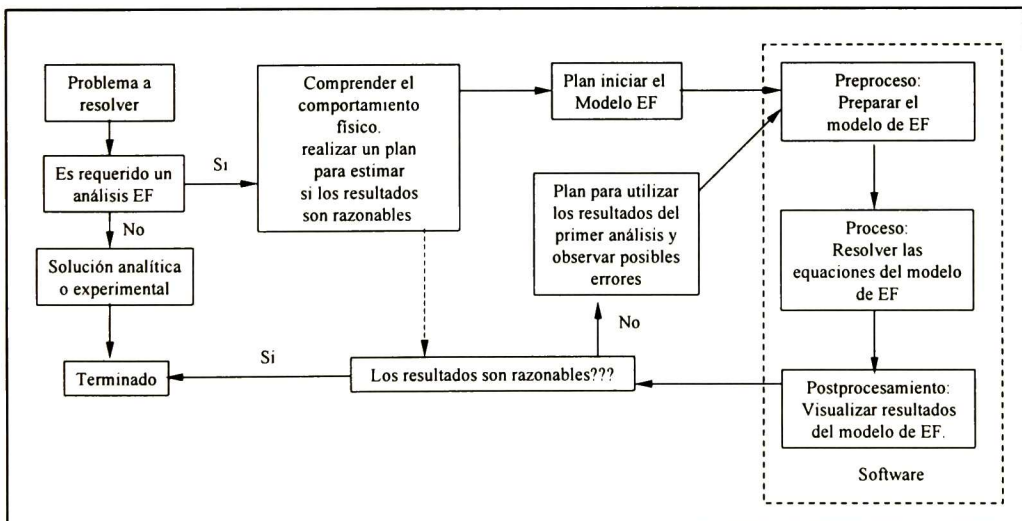


Figura 3.4 Procedimiento de análisis mediante elemento finito.

### 3.1.1.11 Discretización.

Las estructuras reales no son fáciles de discretizar y deben construirse en partes para poder idealizarlas matemáticamente. Los cortes y conectores que existan en el modelo producirán comportamientos inciertos. Las consideraciones que deben realizarse en la construcción de una malla deben ser dirigidas hacia que tipo de elemento es el mas adecuado y la cantidad de ellos. Los elementos deben guardar una relación de tamaño y buena conectividad. En geometrías caprichosas, como radios muy pequeños, se debe realizar un refinamiento de la malla, mientras que en geometrías regulares la malla puede ser mas burda.

Una buena practica para conocer cuando una discretización es buena, es realizar un análisis con una malla que represente lo mejor posible la geometría de la pieza, sin embargo, existirán pequeñas áreas donde se necesite refinar la malla para conocer con mejor aproximación el valor de resultados que se tiene.

Un indicador de cuando los resultados de un análisis son aceptables es resolver el problema mas de 2 veces usando refinamientos de malla cada vez que se resuelva, especialmente en las secciones de geometría caprichosa. Una vez que se tienen los resultados, se debe calcular el porcentaje de diferencia (porcentaje de error) entre los análisis realizados, de tal manera que no sea mayor al 4%.

Al realizar la malla del modelo, el software tiene un modulo especial para detectar la distorsión del elemento, tomando el siguiente criterio, si del total de los elementos en el modelo mas del 4% de ellos se encuentra distorsionado el modelo no se considera bueno y se debe buscar una mejor manera de realizar la malla.

### 3.1.1.12 Condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera describen las superficies libres de desplazamiento y las superficies restringidas de movimiento. Usualmente ambas aparecerán en un problema dado, especialmente en el análisis de estructuras, debido a que una superficie del modelo es restringida al movimiento y en otra superficie la carga es aplicada. Por ejemplo, la figura 3.5 la sección AD esta restringida del movimiento mientras que en la sección BC es aplicada una carga uniforme.

En todas las fronteras y nodos del modelo excepto los contenidos en AD deben estar cargados por fuerzas asociadas a su propio peso y deben estar libres para el desplazamiento. En estructuras mecánicas, el término “condiciones de soporte” es usado como un sinónimo de condiciones de frontera de desplazamientos.

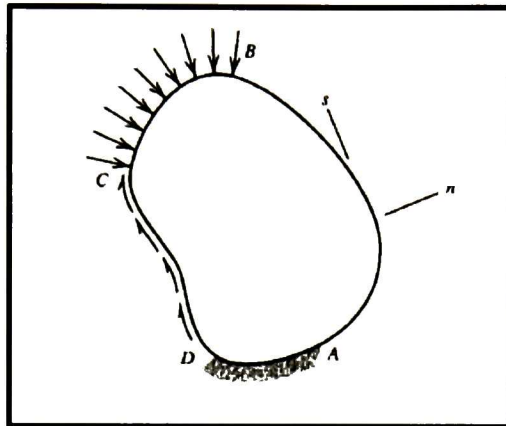


Figura 3.5 Cuerpo con condiciones de frontera y carga aplicada.

### 3.1.1.13 Cargas mecánicas.

Las cargas mecánicas son consideradas como fuerzas de cuerpo, de tracción en la superficie, fuerzas concentradas y momentos. Tracción en la superficie es considerada como una carga distribuidamente aplicada en una frontera de la estructura. Carga de presión es cuando se genera una fuerza que empuja a la superficie.

Las fuerzas de cuerpo son aquellas inducidas por un volumen. Estas fuerzas son generalmente causadas por una aceleración y ocasionalmente por un campo magnético. Las aceleraciones típicas son: aceleración centrípeta en maquinaria rotativa y la aceleración por la gravedad, la cual se produce por el propio peso del volumen.

La carga debida a un momento puede ser aplicada en un nodo solo si un elemento conectado a este nodo tiene grados de libertad rotacionales en su formulación de rigidez. La entrada de esta carga en el software consiste en una magnitud, dirección y un nodo asociado a la fuerza o momento.

Debido a la naturaleza de nuestro problema solo se consideraran las fuerzas de cuerpo y las concentradas, especificando su dirección y magnitud mediante las normas que las establecen.

### 3.1.1.14 Análisis Estático.

El método de solución para un análisis estático es valido para todos los grados de libertad. Los efectos inerciales y de amortiguamiento, excepto para aceleración de campos estáticos.

Las ecuaciones de equilibrio para un análisis estructural lineal son (Ec 3.1):

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad \text{o} \quad [K]\{u\} = \{F^{ac}\} + \{F^r\}$$

donde:

$$[K_e] = \text{Matriz de rigidez} = \sum_{m=1}^N [K_e]$$

$\{u\}$  = vector de desplazamiento

N = Número de elementos

$\{F^a\}$  = vector total de carga aplicada

$\{F^r\}$  = vector de reacción a la carga

$$\{F^a\} = \{F^{nd}\} + \{F^{ac}\} + \sum_{m=1}^N (\{F_e^{th}\} + \{F_e^{pr}\})$$

donde:

$\{F^{nd}\}$  = carga nodal aplicada

$\{F^{ac}\} = -[M]\{a_c\}$  = vector de aceleración de carga

$$[M] = \text{matriz de masa} = \sum_{m=1}^N [M_e]$$

$[M_e]$  = matriz elemental de masa

$\{a_c\}$  = vector total de aceleración

$\{F_e^{th}\}$  = vector elemental de carga térmica

$\{F_e^{pr}\}$  = vector elemental de carga a presión

En el análisis actual, solamente se utilizan cargas nodales aplicadas, matriz de masa, matriz de rigidez, vector de aceleración y se genera un vector de reacción de carga. Los demás términos son despreciados debido a que no se tiene influencia o cargas térmicas. De la ecuación general de análisis estáticos sabemos que la matriz de rigidez es conocida debido a que el material y la geometría son conocidas, así como el vector de fuerzas

debido a que es una especificación de prueba, por lo tanto lo desconocido en esta ecuación es solamente la matriz de desplazamientos y que será calculada por el software y que nos dará como resultados desplazamientos, deformaciones y finalmente esfuerzos.

### 3.1.2 Análisis de esfuerzos a través de extensometría eléctrica.

#### 3.1.2.1 Extensometría eléctrica y sus fundamentos.

Mediante la aplicación de la teoría de la mecánica del medio continuo y de la mecánica de materiales, se obtiene un conjunto de ecuaciones que permiten obtener el estado de esfuerzos de un elemento estructural cualesquiera, en uno, dos o tres de sus ejes, de igual manera se cuenta con ecuaciones que permiten obtener el estado general de esfuerzos a partir de los valores de deformación en los tres ejes (estado de deformación).

La extensometría eléctrica es precisamente una técnica que nos permite obtener el estado de deformación con gran exactitud y de manera muy sencilla por la facilidad de su instalación, convirtiéndola en una herramienta indispensable en la ingeniería moderna, ya que esta no considera las simplificaciones que los métodos matemáticos emplean para la obtención de soluciones [11,28].

Con los extensómetros eléctricos no solo es posible determinar esfuerzos; ya que al ser estos unos transductores que transforman los cambios de resistencia eléctrica a deformaciones unitarias, es posible mediante una serie de transformaciones adecuadas obtener parámetros como fuerza, presión, temperatura, dilatación térmica, entre otros.

#### 3.1.2.2 Principio de funcionamiento.

Las ecuaciones que rigen la operación de los extensómetros eléctricos son funciones de la resistencia eléctrica de cualquier conductor, la resistencia eléctrica de cualquier conductor depende del material de que se trate y de sus dimensiones, como se muestra en la ecuación 3.2:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Donde:

R = Resistencia eléctrica del material (ohm)

L = Longitud (m)

A = Área seccional del conductor (m<sup>2</sup>)

$\rho$  = Resistividad (ohm/m)

Para determinar el cambio unitario de resistencia y relacionarlo con la deformación unitaria, se diferencia la ecuación 3.2, teniendo como resultado la ecuación 3.3

$$dR = \frac{\rho Adl + LAd\rho - L\rho dA}{A^2}$$

El volumen queda expresado como (Ec 3.4)

$$V = AL$$

Diferenciando (Ec 3.5) :

$$dV = AdL + LdA$$

para una deformación unitaria dV puede escribirse (Ec. 3.6):

$$dV = LA(1 + \varepsilon)(1 - \nu\varepsilon)^2 - LA$$

donde:

$\varepsilon$  = deformación unitaria longitudinal

$\nu$  = coeficiente de Poisson

L = longitud

A = Área

Si la deformación unitaria es pequeña de tal manera que los términos de segundo orden de  $\varepsilon$  pueden despreciarse, la ecuación (3.6), se reduce a (Ec. 3.7):

$$dV = LA \varepsilon(1 - 2\nu)$$

en general la deformación unitaria puede expresarse como (Ec. 3.8)

$$\varepsilon = \frac{dL}{L}$$

sustituyendo (Ec. 3.8) en (Ec. 3.7), tenemos (Ec.3.9):

$$Dv = AdL(1 - 2\nu)$$

Igualando ecuaciones (Ec. 3.9) y (Ec. 3.5), tenemos (Ec. 3.10)

$$AdL(1 - 2\nu) = AdL + LdA$$

$$dA = -\frac{2\nu AdL}{L}$$



Substituyendo la ecuación (Ec. 3.10) en (Ec. 3.2), tenemos (Ec 3.11)

$$dR = \frac{\rho dL(1+2\nu)}{A} + \frac{Ld\rho}{A}$$

Dividiendo la ecuación (Ec. 3.11) entre (Ec. 3.2) se tiene (Ec. 3.12):

$$\frac{dR}{R} = (1+2\nu)\frac{dL}{L} + \frac{d\rho}{\rho}$$

Dividiendo entre  $dL / L$  se tiene (Ec. 3.13):

$$\frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}} = 1 + 2\nu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\frac{dL}{L}}$$

Donde:  $\frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}}$  se denomina factor de sensibilidad  $S_A$  y tomando en cuenta que  $\varepsilon = \frac{dL}{L}$ , se

crea una nueva ecuación (Ec. 3.14)

$$S_A = \frac{\frac{dR}{R}}{\varepsilon} \approx \frac{\Delta R}{\varepsilon}$$

La sensibilidad  $S_A$  es una función de la aleación (tabla 3.1) empleada para fabricar el conductor, siempre que forme espiras o rejillas este exhibe una sensibilidad a la deformación unitaria y transversal.

Tabla 3.1 Sensitividad a la deformación en aleaciones de extensómetros.

Aleación del Extensómetro	Composición	$S_A$
Constantan	45%Ni, 55%Cu	2.1
Nicrome V	80%Ni, 20%Cr	2.1
Isoelastica	36%Ni, 8%Cr, 0.5%Mo, 55.5%Fe	3.6
Karma	74%Ni, 20%Cr, 3%Al, 3%Fe	2
Armour D	70%Fe, 20%Cr, 10%Al	2
Platino Tugsteno	92%Pt, 8%W	4

El segmento axial de la rejilla guarda una relación elevada de ancho y espesor, así que cierta cantidad de deformación transversal se transmite al adhesivo y al material de soporte. La magnitud de la deformación unitaria transversal transmitida depende del espesor y módulo elástico del adhesivo, del material de soporte, del material de la rejilla y de la relación de ancho a espesor del segmento axial de la rejilla.

La respuesta de un extensómetro perfectamente adherido a una superficie que presenta un sistema de deformación biaxial se expresa como (Ec. 3.15):

$$\frac{\Delta R}{R} = S_A \varepsilon_A + S_T S_\varepsilon + S_c \gamma_c$$

Donde:

$S_A$  = Sensibilidad del extensómetro a la deformación unitaria axial.

$\varepsilon_A$  = Deformación unitaria a lo largo de la dirección del eje del extensómetro.

$S_T$  = Sensibilidad del extensómetro a la deformación unitaria transversal.

$\varepsilon_T$  = Deformación unitaria a lo largo de una dirección transversal del extensómetro.

$S_c$  = Sensibilidad del extensómetro a la deformación unitaria por corte.

$\gamma_c$  = Deformación unitaria de corte.

La sensibilidad del extensómetro a la deformación unitaria por corte es muy pequeña, por eso puede despreciarse (Ec. 3.16)

$$\frac{\Delta R}{R} = S_A (\varepsilon_A + K \varepsilon_T)$$

Donde el cociente  $\frac{S_T}{S_A}$  se denomina factor de sensibilidad transversal ( $K_t$ ).

Los fabricantes de extensómetros proporcionan este valor ( $K_t$ ); y además otra constante llamada factor del extensómetro ( $F_e$ ); este factor relaciona los cambios de resistencia a la deformación unitaria axial (Ec. 3.17),

$$\frac{\Delta R}{R} = F_e \varepsilon_A$$

Este factor es obtenido por medio de un ensayo realizado por medio de una viga especial de calibración a la cual se le proporciona una flexión determinada para una deformación unitaria conocida como  $\varepsilon_A$ , el cambio de resistencia es medido y el factor  $F_e$  se determina mediante la ecuación (Ec. 3.17)

Mediante este método de calibración la deformación unitaria experimentada por la celda es biaxial con (Ec. 3.18):

$$\varepsilon_T = -\nu_o \varepsilon_A$$

donde:

$$\nu_o = 0.285$$

Representa el coeficiente de Poisson del material de la viga.

Sustituyendo la ecuación (Ec. 3.18) en (Ec. 3.17), se tiene el cambio de resistencia en el proceso de calibración (Ec 3.19):

$$\frac{\Delta R}{R} = S_A \varepsilon_A (1 - K \nu_o)$$

Igualando (Ec. 3.17) con (Ec. 3.19), tenemos (Ec. 3.20)

$$F_e = S_A (1 - K \nu_o)$$

Es importante reconocer que el error puede ocurrir en la medición cuando se emplea la ecuación (Ec. 3.17), exceptuando dos casos especiales, en el caso de que el estado de esfuerzos sea uniaxial o cuando ( $K_t$ ) sea cero, ocurrirá por despreciar la sensibilidad transversal del extensómetro.

La magnitud del error se determina considerando la respuesta del extensómetro en un estado biaxial de esfuerzos con deformaciones unitarias  $\varepsilon_A$  y  $\varepsilon_T$ , llegando a la ecuación (Ec. 3.21):

$$\%E = \frac{K_T \left( \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_A} + \nu_o \right)}{1 - \nu_o K_T} * 100$$

Debido a que los errores pueden ser de consideración cuando ambos son grandes, es importante hacer las correcciones para la sensibilidad transversal del extensómetro.

Teniendo estas consideraciones es factible de obtener la deformación unitaria de un elemento estructural, si de alguna manera se logra instalar un elemento conductor íntimamente adherido a el y que muestre el cambio de resistencia, esto es, un extensómetro; un fino conductor, con una resistencia y un  $F_e$  conocido y montado sobre una delgada capa de material de soporte que permite que sean pegados fácil e íntimamente a cualquier elemento estructural.

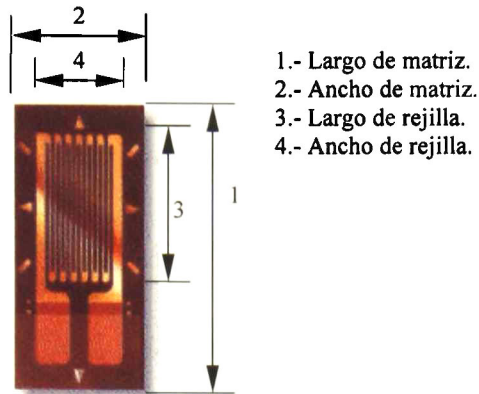


Figura 3.6 Extensómetro eléctrico

Las cualidades de los extensómetros eléctricos (figura 3.6), obedecen al hecho de que en su fabricación se emplean las técnicas más modernas de los circuitos electrónicos impresos, respaldados en una investigación de materiales y técnicas.

### 3.1.2.3 Medición de deformaciones.

En la figura 3.7 se representa un arreglo de cuatro resistencias eléctricas  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$  las cuales son alimentadas por la batería  $V$  en los puntos  $A$  y  $C$ , entre los puntos  $B$  y  $D$  se coloca un galvanómetro que permite medir la intensidad y dirección de la corriente eléctrica que circula entre los puntos  $B$  y  $D$  cuando exista una diferencia de potencial entre ellos. Las mediciones más precisas de la resistencia se obtienen con un circuito llamado puente de Wheatstone, en honor del físico británico Charles Wheatstone. Este circuito consiste en tres resistencias conocidas y una resistencia desconocida, conectadas entre sí. Se aplica una corriente continua a través de dos puntos opuestos del diamante y se conecta un galvanómetro a los otros dos puntos. Cuando todas las resistencias se nivelan, las corrientes que fluyen por los dos brazos del circuito se igualan, lo que elimina el flujo de corriente por el galvanómetro. Variando el valor de una de las

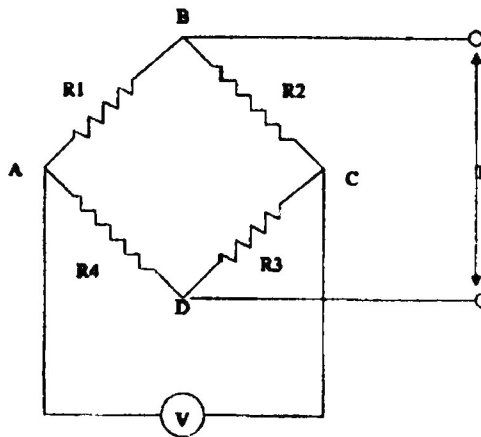


Figura 3.7 Puente de Wheatstone.

resistencias conocidas, el puente puede ajustarse en cualquier valor de la resistencia conocida, que se calcula a partir de los valores de las otras resistencias

El principio de operación del puente de Wheatstone consiste en la medición de  $\Delta E$  la cual se emplea para medir la deformación unitaria. En el circuito la caída de voltaje a través de  $R_1$  se denomina  $V_{AB}$  y esta dado por (Ec 3.22):

$$V_{AB} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V$$

De la misma manera la caída de voltaje a través de  $R_4$  es (Ec. 3.23):

$$V_{AD} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V$$

La salida de voltaje del puente E es equivalente a  $V_{BD}$ , (Ec. 3.24)

$$E = V_{BD} = V_{AB} - V_{AD}$$

Substituyendo (Ec 3.22) y (Ec. 3.23) en (Ec. 3.24), tenemos (Ec. 3.25)

$$E = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V$$

E será cero y el puente estará en equilibrio cuando  $R_1 R_3 = R_2 R_4$

Esta característica de balancear el puente es lo que permite que el puente sea empleado para obtener las deformaciones unitarias que sufren los extensómetros en el puente; de esta manera el voltaje inicial es cero y el voltaje  $\Delta E$  es inducido por la deformación unitaria de cada uno de los extensómetros.

### 3.1.2.4 Selección de extensómetros.

El tamaño del extensómetro es importante antes de realizar el análisis, puesto que de esto depende el número de extensómetros que se aplicarán en la prueba.

La selección de un extensómetro depende básicamente en las condiciones que van a ser empleados, ya que esta es la única forma de saber si el extensómetro es el adecuado para el análisis en que se desea emplear esta técnica experimental. Las pruebas pueden ser estáticas o dinámicas, bajo condiciones de temperaturas tan bajas como  $-250^\circ\text{C}$  o altas como  $450^\circ\text{C}$ , sujetas a grandes fuerzas de cuerpo o de contacto y la duración de las pruebas puede esperarse que sean de unos segundos o de varias décadas y con una muy alta y estable precisión.

Además que el elemento debe ser ultra delgado y ser montado sobre un material que facilite su manejo y que junto con el pegamento, soldaduras y cables no permitan reacciones indeseables. Tratar de conciliar estas variables justifican el elevado número de configuraciones y hace que la selección de un extensómetro, el adhesivo, soldadura y cables empleados para su instalación no resulten triviales.

Los parámetros más importantes que se debe considerar para la selección de un extensómetro se sintetizan en los siguientes puntos:

- 1.- Sensibilidad a la deformación de la aleación utilizada.
- 2.- Material de respaldo.
- 3.- Longitud de medición.
- 4.- Modelo o tipo.
- 5.- Número de referencia para su auto compensación de temperatura,
- 6.- Resistencia eléctrica del medidor.
- 7.- Opciones.

Básicamente el proceso de selección consiste en una combinación de características disponibles que sean compatibles con las condiciones en que se trabaja el elemento y se satisfagan sus limitaciones, tales como:

- 1.- Precisión.
- 2.- Estabilidad.
- 3.- Temperatura.
- 4.- Deformación esperada.
- 5.- Duración de la prueba.
- 6.- Número de ciclos esperados.
- 7.- Facilidad de instalación.
- 8.- Condiciones de operación.

Es obvio que no siempre se podrá disponer del extensómetro y los materiales de instalación que cumplan con las condiciones requeridas para el elemento que se va a instrumentar, lo que implica que será necesario pasar por alto algunas condiciones, tomando las mas importantes para especificarlo.

### 3.1.2.5 Método de instalación.

Los extensómetros son resistores de precisión de alta calidad, pero no servirán de nada, si no se colocan en el espécimen, de una manera adecuada. Cuando se monta un extensómetro, es de vital importancia preparar adecuadamente la superficie del componente donde se colocará. Este acondicionamiento de superficie a grosso modo consiste en la remoción de cualquier pintura o capa de oxido o corrosión, para obtener una superficie lisa pero no altamente pulida. Finalmente la superficie es tratada con una solución básica para darle la afinidad química necesaria para aplicar el adhesivo.

A continuación se dan los pasos mas importantes del proceso:

- 1.- Desengrasado de la superficie.
- 2.- Pulido de superficie.
- 3.- Líneas de colocación.
- 4.-Acondicionamiento de la superficie
- 5.- Pegado del extensómetro.
  - a) Manejo y preparación.
  - b) Aplicación del pegamento
- 6.-Soldado de las terminales.

### 3.1.2.6 Extensómetros utilizados en el análisis.

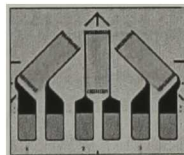
#### Rosetas de deformación.

En un campo de deformaciones axiales, la colocación de los extensómetros debe ser en orientación a los ejes de las deformaciones principales. Es posible utilizar arreglos de extensómetros comerciales con tres elementos que vienen orientados de acuerdo a distintos ángulos entre si. Dichos elementos se les conoce con el nombre de rosetas de deformación.

La colocación de una roseta se hace de acuerdo a la orientación de uno de sus ejes con el eje de referencia marcado en la pieza que se estudia. Con los tres valores de deformación de cada elemento y con los ángulos de la roseta, se obtienen las deformaciones y direcciones principales.

Para esta aplicación se selecciono una roseta tipo:

CEA-06-062UR-120 que consiste con tres extensómetros colocados a 0, 45 y 90 grados,



### 3.1.2.7 Medición de deformaciones principales y sus direcciones con Roseta.

Las ecuaciones para calcular las deformaciones principales a través de una roseta son derivadas de las relaciones de “transformaciones de deformaciones”. Las relaciones que se utilizan son las mas simples, se utilizan las relaciones que expresan las deformaciones principales en cualquier dirección en una superficie a prueba en términos de dos deformaciones principales y el ángulo que forman con el eje principal con una dirección de deformaciones especifica. Esta situación puede ser mejor visualizada con la ayuda de la teoría del Circulo de Mohr. Esto puede ser visto en la figura 3.8, donde las

deformaciones principales a un ángulo  $\theta$  del eje principal es simplemente expresada por (Ec. 3.26):

$$\epsilon_{\theta} = \frac{\epsilon_P + \epsilon_Q}{2} + \frac{\epsilon_P - \epsilon_Q}{2} \cos 2\theta$$

La figura 3.9 representa una pequeña área de una superficie en prueba, con una roseta rectangular, a  $\theta$  grados de  $\epsilon_P$  con referencia a la rejilla #1. En la figura 3.10 se muestra el círculo de Mohr superpuesto.

Figura 3.8. Deformación  $\theta$  en términos de deformaciones principales.

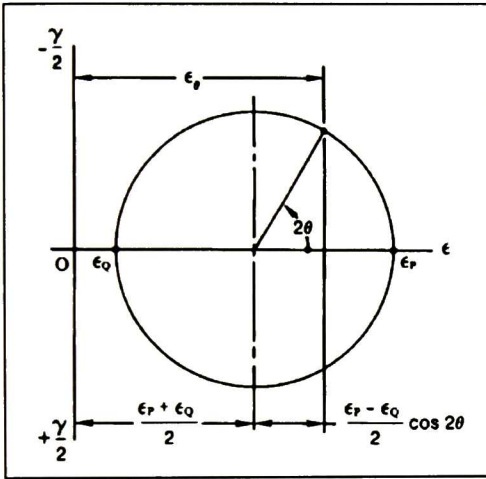


Figura 3.9. Roseta instalada en una superficie a un ángulo aleatorio.

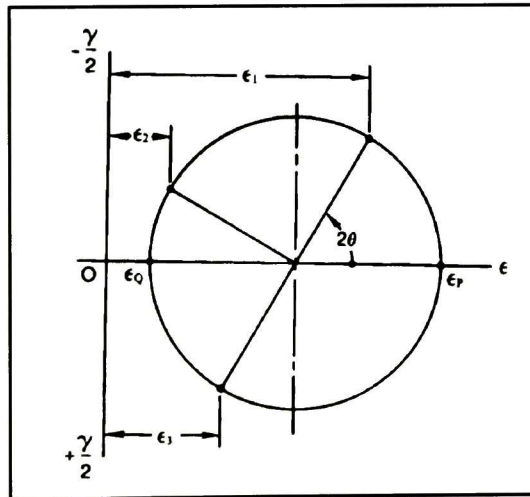
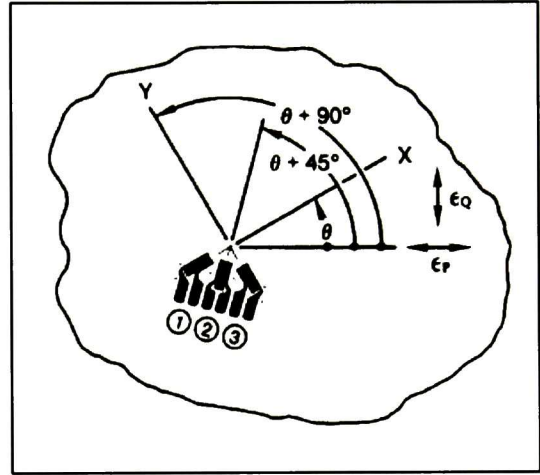


Figura 3.10. Ejes de la roseta superpuesta en el círculo de deformación de Mohr.



