



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
MECÁNICA

**TESIS**

ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA ULTRASÓNICA  
DEL PLÁSTICO INDUSTRIAL ABS (ACRILONITRILO BUTADIENO  
ESTIRENO)

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
PRESENTA**

Ing. Erasmo Correa Gómez

**ASESOR**

Dr. en Energética. Gonzalo M. Domínguez Almaraz

**CO-ASESOR**

M. I. Víctor López Garza



MORELIA, MICH. AGOSTO de 2013

---



## **RESUMEN.**

El estudio de la resistencia a la fatiga ultrasónica en materiales polímeros es prácticamente inexistente al día de hoy. Ensayos en materiales plásticos en fatiga convencional han aparecido desde la década de los 70's del siglo pasado. Una de las dificultades principales para llevar a cabo ensayos en fatiga ultrasónica en materiales plásticos es la naturaleza de estos materiales: su baja capacidad de disipación térmica, su baja resistencia mecánica, y su alta capacidad de deformación elástica y plástica en algunos de ellos. Dado que en fatiga gigacíclica las frecuencias de ensayos son muy altas (20 kHz o más), los periodos de ciclo de fatiga son extremadamente pequeños (50 microsegundos o menos), lo que implica que la disipación térmica asociada a un ciclo se lleve a cabo en un tiempo muy corto; esto es, en fatiga ultrasónica la potencia de disipación térmica es considerablemente más alta. En el caso de materiales plásticos que tienen bajas propiedades de conductividad térmica, lo anterior significa mayor dificultad para disipar el calor generado durante el ensayo en fatiga; este calor tiende a dilatar el material y, en su caso, a perder la condición de resonancia necesaria en este tipo de ensayos destructivos.

## **ABSTRACT.**

Ultrasonic fatigue resistance studies in polymer materials are virtually nonexistent today. Tests on plastic materials in conventional fatigue have appeared since the early 70's of last century. One of the main difficulties to perform ultrasonic fatigue testing of plastic materials is the nature of these materials: its low thermal dissipation, low mechanical strength, and high capacity of elastic and plastic deformation in some of them. In gigacyclic fatigue tests, frequencies are very high (20 kHz or more), the fatigue life periods are extremely short (50 microseconds or less), which implies that the thermal dissipation associated with a cycle is carried out in a very short time; that is, in ultrasonic fatigue thermal power dissipation is considerably higher. In the case of plastic materials having low thermal conductivity properties, this means more difficult to dissipate heat generated during the fatigue test, the heat tends to expand the material and this expansion leads to get out of the testing resonance condition.

## ÍNDICE

**RESUMEN.**

**ABSTRACT.**

**ÍNDICE GENERAL.**

**CONTENIDO.**

<b>RELACIÓN DE TABLAS, GRÁFICAS E ILUSTRACIONES.....</b>	<b>3</b>
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>5</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....</b>	<b>7</b>
<b>FATIGA MECÁNICA.....</b>	<b>9</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>10</b>
<b>OBJETIVOS.</b>	
<b>OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>11</b>
<b>OBJETIVOS PARTICULARES.....</b>	<b>11</b>
<b>JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>HIPÓTESIS.....</b>	<b>13</b>
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>14</b>
<b>RECURSOS HUMANOS.....</b>	<b>15</b>
<b>RECURSOS MATERIALES.....</b>	<b>15</b>
<b>Generador de alta frecuencia y equipo piezoeléctrico.....</b>	<b>15</b>
<b>Sistema de enfriamiento.....</b>	<b>16</b>
<b>Sensor inductivo de proximidad.....</b>	<b>17</b>
<b>Dispositivo electrónico para el conteo del número de         ciclos.....</b>	<b>18</b>
<b>Fresadora.....</b>	<b>20</b>
<b>Microscopio óptico.....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 1. MATERIAL DE ESTUDIO</b>	
<b>1.1 ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO (ABS).....</b>	<b>23</b>
<b>1.2 USOS MÁS COMUNES DEL MATERIAL ABS.....</b>	<b>23</b>
<b>1.2.1 Otros usos.....</b>	<b>24</b>

1.3 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS.....	25
1.4 MATERIAL DISPONIBLE EN EL MERCADO.....	26
1.5 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LAS PROBETAS DE ABS.....	28
1.6 MEDIDAS NECESARIAS PARA OBTENER ENSAYOS EN FATIGA ULTRASÓNICA DEL MATERIAL ABS.....	29
<b><i>CAPÍTULO 2. SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA OBTENER EL PERFIL DE ENSAYOS EN FATIGA ULTRASÓNICA</i></b>	
2.1 NECESIDAD DEL CÁLCULO DE LOS PERFILES DE PROBETAS.....	30
2.2 SIMULACIÓN EN ANSYS.....	32
2.3 OPTIMIZACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PERFILES DE PROBETAS.....	38
<b><i>CAPÍTULO 3. MAQUINADO DE LAS PROBETAS.</i></b>	
3.1 MAQUINADOS.....	48
<b><i>CAPÍTULO 4. PUESTA EN MARCHA DE ENSAYOS EXPERIMENTALES</i></b>	
4.1 NECESIDADES.....	59
4.2 CONSTRUCCIÓN Y ARMADO DE SEGUNDA COLUMNA PARA ENSAYOS EN FATIGA ULTRASÓNICA.....	60
4.3 ENSAYOS.....	65
<b><i>CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.</i></b>	
5.1 RESULTADOS.....	70
5.2 IMÁGENES DE FRACTURAS.....	76
<b>DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>78</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....</b>	<b>82</b>
<b>PRESUPUESTO Y FINANCIAMIENTO.....</b>	<b>85</b>

## RELACIÓN DE TABLAS, GRÁFICAS E ILUSTRACIONES.

### Tablas.

- Tabla A.1. Características (microscopio)
- Tabla A.2. Especificaciones (microscopio)
- Tabla 1.1. Propiedades del material ABS [11,12].
- Tabla 2.1. Propiedades del material ABS.
- Tabla 5.1. Valores de esfuerzos inducidos en la zona estrecha de la probeta para un desplazamiento longitudinal de  $0.96 \mu\text{m/volt}$  (segunda columna).
- Tabla 5.2. Valores de esfuerzos inducidos en la zona estrecha de la probeta para un desplazamiento longitudinal de  $1.37 \mu\text{m/volt}$  (primera columna).
- Tabla 5.3. Tiempos de vida del material ABS (Probetas sumergidas en agua).