Si sustituimos en la ecuación 3.26, los ángulos de las tres direcciones de las rejillas, las deformaciones sensadas por cada una de las rejillas pueden ser expresadas como (Ec 3.27):

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_P + \varepsilon_Q}{2} + \frac{\varepsilon_P - \varepsilon_Q}{2} \cos 2\theta$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_P + \varepsilon_Q}{2} + \frac{\varepsilon_P - \varepsilon_Q}{2} \cos 2(\theta + 45^\circ)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_P + \varepsilon_Q}{2} + \frac{\varepsilon_P - \varepsilon_Q}{2} \cos 2(\theta + 90^\circ)$$

Cuando la roseta es instalada en la parte que esta sujeta a prueba en un punto con estado arbitrario de esfuerzos, las variables del lado derecho de las ecuaciones 3.27 son desconocidas. Pero las deformaciones  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  y  $\varepsilon_3$  pueden ser medidas. Por lo tanto, resolviendo las ecuaciones 3.27 simultáneamente para las cantidades desconocidas  $\varepsilon_P$ ,  $\varepsilon_Q$  y  $\theta$ , las deformaciones principales y el ángulo pueden ser expresadas en términos de las tres deformaciones medidas. Teniendo los siguientes resultados (Ec. 3.28 y Ec. 3.29):

$$\varepsilon_{P,Q} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2}$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right)$$

Si la roseta es propiamente numerada, las deformaciones principales pueden ser calculadas de la ecuación 3.28 mediante la sustitución de las deformaciones medidas  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  y  $\varepsilon_3$ . El ángulo  $\theta$  representa el ángulo agudo del eje principal a la rejilla de referencia de la roseta, como se aprecia en la figura 3.29. En la practica de los análisis experimentales de esfuerzo, es muy conveniente, y fácil de visualizar, si es expresado como el ángulo de la rejilla #1 al eje principal. Para cambiar el sentido del ángulo se requiere solo cambiar el signo (Ec. 3.30).

$$\phi_{P,Q} = -\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{-\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right)$$

La dirección física del ángulo agudo dado por las ecuaciones (3.28) es siempre en contra del sentido de las manecillas del reloj. La única diferencia es que  $\theta$  es medida del eje principal a la rejilla #1, mientras  $\phi$  es medida de la rejilla #1 al eje principal.

Desafortunadamente,  $2\phi \equiv \tan 2(\phi + 90^\circ)$ , el ángulo calculado puede referirse a cualquiera de los ejes principales; y entonces la identificación en la ecuación 3.30 es  $\phi_{P,Q}$ . Esta ambigüedad puede ser resuelta fácilmente con la aplicación de las siguientes reglas:

- 1.- si  $\varepsilon_1 > \varepsilon_3$ , entonces  $\phi_{P,Q} = \phi_P$
- 2.- si  $\varepsilon_1 < \varepsilon_3$ , entonces  $\phi_{P,Q} = \phi_Q$
- 3.- si  $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$  y  $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ , entonces  $\phi_{P,Q} = \phi_P = -45^\circ$
- 4.- si  $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$  y  $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ , entonces  $\phi_{P,Q} = \phi_P = +45^\circ$
- 5.- si  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$ , entonces  $\phi_{P,Q}$  es indeterminado (deformaciones axiales iguales)

El éxito de realizar un análisis experimental de esfuerzos es llegar a determinar los esfuerzos principales, con el objetivo de comparar los resultados con un criterio de falla. A través del estado de deformaciones completamente calculado se puede determinar completamente el estado de esfuerzos de una manera fácil cuando se conocen las propiedades del material del componente que está en análisis. Algunos equipos de medición de extensómetros, tales como el Sistema 5000 de Measurements Group's (utilizado en el presente trabajo), puede calcular las deformaciones y esfuerzos principales con tan solo alimentar el software con las propiedades del material.

Si el material en prueba es homogéneo en su composición, y es isotropico en sus propiedades mecánicas, y si las relaciones de esfuerzo y deformación son lineales, con proporcionalidad entre esfuerzos y deformaciones, la teoría del círculo de Mohr biaxial puede ser usada para convertir las deformaciones principales a esfuerzos principales. Este procedimiento requiere por supuesto que el Modulo de Elasticidad y la Relación de Poisson sean conocidos. La ley de Hooke para un estado biaxial de esfuerzos puede ser expresado como (Ec. 31 y Ec. 32):

$$\sigma_P = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_P + \nu\varepsilon_Q)$$

$$\sigma_Q = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_Q + \nu\varepsilon_P)$$

Los valores numéricos de las deformaciones principales calculadas de la ecuación 3.26 pueden ser substituidas en la ecuación 3.31 y 3.32, también las propiedades elásticas, para obtener los esfuerzos principales. La ecuación 3.26 puede substituirse algebraicamente en la ecuación 3.31 y 3.32 para expresar los esfuerzos principales directamente en términos de las tres deformaciones medidas y de las propiedades mecánicas del material. Teniendo la ecuación:

$$\sigma_{P,Q} = \frac{E}{2} \left[ \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1-\nu} \pm \frac{\sqrt{2}}{1+\nu} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \right]$$

---

Cuando el material en prueba es isotrópico y lineal-elástico en sus propiedades mecánicas, el principal esfuerzo coincide en dirección con las deformaciones principales.

## 3.2 Aplicación de la tecnología avanzada en el desarrollo de nuevos productos.

### 3.2.1 Metodología de diseño DFSS.

El proceso de Diseño para Seis Sigma (Design For Six Sigma) es una metodología sistemática que nos permiten diseñar productos o procesos que cumplan con las expectativas del cliente y puedan ser producidas con un nivel de 6 sigma.

Dentro del DFSS se utilizan una serie de métodos y herramientas estadísticas que predicen y mejoran la calidad antes de construir prototipos (etapas tempranas del proyecto). Posteriormente se verifica la calidad del diseño en las corridas pilotos, preproducción y producción de las unidades durante el proceso del NPI.

Esta metodología contempla las siguientes fases:

- **Identificación:** Esta fase se pretende identificar el cliente y sus requerimientos que satisfagan sus necesidades. Además, se busca traducir los requerimientos del cliente a especificaciones técnicas de diseño.
- **Medición:** En esta etapa se busca determinar las fuentes de variación debidas a los sistemas de medición a utilizar en el desarrollo del proyecto para obtener un sistema de medición capaz, con sesgo y variabilidad minimizada.
- **Diseño:** Genera diseños conceptuales que tengan una probabilidad alta de lograr cumplir con los requerimientos del cliente, desarrollar soluciones alternativas de diseño, construir conocimiento/proceso/aplicación y predecir el comportamiento del diseño, son los principales objetivos de esta etapa.
- **Optimización:** El objetivo de esta etapa es encontrar las variables que afecten al diseño para plantear la mejor combinación de ellas, teniendo del mejor desempeño al menor costo.
- **Validación:** En esta etapa se pretende probar el mejor diseño obtenido en las etapas anteriores con el objetivo de aprobar el diseño final o de encontrar modos de falla y corregirlos.

El uso de esta metodología no ha sido muy explotada hasta el momento en nuestra empresa, por lo tanto a través de este proyecto se busca impulsarla dentro de las áreas de ingeniería.

### 3.2.2 Aplicación de la tecnología avanzada en la metodología de diseño.

Recordando que el NPI es una guía para la introducción de un nuevo producto al mercado y que dentro de sus etapas de revisión contempla el diseño de un producto, establecemos que la metodología de DFSS formara parte como una herramienta para cumplir con el proceso de desarrollo de un nuevo producto que establece el NPI y tener mayores probabilidades de éxito [36].

La figura 3.11 muestra como el uso de la metodología de DFSS es mas oportuna en etapas tempranas del proyecto, debido a que se generan mayores opciones de diseño y se minimizan las probabilidades de falla. Además, se tiene mejor oportunidad para llegar al diseño óptimo del producto que sería el mejor desempeño al mínimo costo de material, mano de obra y transportación

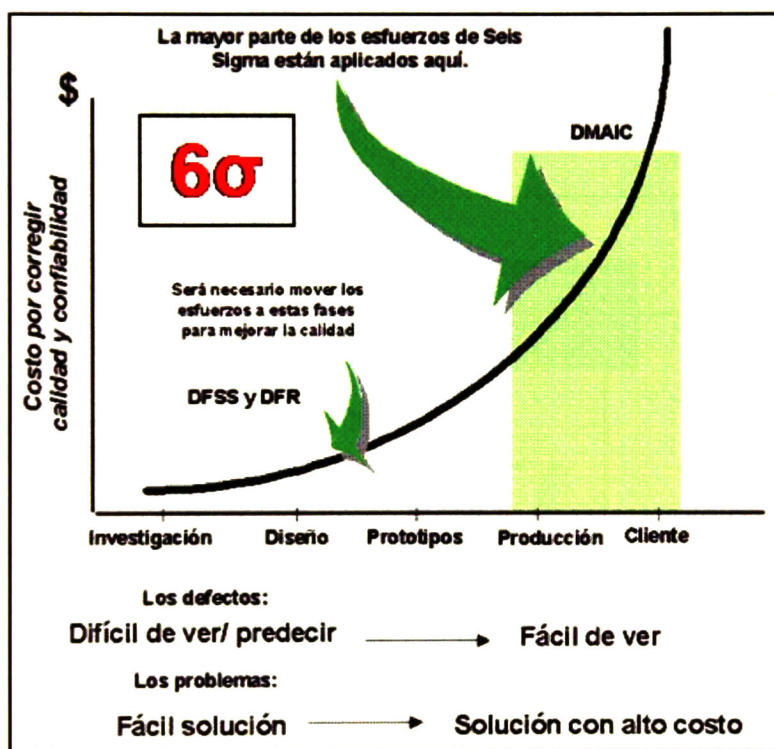


Figura 3.11. Aplicación de la metodología DFSS

Basados en la visión de DFSS decidimos integrar técnicas numéricas y experimentales dentro de las etapas de desarrollo. Estas técnicas serán utilizadas para la evaluación del desempeño del producto. Numéricamente será usado el método de elemento finito a través del software comercial ANSYS y experimentalmente será usada la extensometría eléctrica que a través de un sistema de adquisición de datos, se entregan resultados en tiempo real.

Ambas técnicas son necesarias y complementarias. Mientras que un análisis estático por elemento finito entrega como respuesta un estado de esfuerzos en diferentes posiciones de un componente o ensamble, este representa solo un instante en el tiempo en tanto una fuerza es aplicada. Por otro lado, el análisis experimental de esfuerzos entrega resultados solo en posiciones donde fue colocado el extensómetro; sin embargo, estos resultados pueden variar de acuerdo a la variación de las fuerzas aplicadas.

Una correlación entre resultados numéricos y experimentales es necesaria, que de acuerdo a criterios establecidos el tener un coeficiente de correlación mayor a 0.8 el modelo numérico tendrá la cualidad de ser predictivo. En otro orden de ideas podrán ser evaluados cambios al diseño (geométricos y de materiales) con resultados altamente confiables, sin la necesidad de fabricar prototipos para confirmar resultados.

Apoyados en la teoría y recordado lo descrito por Diter, Asimov y Ashby se desarrolla la siguiente propuesta de diseño basada en fortalecer la etapa de diseño a través de análisis mas completos y con mejores herramientas. La figura 3.12 muestra el nuevo esquema de análisis en la etapa de diseño dentro del desarrollo de un nuevo producto apoyados por la metodología DFSS.

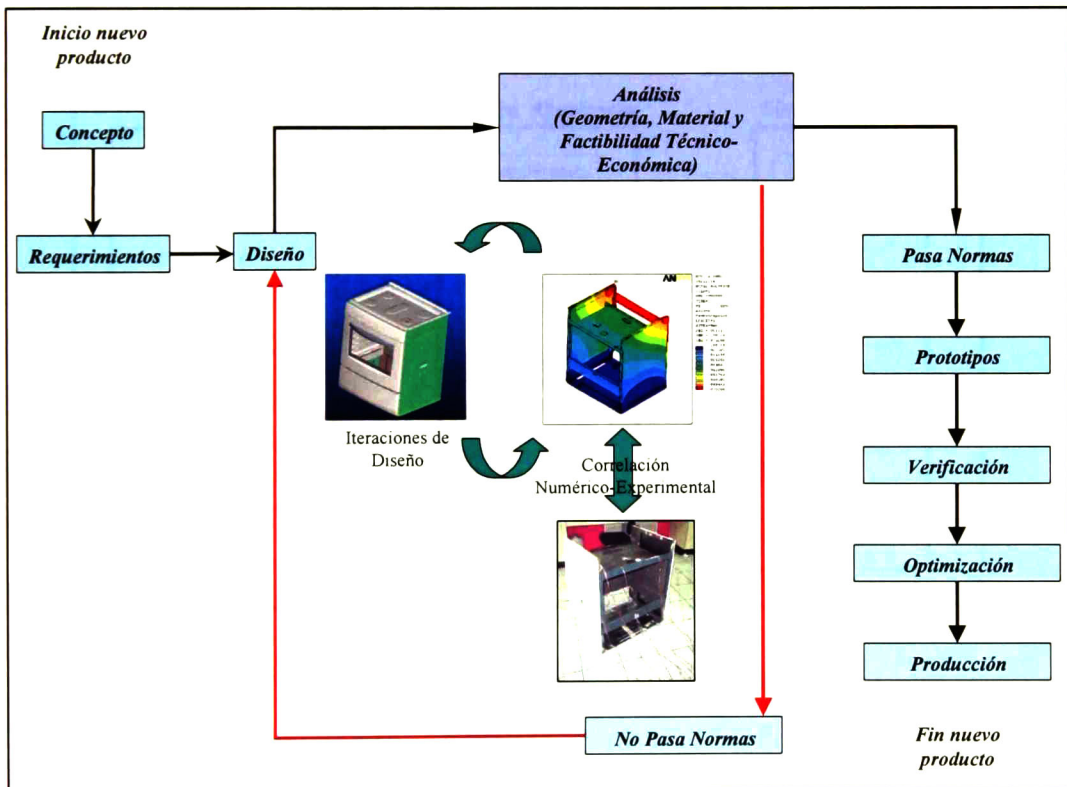


Figura 3.12. Metodología de diseño propuesta.

### 3.3 Identificación “Requerimientos de desempeño mecánico”.

#### 3.3.1 Descripción del problema.

Uno de los principales problemas que involucra el lanzamiento de un nuevo producto que tiene como objetivo una inversión mínima en su desarrollo, es asegurar desempeño de todos los subsistemas que integran el producto, de tal manera que satisfaga los requerimientos del negocio y del cliente. La situación particular de estudio donde se buscará contribuir al objetivo planeado será el comportamiento mecánico estructural de los subsistemas chasis y cavidad de horno que conforman la Estufa (Figura 3.13).

Objetivo general: Desarrollar una nueva plataforma de piso, para el producto manufacturado en San Luis Potosí, que nos permita recuperar el liderazgo de mercado de 30” en Latinoamérica. Actualmente nuestro costo de materiales es de \$71 usd en nuestro modelo mas económico de la Planta de San Luis Potosí. El objetivo es llegar a un costo de \$47 usd de costo de materiales por lo que se debe pensar en un diseño sencillo y económico con el menor numero de piezas posibles.

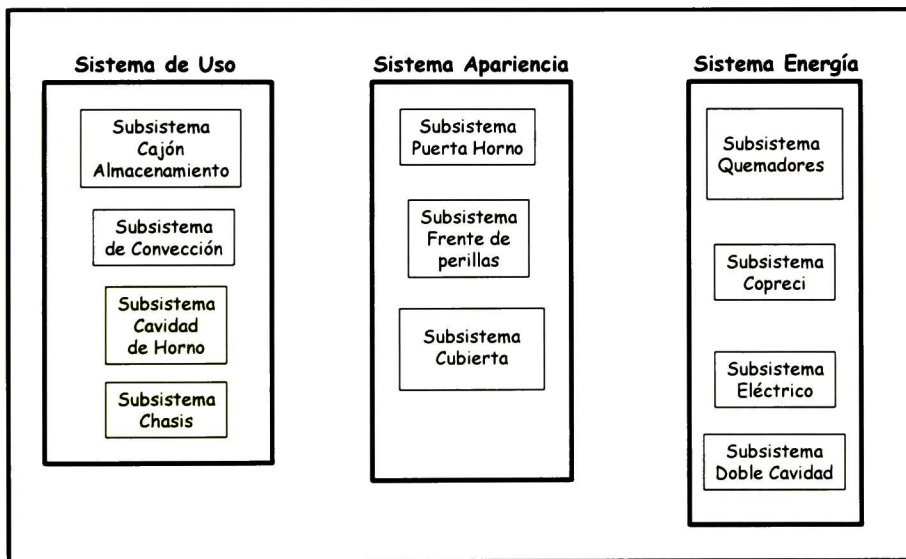
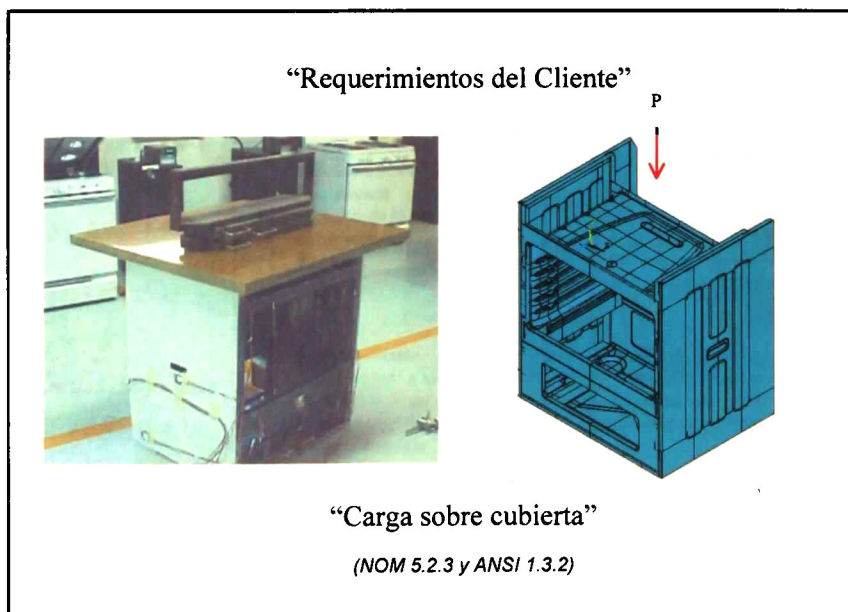
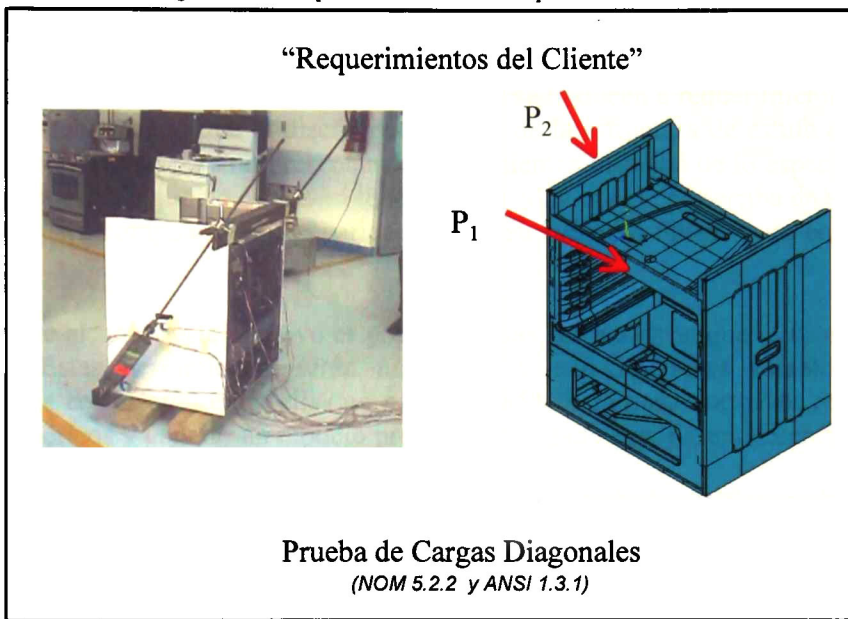


Figura 3.13. Diagrama general de la estufa

### 3.3.2 Definición del problema.

Desarrollar un nuevo diseño del Subsistema Chasis y Cavity de horno que cumpla con requerimientos de desempeño estructural marcados por normas nacionales e internacionales (figura 3.14), incluyendo la posible reducción de espesores de los diferentes componentes que lo forman.

Figura 3.14. Requerimientos de desempeño estructural.



### 3.3.3 Desarrollo del proceso de DFSS.

La figura 3.15 muestra el desarrollo del proceso de DFSS donde se inicia con las necesidades del cliente, el cual requiere del diseño de una estructura lo suficientemente rígida para acreditar las normas nacionales e internacionales estructurales a las cuales será sujeta. Posteriormente, se cuantifican los requerimientos del cliente teniendo como resultado un desplazamiento menor a 0.02 y 0.12 pulgadas de desplazamiento en el momento de la aplicación de la carga y la no presencia de algún componente deformado plásticamente.

Una vez establecidos los requerimientos del cliente se traducen a requerimientos técnicos de diseño, estableciendo que el diseño geométrico de la estructura de estufa debe ser lo suficientemente rígido para no presentar desplazamientos mas allá de lo especificado por el cliente, además de que no se deberá tener ningún componente por arriba de su esfuerzo de fluencia para componentes de apariencia y de su esfuerzo último para componentes internos.

La manera de alcanzar este objetivo es planteando las herramientas que se usaran para su desarrollo. Estas herramientas serán numéricas y experimentales estableciendo un porcentaje de correlación entre ellas no menor al 85% para posteriormente realizar solo análisis numéricos y generar un modelo predictivo validado experimentalmente.

El análisis de los resultados se realizará bajo la teoría de falla estática de Von Mises, debido a que el material de la estructura es dúctil (Acero) y que además la forma de aplicación de carga es de manera estática.

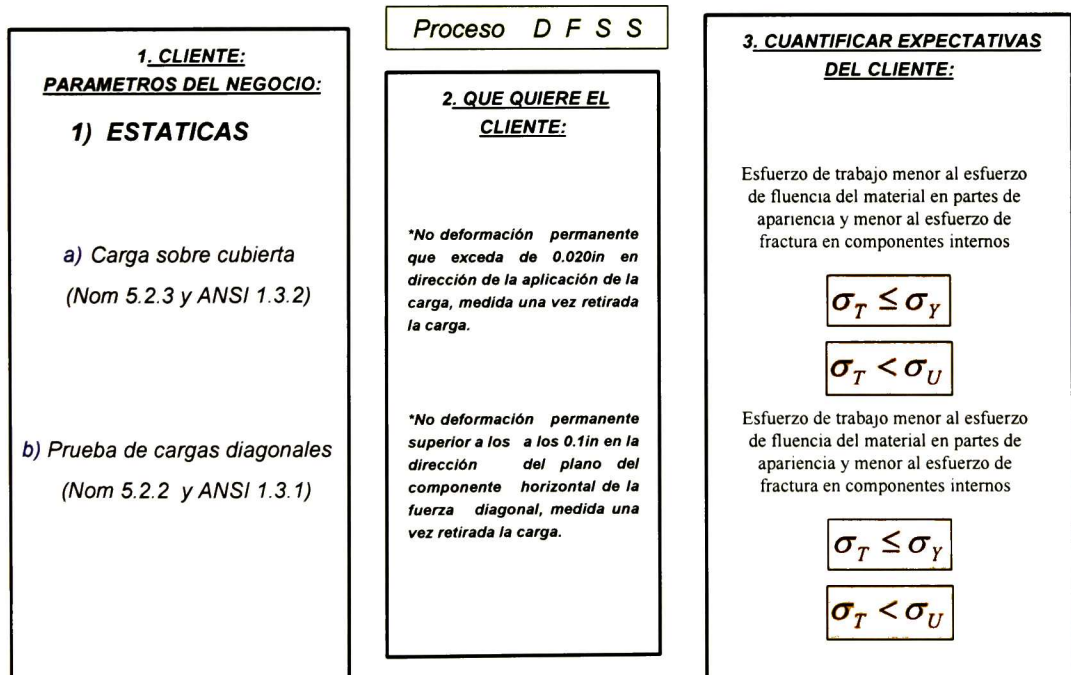


Figura 3.15. Proceso de diseño DFSS.



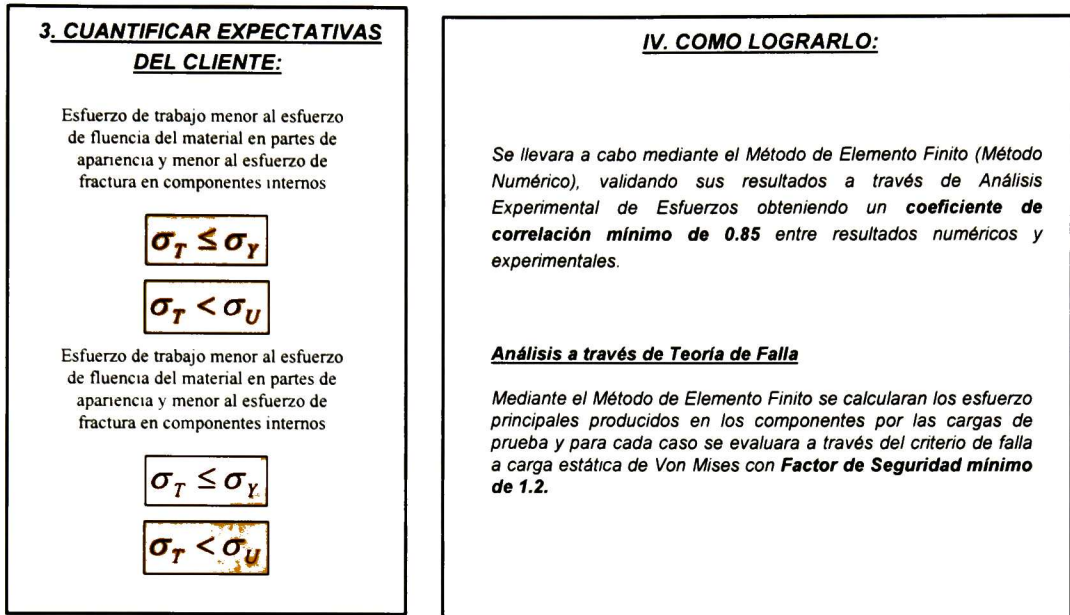


Figura 3.15. Proceso de diseño DFSS (continuación)

### 3.3.4 Causas potenciales de falla (X's).

Dentro de la metodología de DFSS se encuentra una sección donde se debe realizar una revisión de las causas potenciales de falla basándose en una lluvia de ideas, información de quejas actuales del consumidor, experiencia del diseñador e información histórica del laboratorio de evaluación. Mientras mas completo se tenga este análisis se minimizará el riesgo de fallas potenciales no esperadas y que de un momento comprometan el desarrollo del proyecto, o peor aun, la insatisfacción del cliente.

En la figura 3.16 se muestra el análisis de falla mediante el uso de un diagrama de pescado. Este diagrama contempla cinco grandes grupos donde se pueden generar fallas potenciales, estos grupos son:

- 1.- Diseño: El modelado del componente puede no tener una buena representación de la realidad generando un diseño burdo y por consecuencia la generación de errores como perdida de rigidez, malos resultados en los análisis de ingeniería y problemas de ensamble una vez manufacturado el modelo.
- 2.- Material: La selección del material adecuado y el control de calidad del mismo son partes esenciales para cumplir con un buen desempeño del componente o ensamble. La responsabilidad del diseño es seleccionar el material mas adecuado dependiendo de las pruebas, del ambiente al cual será sometido y las condiciones de uso del componente. Para esta aplicación en especial se seleccionaron los materiales mostrados en la figura

3.16, su selección fue basándose en consideraciones de resistencia, manufactura, disponibilidad y costos.