### Figuras.

- Fig. A.1. Variación de la temperatura respecto a la carga y la frecuencia aplicada en el polietileno [1].
  - Fig. A.2. Incremento de temperatura dependiendo de los niveles de carga y del número de ciclos en el material plástico polioximetileno (POM) [1].
  - Fig. A.3. Curvas S-N con ejes logarítmicos para un material plástico hasta  $10^8$  ciclos [4].
  - Fig. A.4. Conjunto generador, piezoeléctrico y multiplicador de desplazamiento.
  - Fig. A.5. Compresor.
  - Fig. A.6. Filtros para el sistema de enfriamiento.
  - Fig. A.7. Sensor inductivo de proximidad.
  - Fig. A.8. Circuito y tarjeta para adquisición de datos provenientes del generador de alta frecuencia.
  - Fig. A.9. Aplicación desarrollada para el programa de cómputo LabView.
  - Fig. A.10. Fresadora.
  - Fig. A.11. Cámara digital Infinity 1.
  - Fig. A.12. Equipo para visualización de superficies de fractura.
- 
- Fig. 1.1. Ejemplo de usos del material ABS en, a) Exteriores, b) Interiores.
  - Fig. 1.2. Presentación disponible de material ABS. a) Vista superior, b) Espesor.
  - Fig. 1.3. Perfil de material ABS.
- 
- Fig. 2.1. Gráficas de desplazamiento y esfuerzos.
  - Fig. 2.2. Gráficas de desplazamiento y esfuerzos del material Nylon 6.
  - Fig. 2.3. Ventana principal de ANSYS.
  - Fig. 2.4. Elección de preferencias.
  - Fig. 2.5. Selección de tipo de elemento.
  - Fig. 2.6. Propiedades del material de trabajo.
  - Fig. 2.7. Perfil de la probeta.
  - Fig. 2.8. Tipo de análisis.
  - Fig. 2.9. Selección del modo “block Lanczos” para la extracción de las frecuencias naturales.
  - Fig. 2.10. Frecuencia natural obtenida cercana a 20 KHz.
  - Fig. 2.11. Programas de cómputo: a) Elementos finitos y b) Programación.
  - Fig. 2.12. Perfiles de probetas de materiales polímeros.
  - Fig. 2.13. Cálculo de la frecuencia natural en ANSYS.
  - Fig. 2.14. Código generado por ANSYS para cada simulación.
  - Fig. 2.15. Reproducción del código generado por ANSYS, en programa DELPHI.
  - Fig. 2.16. Pantalla principal para la optimización del perfil de ensayos ABS.
  - Fig. 2.17. Opción guardar.
  - Fig. 2.18. Listado generado por la herramienta.
  - Fig. 2.19. Introducción del listado producido en DELPHI en el programa ANSYS.

Fig. 2.20. Perfil generado en ANSYS a partir del código generado en DELPHI.

Fig. 2.21. Opciones principales del programa.

Fig. 2.22. Ajuste de ecuación para relacionar la longitud de la probeta con su frecuencia natural.

Fig. 3.1. Refrentado lateral de material ABS.

Fig. 3.2. Prismas rectangulares base.

Fig. 3.3. Máquina para el taladrado de los perfiles.

Fig. 3.4. Bloques perforados.

Fig. 3.5. Base para mordaza.

Fig. 3.6. Mordaza, dimensiones en mm.

Fig. 3.7. Acoplamiento de mordaza.

Fig. 3.8. Modo de sujeción para el maquinado de probetas ABS.

Fig. 3.9. Alineación de los prismas preliminares.

Fig. 3.10. Fresado.

Fig. 3.11. Perfiles terminados para el material ABS.

Fig. 3.12. Placa para maquinados.

Fig. 3.13. Editor de programa para fresadora CNC.

Fig. 3.14. Simulador de maquinados para fresadora CNC.

Fig. 3.15. Maquinados finales.

Fig. 3.16. Probetas finales.

Fig. 3.17. Ubicación de la calibración para la fresadora CNC.

Fig. 3.18. Radio de los arcos para el maquinado de las probetas, dimensiones en mm.

Fig. 4.1. Primeros ensayos.

Fig. 4.2. Piezas de soporte de la segunda columna.

Fig. 4.3. Torneado de la pieza de sujeción.

Fig. 4.4. Fresado de elementos de sujeción de la segunda columna.

Fig. 4.5. Roscados internos de un elemento de sujeción de la segunda columna.

Fig. 4.6. Base para columna de ensayos en fatiga ultrasónica.

Fig. 4.7. Montaje (piezoeléctrico y booster).

Fig. 4.8. Segunda columna para ensayos en fatiga ultrasónica.

Fig. 4.9. Condiciones de los ensayos con inmersión en agua.

Fig. 4.10. Probetas para ensayos en fatiga ultrasónica.

Fig. 4.11. Ensayos preliminares con el equipo nuevo.

Fig. 4.12. Esfuerzo inducido para un desplazamiento de 13.7  $\mu\text{m}$  en el extremo de la probeta.

Fig. 4.13. Esfuerzo inducido para un desplazamiento de 9.62  $\mu\text{m}$  en el extremo de la probeta, segunda columna de ensayos.

Fig. 4.14. Desplazamiento longitudinal para las probetas.

Fig. 5.1. Gráfica de Wöhler (Probetas sumergidas en agua).

Fig. 5.2. Gráfica de Wöhler (Probetas sumergidas en aceite).

Fig. 5.3. Muestra ensayada a 5.72 % del límite elástico del material

Fig. 5.4. Muestra ensayada a 6.24 % del límite elástico del material.

Fig. 5.5. Muestras ensayadas a 6.76% del límite elástico del material.

Fig. 5.6. Muestra ensayada a 7.28 % del límite elástico del material.

Fig. 5.7. Muestra ensayada a 7.8% del límite elástico del material.

Fig. D.1. Efecto del incremento de temperatura al momento de los ensayos.

## GLOSARIO

**Deformación elástica.** O reversible. El cuerpo recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación.

**Deformación plástica.** O irreversible. Modo de deformación en que el material no regresa a su forma original después de retirar la carga aplicada.

**Disipación térmica.** Capacidad de rechazo del calor generado o absorbido.

**Esfuerzo.** Es el término que se emplea para definir la intensidad y la dirección de las fuerzas internas que actúan en un punto dado sobre un plano particular.

**Fatiga mecánica.** Se entiende como: el sometimiento a un elemento o sistema mecánico a cargas oscilantes que no exceden el límite elástico del material.

**Fractura.** Es la separación de un sólido bajo tensión en dos o más piezas.

**Frecuencia natural.** La frecuencia natural es la frecuencia a la que un sistema mecánico seguirá vibrando, después que se quita la señal de excitación.

**Módulo de elasticidad.** Constante que relaciona la tensión aplicada a un cuerpo y su deformación, en el rango de deformación elástica.

**Resonancia mecánica.** La resonancia mecánica es un fenómeno que se produce cuando un cuerpo capaz de vibrar es sometido a la acción de una fuerza periódica, cuyo periodo de vibración coincide con el periodo de vibración característico (o frecuencia propia) de dicho cuerpo.

## **NOMENCLATURA.**

E, Módulo de Young.

$\varepsilon$ , Deformación.

$\lambda$ , Conductividad térmica.

N, Número de ciclos.

$\nu$ , Relación de Poisson.

$\rho$ , Densidad.

$\sigma$ , Esfuerzo aplicado.