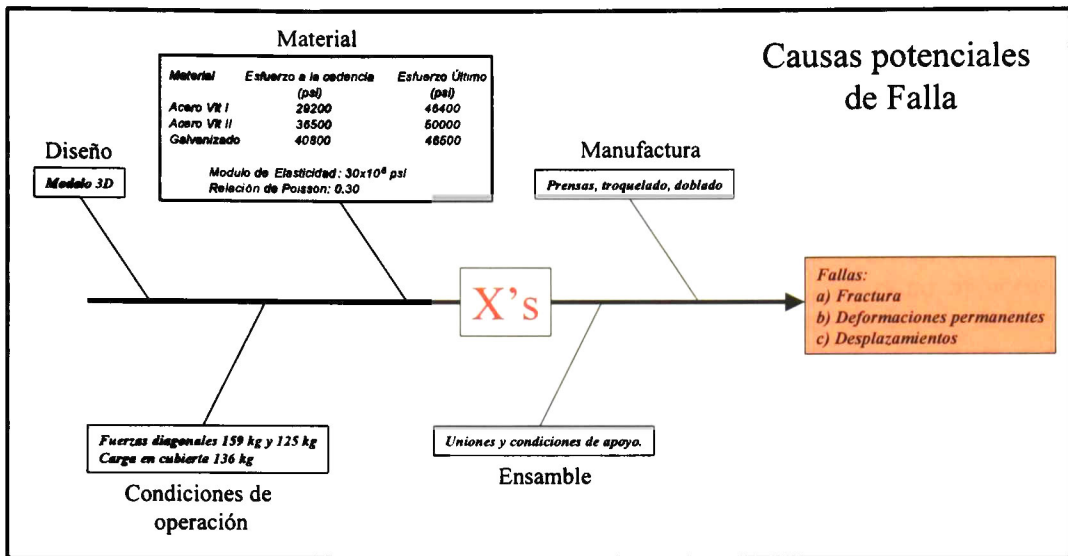


Figura 3.16. Diagrama de fallas potenciales para el análisis estructural de la estufa.

3.- **Manufactura:** Esta posible área de causas potenciales de falla podría ser debido a los procesos de fabricación a los que se somete el material generando en el desgarros o fracturas microscópicas que resulten en una fractura microscópica durante los mismos procesos de fabricación o en el producto final, o peor aun, durante el uso del producto. Esta situación nos obliga a seleccionar un material con alto grado de ductibilidad de tal manera que adapte totalmente la geometría especificada por diseño y que además tenga un buen desempeño. Esta etapa fue apoyada por expertos en manufactura.

4.- **Condiciones de operación:** Tener la visión para conocer y entender las condiciones de operación a las cuales estará sometido el componente o estructura es algo muy importante debido a que estas serán los parámetros de entrada del diseño y que por consecuencia debe soportar. En el caso actual de análisis, las condiciones de operación se muestran en la figura 3.16 y fueron establecidos por el laboratorio de evaluación de estufas.

5.- **Ensamble:** Esta área contempla las posibles fallas debidas al mal ensamble de las piezas, a la interacción de las componentes que forman el ensamble y las zonas de apoyo o contacto que realizan los componentes entre ellas, realizando un efecto negativo o positivo para la estructura. Esta etapa es realizada por ingenieros de diseño que efectúan análisis de tolerancias y selección de uniones.

### 3.3.5 Definición de “Y”.

La definición de Y es un proceso muy importante y de mucha ayuda debido a que dentro de este proceso se establece “que” se va a medir, “que” se va a monitorear y “que” se va a reportar. La figura 3.17 muestra el proceso que se utilizó para definir los “que’s” mencionados anteriormente. Las variables que tendremos dentro de nuestro análisis son las X’s mostradas la figura, que impactan directamente en las consideraciones que se tomarán para definir los análisis experimentales y numéricos.

Las normas que establecen las pruebas a considerar ponen como criterios de aceptación no tener componentes deformados permanentemente y desplazamientos no mayores a 0.20 in y 0.020 in. Estas especificaciones se traducen a no tener niveles de esfuerzo mayores a los límites marcados por el esfuerzo de fluencia y esfuerzo de ruptura, y no tener desplazamientos mayores a esos límites establecidos a través de una buena rigidez del diseño.

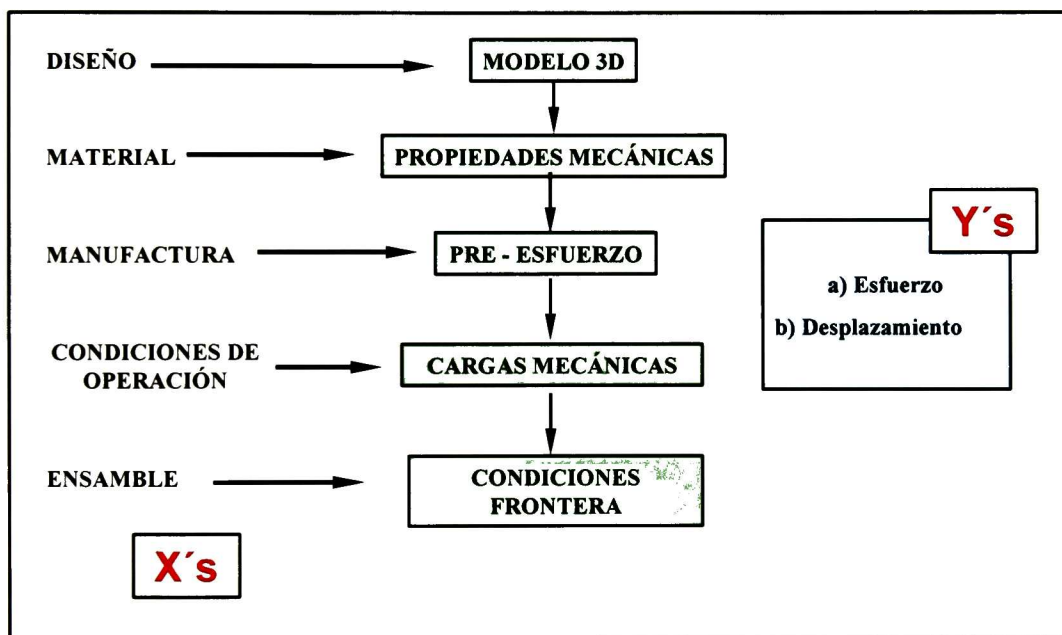


Figura 3.17. Diagrama de definición de “Y’s”.

### 3.4 Medición “Línea Base y Validación del Modelo FEA a través del Análisis Experimental”.

La etapa de medición consiste en establecer un porcentaje de correlación no menor al 85% entre el modelo numérico y el prototipo experimental con el objetivo de tener un grado de confianza aceptable. Además, se llama línea base al resultado del primer análisis de la primer propuesta de diseño, el cual también se analizará en esta etapa.

Como primer paso se determinará la correlación de valores de esfuerzo entre el modelo numérico y el prototipo experimental (figura 3.18). Esta correlación se hará a una carga menor a la demanda por la norma debido a que si se le aplica el total de la carga puede deformarse el prototipo físico y no ser útil para el resto de las pruebas. Es necesario mencionar que el modelo numérico será analizado bajo las consideraciones que se determinen en el análisis experimental. Recordemos que existen tres pruebas a correlacionar, las cuales son: carga en cubierta y fuerzas diagonales. Los resultados que se buscan obtener se presentan en la figura 3.19, la cual presenta niveles de esfuerzo a través del tiempo debidos a la aplicación gradual establecida por norma de la carga.



Figura 3.18. Subsistemas y componentes de Prototipo Experimental y Modelo Numérico.

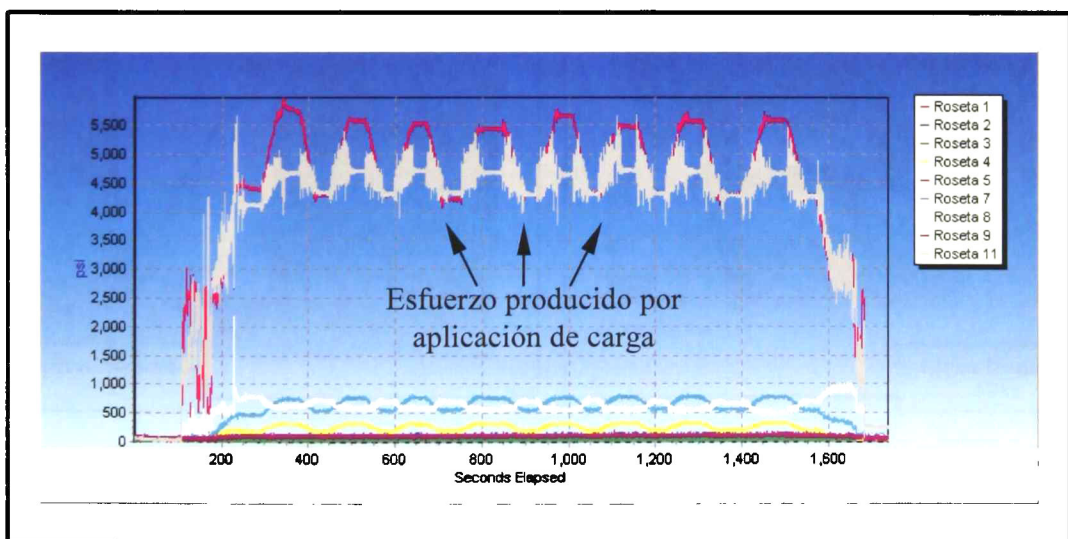


Figura 3.19. Resultados esperados en la etapa de medición experimental.

### 3.4.1 Análisis experimental de esfuerzos bajo pruebas estructurales.

De acuerdo a norma (NOM 5.2.2, 5.2.3 y ANSI 1.3.1), se debe aplicar una carga de 159 kg y 125 kg en dirección diagonal de la estructura, pero como solo contamos con un prototipo instrumentado y además no se tiene el total de los componentes, la aplicación de la carga será de 60 kg y 50 kg respectivamente (figura 3.20), con el objetivo de no dañar permanentemente a ningún componente y poderlo utilizar en pruebas posteriores. Este criterio también aplica para la prueba de carga en cubierta, la cual demanda una carga de 136 kg y solamente se utilizarán 85 kg.

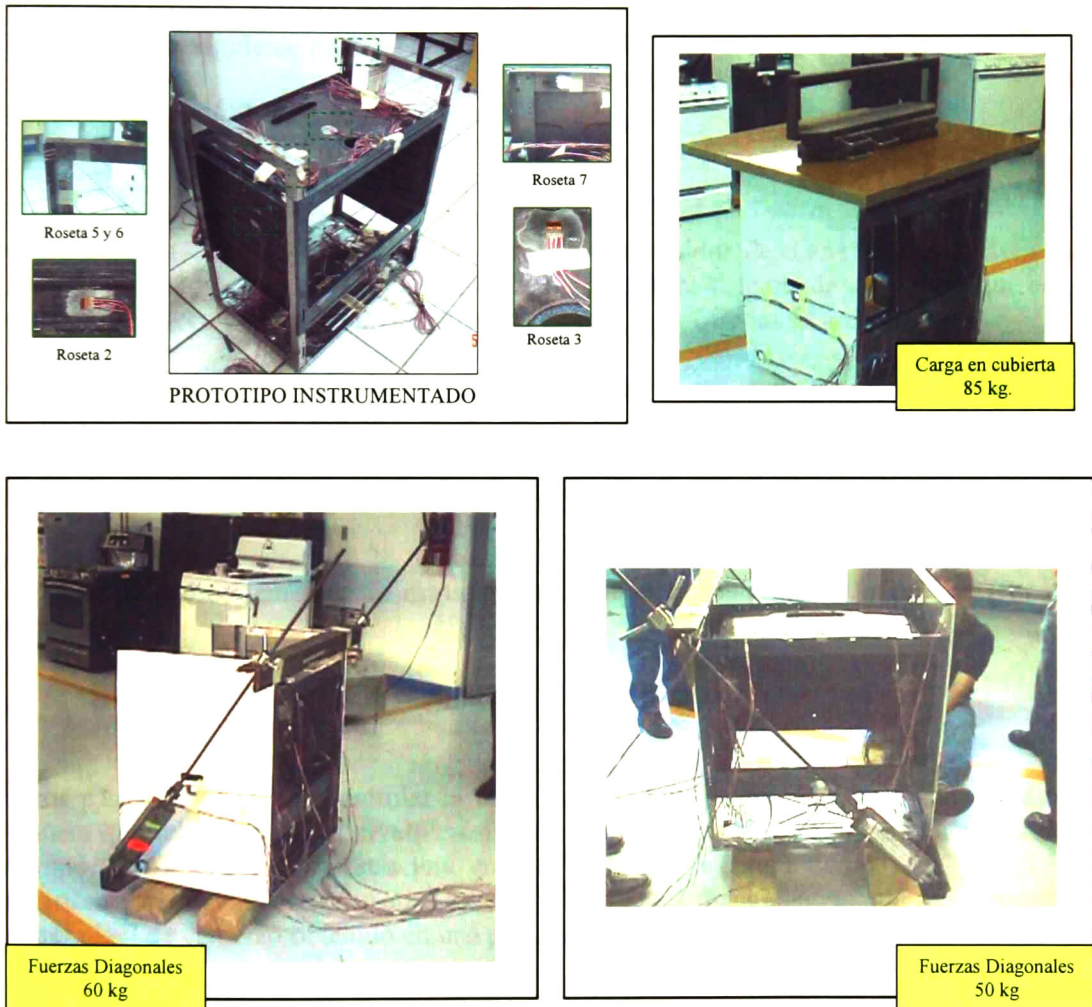


Figura 3.20. Prototipo instrumentado y bajo condiciones de pruebas estructurales.

### 3.4.1.1 Procedimiento de medición.

Junto con el análisis experimental también se establece un procedimiento para la aplicación de carga y obtener la información deseada, por lo tanto se establecen una serie de pasos para desarrollar el análisis y la obtención de la información.

a) Cada uno de los componentes fue instrumentado por separado, y posteriormente se procedió al ensamble de todos.

b) Debido a que fueron un total de 15 rosetas y, además que el sistema de adquisición de datos solo tiene capacidad para 9 rosetas, las rosetas fueron divididas en 2 grupos, quedando de la siguiente manera:

Grupo 1: Roseta 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9 y 11.

Grupo 2: Roseta 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14 y 15

c) Se conectó el Grupo 1 de rosetas al sistema adquisidor de datos y la estructura se colocó sobre la maderas para posteriormente programar el sistema, de tal manera que este estado fuera la condición cero para cada una de la rosetas ( inicio de medición ).

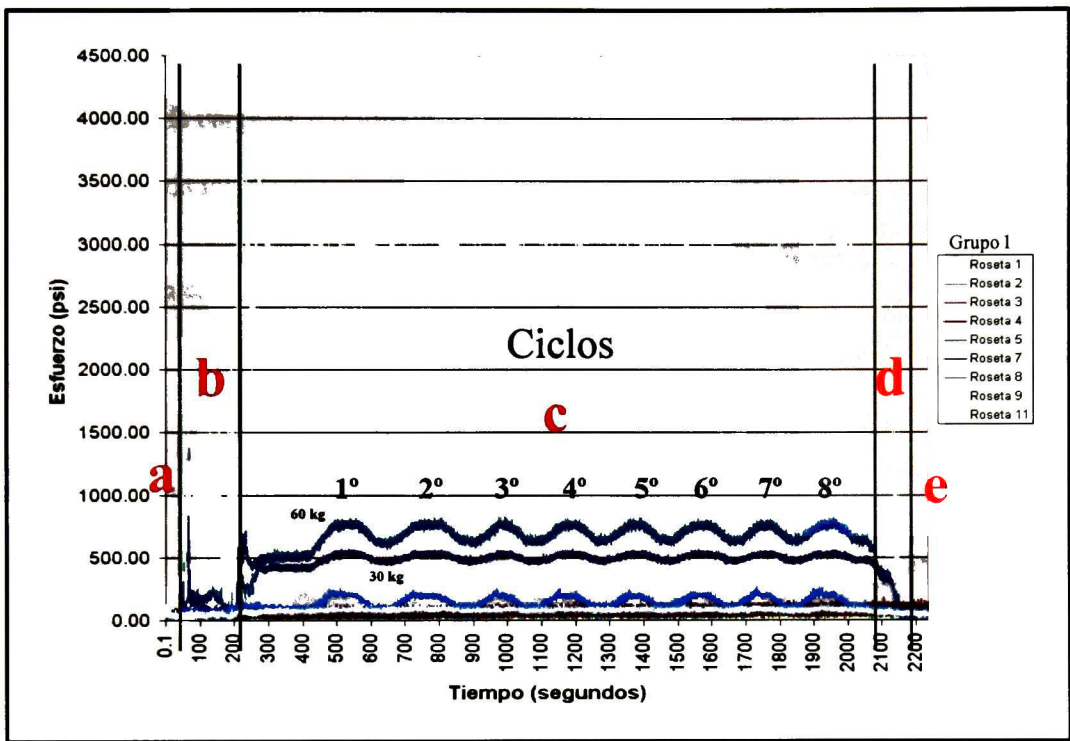
d) Posteriormente se colocaron los ángulos de acero, así como el tensor de carga y medición para fuerzas diagonales.

e) Se procedió a aplicar la carga de manera gradual y conforme a norma.

f) Una vez que se concluyó la aplicación de la carga, se quitaron los tensores y los ángulos de acero, teniendo la estructura igual que cuando inicio la prueba (fin de medición).

g) Se repite el paso c, d y e para el segundo grupo de rosetas.

Estos pasos nos permiten controlar la información obtenida de los extensómetros de tal manera que relacionemos el nivel de esfuerzos con la aplicación de la carga a través del tiempo. La figura 3.21 muestra una gráfica de esfuerzo contra tiempo, en la cual se registran varias etapas relacionadas con los pasos antes mencionados que nos permiten ver el nivel de esfuerzo obtenido en una paso específico.



- a - Inicio de Medición.
- b - Colocar ángulos y tensores de aplicación de carga.
- c - Aplicación de carga de 30 kg - 60 kg - 30 kg.
- d - Quitar ángulos y tensores de aplicación de carga.
- e - Fin de Medición.

Figura 3.21. Gráfico de medición de esfuerzos durante la aplicación de carga.

### 3.4.1.2 Criterios de medición.

Fue necesario establecer un criterio para realizar la medición de una manera metódica, con el objetivo de tener datos reales y sobre todo útiles. Los pasos que generan el criterio de medición son:

- a) La velocidad de adquisición de datos fue de 50 datos por segundo, debido a que la aplicación de la carga es en forma lenta y gradual.
- b) Las propiedades mecánicas del material utilizadas fueron alimentadas al software con el que se realizó la medición (System 5000, Measurements Group). Se utilizaron el módulo elástico y la relación de Poisson del material, los cuales fueron  $30 \times 10^6$  psi y 0.30, respectivamente.
- c) La medición abarca la colocación del sistema de carga, la aplicación de la carga y finalmente el proceso de quitar el sistema de carga del prototipo.
- d) La aplicación de la carga fue en 8 ciclos, los cuales van de 30 kg a 60 kg a 30 kg, con el fin de tener repeticiones de la medición.
- e) Los ciclos se establecieron porque se busca la estabilización del ensamble, debido a que es prototipo.
- f) El tiempo de aplicación de carga de 60 kg y 30 kg fue de 15 segundos.

### 3.4.1.3 Obtención de datos.

Debido a la naturaleza de la prueba y al sistema de medición se elaboró un plan de tal manera que se tengan los datos que se están buscando para validar el análisis numérico (figura 3.22). Los siguientes puntos fueron considerados para la obtención de los datos de interés:

- 1.- Se seleccionaron los 4 últimos ciclos, debido a que se permitió la estabilización del ensamble.
- 2.- Se tomaron 15 datos de cada ciclo, teniendo un total de 60 datos por roseta y por prueba.
- 3.- Los datos se seleccionaron durante la aplicación de la carga de acuerdo al tipo de prueba.



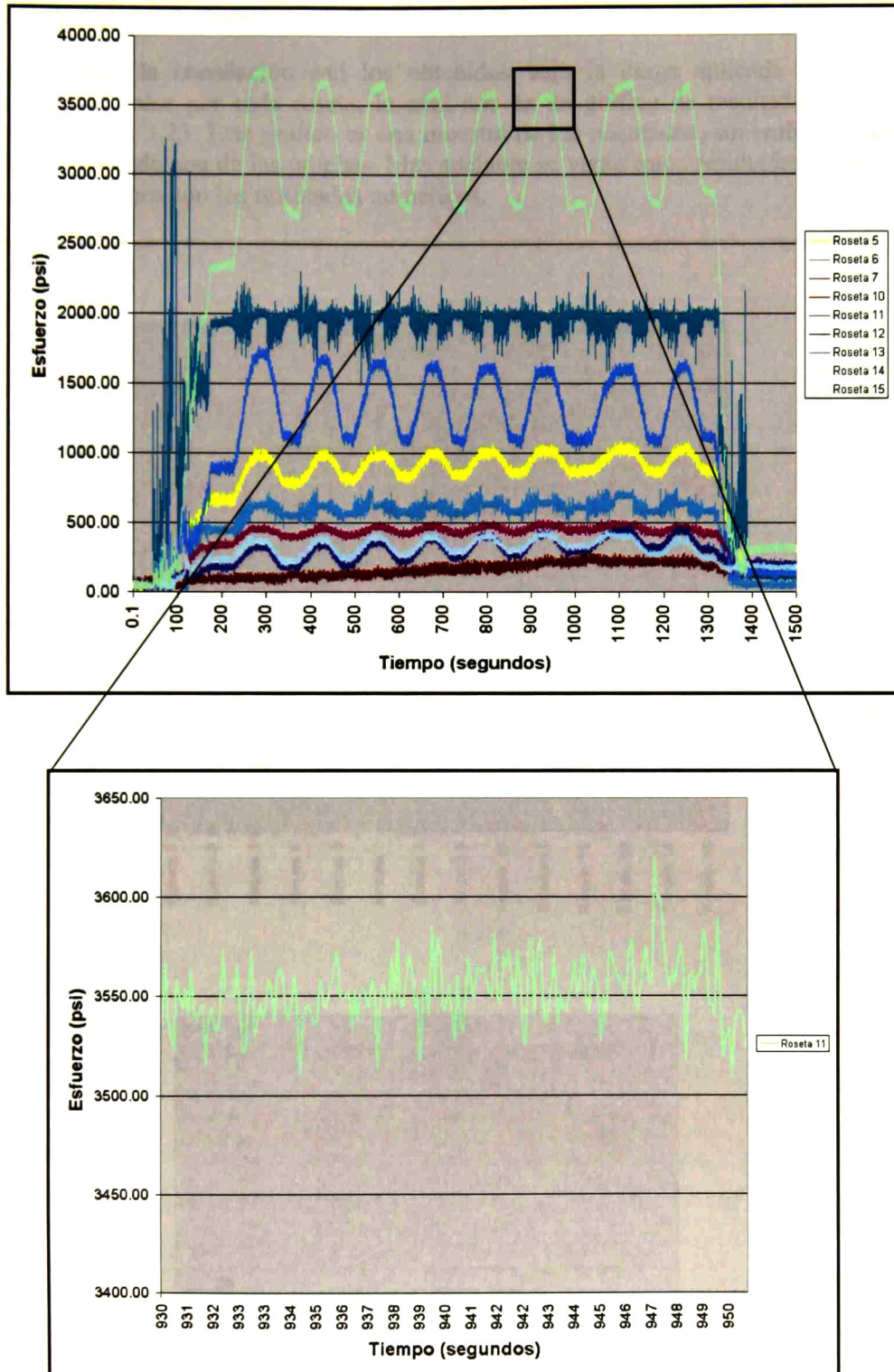
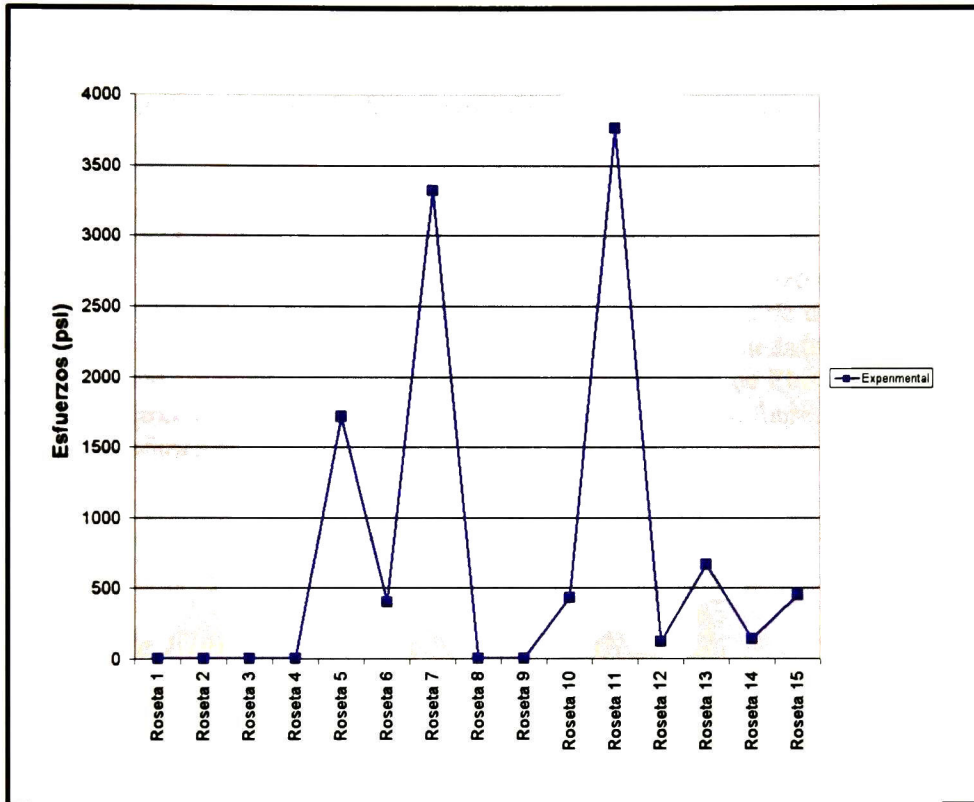


Figura 3.22. Selección de datos para uso en correlación.

### 3.4.1.4 Resultados experimentales obtenidos.

Los datos para la correlación son los obtenidos bajo la carga aplicada de interés, obteniendo un valor por cada roseta, lo cual nos da un gráfico de resultados como la muestra la figura 3.23. Este grafico es una muestra de los resultados, sin embargo existe un gráfico por cada una de las pruebas. Mas adelante se verán estos resultados reflejados en las correlaciones con los resultados numéricos.



Roseta 1	0 psi	Lateral de horno derecho
Roseta 2	0 psi	Lateral de horno izquierdo
Roseta 3	0 psi	Techo de horno
Roseta 4	0 psi	Respaldo de horno
Roseta 5	1720 psi	Marco estructural izquierdo
Roseta 6	398 psi	Marco estructural izquierdo
Roseta 7	3317 psi	Marco estructural derecho
Roseta 8	0 psi	Respaldo de horno
Roseta 9	0 psi	Mascara frontal
Roseta 10	430 psi	Piso estufa
Roseta 11	3766 psi	Piso estufa
Roseta 12	121 psi	Lateral de estufa izquierdo
Roseta 13	667 psi	Lateral de estufa izquierdo
Roseta 14	142 psi	Lateral de estufa derecho
Roseta 15	449 psi	Lateral de estufa derecho

Figura 3.23. Gráfico de esfuerzos en componentes obtenidos por roseta de deformación.

### 3.4.2 Análisis a través del método del elemento finito bajo pruebas estructurales.

#### 3.4.2.1 Desarrollo de modelo de elemento finito, aplicación de cargas y condiciones de frontera.

Bajo los criterios establecidos en secciones anteriores se decidió utilizar un elemento SHELL 63 debido a que es el más adecuado para la realización de estos problemas, donde se tiene componentes de lámina y el elemento se ajusta perfectamente (figura 3.24). El tamaño de elemento utilizado se determinó con el criterio de buena descripción de la geometría de cada una de las partes, así como un porcentaje mínimo de 2% de elementos distorsionados.