$\sigma_Y$ , Esfuerzo de Cedencia.

$\sigma_{VM}$ , Esfuerzo de Von Mises.

$T_g$ , Temperatura vítrea.

$T_m$ , Temperatura de fundición.

$\tau_{max}$ , Esfuerzo cortante máximo en un punto.

.

## INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Los resultados de la resistencia en fatiga de materiales plásticos son relativamente reducidos respecto a las aleaciones metálicas. Algunos autores [1, 2, 3] han abordado el problema utilizando máquinas de fatiga convencionales hidráulicas y eléctricas, pero el estudio de la resistencia a la fatiga de plásticos en resonancia (fatiga vibratoria o ultrasónica) es prácticamente inexistente.

Los primeros estudios en esta materia mediante máquinas convencionales comenzaron por considerar el factor de la temperatura mencionando: dado que los polímeros son visco-elásticos y malos conductores del calor, bajo cargas cíclicas se genera baja disipación de energía en cada ciclo. Como resultado, la temperatura del espécimen se incrementa hasta que el calor generado por ciclo es igual al calor disipado como resultado de conducción, convección y radiación. Dependiendo de la temperatura de prueba, la frecuencia aplicada, amplitud del esfuerzo, la fricción interna, conductividad térmica y calor específico del material en consideración, la temperatura puede incrementarse rápidamente o puede estabilizarse en pruebas particulares [1].

Correspondiente a estudios en fatiga a bajo número de ciclos ( $< 10^7$  ciclos, fatiga convencional) en materiales polímeros se han generado algunos resultados [1]; dichos autores concluyen que mientras más bajo sea el valor de aplicación de la carga, menor será la temperatura en los ensayos, por tanto dependiendo de la carga, a un determinado número de ciclos se tiene un valor de temperatura, Fig. A.1.

El incremento o variación de temperatura es un fenómeno que se presenta de manera muy marcada en los materiales polímeros cuando se someten a cargas por fatiga, debido a su bajo coeficiente de disipación térmica.

Cuando la carga en fatiga alcanza un alto número de ciclos, el incremento de temperatura tiene un comportamiento no lineal: presenta niveles de aumento y posteriormente de estabilización dentro del mismo ensayo, Fig. A.2.

*Fatigue of polymers*

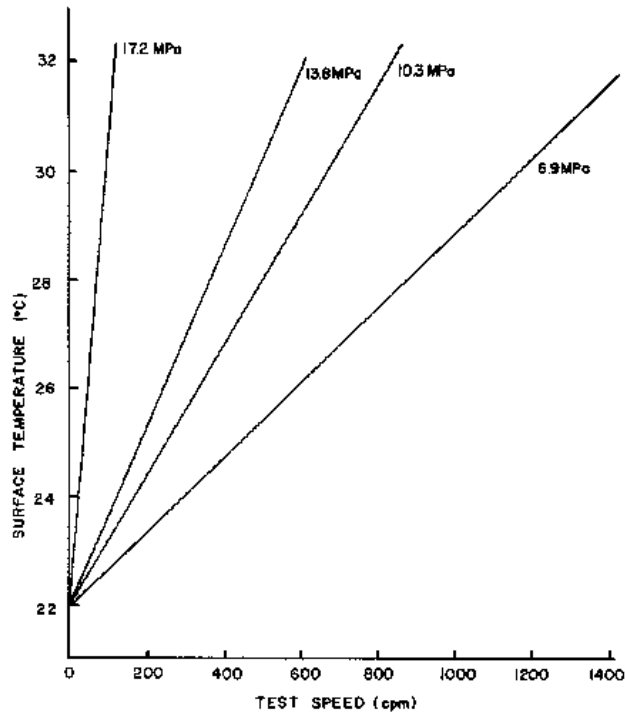


Fig. A.1. Variación de la temperatura respecto a la carga y la frecuencia aplicada en el polietileno [1].

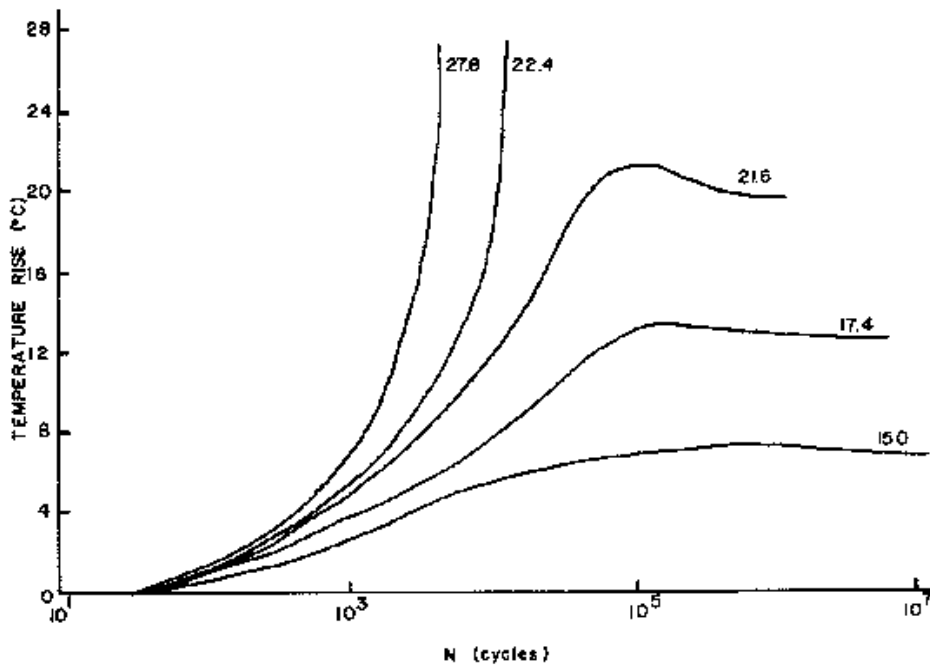


Fig. A.2. Incremento de temperatura dependiendo de los niveles de carga y del número de ciclos en el material plástico polioximetileno (POM) [1].

Un antecedente importante del trabajo que se realizó en esta investigación, fue el estudio llevado a cabo en material plástico nylon “Nylomaq” para determinar su resistencia a la fatiga ultrasónica. Presentado en tesis de licenciatura [4].

### FATIGA MECÁNICA.

La fatiga mecánica es el fenómeno por el cual los materiales fallan cuando están sometidos a cargas variables (dinámicas) y en el que se pueden presentar grietas y/o fracturas en el material. Uno de los factores importantes es el número de ciclos de carga a que está sometida una estructura (cuantas veces se aplica la carga reiterativamente), ya que a medida que se incrementa el número de ciclos, la vida del elemento se reduce. Respecto al comportamiento del material, usualmente se expresa como una reducción de la resistencia a la fatiga del mismo.

La curva que representa la pérdida de la resistencia de una probeta de ensayos con el número de ciclos de trabajo que soporta a un determinado nivel de carga, se le conoce como curva de Wöhler o curva S-N (esfuerzo aplicado contra número de ciclos), como se muestra en la Fig. A.3.

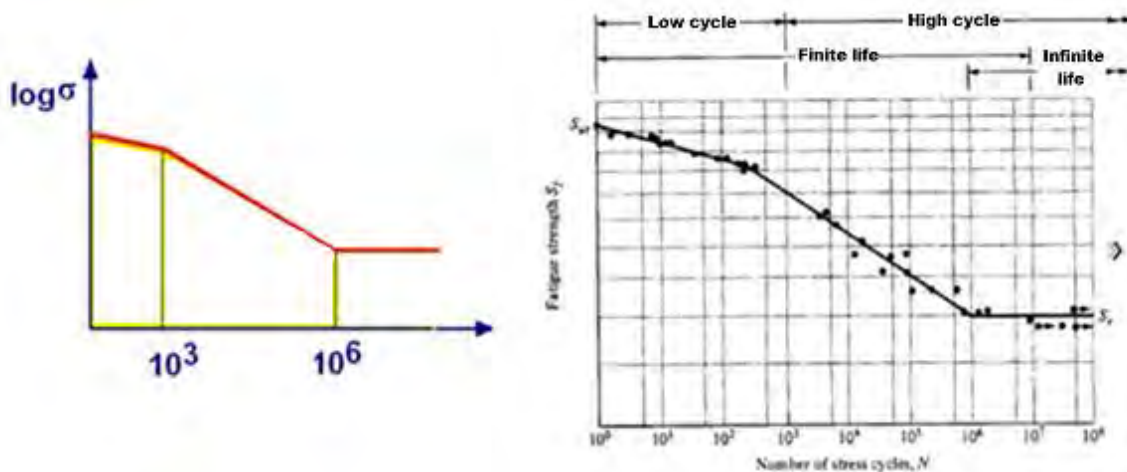


Fig. A.3. Curvas S-N con ejes logarítmicos para un material plástico hasta 10 E8 ciclos [4].

Los ensayos en fatiga mecánica se llevan a cabo con la aplicación de cargas cíclicas cuyos valores máximos no exceden el límite elástico del material. Muchos de los elementos y sistemas mecánicos trabajan bajo estas condiciones: soportan cargas mecánicas oscilantes que no exceden el límite elástico del material; no obstante, con el tiempo pueden provocar inicio de fractura y falla del material.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El estudio del límite de la resistencia a la fatiga ultrasónica de plásticos industriales de alta resistencia empleados en diversas aplicaciones como: engranes, cojinetes, poleas, tolvas, guías de desgaste, rodillos, etc. es reducido. Con la finalidad de obtener valores del límite de la resistencia a la fatiga ultrasónica experimental en este tipo de materiales en un régimen a alto número de ciclos y en un periodo de tiempo razonable, se han implementado técnicas de ensayo en fatiga ultrasónica que cubren estas necesidades. Este tipo de pruebas permiten obtener resultados del límite de resistencia a la fatiga a alto número de ciclos en un tiempo relativamente corto.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Analizar el comportamiento de resistencia a la fatiga a alto número de ciclos en el material Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), utilizando un dispositivo de ensayos en fatiga ultrasónica y microscopía óptica para detectar posibles causas de falla durante el análisis de las superficies de fractura.

### **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Llevar a cabo la calibración del equipo para ensayos en fatiga a alto número de ciclos y la aplicación de la carga para el material Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), definiendo los rangos de voltajes del generador de alta frecuencia.
- Visualizar mediante microscopía óptica las superficies de fractura para establecer posibles causas de falla.
- Obtener experimentalmente la vida en fatiga a alto número de ciclos para el material Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) dentro del rango de carga permisible.

## JUSTIFICACIÓN

El uso de plásticos en diversas aplicaciones industriales ha presentado una evolución exponencial en las últimas décadas. Por ejemplo, en la industria automotriz, aeronáutica, trenes de alta velocidad, de transmisión eléctrica, electrodomésticos, etc. Múltiples componentes que anteriormente eran de aleaciones metálicas, actualmente se han sustituido por plásticos. Así, se requiere conocer el comportamiento de estos elementos plásticos bajo condiciones de carga reales de uso industrial. El polímero ABS es uno de los materiales plásticos de mayor uso industrial, de donde el interés de conocer sus propiedades mecánicas de fatiga en el régimen de alto número de ciclos.

En este proyecto se pretende analizar el comportamiento del plástico ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) bajo condiciones en fatiga ultrasónica. Mediante la realización de ensayos en fatiga ultrasónica es posible obtener resultados experimentales sobre el material plástico de prueba, polímero ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), en el régimen de los 10 a 100 millones de ciclos y más allá. Particular atención implica en los ensayos de fatiga ultrasónica el incremento de temperatura en los mismos, ya que se requiere de una alta disipación de calor, siendo muy baja esta propiedad térmica en los materiales polímeros. Este efecto de incremento de temperatura implica un factor limitante para la aplicación de los ensayos, puesto que es necesario mantener las probetas de este material por debajo de la temperatura vítrea del mismo.

## **HIPÓTESIS**

La implementación de técnicas de ensayo permitirá obtener resultados del límite de resistencia a la fatiga ultrasónica del plástico industrial Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), mediante el uso de equipo trabajando a alto número de ciclos con una frecuencia de 20 KHz. Así como detectar posibles causas de falla mediante el análisis de las superficies de fractura con ayuda de microscopía óptica.

## METODOLOGÍA

Se contemplan las siguientes etapas en el desarrollo del proyecto.

Como etapa preliminar será indispensable lo siguiente:

- Búsqueda bibliográfica
- Obtención del material objeto de estudio.
- Obtención de los perfiles de probeta mediante simulación numérica en paquete de cómputo Ansys.
- Determinación de los esfuerzos inducidos en las probetas objeto de estudio por medio de simulación en Ansys.
- Maquinado de las probetas para ensayos en fatiga ultrasónica.

La etapa final del proyecto comprenderá las siguientes acciones:

- Puesta en marcha de los ensayos experimentales para ensayos en fatiga ultrasónica.
  - o Determinación del rango de aplicación de la carga en el generador de alta frecuencia.
  - o Calibración de los equipos: sensor de desplazamiento.
  - o Realización de los ensayos experimentales.
- Captura de resultados.
- Comparación e interpretación de los resultados obtenidos.
- Análisis de las superficies de fractura.
- Determinación de posibles causas de falla.
- Finalización de la tesis de maestría.
- Publicación de artículos.

## RECURSOS HUMANOS

En este proyecto he trabajado bajo el asesoramiento del Dr. Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz. La puesta en marcha de los equipos y los ensayos es una tarea que se puede realizar de forma independiente por una sola persona, ya que el montaje de las probetas en el equipo es relativamente sencillo al igual que la calibración del sensor de desplazamiento. Se ha solicitado también el apoyo para los maquinados de las probetas a los responsables de los laboratorios de metal-mecánica y de máquinas y herramientas (torno de control numérico) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

## RECURSOS MATERIALES

Se cuenta con los siguientes equipos para la realización de los ensayos en fatiga ultrasónica.