Las condiciones de frontera y la aplicación de carga (figura 3.25) se realizó mediante análisis visual del equipo de apoyo técnico basado en los análisis experimentales y soportado por la experiencia en estos tipos de análisis, esto se realizó para cada tipo de carga. Lo simple de la aplicación de la carga nos dio la confianza de determinar de esta manera las condiciones de frontera y su aplicación. Las propiedades mecánicas del material utilizado en el análisis fueron del Acero con un Módulo de Elasticidad de  $30 \times 10^6$  psi y una Relación de Poisson de 0.29. Estas propiedades también fueron consideradas en el análisis experimental.;

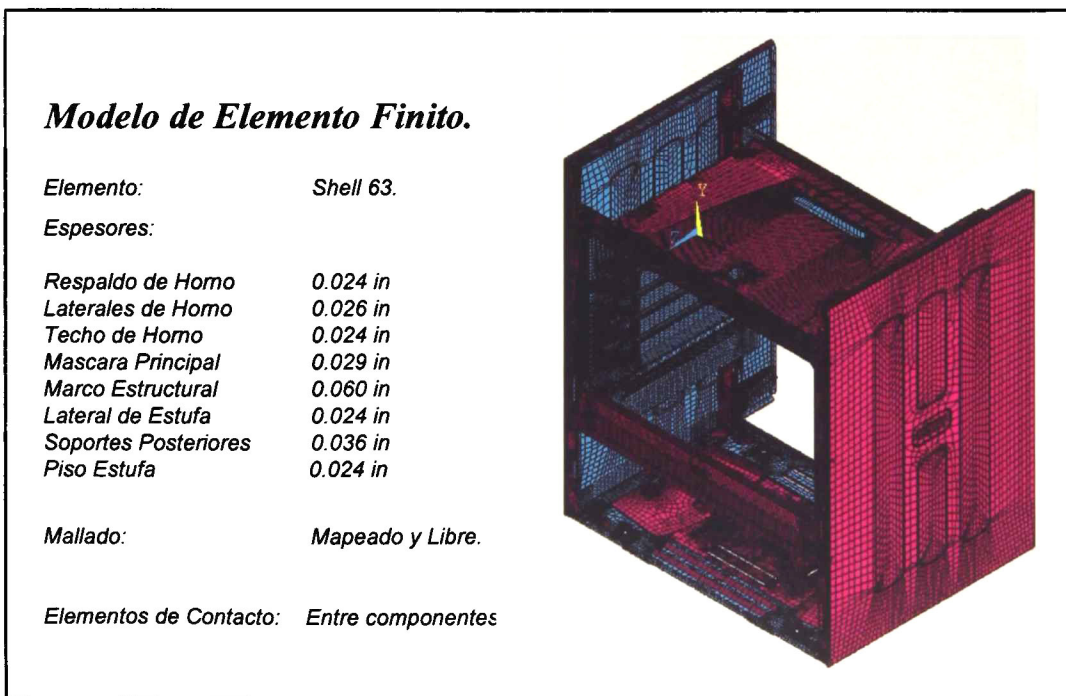


Figura 3.24. Modelo de Elementos Finitos.

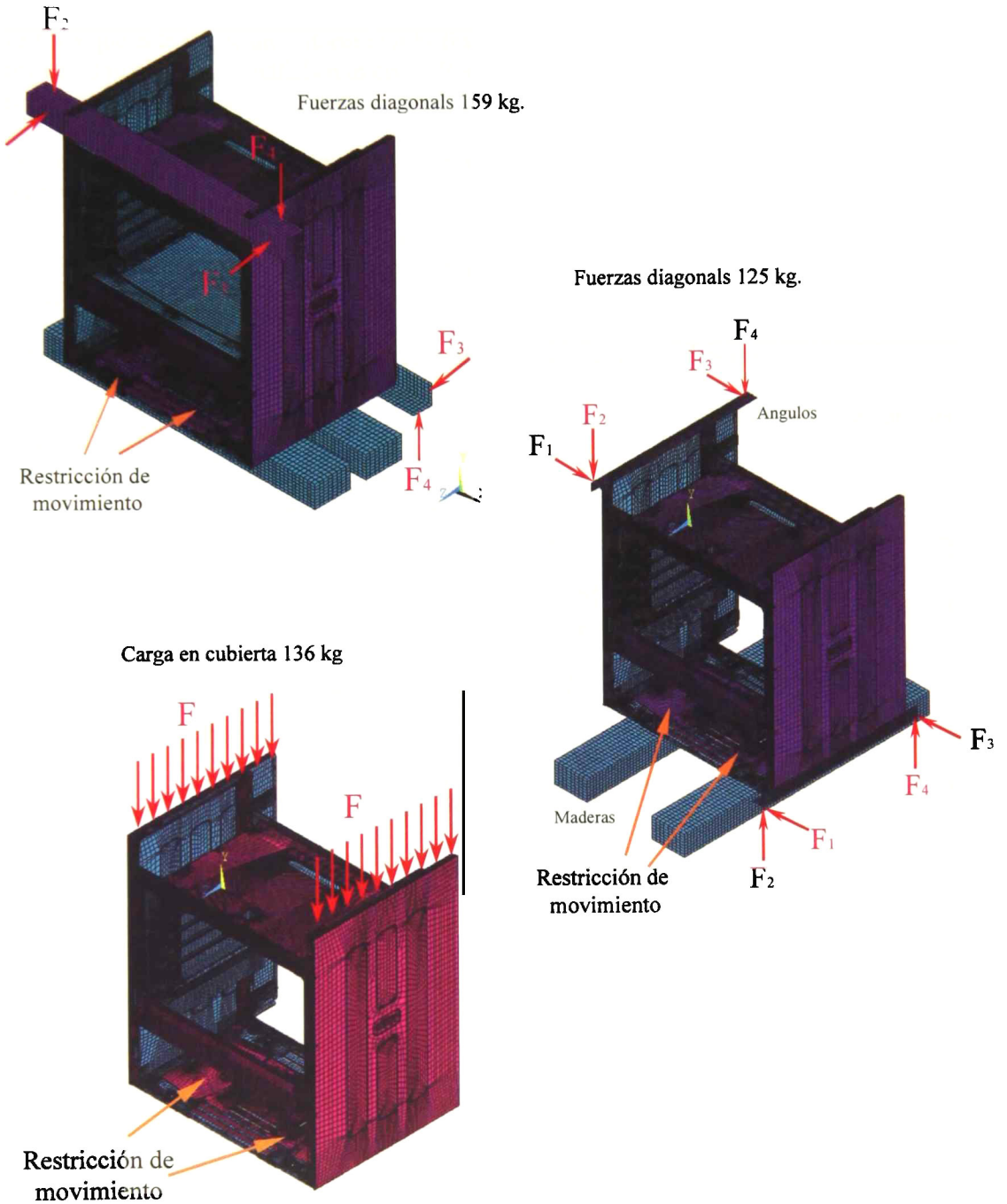


Figura 3.25. Aplicación de carga y condiciones de frontera en el modelo de elementos finitos.

### 3.4.2.2 Criterio de obtención de resultados.

Para la obtención de los resultados de las mediciones de esfuerzos en el modelo numérico se tuvo que establecer un criterio con la finalidad de medir siempre de la misma manera para cualquier tipo de análisis numérico. Por lo tanto se establecieron una serie de pasos a seguir.

\*Determinar la ubicación del extensómetro en el componente, tanto en el modelo numérico como en el prototipo.

\*Determinar el área que cubre el extensómetro en el componente instrumentado y en el modelo numérico.

\*Promediar los valores de los nodos que cubre el área del extensómetro.

\*El promedio será el valor a comparar con los valores obtenidos de la prueba experimental.

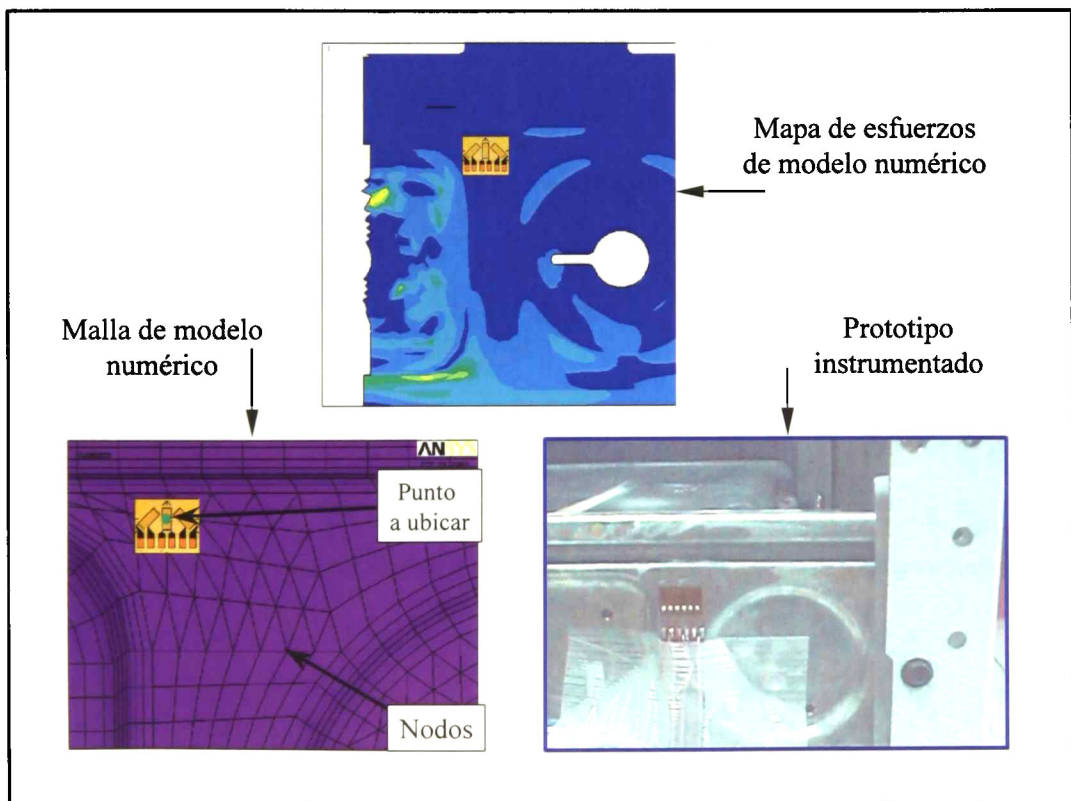


Figura 3.26. Criterio de obtención de resultados en modelo de elementos finitos.

### 3.4.2.4 Resultados numéricos obtenidos.

Una vez definido el criterio de medición se obtuvieron los valores por cada uno de los extensómetros utilizados (figura 3.27), teniendo un valor de esfuerzo por cada posición que ocupaba un extensómetro. Con estos valores se construyó una gráfica de tal manera que se visualizaran los valores de esfuerzo contra su respectiva roseta (figura 3.28).

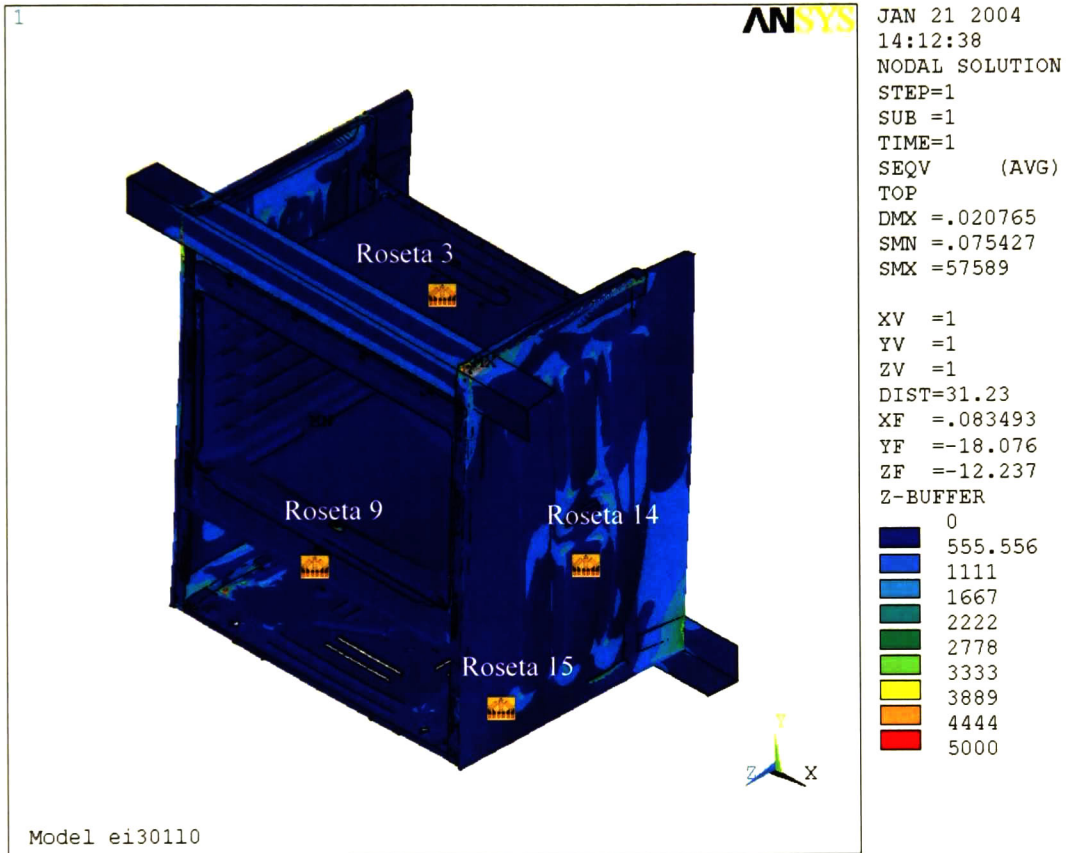


Figura 3.27. Puntos a medir que indican la ubicación de rosetas en el modelo de elementos finitos.

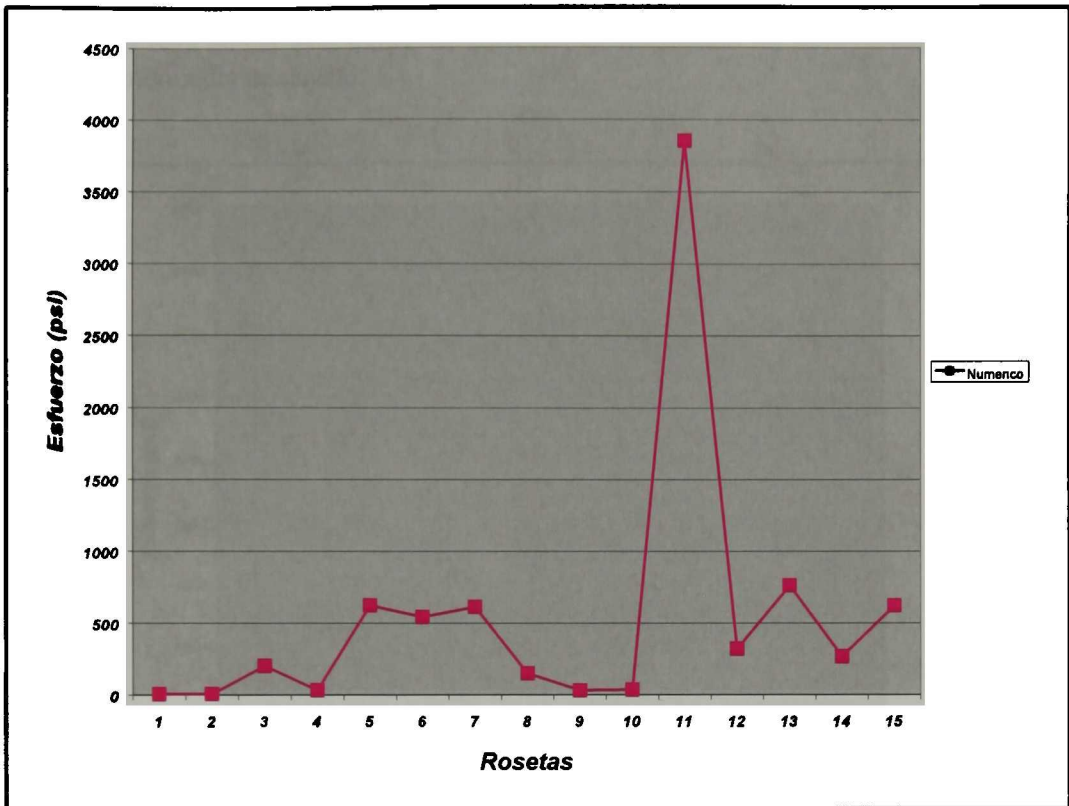


Figura 3.28. Resultados de esfuerzos del modelo de elementos finitos.

### 3.4.3 Correlación de resultados numéricos y experimentales.

Solo se presenta el resultado gráfico de una de las pruebas (carga en cubierta) debido a que esta información se considera confidencial y para efectos de presentación es suficiente mostrar solo una.

El análisis de la correlación se realiza en 2 partes,

#### a) Semejanza entre Curvas.

En esta sección se puede notar que la forma es muy parecida lo cual se traduce a que las cargas y las condiciones de frontera están siendo bien definidas y aplicadas, además, también refleja la buena interacción de los componentes tanto del prototipo como del modelo numérico (figura 3.29).

#### b) Magnitudes de Esfuerzo.

Los niveles de esfuerzos obtenido en el modelo numérico, especialmente en las rosetas 5 y 7, son muy bajos con respecto a los valores experimentales, lo cual se le atribuye a

problemas de ensamble debido a que es un prototipo. Sin embargo se continuará trabajando para elevar este índice de correlación, realizando un análisis experimental en la etapa intermedia de diseño.

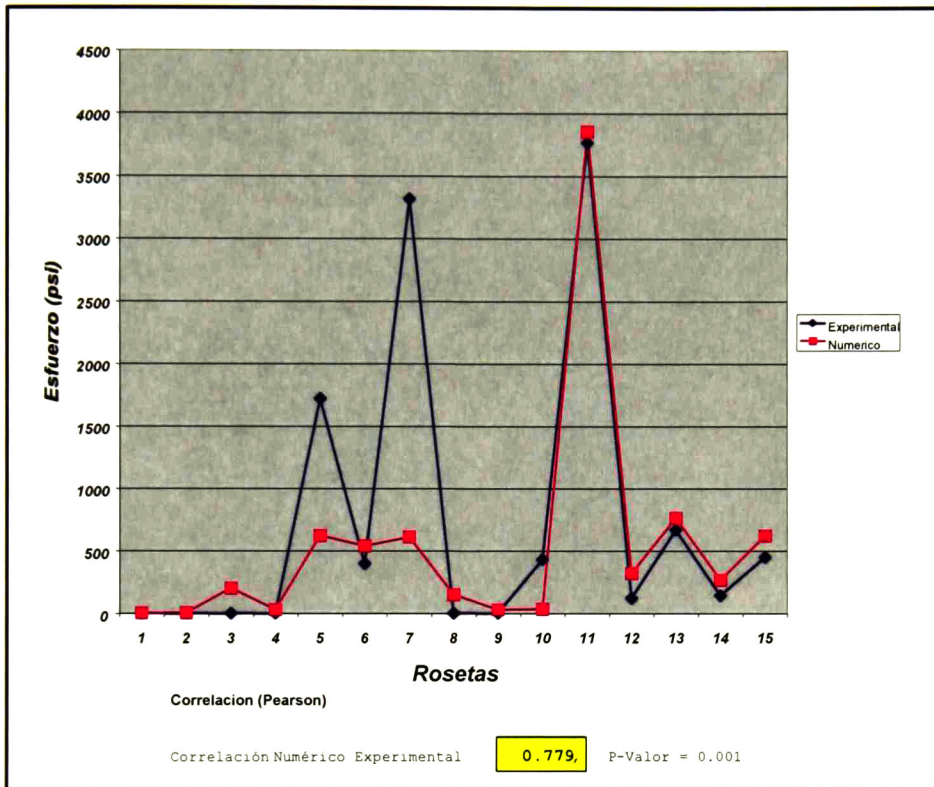


Figura 3.29. Gráfico de correlación de esfuerzos entre método numérico y método experimental. Los coeficientes de correlación obtenidos son bajos especialmente para la prueba de fuerzas diagonales 50 kg. Estas diferencias entre los resultados se atribuyen a que el modelo numérico es “ideal” y desgraciadamente el prototipo fue hecho con piezas realizadas manualmente, donde algunas si ensamblaban adecuadamente y otras no lo hacían además de que las geometrías no eran muy apegadas al diseño. Debido a decisiones de negocio y a los tiempos del proyecto se decidió seguir adelante con las evaluaciones de los primeros diseños apoyados con los análisis experimentales y numéricos, que no tienen la correlación esperada pero nos dan un gran nivel de confianza.

*Carga en cubierta 85 kg*

*Coficiente de correlación  
Numérico-Experimental 78%*

*Fuerzas Diagonales 60 kg*

*Coficiente de correlación  
Numérico-Experimental 81%*

*Fuerzas Diagonales 50 kg*

*Coficiente de correlación  
Numérico-Experimental 72%*



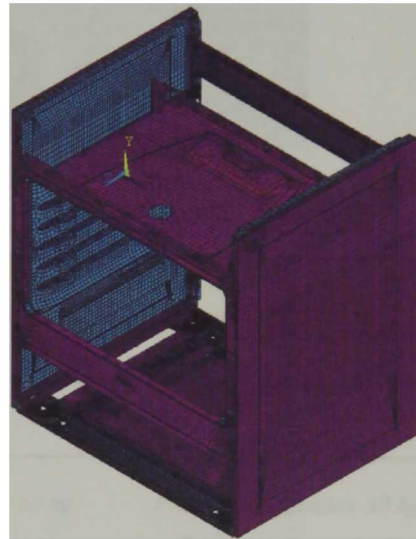
Se establece que es necesario realizar una segunda correlación en prototipo de diseño elaborado con mejores piezas y uniones, además sobre la marcha se realizarán mas análisis en las condiciones de frontera del modelo numérico ya que hasta esta etapa los tiempos no nos lo permitieron. Por lo que en esta etapa se compromete una segunda correlación para aumentar la confianza de nuestros diseños y soportar nuestras decisiones.

### Resultados de la segunda correlación.

Debido al compromiso de mejorar los primeros porcentajes de correlación de la primera propuesta y que además el diseño a sufrido cambios drásticos en sus componentes, se decidió realizar una segunda correlación con la cuarta propuesta de diseño (figura 3.30).



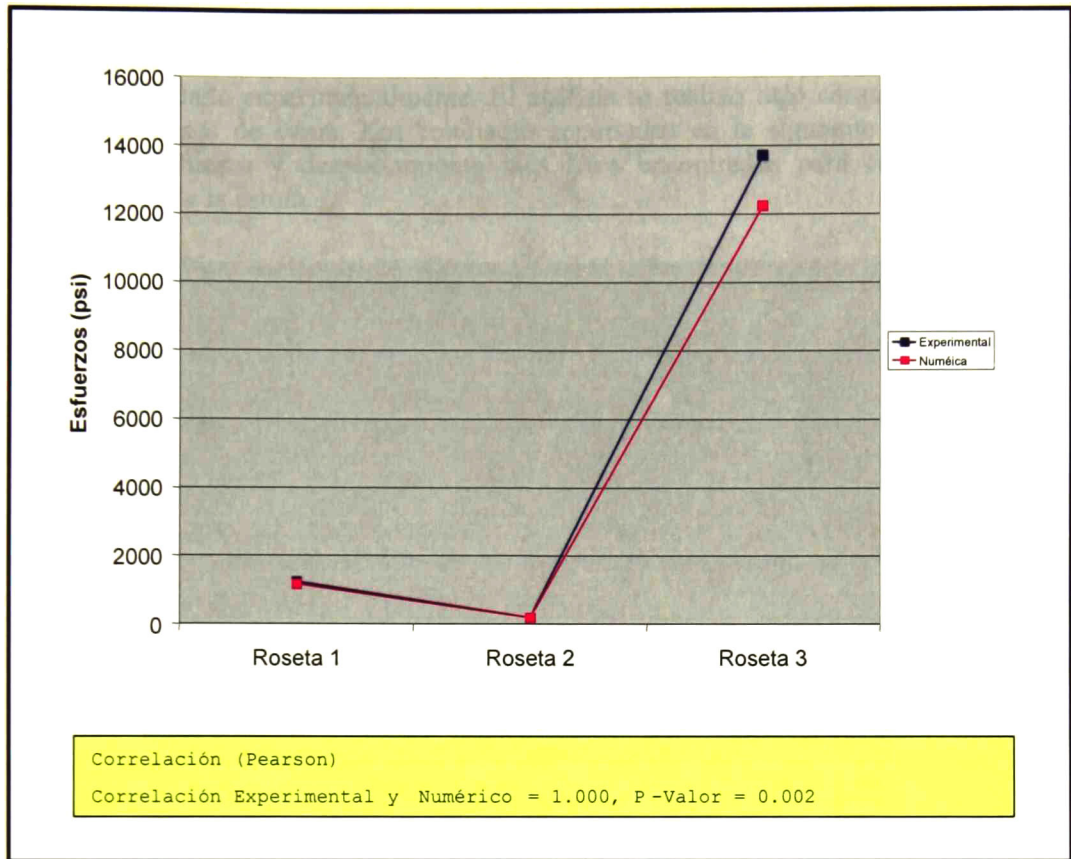
Prototipo Experimental  
(4a Propuesta de diseño)



Modelo Numérico de FEA  
(4a Propuesta de diseño)

Figura 3.30. Prototipo experimental y modelo de elementos finitos de la 4ta propuesta de diseño.

En esta segunda correlación solo se utilizaron 3 rosetas para el análisis experimental debido a que los componentes fueron fabricados con herramientas finales, pero no en producción, de tal manera que su geometría y acabado tenía mas calidad. Además, respecto al modelo de elementos finitos, se trabajo aun nivel mas fino en las condiciones de frontera realizando una minuciosa inspección de los contactos que estaban realizando los componentes entre si, tanto los que ensamblaban directamente como los que hacían interacción debido a la carga. De igual manera que se realizó en la primer correlación, solo se muestra un gráfico y los niveles de correlación correspondientes a cada prueba.



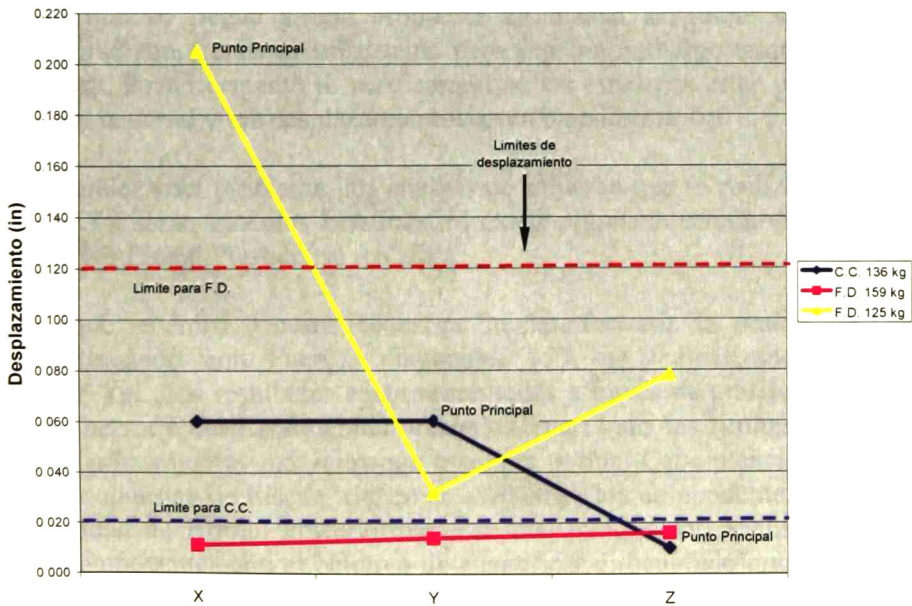
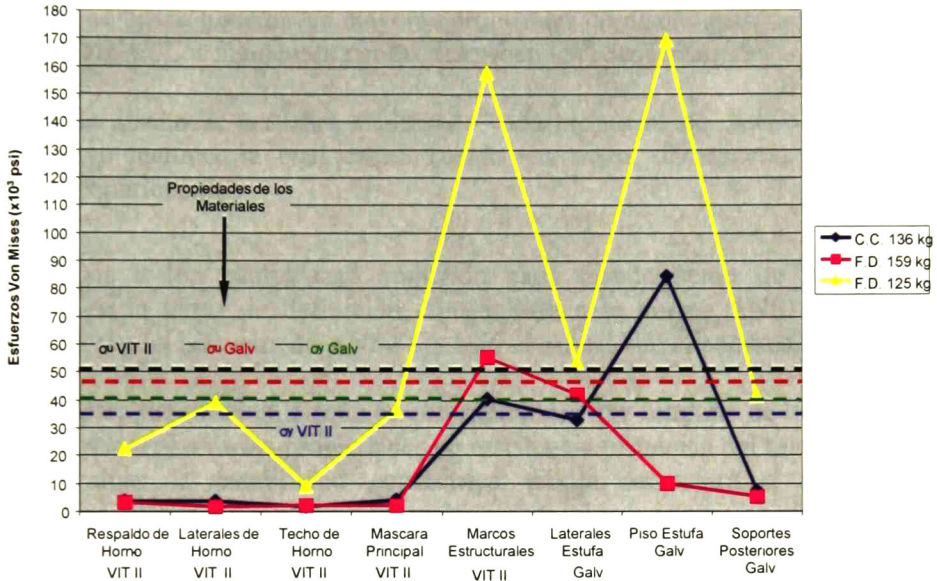
<i>Carga en cubierta 85 kg</i>	<i>Fuerzas Diagonales 60 kg</i>	<i>Fuerzas Diagonales 50 kg</i>
<i>Coefficiente de correlación Numérico-Experimental 99%</i>	<i>Coefficiente de correlación Numérico-Experimental 100%</i>	<i>Coefficiente de correlación Numérico-Experimental 89%</i>

Figura 3.31. Gráfico y valores de la 2da correlación de esfuerzos entre método numérico y método experimental.

El porcentaje mínimo aceptable para una buena correlación es del 85%, el cual esta por debajo de los obtenidos y el mas próximo a el es del 89%, por lo tanto podemos decir que el modelo numérico es muy confiable en los resultados obtenidos mediante su análisis (figura 3.31).

### 3.4.4 Línea base (resultados de la primera propuesta de diseño).

Este es el primer resultado de la primer propuesta de diseño realizada a través del modelo numérico validado experimentalmente. El análisis se realizó bajo carga total para cada uno de los casos de carga. Los resultados reportados en la siguiente gráfica son los valores de esfuerzo y desplazamiento más altos encontrados para cada uno de los componentes de la estufa.



---

Los resultados muestran componentes arriba de los límites de cedencia del material, así como el gráfico de desplazamientos muestra puntos más allá de lo especificado por los límites que marca la norma. Por lo tanto, se debe trabajar en la generación de nuevas geometrías para obtener resultados satisfactorios.

### 3.5 Diseño “Opciones de mejora a través del análisis predictivo”.

En esta etapa, se busca generar las mayores propuestas de diseño posibles que el tiempo nos permita realizar. Los siguientes puntos describen los pasos a seguir:

1.- La etapa de diseño se realizará analizando cada propuesta de diseño emitida por el grupo de apoyo técnico, la cual estará basada en costo, desempeño, funcionalidad, manufactura y apariencia.

2.- Los análisis a los cuales será sometido cada diseño serán de acuerdo a los especificados en la etapa de definición, apegándose a la norma ANSI y NOM, y se realizarán a través del software de ANSYS y bajo el método de elementos finitos.

3.- El criterio para juzgar si un diseño es aceptable, será que ninguno de los componentes a evaluar este por arriba de las propiedades de resistencia mecánica del material a utilizar, así como evaluar la estabilidad geométrica de la estructura a través de los desplazamientos generados por la carga mecánica en el subsistema chasis y cavidad de horno, además de observar la distribución de los esfuerzos de tal manera que todo el componente este trabajando y no solo una parte de él.

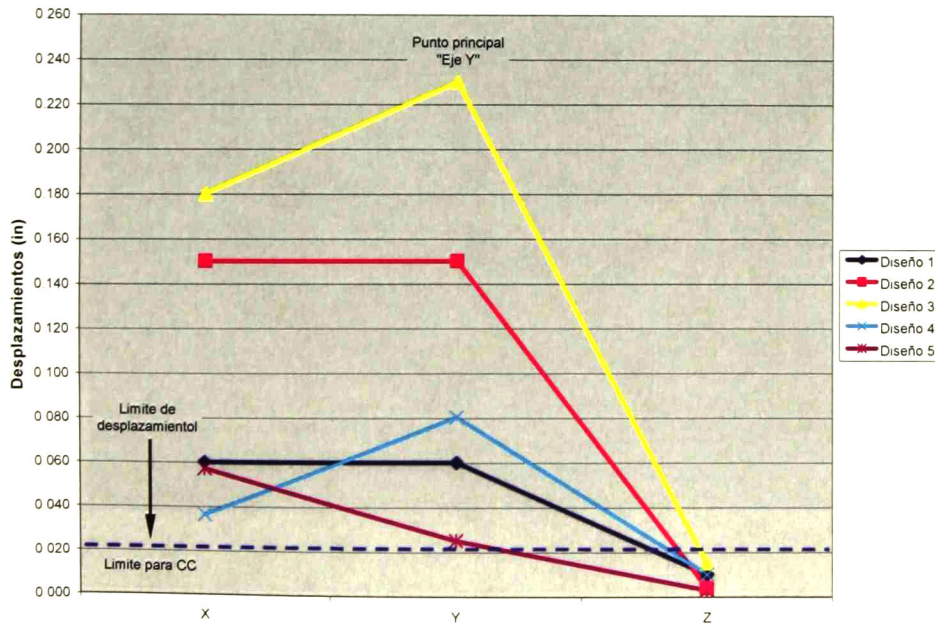
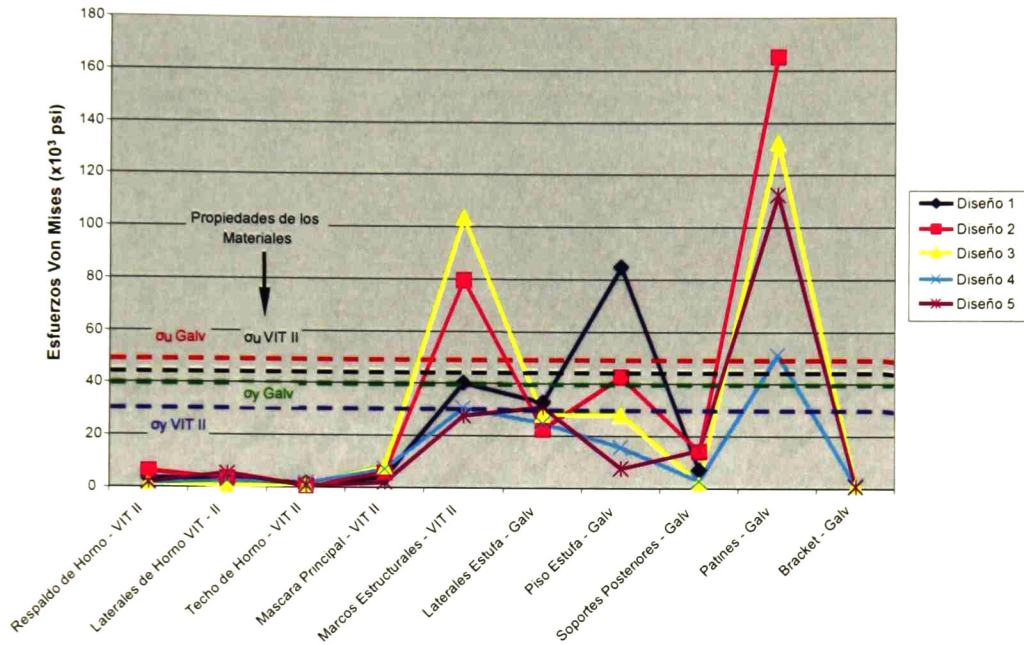
4.- Una vez que se llegue a una propuesta de diseño aceptable se agregarán los componentes que son ajenos al subsistema pero que sin embargo también contribuyen como estructura. Posteriormente se verificarán que los esfuerzos estén por debajo de las propiedades de material y los desplazamientos estén bajo norma.

5.- Por la naturaleza del problema, los análisis de esfuerzo que se realizarán a través del software ANSYS serán Lineales Elásticos. Si existe alguna situación donde se requiera algún análisis No Lineal Plástico, se realizará.

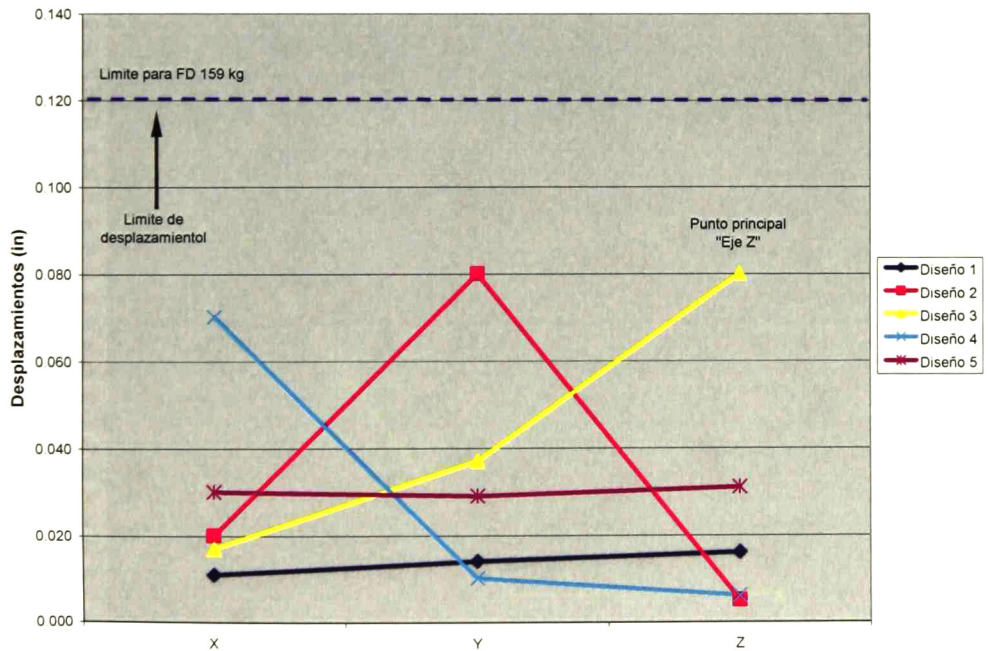
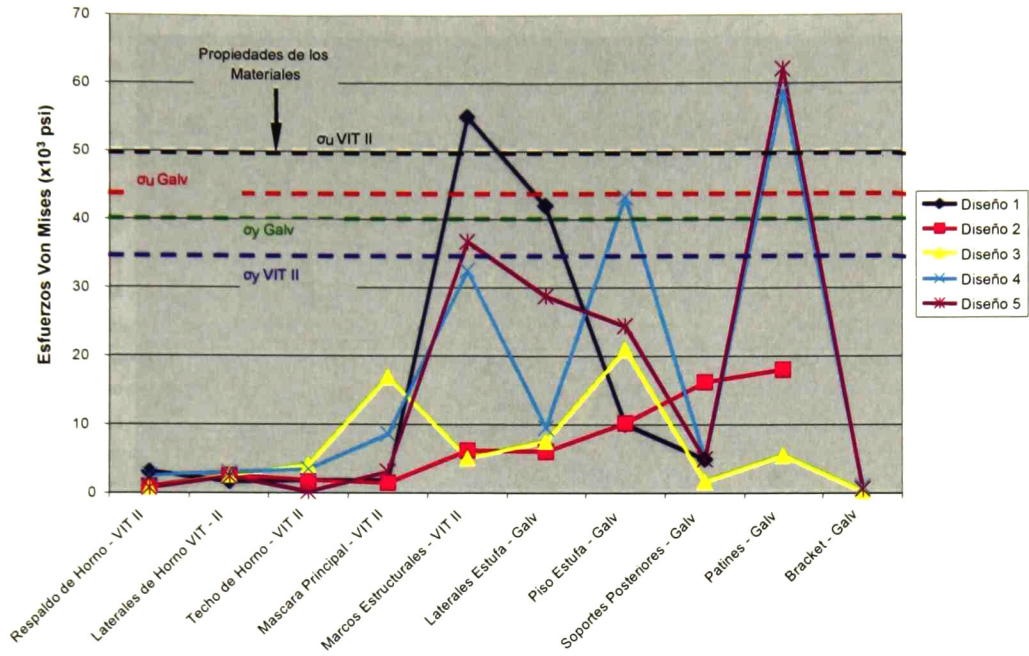
Recordando que tenemos 3 casos de carga, iniciaremos con la prueba de Carga en cubierta, continuando con Fuerzas diagonales 159 kg y finalizando con Fuerzas diagonales 125 kg.. Los resultados serán presentados a través de gráficos mostrando los niveles de esfuerzo y desplazamientos obtenidos, marcando los límites de esfuerzo de cedencia y desplazamientos máximos que marca la norma. Cabe mencionar que sólo se realizaron 5 propuestas de diseño, donde se evaluaron los componentes del subsistema Chasis y Cavidad de Horno. Posteriormente se realizó un sexto análisis integrando el resto de los componentes con el objetivo de cuantificar el beneficio que los subsistemas chasis y cavidad de horno tendrían por la adición de estas partes, que aunque no son parte estructural, si ayudan a la respuesta estructural de los subsistemas en estudio. Es

importante mencionar que a través de la evaluación de los diferentes propuestas de diseño se generó conocimiento del producto y en base a esto se fue realizando la mejora de los diseños.

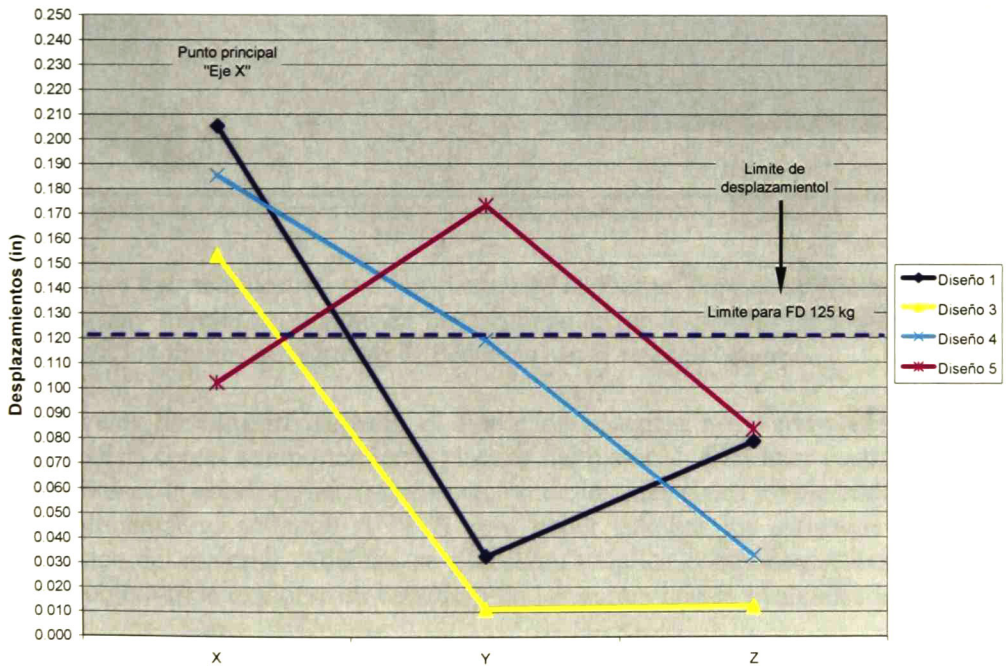
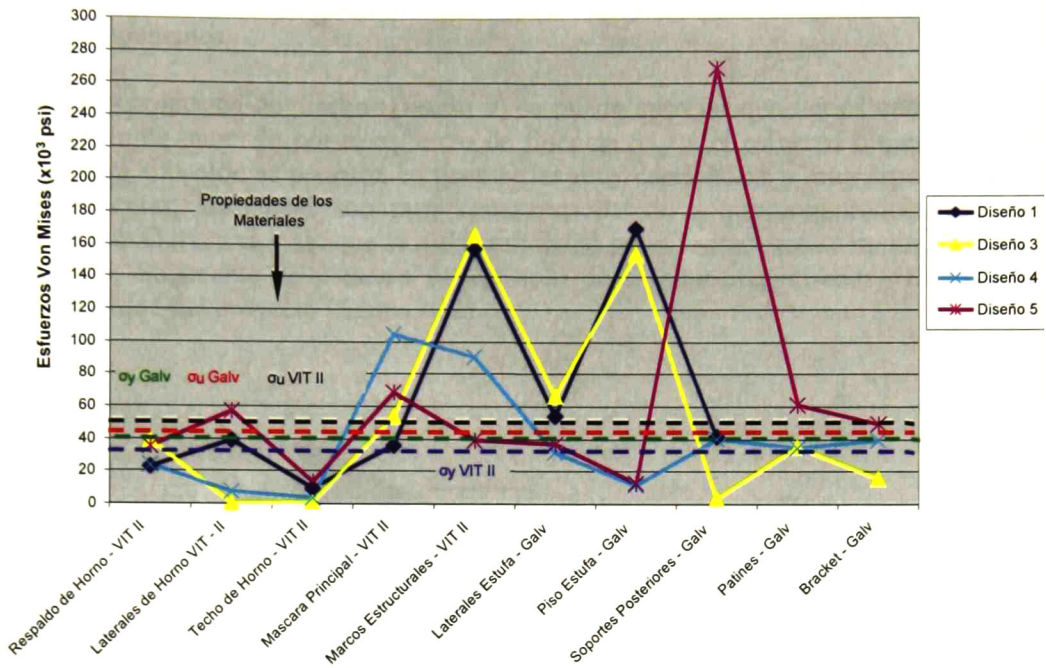
Resultados de las 5 propuestas de diseño bajo la prueba de Carga en Cubierta.



Resultados de las 5 propuestas de diseño bajo la prueba de Fuerzas Diagonales 159 kg.



Resultados de las 5 propuestas de diseño bajo la prueba de Fuerzas Diagonales 125 kg.



El tiempo y los recursos económicos fueron los principales límites para realizar solo 5 diferentes propuestas de diseño. Sin embargo también nos permitieron experimentar con diferentes geometrías de partes, diferentes ensambles y diferentes espesores de lamina para los componentes.

En la última propuesta de diseño (Diseño 5) se puede apreciar que varios componentes superan el límite marcado por el esfuerzo de fluencia ( $\sigma_y$ ) y el esfuerzo último ( $\sigma_u$ ) del material. Esta situación se presenta en geometrías muy caprichosas y muy específicas de los componentes, las cuales son muy necesarias debido a que son producto de los procesos de manufactura y aunque se quisieron evitar no se logró, pero se minimizaron lo más posible. Solamente se presenta un ejemplo de la situación anterior debido a la confidencialidad del proyecto (figura 3.32).

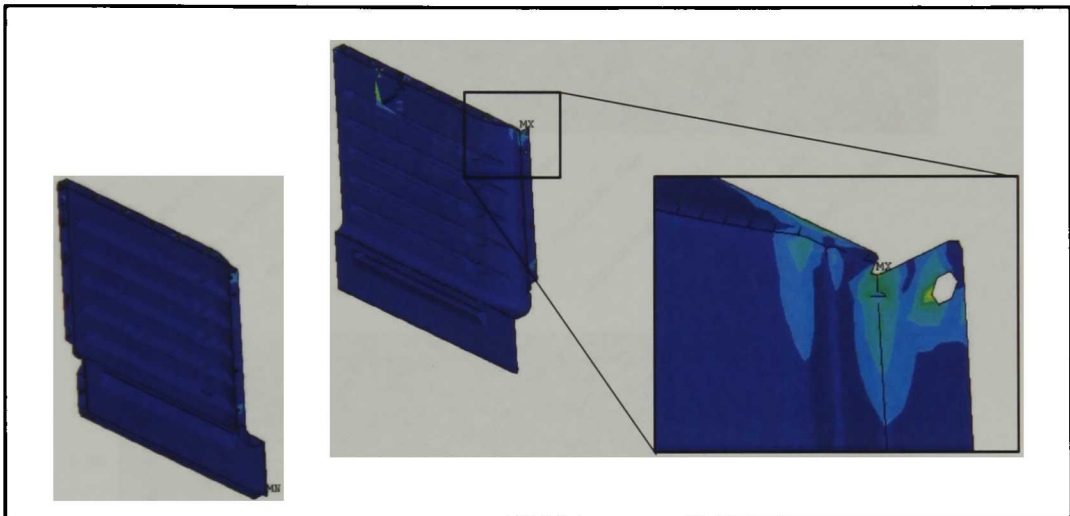


Figura 3.32. Concentraciones de esfuerzos debido a geometrías complicadas del componente.

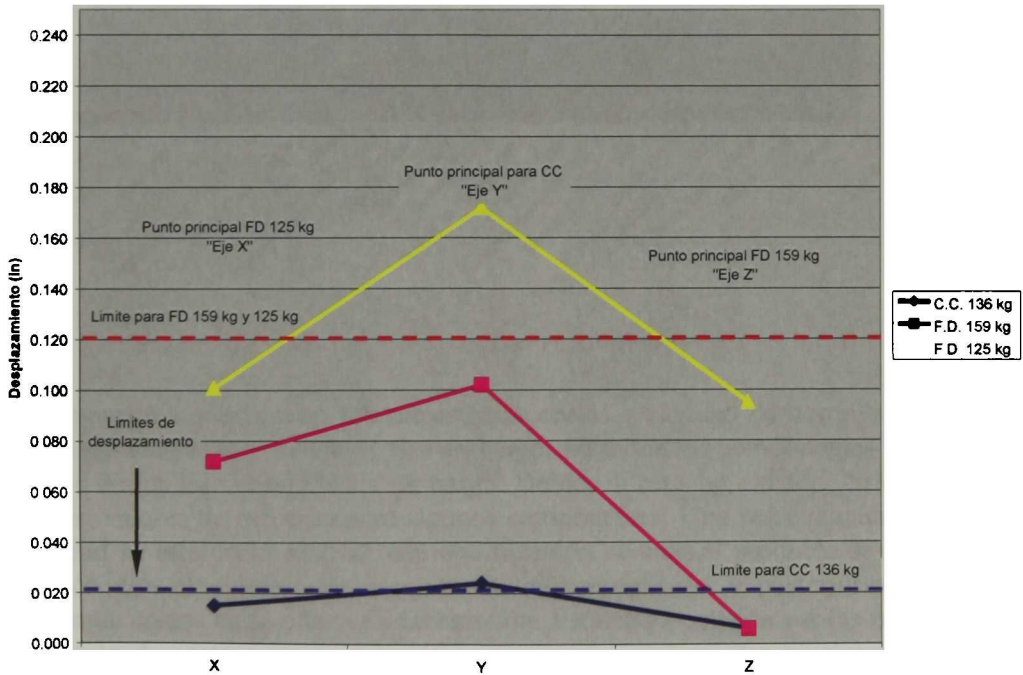
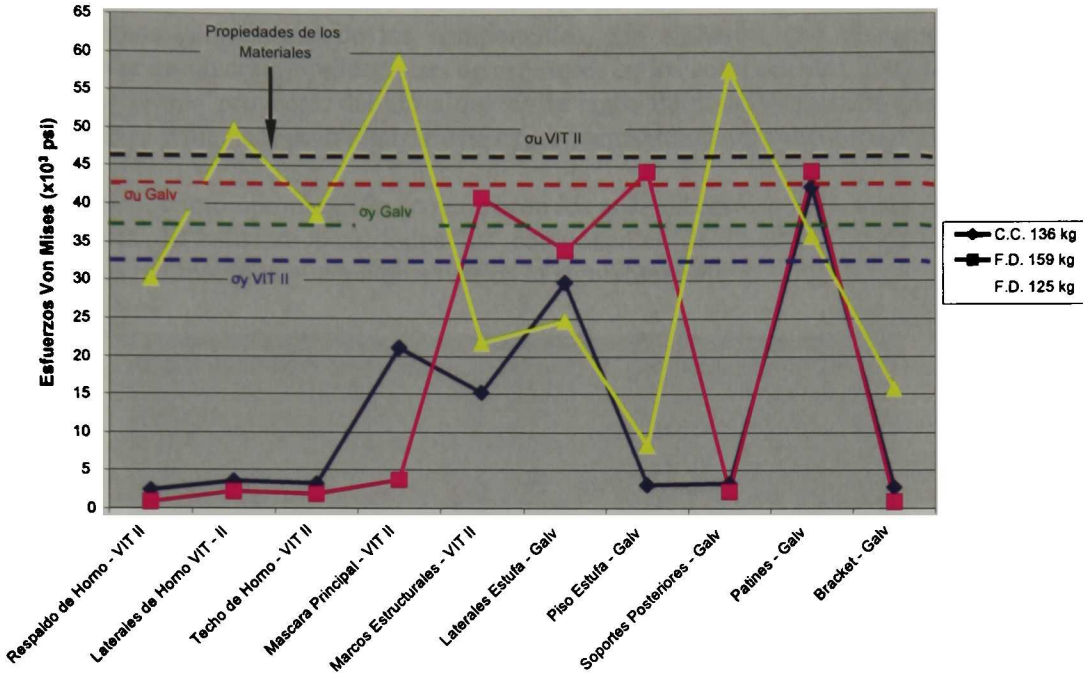
Los componentes que se muestran son los “Laterales de Horno”, donde se puede apreciar que solamente hay niveles muy altos en las esquinas teniendo niveles de esfuerzo muy bajos (debajo de los límites de esfuerzo de cedencia) en el resto del cuerpo.

Como los niveles de esfuerzo superan el límite de cedencia nos vemos obligados a realizar un análisis con el comportamiento plástico del material. El primer paso para este análisis fue obtener la curva esfuerzo-deformación de los materiales involucrados con el objetivo de alimentar al software ANSYS para poder calcular los esfuerzos bajo un esquema plástico del material. Además, se añadieron todos los componentes extras de la estufa con el objetivo de explorar un beneficio en los componentes evaluados hasta este momento.

Tomando en consideración la información antes mencionada se realizaron los análisis de las tres pruebas y se presentan los resultados en la tabla siguiente.



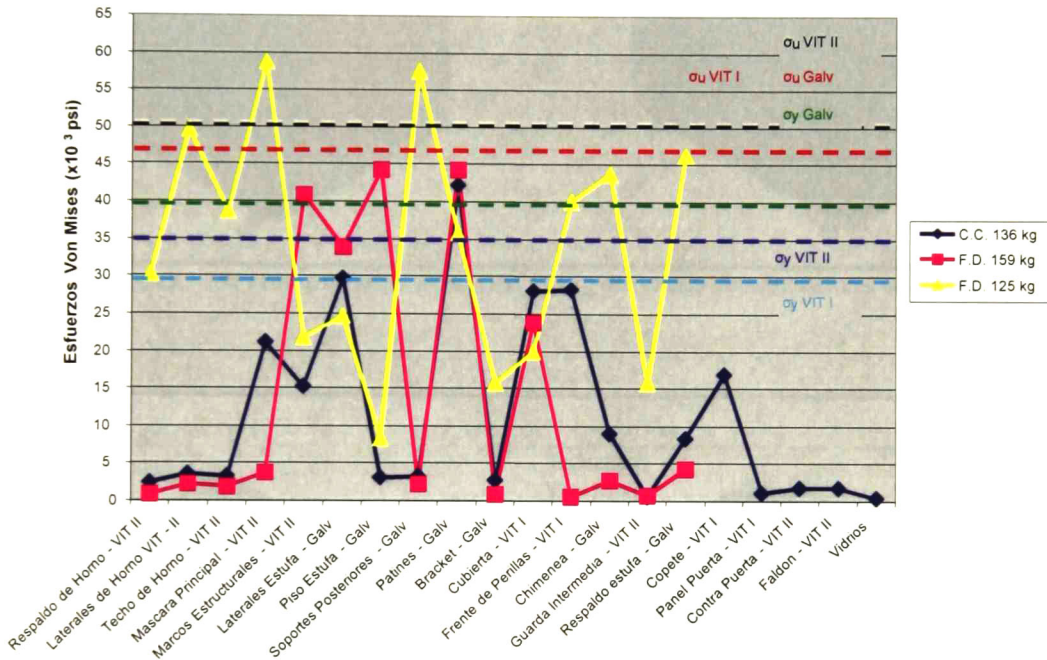
Resultados de la última propuesta de diseño (Diseño 5) bajo el esquema de análisis plástico y con componentes extras de la estufa.