### **Generador de alta frecuencia y equipo piezoeléctrico.**

Para llevar a cabo los ensayos experimentales en fatiga ultrasónica, es necesario un generador de alta frecuencia (20 kHz) cuya salida electrónica se conecta a un dispositivo piezoeléctrico, en donde se convierte la vibración electrónica de alta frecuencia en vibración mecánica del mismo valor. Las vibraciones mecánicas obtenidas en la salida del piezoeléctrico son pequeñas (alrededor de 20  $\mu\text{m}$ ), por lo que es necesario conectar un par de dispositivos multiplicadores; estos son: el “booster” multiplicador con ganancias máximas de 2.5 y el “sonotrodo” con una ganancia de 2.75, Fig. A.4.

Sistemáticamente, los desplazamientos en el extremo libre de las probetas se calibran mediante un proceso de medición de voltaje registrado en el generador de alta frecuencia. En el rango de comportamiento lineal de la probeta (condición de fatiga mecánica), los desplazamientos en los extremos de la probeta son funciones lineales del voltaje aplicado en el generador.



Fig. A.4. Conjunto generador, piezoeléctrico y multiplicador de desplazamiento.

### **Sistema de enfriamiento.**

La alta frecuencia en los ensayos ultrasónicos provoca una elevación de temperatura importante en la sección estrecha de la probeta. En efecto, los materiales plásticos presentan un coeficiente de disipación térmica bajo y resulta necesario implementar un sistema de enfriamiento con aire a presión para controlar la temperatura de la probeta en esta zona que debe ser inferior a la temperatura vítrea del material. El sistema de refrigeración consiste en un compresor de capacidad 225 litros, Fig. A.5. y una presión máxima de 9.36 bar. El aire a presión se hace pasar por un sistema de filtros de partículas y eliminadores de humedad, mostrado en la Fig. A.6, para incidir en la parte estrecha de la probeta y controlar su temperatura, así como inyectarse en el piezoeléctrico con el mismo propósito.



Fig. A.5. Compresor.



Fig. A.6. Filtros para el sistema de enfriamiento.

### **Sensor inductivo de proximidad.**

Este dispositivo electrónico permite la calibración entre el voltaje aplicado del generador y los desplazamientos en los extremos de la probeta. El mismo consiste en el sensor inductivo de proximidad acompañado de un programa de cómputo del fabricante que permite visualizar las gráficas del desplazamiento en tiempo real, Fig. A.7.



Fig. A.7. Sensor inductivo de proximidad.

### **Dispositivo electrónico para el conteo del número de ciclos.**

Se ha diseñado un dispositivo electrónico para el conteo de ciclos y el arranque de los ensayos; este dispositivo consiste en un circuito electrónico programable para iniciar el conteo del tiempo al arranque de un ensayo, así como de un multiplicador para obtener el número de ciclos acumulados en tiempo real. Esta información se despliega en una pantalla LCD (pantalla de cristal líquido). El control de inicio de ensayo es posible mediante la conexión de las entradas de este dispositivo con una de las salidas analógicas del generador de alta frecuencia.

Actualmente se ha implementado un segundo sistema de control que comprende arranque y conteo de número de ciclos mediante la computadora y el programa de cómputo comercial LabView. Este sistema de control tiene como base una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments, la cual es conectada a la computadora y a un circuito que permite la interacción entre el generador, la columna de ensayos y la tarjeta de captura de datos, Fig. A.8. (Circuito desarrollado por estudiantes de licenciatura, asesorados por el Dr. Gonzalo M. Domínguez Almaraz, 2012-2013).

La recolección de datos se realiza desde una aplicación desarrollada para el programa de cómputo LabView. Aplicación igualmente desarrollada para fines de tesis de licenciatura en esta Facultad e igualmente empleada en este proyecto de investigación. Se muestra dicha aplicación en la Fig. A.9, la cual contiene un contador de tiempo y un multiplicador de ciclos.

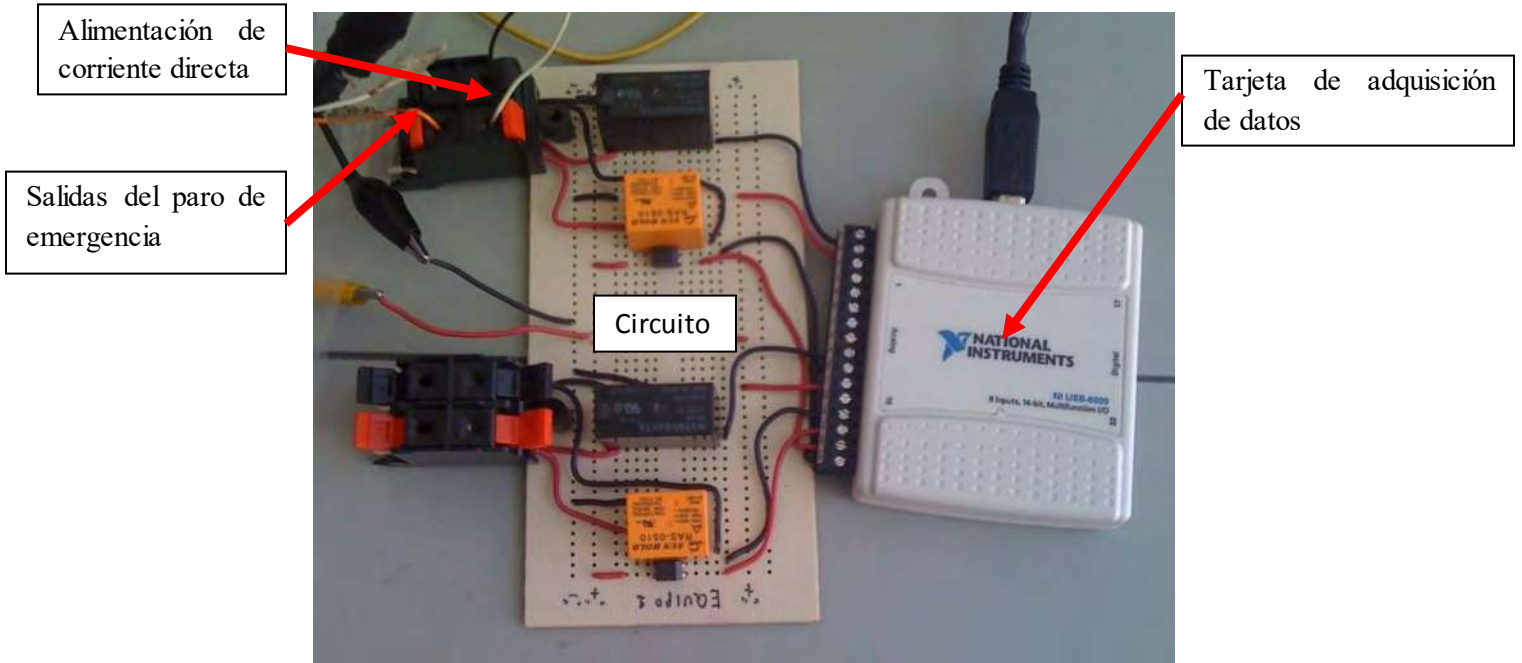


Fig. A.8. Circuito y tarjeta para adquisición de datos provenientes del generador de alta frecuencia.