### 3.6 Optimización “DOE Superficie de respuesta”.

Al inicio del proyecto se planteo que en la etapa de diseño se experimentaría únicamente con cambios geométricos de los componentes. Sin embargo, por la complejidad del proyecto se involucraron reducciones de espesores en los componentes. Esta situación fue causa del propio proyecto, debido a que en la etapa de diseño se estaba incurriendo en sobre costos y fue necesario realizar esta experimentación dentro de la etapa de diseño

Por lo tanto, como optimización se realizaron los análisis correspondientes y se presentan los niveles de esfuerzo para todos los componentes de la estufa (figura 3.33). Los resultados puntuales se pueden observar en la siguiente gráfica.



Los componentes que forman los subsistemas chasis y cavidad de horno son evaluados bajo las tres condiciones de carga. Sin embargo, no todos los componentes restantes son evaluados en las tres condiciones de carga. Debido a esto no existen, en el gráfico de resultados, valores de esfuerzo para algunos componentes. Una vez evaluada la estufa en su totalidad se estableció realizar una optimización cuando el producto se encuentre en producción con el objetivo de asegurar su implementación y posteriormente realizar reducción de costos en la planta de fabricación. Esta etapa permite ver las oportunidades de reducción de costo a través del gráfico donde se visualizan los niveles de esfuerzo y hacen candidatos a reducción de espesor a varios componentes. En esta etapa todos los herramientas con los que se producirá la estufa serán afinados y congelados, de tal manera a que se proceda a su liberación e instalación en la planta de manufactura.

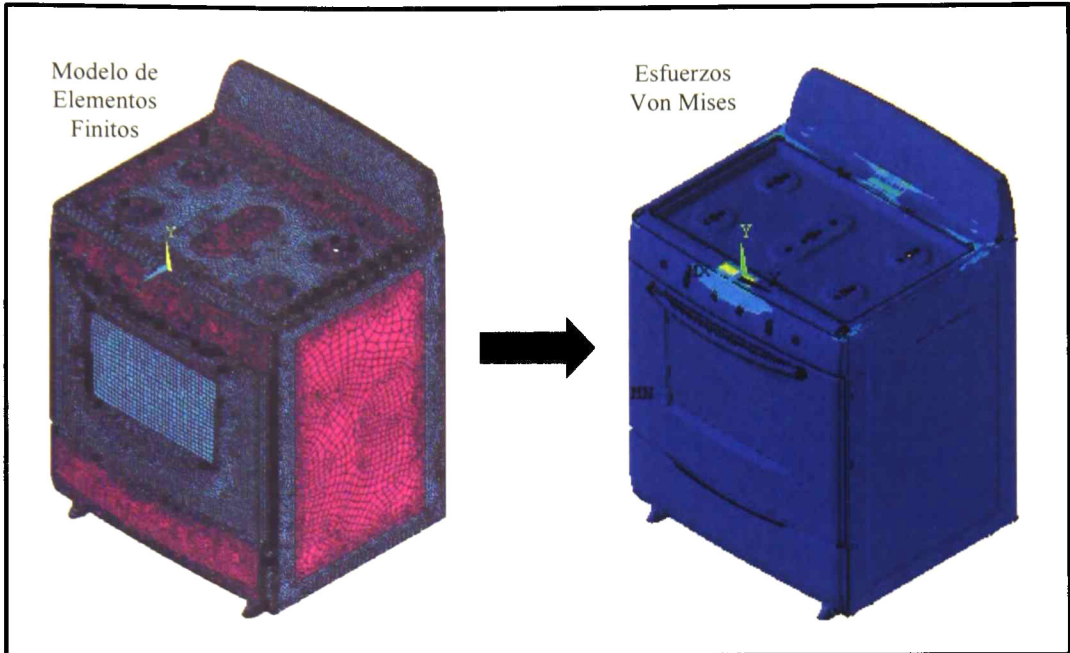


Figura 3.33a Prueba de carga en cubierta 136 kg con todos los componentes de estufa.

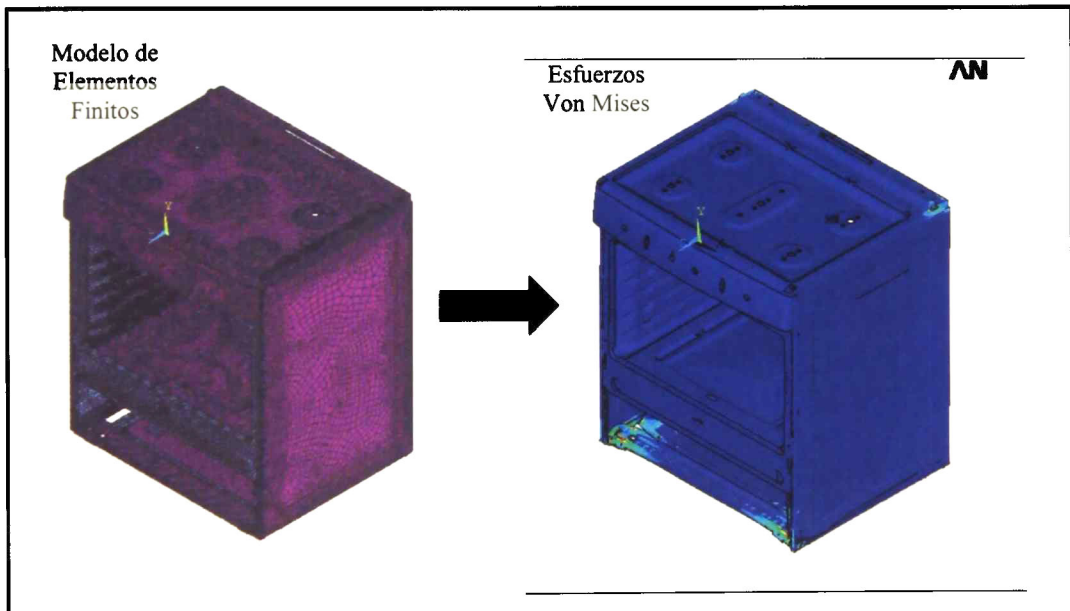


Figura 3.33b Prueba de fuerzas diagonales 159 kg con todos los componentes de estufa.

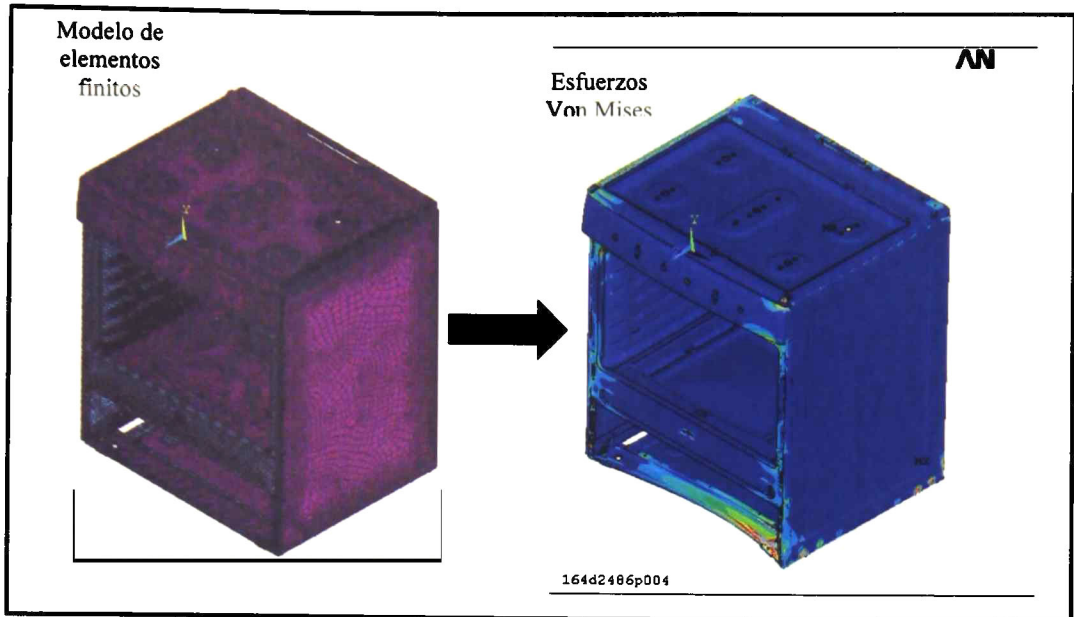


Figura 3.33c Prueba de Fuerzas Diagonales 125 kg con todos los componentes de estufa.

### 3.7 Validación “Pruebas de laboratorio”.

En esta etapa de la metodología, el proyecto se encontraba en la etapa de prepiloto donde según el proceso de la introducción de un nuevo producto que nuestra empresa utiliza, el diseño debe ser definitivo y como consecuencia se elaboran prototipos para la realización de las diferentes pruebas del producto entre ellas las pruebas estructurales como carga en cubierta y fuerzas diagonales.

Catorce prototipos fueron probados por el laboratorio de estufas teniendo aceptación del comportamiento de los subsistemas bajo cargas estructurales (figura 3.34), el cual consiste en no observar componentes deformados permanentemente ni la presencia de desplazamientos mayores a 0.20 in y 0.02 in bajo la aplicación de la carga (figura 3.35) .

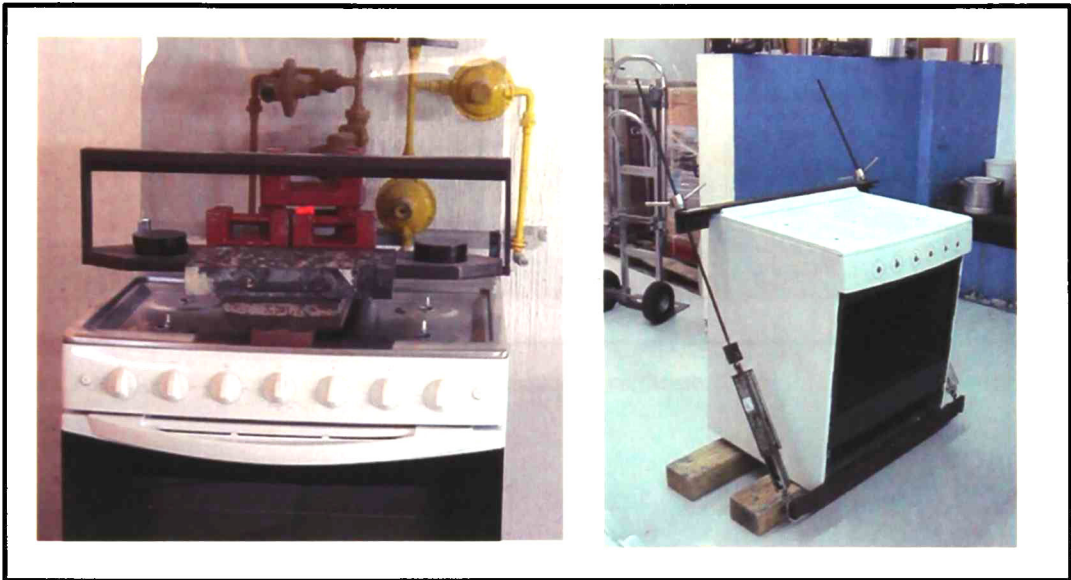


Figura 3.34. Pruebas de laboratorio a prototipo de diseño final de subsistemas chasis y cavidad de horno.



Figura 3.35. Evidencia de la no presencia de componentes deformados permanentemente.

Posteriormente, en la etapa de Piloto se realizaron 18 prototipos con el objetivo de colocarlas con usuarios verdaderos y en puntos estratégicos (figura 3.36). Estas estufas fueron revisadas periódicamente sin encontrar una sola falla en los subsistemas chasis y cavidad de horno.

Plan estufas de campo PR

18 estufas de fase piloto a consignación instaladas.

2 / EM307CSBIO	México	31	12
2 / EM308DSNIO	Guadalajara	19	
3 / EG410DSX0	SLP	19	2
3 / XO5500PSX0	Mty	16	
1 / EM1358SBB0	Veracruz	11	2
1 / EG408DSBIO	Culiacán	8	
3 / EG407CSNIO	Querétaro	7	2
3 /EG406DSNIO	Hidalgo	1	
	Gran Total	112	18

Se enviarán 25 estufas adicionales al plan original para un total de 43 .

Figura 3.36. Estufas prototipo colocadas en estratégicamente en campo.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y BENEFICIOS.

#### 4.1 Evaluación y discusión de resultados.

La evaluación y discusión de los resultados se realizará basándonos en la primer propuesta y la última propuesta de diseño (diseño final) con el objetivo de analizar el beneficio obtenidos por el presente análisis. Finalmente, se concluirá con el análisis estructural considerando todos los componentes que integran la estufa.

##### 4.1.1 Estructura en prueba de carga en cubierta 136 kg.

Los niveles de esfuerzo obtenidos en la primer propuesta de diseño fueron altos solamente para tres componentes del subsistema chasis. Estos esfuerzos eran muy superiores a las propiedades del material por lo cual la estructura fallaría de una manera súbita al momento de la aplicación de la carga. Los niveles de esfuerzo en los componentes del subsistema cavidad de horno eran muy bajos, siendo esta situación, un resultado benéfico debido a que la cavidad de horno mientras menos carga soporte es mejor. Respecto a los desplazamientos, la estructura presentó un abombamiento en los laterales de la estufa los cuales estaban por arriba de los limites especificados por norma (figura 4.1).

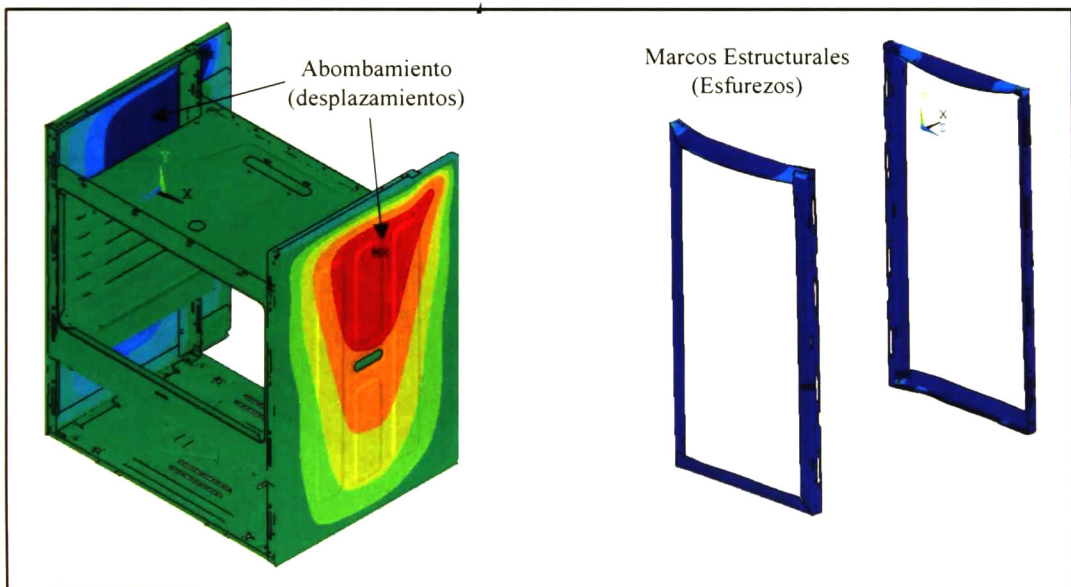


Figura 4.1 Abombamiento excesivo en estructura de estufa y esfuerzos altos en uniones de marcos estructurales.

Para evitar estos efectos no deseados en la estructura se realizaron cambios a través de las diferentes propuestas de diseño, las cuales fueron muy importantes y radicales como seleccionar otro tipo de uniones (figura 4.2), nuevas geometrías de componentes (figura 4.3), nuevos componentes y mejores apoyos entre componentes y de la estructura al piso. Estos cambios se realizaron tomando en cuenta su manufacturabilidad y costo.

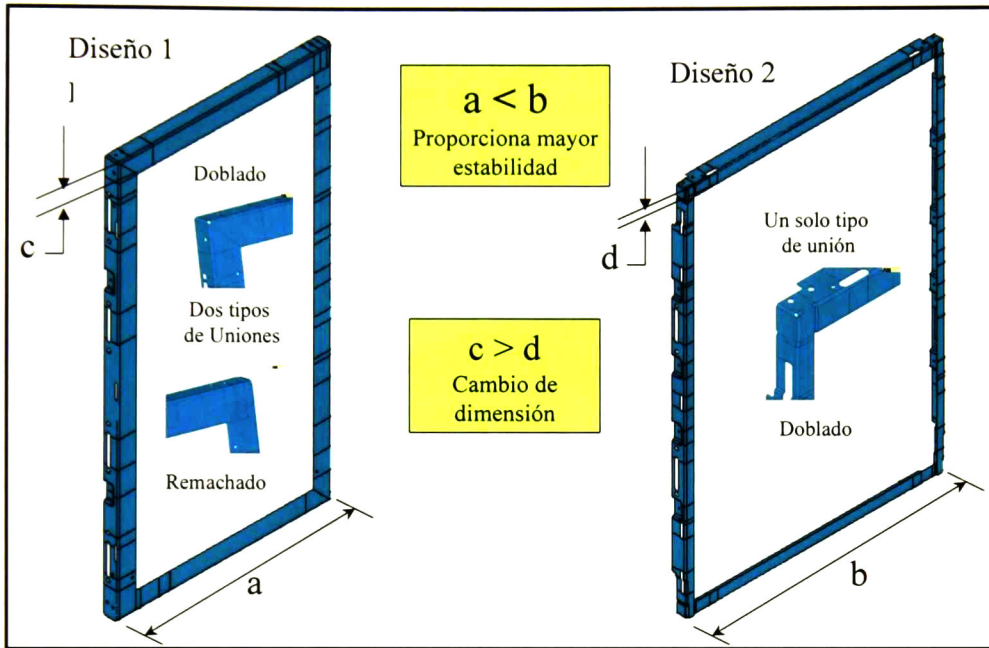


Figura 4.2 Mejoras en tipos de uniones.

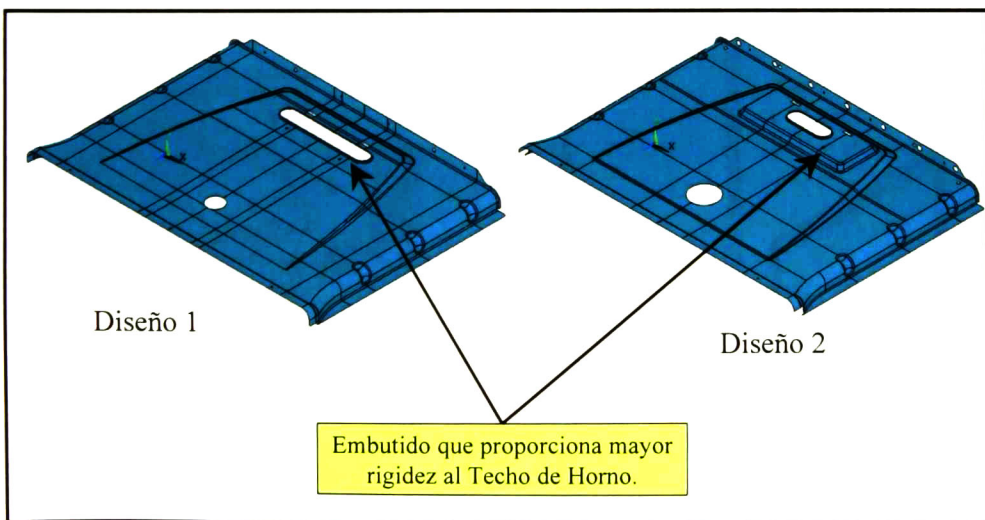


Figura 4.3 Mejoras en tipos de geometrías.



Una vez realizados los análisis a las diferentes propuestas de diseño se determinó congelar el diseño en la propuesta de diseño número 5. Los resultados fueron satisfactorios excepto para el componente llamado patín (figura 4.4), el cual presentó una deformación ligeramente permanente. Sin embargo, aplicando la norma y midiendo donde lo indica, la estructura se comporta totalmente satisfactoria debido a que los desplazamientos obtenidos están por debajo de los límites y además se eliminó el abombamiento que se presentaba en la propuesta de diseño uno (figura 4.5). Considerando los desplazamientos y los esfuerzos podemos decir que esta estructura se comportará establemente bajo este tipo de carga debido a los desplazamientos pequeños que tiene y a la uniformidad de ellos.

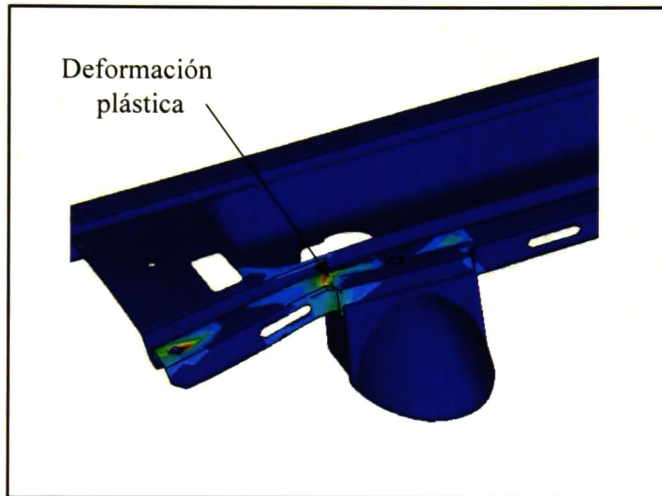


Figura 4.4 Deformación plástica en patín.

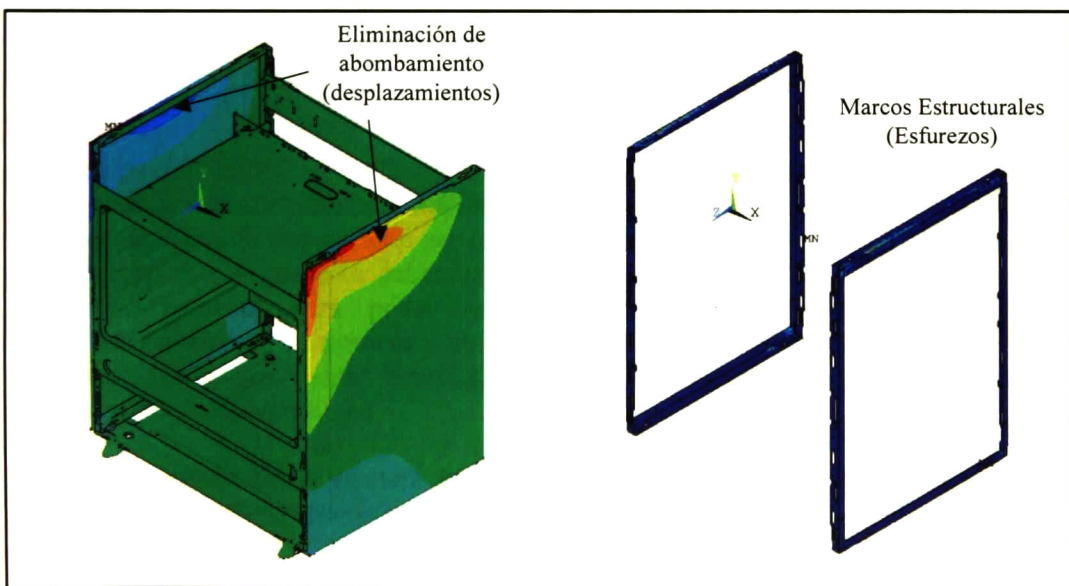


Figura 4.5 Análisis de diseño final bajo la prueba de carga en cubierta.

### 4.1.2 Estructura en prueba de fuerzas diagonales 159 kg.

En esta prueba, el subsistema chasis de la primera propuesta de diseño tuvo dos componentes que registraron esfuerzos superiores al esfuerzo de fluencia del material debido a la forma de aplicación de la carga. Los demás componentes de los subsistemas registraron esfuerzos por debajo del esfuerzo de fluencia del material. Algunos cambios realizados para solucionar los problemas que se presentaron en esta prueba fueron el aumento de espesor en uno de sus componentes y la eliminación de geometrías caprichosas que nos generaran concentradores de esfuerzo tales como radios caprichosos (figura 4.6).

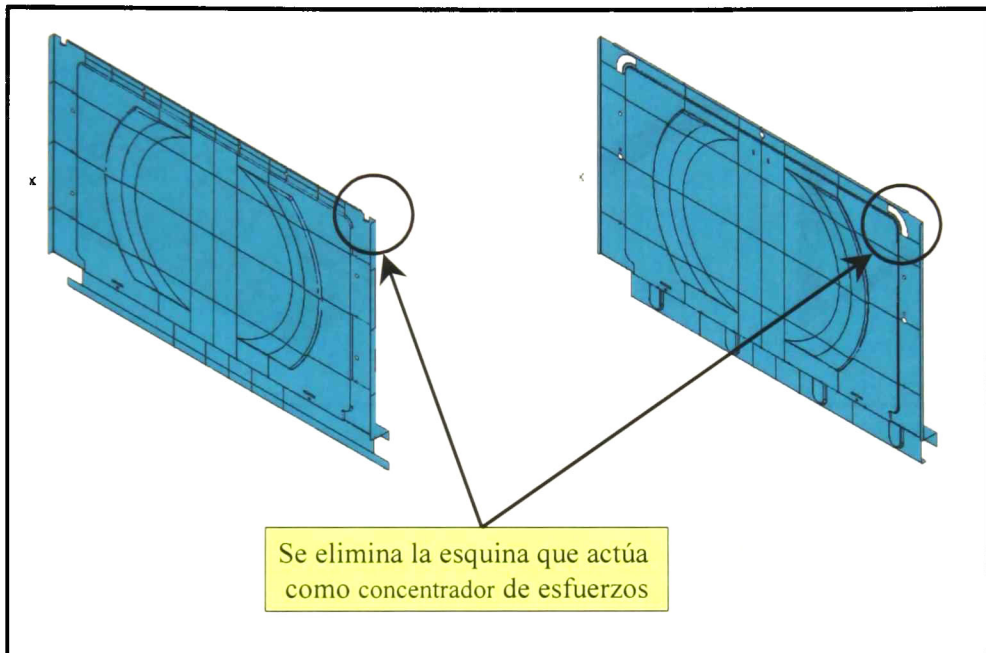


Figura 4.6 Eliminación zonas de concentración de esfuerzos (geometrías caprichosas).

Los desplazamientos encontrados en la estructura (figura 4.7) se encuentran muy por debajo de los límites establecidos por la norma. Esta situación y lo reflejado en los niveles de esfuerzo nos permite ver que bajo esta aplicación de carga la estructura tiene buena respuesta y que sólo debemos reforzar los componentes que obtuvieron valores altos de esfuerzo para poder acreditar totalmente esta prueba en particular. Desafortunadamente la estructura no debe cumplir solo con esta prueba y fue sujeta a cambios, los cuales fueron evaluados también bajo esta prueba con el objetivo de mantener su comportamiento.

La configuración de la primera propuesta de diseño se cuidó de tal manera que no sufriera grandes cambios con la intención de mantener esta respuesta estructural.

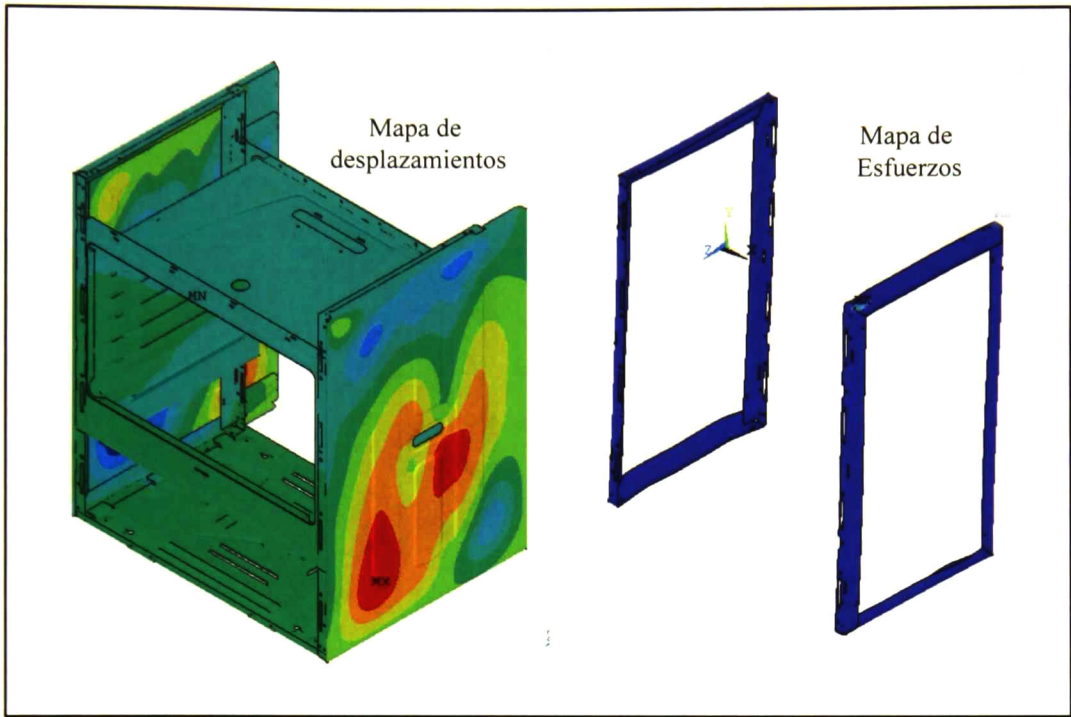


Figura 4.7 Análisis de primera propuesta de diseño bajo la prueba de fuerzas diagonales 159 kg.

Sin embargo, se cuidó de los niveles de esfuerzo, encontrándose en la propuesta de diseño final que un componente se encuentra con un nivel de esfuerzos superiores al esfuerzo de fluencia, estando los demás componentes con un nivel bajo de esfuerzos. Por otro lado, los desplazamientos encontrados en este análisis son muy buenos debido a que no se presenta ningún valor por arriba del límite marcado por la norma. La figura 4.8 muestra los mapas de desplazamiento y esfuerzos del análisis bajo la carga de 159 kg aplicados. En la figura de desplazamientos se muestra un ligero efecto de abombamiento en las caras laterales de la estufa, sin embargo, las escalas de desplazamiento son muy pequeñas y este efecto no debe ser considerado.

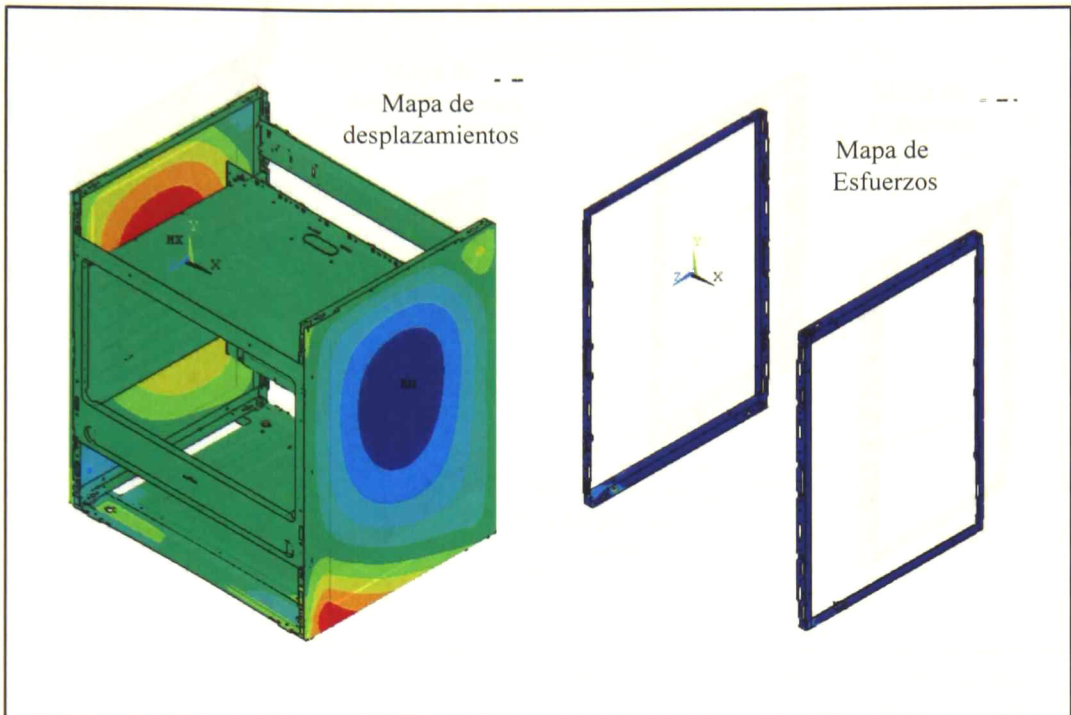


Figura 4.8 Análisis de diseño final bajo la prueba de fuerzas diagonales 159 kg.

#### 4.1.3 Estructura en prueba de fuerzas diagonales 125 kg.

Los resultados del análisis de la primera propuesta de diseño bajo este criterio de prueba fueron muy negativos debido a que se tuvieron niveles de esfuerzo muy arriba del esfuerzo de fluencia para la mayor parte de los componentes y los desplazamientos (figura 4.9) fueron también muy superiores a los límites establecidos por la norma. La estabilidad de la estructura era no adecuada debido a que se presentó un efecto “lata” y los marcos estructurales tendían a pandearse lo cual era una falla muy delicada para la estructura.

A lo largo de los análisis a las diferentes propuestas de diseño esta prueba fue la más crítica debido a que en todas las propuestas fue la que presentó un constante mal comportamiento. De tal manera que fue necesario agregar un componente exclusivamente para esta prueba y una mayor área de apoyo en los marcos estructurales.

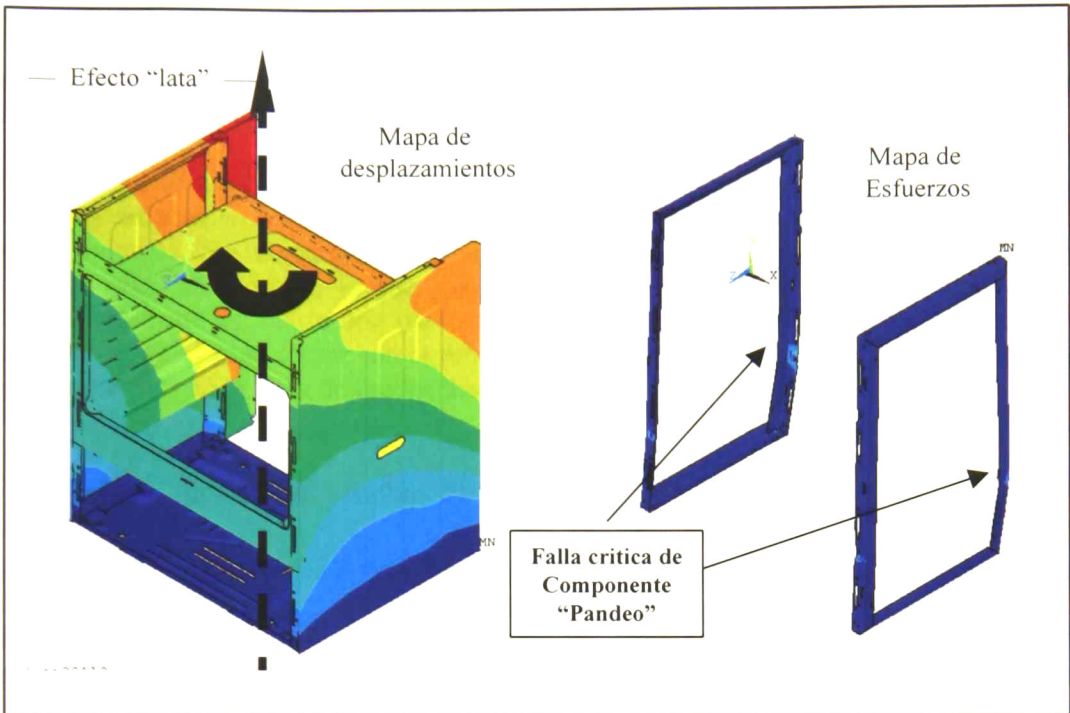


Figura 4.9 Análisis de primera propuesta de diseño bajo la prueba de fuerzas diagonales 125 kg.

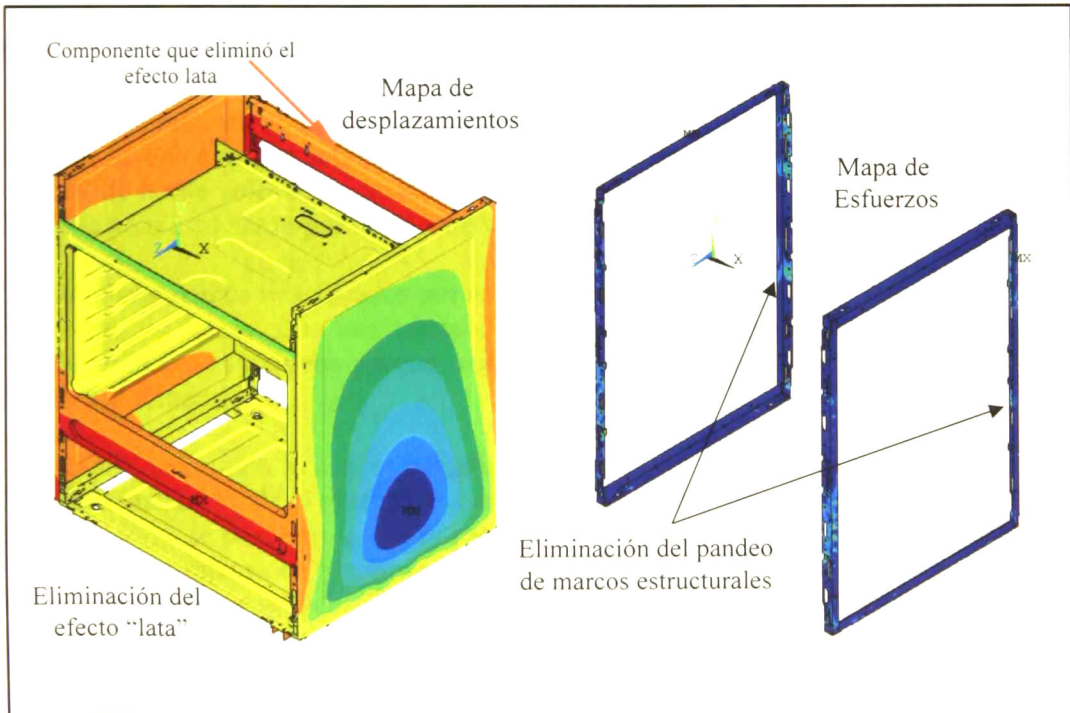


Figura 4.10 Análisis de diseño final bajo la prueba de carga en cubierta.

---

Los niveles de esfuerzos en los componentes, obtenidos del análisis a la última propuesta de diseño, estuvieron también en algunos componentes por arriba del esfuerzo de cedencia y en algunos por arriba del esfuerzo de ruptura. Por otro lado, los resultados en desplazamiento estuvieron por debajo de los límites especificados por la norma.

En otras palabras, la prueba fue acreditada de acuerdo a los desplazamientos pero desafortunadamente las deformaciones permanentes y rupturas estuvieron presentes sin poder evitarlas. Sin embargo todavía faltaba el análisis de la estructura con todos los componentes de la estufa, lo que nos hacía suponer que los esfuerzos bajarían y nos colocarían en un escenario con menor riesgo. Esta situación se evaluó ante un comité revisor y se determinó seguir con el proyecto y congelar los diseños de los herramientas para instalarlos en la línea de producción.

#### 4.1.4 Estufa en las tres pruebas de carga.

Los resultados presentados anteriormente fueron realizados solamente a los subsistemas chasis y cavidad de horno, siendo esta situación un escenario crítico debido a que no se consideraban los demás componentes que constituían a la estufa y que de alguna manera proporcionan rigidez a la estufa. Por esta situación se decidió realizar la modelación de los demás componentes e integrarlos a los análisis sobre todo a la prueba de fuerzas diagonales 125 kg que es donde se tiene el mayor riesgo.

##### 4.1.4.1 Estufa bajo carga en cubierta 136 kg.

La respuesta estructural de la estufa con todos sus componentes bajo la aplicación de 136 kg sobre la cubierta fue muy satisfactoria. De los componentes del subsistema chasis y cavidad de horno solo un componente tuvo valores de esfuerzo mayores al esfuerzo de cedencia pero estuvieron por debajo del valor del esfuerzo de ruptura (figura 4.11).

Los desplazamientos ocasionados por esta carga están en el límite del valor establecido por norma y además tiene una buena distribución, en otras palabras la estructura paso satisfactoriamente la prueba porque cumple con los desplazamientos y tiene una buena estabilidad dimensional.

Afortunadamente, una vez que se realizó la validación del análisis se presentaron las fallas justamente donde el modelo de elementos finitos lo predijo. Nos pudimos constatar de esto porque se desarmó la estufa para observar las zonas afectadas encontrándose la cedencia del componente. Sin embargo, como el componente deformado no es integrante del subsistema de apariencia, la estructura fue acreditada por norma debido a que no se veía daño en la apariencia de la estufa ni perjudicaba la funcionalidad de la estufa..

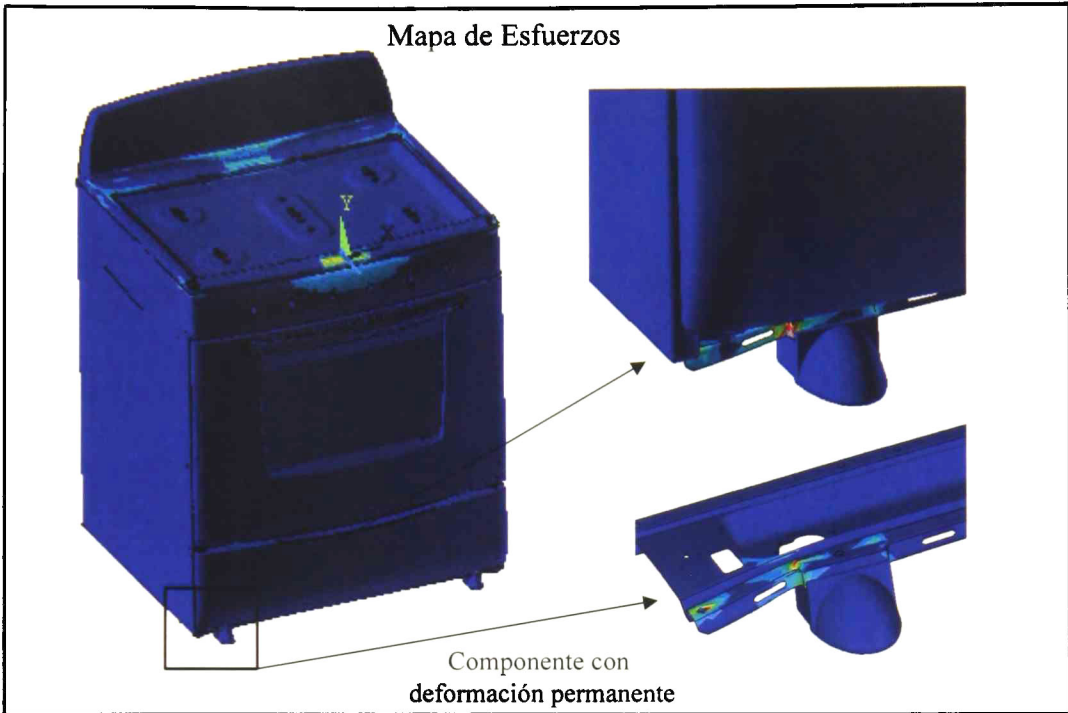


Figura 4.11 Análisis a estufa completa bajo la prueba de carga en cubierta.

#### 4.1.4.2 Estufa bajo fuerzas diagonales 159 kg.

Los niveles de esfuerzo que se presentaron bajo este tipo de carga fueron altos solo para tres componentes. Esta situación se trató de igual manera que se realizó con la anterior, teniendo que los componentes afectados no son de apariencia y no llegan a la ruptura por lo tanto esto se considera aceptable y se acredita la prueba desde el punto de vista de esfuerzos. Respecto a los desplazamientos, estos se localizaron por debajo de los límites establecidos por la norma por lo tanto la prueba es acreditada satisfactoriamente (figura 4.12).

#### 4.1.4.3 Estufa bajo fuerzas diagonales 125 kg.

Los desplazamientos durante la aplicación de la carga a la estufa completa fueron totalmente satisfactorios debido a que se encuentran por debajo del límite establecido por la norma. Por otro lado, los esfuerzos disminuyeron para algunos componentes pero desafortunadamente incrementaron para otros (figura 4.13). Estos esfuerzos estuvieron por arriba del límite que marca el esfuerzo de cedencia del material pero por abajo del esfuerzo de ruptura. El lado bueno de esta situación es que los esfuerzos continúan presentándose en partes que no son de apariencia y están ocultos, lo que no afecta al

desempeño del producto ni a su apariencia. Por lo tanto esta prueba queda aprobada tanto en desplazamientos como en esfuerzos.

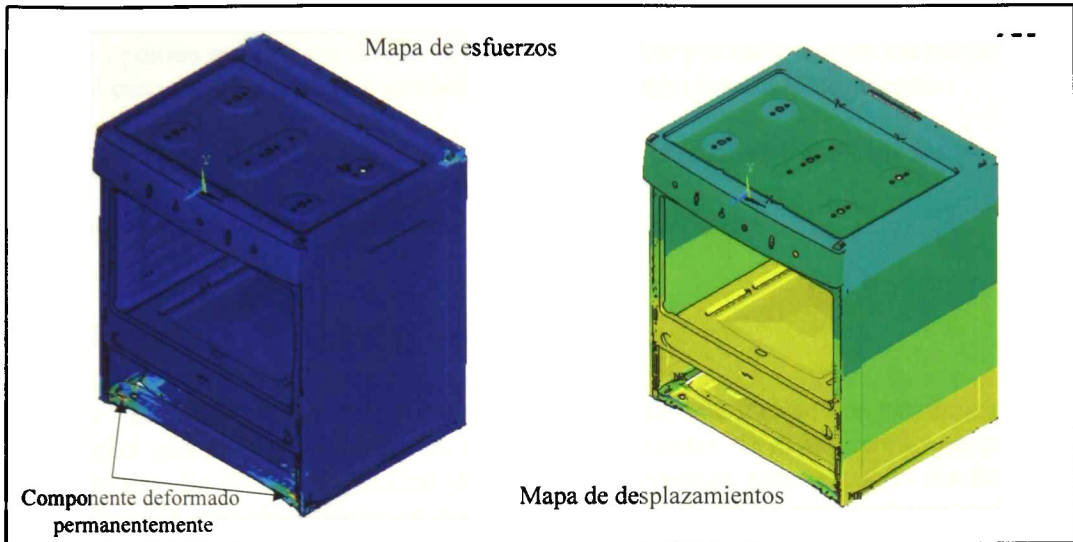


Figura 4.12 Análisis a estufa completa bajo la prueba de fuerzas diagonales 159 kg.

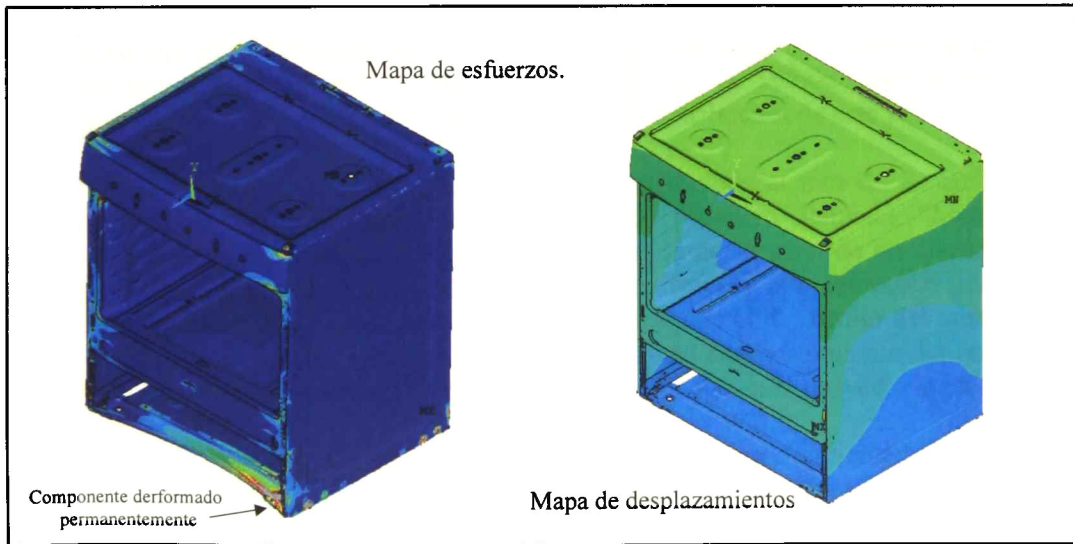


Figura 4.13 Análisis a estufa completa bajo la prueba de fuerzas diagonales 125 kg.



## 4.2 Impacto al costo del Proyecto y del Producto.

Al inicio del proyecto se estableció un porcentaje de reducción de costos en la fabricación del producto. Todos los subsistemas deberían de contribuir a esta reducción. Por lo tanto se fijaron puntos específicos donde se debería contribuir por cada uno de los subsistemas, y para el caso de la estructura (cavidad de horno y chasis) fueron los siguientes:

- 1.- Menor número de componentes comparado contra la cavidad y el chasis actual.
- 2.- Menor peso en subsistema chasis comparado contra el actual.

### 4.2.1. Impacto al costo por método de análisis.

A través del método de análisis desarrollado por el presente trabajo nos permitió generar una amplia gama de resultados para diferentes propuestas de diseño como ensamble y componentes. Se tuvo la capacidad de analizar 5 diferentes propuestas de diseño como ensamble y 38 cambios diseño en componentes a través de 29 simulaciones realizadas antes de liberar el diseño final (figura 4.14). Esta situación nos permitió contribuir con los siguientes porcentajes de reducción de costos en el proyecto global.

- 1.- Se obtuvo una reducción del 20% en número de partes.
- 2.- El porcentaje de reducción en peso del chasis fue del 18%.

El reflejo en reducción de costos generales del producto con el cual se contribuyó a través del subsistema estructura (chasis y cavidad de horno) fue del 31.5% menor al costo del producto actual. Considerando la producción proyectada de 500,000 estufas anuales la reducción en costo fue muy significativa debido a la contribución de este proyecto.

Los beneficios que se generan a largo plazo son atribuidos al método de análisis, los cuales muestran la metodología anterior a este proyecto llamada "Metodología tradicional" donde se tenían problemas que impedían la generación de un diseño óptimo tales como la elaboración limitada de propuestas de diseño y la elaboración limitada de prototipos de acuerdo al presupuesto que se manejara para el desarrollo del mismo. Con este tipo de metodología se tenía un desconocimiento del comportamiento del producto y se dependía de la experiencia de las personas que desarrollaban el proyecto anterior.

Ahora, con el nuevo esquema de diseño que integra herramientas numéricas y experimentales se tiene un mejor conocimiento del comportamiento estructural de la estufa y que permanecerá en los análisis que son propiedad de la empresa y que a pesar de que sea nueva gente la que desarrolle un proyecto tendrá referencias analíticas para soportar sus decisiones. Este análisis será una referencia para futuros proyectos de tal manera que dará mucha visión para el desarrollo de próximos proyectos.

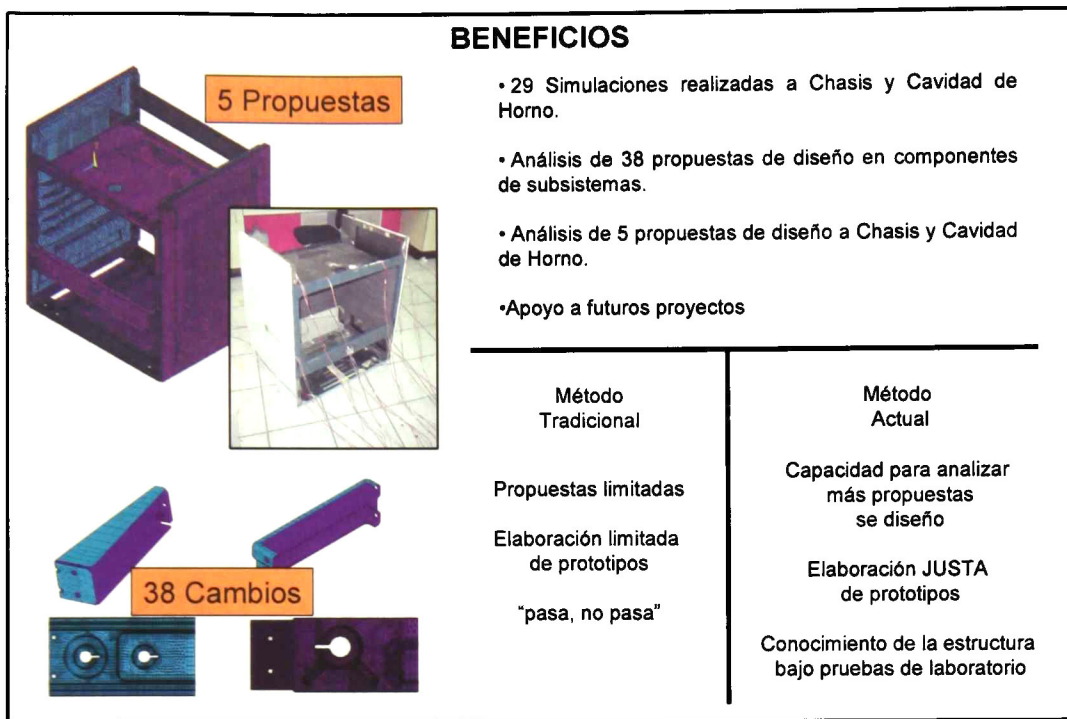


Figura 4.14 Beneficios en costos a través del método de análisis .

#### 4.2.2. Impacto al costo por método de trabajo.

En la ausencia de estas herramientas de diseño se hubiera necesitado realizar una cantidad impresionante de prototipos para generar un buen conocimiento del producto y sobre todo garantizar la funcionalidad del mismo en etapas tempranas del proyecto. El costo y el tiempo por fabricar 5 propuestas de diseño y 38 cambios en componentes hubieran generado una considerable inversión que muy probablemente no se hubiera autorizado. Esta situación hubiera provocado un mayor tiempo de desarrollo con una mayor inversión dejándonos fuera del mercado por nuestra pobre capacidad de reacción ante grandes competidores en la rama de electrodomésticos.

Sin embargo, se utilizaron herramientas que nos permitieron salir a tiempo al mercado y sin rebasar el presupuesto dirigido al mismo. El porcentaje de reducción de costos por la fabricación de los prototipos justos fue del 66%, lo cual es una suma considerada de inversión. El impacto de esta metodología en el costo del producto fue reflejado en el buen precio que se le dio al consumidor final, el cual es muy competitivo y nos reafirma como líderes del mercado.