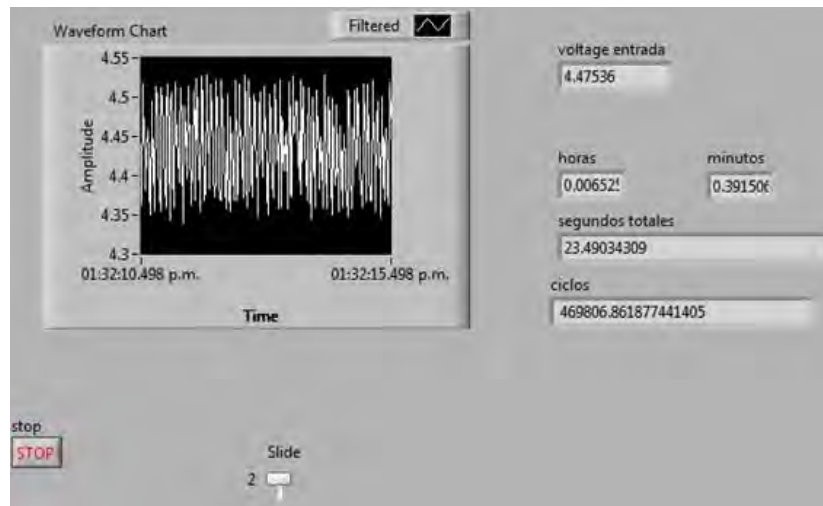


Fig. A.9. Aplicación desarrollada para el programa de cómputo LabView.

En la puesta en marcha de un ensayo y fractura del espécimen de prueba, el generador envía la señal de paro de emergencia, ocasionando que se detenga el ensayo y en paralelo se recolecten los datos simultáneamente a esta acción, en la pantalla de control queda indicado el tiempo de vida preciso de dicho espécimen.

### Fresadora.

El maquinado de las probetas se lleva a cabo en una fresadora de control numérico computarizado, Fig. A.10. que existe en el laboratorio de “Automatización” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.



Fig. A.10. Fresadora.

### Microscopio óptico.

1. Microscopio óptico para las visualizaciones de las superficies de fractura.

Tabla A.1. Características (microscopio).

Cuerpo del Microscopio	Aumento de Zoom	WHSZ10X- HWHSZ10X	WHSZ10X- HWHSZ10X	WHSZ15X-H	WHSZ15X-H
		F.N. 22	F.N. 22	F.N. 16	F.N. 16
		Aumentos Totales	Campo de Visión (mm)	Aumentos Totales	Campo de Visión (mm)
<b>SZX61</b>	0.67x	6.7	32.8	10.1	23.9
	1x	10	22	15	16
	2x	20	11	30	8.0
	3x	30	7.3	45	5.3
	4.5x	45	4.9	67.5	3.6
<b>SZX51</b>	0.8x	8	27.5	12	20
	1x	10	22	15	16
	2x	20	11	30	8.0
	3x	30	7.3	45	5.3
	4x	40	5.5	60	4.0

Tabla A.2. Especificaciones (microscopio).

SZ61				
Ítem		Especificaciones		
<b>Cuerpo del Microscopio</b> SZ51 SZ61-60		<b>SZ61</b>	<b>SZ61 - 60</b>	
	Aumentos	0.67x A 4.5x		
	Relación de Zoom	6.7 : 1		
	Distancia de Trabajo	110		
	Ángulo de Inclinación del Tubo	45°	60°	45°
	Ajuste de Distancia Interpupilar	Izquierda y derecha entrelazadas Rango de ajuste: de 52 a 76mm (utilizando oculares WHSZ10x)		
	Adaptabilidad para Videocámara	-		C-mount (0.5x incorporado)
	Perilla de Regulación de Zoom	Izquierda y derecha entrelazadas Rango de ajuste: de 52 a 76mm (utilizando oculares WHSZ10x)		
Componentes Ópticos	Sin plomo			
<b>Objetivo Auxiliar</b>	Se atornilla en la parte inferior del estativo (M48 rosca 0.75x)			
<b>Oculares</b>	Serie WHSZ "Visión cómoda" Sin plomo			
<b>Plataforma</b> SZ2-ST SZ2-ILST		<b>SZ2 - ST</b>		
		Plataforma Estándar		
	Instalación de Estantivo	Diámetro de montaje: 76mm		
	Ajuste de Enfoque	Distancia de enfoque: 120mm		
	Placa de Platina	SZ2-SPBW (Blanca y negra para protección contra descargas electrostáticas) SP-C (Placa de vidrio transparente)		
Fuente de Luz	Sistema de iluminación por fibra óptica SZ2-LGB desmontable (opcional) Accesorio de iluminación por luz transmitida (SZ2-ILA) desmontable (opcional)			
<b>Peso</b>	Sólo Cuerpo de Zoom	1.300g	3.520g	
	Configuración 3	1.500g	3.720g	

Adicionalmente se cuenta con una cámara digital acoplable para el microscopio óptico (Fig.A.11), con la finalidad de registrar las imágenes para su posterior evaluación (Fig. A.12) y realizar el análisis de las superficies de fractura para poder establecer las posibles causas de falla.



Fig. A.11. Cámara digital Infinity 1.



Fig. A.12. Equipo para visualización de superficies de fractura.

## **CAPÍTULO 1. MATERIAL DE ESTUDIO.**

### 1.1 ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO (ABS).

El Acrilonitrilo Butadieno Estireno o ABS es un plástico muy resistente al impacto (golpes) ampliamente utilizado en la industria automotriz y otros usos tanto industriales como domésticos. Es un termoplástico amorfo. Los materiales de ABS tienen importantes propiedades en ingeniería, como buena resistencia mecánica y al impacto combinado con facilidad para el procesado y una baja densidad respecto de los metales.

La resistencia al impacto de los plásticos ABS se ve incrementada al aumentar el porcentaje de contenido en butadieno pero disminuyen entonces las propiedades de resistencia a la tensión y disminuye la temperatura de deformación por calor.

### 1.2 USOS MÁS COMUNES DEL MATERIAL ABS.

Las aplicaciones más comunes de este polímero son las siguientes:

- Piezas de automóviles (tableros, defensas, etc. Fig. 1.1)
  - El ABS se caracteriza por ser un material muy fuerte y liviano, lo suficientemente fuerte como para ser utilizado en la fabricación de piezas para automóviles.
  - Se utiliza tanto en el interior como en el exterior (Fig. 1.1).
  - Se puede nombrar el panel de instrumento, consolas, cobertores de puertas y otras partes decorativas del interior.
  - Aplicaciones del exterior del automóvil pueden ser la parrilla del radiador, cuna de faros, alojamiento del espejo, defensas (parachoques)
- Tubos, accesorios, particularmente en las tuberías de drenaje, desagüe, ventilación de los edificios y juntas.
- Electrodomésticos.