### 4.3 Impacto al tiempo del desarrollo de un Producto.

El tiempo de desarrollo del proyecto fue el mismo que para proyectos anteriores, sin embargo el impacto generado fue una mejor distribución del tiempo con el objetivo de generar menos gastos tanto en el proyecto como en el producto y garantizar la entrega del proyecto al tiempo establecido al inicio del mismo. La figura 4.15 muestra el tiempo y su distribución a través de las etapas del proyecto con el método actual y con el método tradicional. El método tradicional invertía muy poco en las etapas tempranas del proyecto y se generaba una gran inversión en las últimas etapas debido al desconocimiento del diseño y sobre todo al método de prueba y error. Con la nueva metodología se realizó una mayor inversión en etapas muy tempranas del proyecto lo que nos permitió generar un muy buen conocimiento del producto, lo cual se reflejó en los pocos o casi nulos cambios que se realizaron en las etapas avanzadas del proyecto.

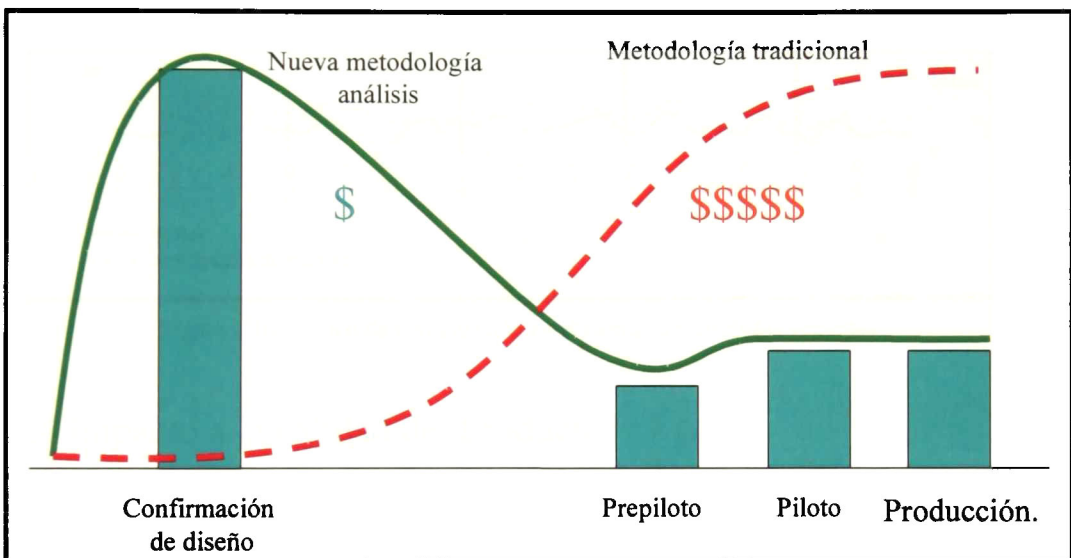


Figura 4.15 Beneficios al proyecto a través del método de análisis.

La entrega del producto se comprometió para estar en venta en el último mes del año 2004 sin embargo siempre se presentan contratiempos y dificultades las cuales generaron un retraso de un mes estando disponible para venta el primer mes del año 2005.

A partir de este tiempo el producto empezó a venderse a nuestros principales clientes generando una gran demanda y cumpliendo nuestras expectativas (figura 4.16), lo cual se puede constatar a través de un estudio de mercado donde se observa el nivel de unidades vendidas. Este mismo gráfico muestra como en este año nos hemos consolidado como líderes del mercado obteniendo un porcentaje mayor del mismo.

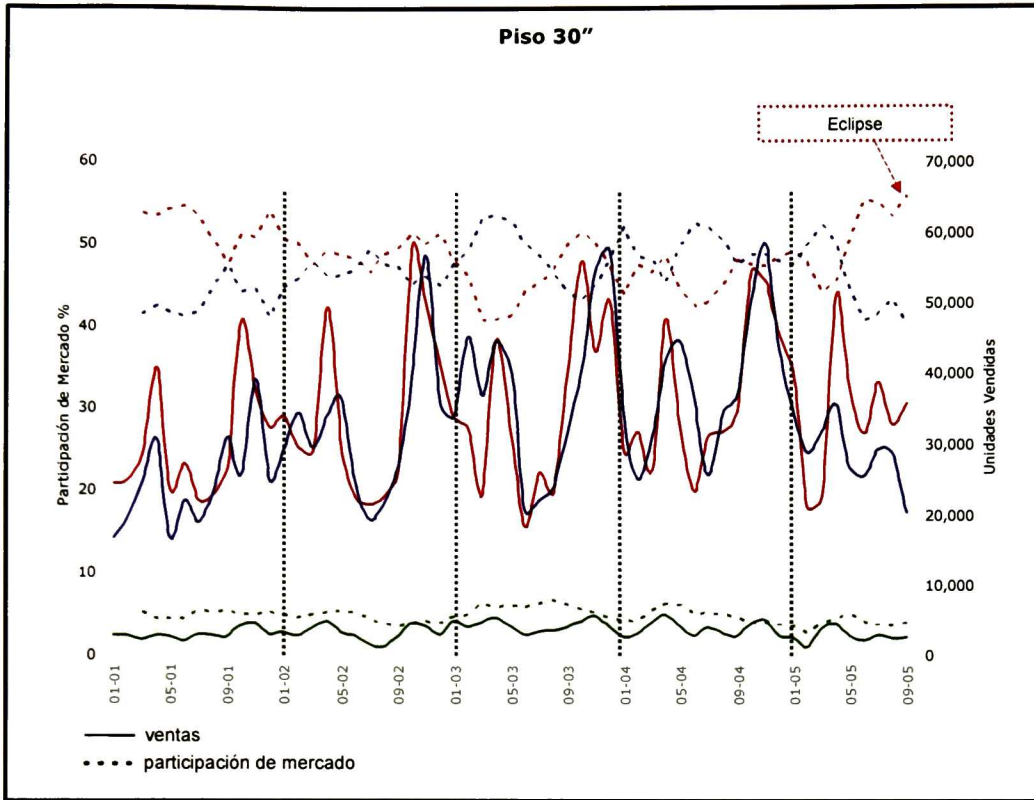


Figura 4.16 Gráfico de participación en el mercado y unidades vendidas.

#### 4.4 Impacto a la calidad del Producto.

La calidad del producto se mide en Z's y SCR (del inglés Service Call Rate, Índice de llamadas de servicio). El cálculo de la Z se realiza a través de los límites superiores establecidos, la media (media del proceso) y la desviación estándar (variación del proceso) de una serie de datos, lo cual nos da un nivel de la calidad del producto y mientras se tengan valores bajos de desviación estándar el valor de Z será mayor. El nivel de Z establecido como objetivo al inicio del proyecto, al cual es la suma de los diferentes subsistemas que forman la estufa, fue de 4.5. Este valor es muy agresivo para calificar la calidad de un producto debido que las expectativas son muy altas.

El valor obtenido de Z con el que contribuyó la estructura desde el punto de vista de manufacturabilidad y ensamble fue de 3.66. Aunque no se alcanzó el nivel de Z esperado, el valor obtenido es muy buen valor.

Otro índice de buena calidad es el SCR, este índice cuantifica el número de llamadas de servicio que el usuario del producto realiza por motivos de alguna inconformidad o problema. Este valor hasta el mes de abril es de 1.27% que comparado con el valor del producto anterior su reducción fue del 22.08% (figura 4.17).

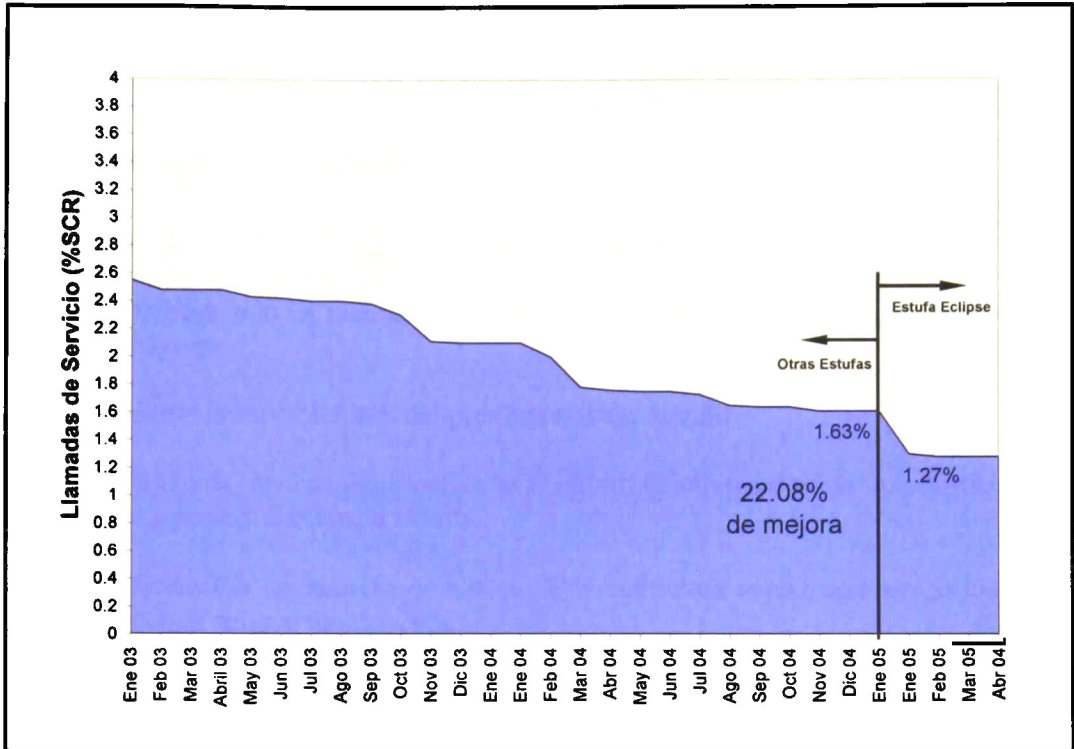


Figura 4.17 Impacto en la calidad del producto evaluado a través del SCR.

---

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES.

#### 5.1 Aportaciones generales.

Sin duda el desarrollo del análisis estructural sólo es una parte del desarrollo de un producto donde son muchas las personas y áreas que intervienen en su creación. Por lo tanto, este trabajo sólo es una parte del gran trabajo que realizó el equipo que estaba a cargo del proyecto.

Específicamente las aportaciones del presente trabajo fueron:

1.- Contribución de manera significativa en el ahorro objetivo del proyecto a través de los Subsistemas Chasis y Cavidad de Horno.

- La reducción en número de partes de la estructura actual comparada contra la estructura eclipse fue del **20%**.
- El ahorro total obtenido en la estructura debido a este proyecto fue de **\$2.3 millones de dólares**.
- Se obtuvo un **18% de ahorro en material** en los subsistemas chasis y cavidad de horno.
- No se tuvo **ningún gasto** en etapas tardías del proyecto debido a problemas técnicos de la estructura de la estufa.
- Las especificaciones de diseño, para la estructura de la estufa, son críticas para la calidad de tal manera que **no serán afectadas** en planta de producción a través del respaldo de este proyecto.
- El aumento del precio en los recientes años del acero **no afectó** al producto debido a que se necesita menos material para la construcción de este.

2.- **Implementación de técnica de análisis numérico-experimental** que permitió la creación de un modelo numérico validado experimentalmente, el cual será de utilidad en diseños futuros no solo de estufas, sino para los tres productos que fabrica la empresa. Esta nueva metodología de análisis rompió con un esquema de metodología de análisis “tradicional” que limitaba al desarrollo de un nuevo producto en cuanto a tiempo, calidad y costo (figura 5.1).

Cambios fundamentales a los procesos de desarrollo de nuevos productos han ocurrido en los últimos años, estos han sido por presiones de mercados, la globalización, el desarrollo

de nuevas tecnologías y la optimización de los procesos de producción; pero sobre todo la necesidad de reducir los tiempos de desarrollo e incrementar la calidad de los nuevos productos. Dichos cambios han sido en el sentido de integrar técnicas numéricas y experimentales en las fases iniciales de los procesos de desarrollo de nuevos productos.

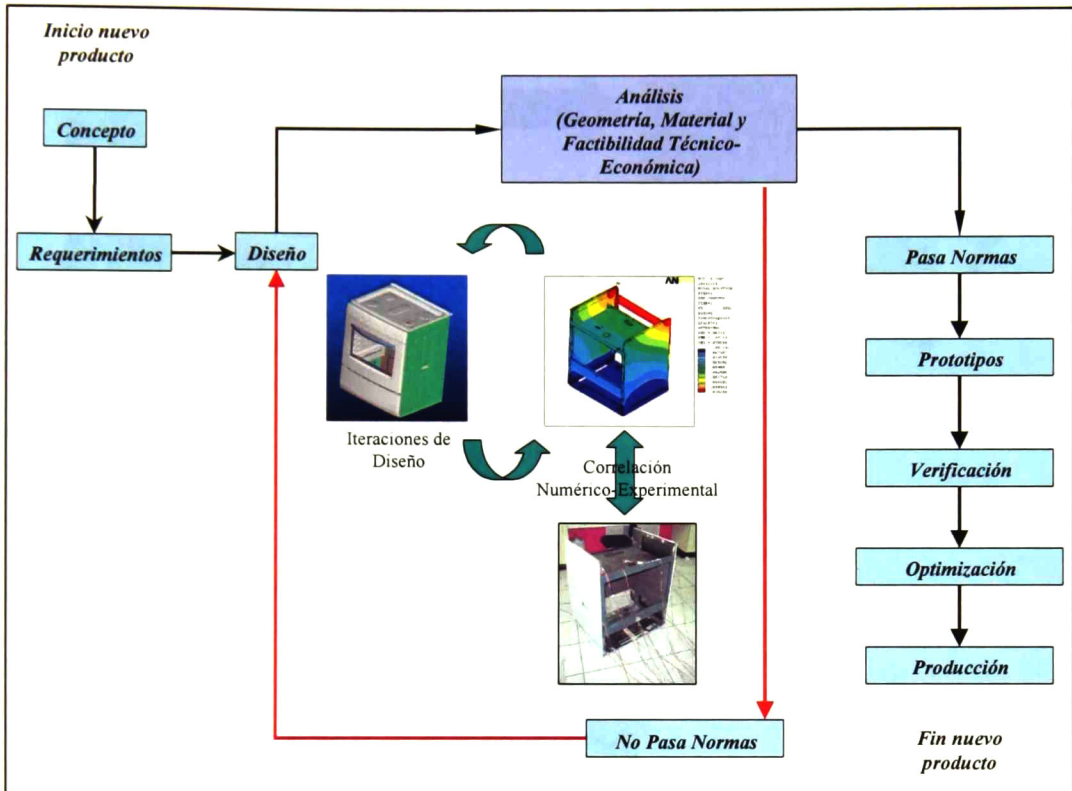


Figura 5.1 Nueva metodología de diseño que desplaza a la metodología de tradicional.

3.- **Generación de conocimiento** que permitió optimizar el comportamiento estructural del subsistema chasis y cavidad de horno para poder seleccionar un material mas económico, geometrías mas fáciles de manufacturar y espesores más adecuados en componentes críticos y no críticos.

La evaluación de una estructura a través del método tradicional solamente daba como resultado un “pasa la prueba” o “no pasa la prueba” proponiendo opciones limitadas y totalmente cualitativas que retroalimentarán al diseño de la estructura sin conocer como estaban los niveles de esfuerzo y desplazamiento en los componentes de la misma. Por otro lado, la nueva metodología de análisis (no llamada evaluación) muestra específicamente las áreas de oportunidad de mejora en la estructura y sus componentes, permitiendo el análisis de cada una de los componentes de la estructura así como la mejor unión entre componentes en cuanto a calidad y cantidad se refiere. La figura 5.2 muestra como esta nueva metodología nos permite analizar minuciosamente los niveles de esfuerzo y desplazamiento de cada uno de los componentes siendo esto imposible con la metodología tradicional de diseño.

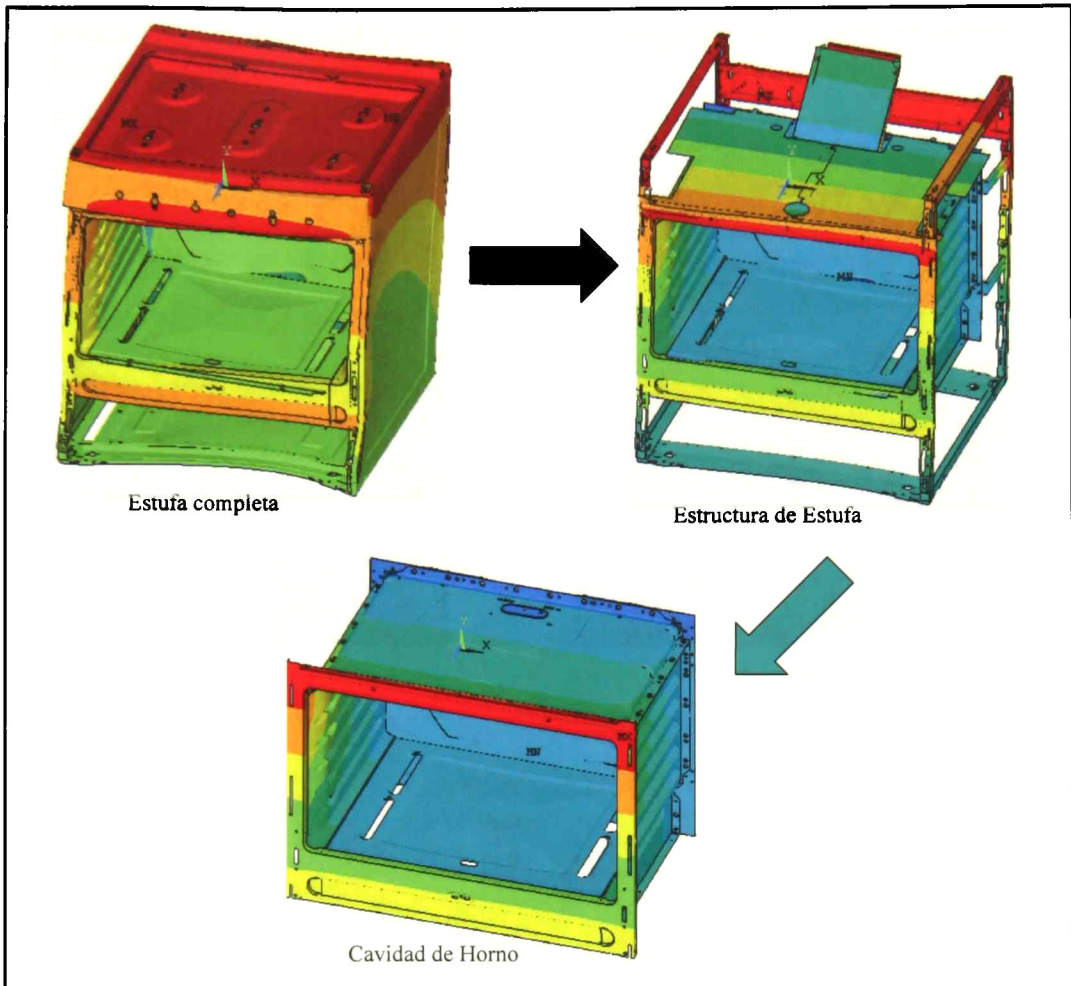


Figura 5.2 Mapas de desplazamiento en estufa bajo fuerzas diagonales 125 kg que permiten un análisis minucioso para cada componente de la estructura.

3.- **Incrementar y asegurar** el desempeño mecánico del subsistema estructura bajo las propuestas de reducción de calibre, los requerimientos de manufactura y funcionalidad, nos permitió estar en un tiempo muy adecuado para la venta del producto con un excelente nivel de calidad y a un bajo costo, esto lo podemos confirmar con las pocas llamadas de servicio que genera el cliente y con los altas ventas del producto que incrementan nuestra presencia en el mercado, confirmándonos como líderes del mercado nacional y sudamericano en cuanto a estufas se refiere.

4.- El chasis y cavidad de horno involucrados en este análisis fue para la estufa mas económica de una completa línea de producto, teniendo mas estufas con el mismo chasis y cavidad de horno, tales como estufa nivel medio y estufa nivel alto (figura 5.3). Ninguna de las estufas de otros niveles presento un efecto negativo en su estructura



durante la aplicación de las pruebas estructurales mencionadas en este proyecto, por lo tanto toda la gama de estufas con el mismo chasis y cavidad de horno acreditaron las pruebas estructurales.



Figura 5.3 Línea completa de estufas donde se utiliza el mismo chasis y cavidad de horno, las cuales acreditan completamente las pruebas estructurales.

Son varias las aportaciones generadas con el desarrollo de este proyecto, pero sin duda la principal aportación a la compañía es el uso de la tecnología en la aplicación del desarrollo de un nuevo producto generando con esto un producto a tiempo en el mercado, con alta calidad y con un bajo costo, siendo este el principal objetivo de la compañía.

## 5.2 Futuras líneas de desarrollo.

Es una realidad que la estufa no solamente tiene funciones estructurales sino tambien debe cumplir con funciones tales como:

- Térmicas,

Un mejor aislamiento para obtener un horno con mayor eficiencia y menos perdida de calor por transferencia hacia el exterior de este. Además, de generar mapas de temperatura mas homogéneos.

- Termo-Estructurales,

La interacción carga-temperatura que obligadamente se da en el campo y que con frecuencia el cliente lo realiza es tambien una área de desarrollo.

- Flujo,

El flujo de calor en el horno de la estufa es muy importante debido a que a través de este se genera una buena distribución de temperatura que permite el buen cocinado de los alimentos y que sin duda tambien afecta al desempeño de la estufa.

Estas áreas de oportunidad crecen aun mas cuando estas estufas deben cumplir con pruebas requeridas por normas y por el uso del cliente final. Sin duda, estas son grandes oportunidades para generar nuevas líneas de desarrollo y realizar análisis numérico-experimentales en campos de térmicos y de flujo.

No solamente esta técnica se aplica en el desarrollo de un nuevo producto debido a que en las plantas de manufactura fue requerido el uso de esta metodología para optimizar el producto actual y generar reducciones de costo. Por lo que, fue requerido el desarrollo de un proyecto donde lo critico no son las cargas estructurales sino el desempeño térmico de la estufa.

En la actualidad todos los proyectos que se desarrollan en el área de estufas contemplan los análisis numérico-experimentales ya que se han vuelto un requisito que permite la continuación del proyecto o su cancelación.

---

**REFERENCIAS.**

- [1] Mabe TyP, "New Product Introduction", Sistema de Calidad de Mabe TyP, Querétaro, Qro., 2005.
- [2] Secretaria de energía de los Estados Unidos Mexicanos, "Aparatos domésticos para cocinar alimentos que utilizan gas L.P. o gas natural", Norma Oficial Mexicana NOM-09-SEDEG-2002 , Diario Oficial de la Federación, México, DF., 2002.
- [3] American National Standar, "ANSI Z21.1-200 Household cooking gas appliances", American National Standar Institute, Inc., Cleveland, Ohio, 2003.
- [4] Kenneth G. Budinski, "Engineering Materials Properties and Selection", Editorial Prentice Hall, 4ta Edición, 1992.
- [5] Richard W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering", Editorial, Jhon Wiley and Sons, Inc., 2da Edicion, 1989.
- [6] Michael F. Ashby, Dabid R.H. Jones, "Engineering Materials 1", Editorial Butterworth Heinemann, 2da Edicion, 1996.
- [7] Jack A. Collins, "Failure of Materials in Mechanical Design", Editorial Jhon Wiley and Sons, Inc., 2da Edicion, 1993.
- [8] James M. Gere, "Mecánica de Materiales", Editorial Thomson Learning, 4ta Edición, 2002.
- [9] Beer, F., and Johnston, E., "Mecánica Vectorial para Ingenieros Estática", Edición McGraw Hill, 5ta Edición, 1994.
- [10] Beer, F., and Johnston, E., "Mecánica de Materiales", Editorial McGraw Hill, 1985.
- [11] James W. Dally, William F. Riley, "Experimental Stress Análisis", Editorial Mc Graw Hill, 3ra Edición, 1991.
- [12] Robert L. Norton, "Diseño de Maquinas", Editorial Prentice Hall, 3ra Edición, 1999.
- [13] Robert C. Juvinial, "Fundamentos de Diseño para Ingeniería Mecánica", Editorial Limusa, 1991.
- [14] Blumrich, J., P., "Sciencie", Vol. 168, 1970.
- [15] Dieter., G., E., "Engineering Desing", 2nd Edition, McGraw-Hill, 1991

- 
- [16] Asimov, M., "Introduction to Design", Editorial Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1962.
- [17] Ullman, G., D., "The Mechanical Design Process", Editorial Mc Graw-Hill, International edition, 1992.
- [18] Michael F. Ashby & David R. H. Jones, "Engineering Materials 2", Editorial Pergamon, 1986.
- [19] Michael F. Ashby, "Materials Selection in Mechanical Design", Editorial Butterworth Heinemann, 1992.
- [20] Ertas, A., & Jones, J., C., "The Engineering Design Process", John Wiley & sons, Inc. 1993.
- [21] Charles A. Harper, "Manual de plásticos volumen 1", Editorial Mc Graw Hill, 2004.
- [22] Akin, J., "Computer Assited Mechanical Design", Prentice Hall, Englewood cliffs, N.J., 1990.
- [23] Adams & Rogers, "Computer Aided Heat Transfer Analysis", McGraw-Hill, N.Y., 1973.
- [24] Forsythe & Wason, "Finite-Difference Method for Partial Differencial Equations", John Wiley & sons, Inc., N.Y., 1960.
- [25] Sergerlind, "Applied Finite Element Analysis", John Wiley & sons, N.Y., 1989.
- [26] Hammerslay & Handscomb, "Monte Carlo Methods", John Wiley & sons, N.Y., 1956.
- [27] Rubinstein, "Simulation and the Monte Carlo Method", John Wiley & sons, N.Y., 1981.
- [28] Luis Ferrer Argote, "Análisis Experimental de Esfuerzos", Instituto Tecnológico de Querétaro, 1984.
- [29] Robert D. Cook, "Finite Element Modeling For Stress Análisis", Editorial John Wiley & sons, 1995.
- [30] Larry J. Segerlind, "Applied finite element analysis", Editorial John Wiley & sons, 1984.
- [31] O.C. Zinenkiewicz and R. L. Taylor, "The finite element meted", Editorial Mc Graw Hill, 1991.
-

- 
- [32] ANSYS User's manual, "ANSYS Release documentation"., Theory and procedures, 2004.
- [33] Noe Hernández Silva, "Manual de practicas de extensometria", Instituto Tecnológico de Celaya, 1998.
- [34] González Nila Juan Antonio, "Programa de practicas para el laboratorio de Análisis de Esfuerzos", Universidad Autónoma Nacional de México, México DF, 2000.
- [35] Vishay, "Notas técnicas de extensometria eléctrica", Measurements group, Inc., 2003 <http://www.measurementsgroup.com>
- [36] Mabe TyP- GE, "Design For Six Sigma", Proceso de diseño de Mabe TyP, Querétaro, Qro., 2005.
- [36] Mabe TyP- GE, "Six Sigma", Proceso de control de calidad en manufactura de Mabe TyP, Querétaro, Qro., 2005.

EL JURADO DESIGNADO POR LA UNIDAD QUERÉTARO DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, APROBÓ LA TESIS DEL C. OSCAR BARRIOS FLORES TITULADA: "ANÁLISIS MECÁNICO DE ESTRUCTURA DE ESTUFA DE 30", FIRMAN AL CALCE DE COMÚN ACUERDO LOS INTEGRANTES DE DICHO JURADO, EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO, QRO., A LOS VEINTIOCHO DÍAS DEL MES DE NOVIEMBRE DE DOS MIL CINCO.



**Dr. Luis Gerardo Trápaga Martínez**  
**Director de Tesis**  
**Profesor Investigador Cinvestav 3D**



**Dr. Rafael Ramírez Bon**  
**Profesor Investigador Cinvestav 3C**



**Dr. José Martín Yáñez Limón**  
**Profesor Investigador 3A**



**Dr. Juan Muñoz Saldaña**  
**Profesor Investigador 3B**



CINVESTAV  
BIBLIOTECA CENTRAL



SSIT000008269