- Recubrimiento interior y exterior de las puertas de refrigeradores, carcasa de aparatos eléctricos como taladros, televisores, radios, aspiradoras, máquinas de coser y secadores de pelo, etc.
- Máquinas de oficina, carcasas de computadoras y teléfonos.

El ABS puede crear variadas combinaciones de colores. También puede ser cromado, estampado o metalizado. Dependiendo del molde utilizado, las superficies pueden ser opacas, brillantes o satinadas.

### 1.2.1 Otros usos

Entre otros, el ABS se puede utilizar para:

- Contenedores pequeños.
- Dispositivos eléctricos y electrónicos.
- Interiores de aviones.
- Paneles de instrumentos.
- Prototipos.
- En la industria farmacéutica para revestimiento de áreas estériles.



a)



b)

Fig. 1.1. Ejemplo de usos del material ABS en, a) Exteriores, b) Interiores.

### 1.3 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS.

El amplio rango de propiedades que exhibe el ABS es debido a las propiedades que presentan cada uno de sus componentes.

El acrilonitrilo proporciona:

- Resistencia térmica.
- Resistencia química.
- Resistencia a la fatiga.
- Dureza y rigidez.

El butadieno proporciona:

- Ductilidad a baja temperatura.
- Resistencia al impacto.
- Resistencia a la fusión.

El estireno proporciona:

- Facilidad de procesamiento (fluidez).
- Brillo.
- Dureza y rigidez.

Tabla 1.1. Propiedades del material ABS [11,12].

<b>Properties</b>			
Polymer abbreviation	-	-	<b>ABS</b>
Density	ISO 1183	kg/m <sup>3</sup>	<b>1040</b>
Water absorption, equilibrium in water at 23°C	similar to ISO 62	%	<b>1</b>
Moisture absorption, equilibrium 23°C/50% r.h.	similar to ISO 62	%	<b>0.22</b>
<b>Processing</b>			
Processing: Injection moulding (M), Extrusion (E), Blow moulding (B)	-	-	<b>M</b>
Melt volume-flow rate MVR 220 °C/10 kg	ISO 1133	cm <sup>3</sup> /10min	<b>19</b>
Pre-drying: Temperature	-	°C	<b>80</b>
Pre-drying: Time	-	h	<b>2 - 4</b>
Melt temperature, injection moulding	-	°C	<b>220 - 260</b>
Mould temperature, injection moulding	-	°C	<b>30 - 60</b>
Moulding shrinkage, free, longitudinal	-	%	<b>0.4 - 0.7</b>
<b>Flammability</b>			
UL94 rating at 1.6 mm thickness	UL-94	class	<b>HB</b>
Automotive materials (thickness d >= 1mm)	-	-	<b>+</b>
<b>Mechanical Properties</b>			
Tensile modulus	ISO 527-1/-2	MPa	<b>2300</b>
Yield stress, 50 mm/min	ISO 527-1/-2	MPa	<b>45</b>
Yield strain, 50 mm/min	ISO 527-1/-2	%	<b>2.6</b>
Nominal strain at break, 50 mm/min	ISO 527-1/-2	%	<b>10</b>
Flexural strength	ISO 178	MPa	<b>65</b>
Charpy impact strength (23°C)	ISO 179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	<b>180</b>
Charpy impact strength (-30°C)	ISO 179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	<b>100</b>
Izod notched impact strength (23°C)	ISO 180/A	kJ/m <sup>2</sup>	<b>26</b>
Izod notched impact strength (-30°C)	ISO 180/A	kJ/m <sup>2</sup>	<b>8</b>
Charpy notched impact strength (23°C)	ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	<b>22</b>
Charpy notched impact strength (-30°C)	ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	<b>8</b>
Izod notched impact strength, method A (23°C)	ASTM D 256	J/m	<b>300</b>
Ball indentation hardness at 358 N/30 s	ISO 2039-1	MPa	<b>97</b>
<b>Thermal properties</b>			
HDT A (1.80 MPa)	ISO 75-1/-2	°C	<b>80</b>
HDT B (0.45 MPa)	ISO 75-1/-2	°C	<b>92</b>
Vicat softening temperature VST/A/50	ISO 306	°C	<b>105</b>
Vicat softening temperature VST/B/50	ISO 306	°C	<b>96</b>
Max. service temperature (short cycle operation)	-	°C	<b>80</b>
Coefficient of linear thermal expansion, longitudinal (23-80)°C	ISO 11359-1/-2	E-4/°C	<b>0.8 - 1.1</b>
Thermal conductivity	DIN 52612-1	W/(m K)	<b>0.17</b>

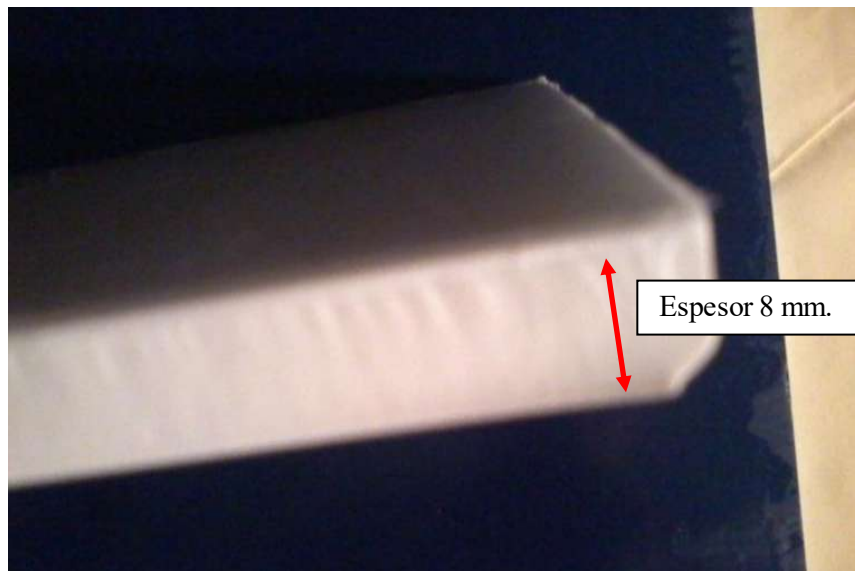
#### 1.4 MATERIAL DISPONIBLE EN EL MERCADO.

Este material puede ser obtenido en diferentes formas y presentaciones para su conformado, mayormente es comercializado en “pellets” y en nuestro caso solo pudo ser obtenido en placas de 21 X 27 cm, en espesores de 4 y 8 mm. De donde la necesidad de cambiar el tipo de perfiles para las probetas que se ha venido manejando. El perfil

propuesto para este tipo de material se presenta más adelante. Este material fue donado por la empresa SENOPLAST ubicada en la ciudad de Querétaro, México.



a)



b)

Fig. 1.2. Presentación disponible de material ABS. a) Vista superior, b) Espesor.

### 1.5 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LAS PROBETAS DE ABS.

Como se ha venido manejando, el perfil básico para los ensayos en fatiga ultrasónica es en forma de “reloj de arena”, el cual ha sido modificado a conveniencia debido a la disponibilidad del material objeto de estudio y el que está representado en la Fig. 1.3.

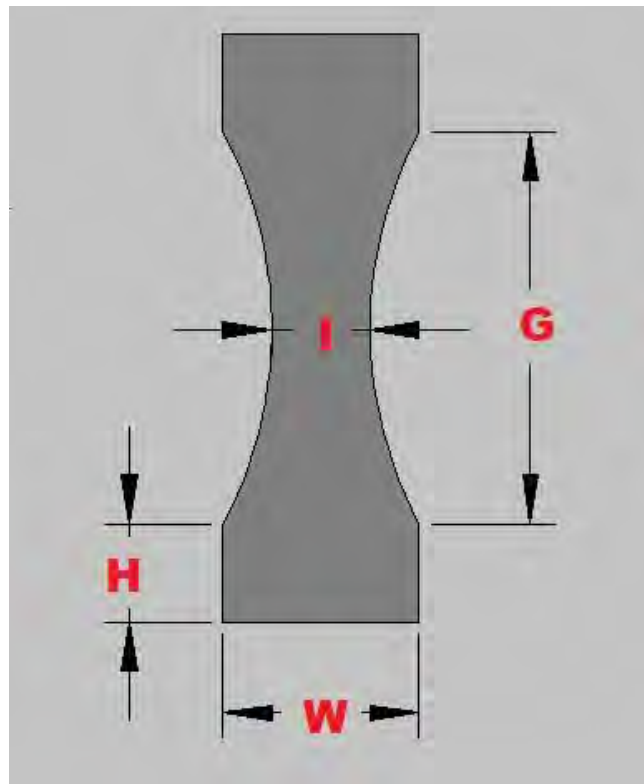


Fig. 1.3. Perfil de material ABS.

Esencialmente se usaron probetas de sección transversal circular, pero debido a la disponibilidad del material, se optó por usar probetas con la sección transversal rectangular. Dicho perfil se calcula por medio del programa de cómputo ANSYS de elemento finito, como se muestra en un capítulo posterior.

Para un perfil con un espesor de 8 mm, los resultados concernientes a los parámetros geométricos mostrados en la Fig. 1.3, son los siguientes:

$G = 20 \text{ mm.}$

$H = 5 \text{ mm.}$

$I = 5 \text{ mm.}$

$W = 10 \text{ mm.}$

En este caso se busca mantener constantes los parámetros geométricos  $G$ ,  $I$  y  $W$ , y hacer variar el parámetro  $H$ . Lo anterior con el objeto de obtener el perfil adecuado que cumpla con las condiciones de resonancia para la puesta en marcha de los ensayos en fatiga ultrasónica.

## 1.6 MEDIDAS NECESARIAS PARA OBTENER ENSAYOS EN FATIGA ULTRASÓNICA DEL MATERIAL ABS.

Tres medidas se tomaron para poder obtener resultados en este material.

1. Nivel de carga bajo. Para disminuir la disipación de energía y no sobrepasar la temperatura de transformación vítrea.
2. Propiedades geométricas de la probeta cumpliendo la condición de resonancia y con dimensiones lo más pequeñas posibles, con el objeto de disminuir el gradiente de temperatura en la parte estrecha de la probeta.
3. Inicialmente un sistema de enfriamiento con aire. Posteriormente este sistema fue sustituido por otro sistema de enfriamiento por agua y por aceite hidrosoluble.

## CAPÍTULO 2. SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA OBTENER EL PERFIL DE ENSAYOS EN FATIGA ULTRASÓNICA.

### 2.1 NECESIDAD DEL CÁLCULO DE LOS PERFILES DE PROBETAS.

Los ensayos en fatiga ultrasónica son llevados a cabo mediante probetas con forma de “reloj de arena”. Siendo la condición de resonancia esencial para los ensayos; esto se consigue calculando los perfiles de los especímenes objeto de estudio de modo que su frecuencia natural sea igual, o lo más cercana a la frecuencia de la fuente excitadora (20 KHz).

El cálculo de la frecuencia natural para las probetas se realiza de manera más rápida con ayuda de programas de cómputo de elemento finito. El programa empleado fue ANSYS, con el cual se consiguen soluciones para los distintos modos de vibración que tiene un perfil determinado. El modo de vibración de interés y el que resulta necesario de obtener igual o muy cercano a la frecuencia de excitación, es aquel en el que se establece una onda elástica estacionaria longitudinal, condicionando el máximo desplazamiento en los extremos de la probeta y mínimo en el centro de la misma. En el caso de los esfuerzos inducidos, este mismo modo de vibración implica un máximo esfuerzo en el centro de la probeta y un mínimo en sus extremos, Fig. 2.1.

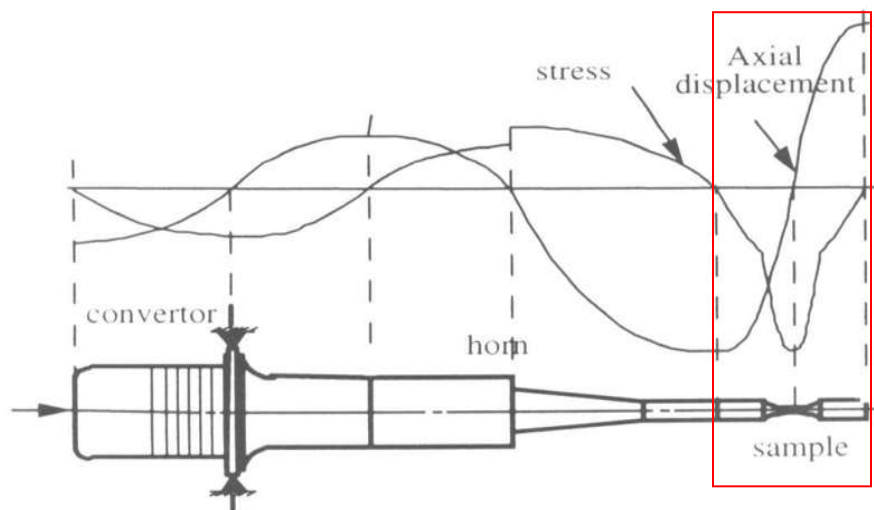


Fig. 2.1. Gráficas de desplazamiento y esfuerzos.

Para reforzar este concepto, de manera alternativa se presentan las gráficas del esfuerzo y el desplazamiento de modo independiente, obtenidas para la probeta de Nylon 6, Fig. 2.2, ensayada con anterioridad.

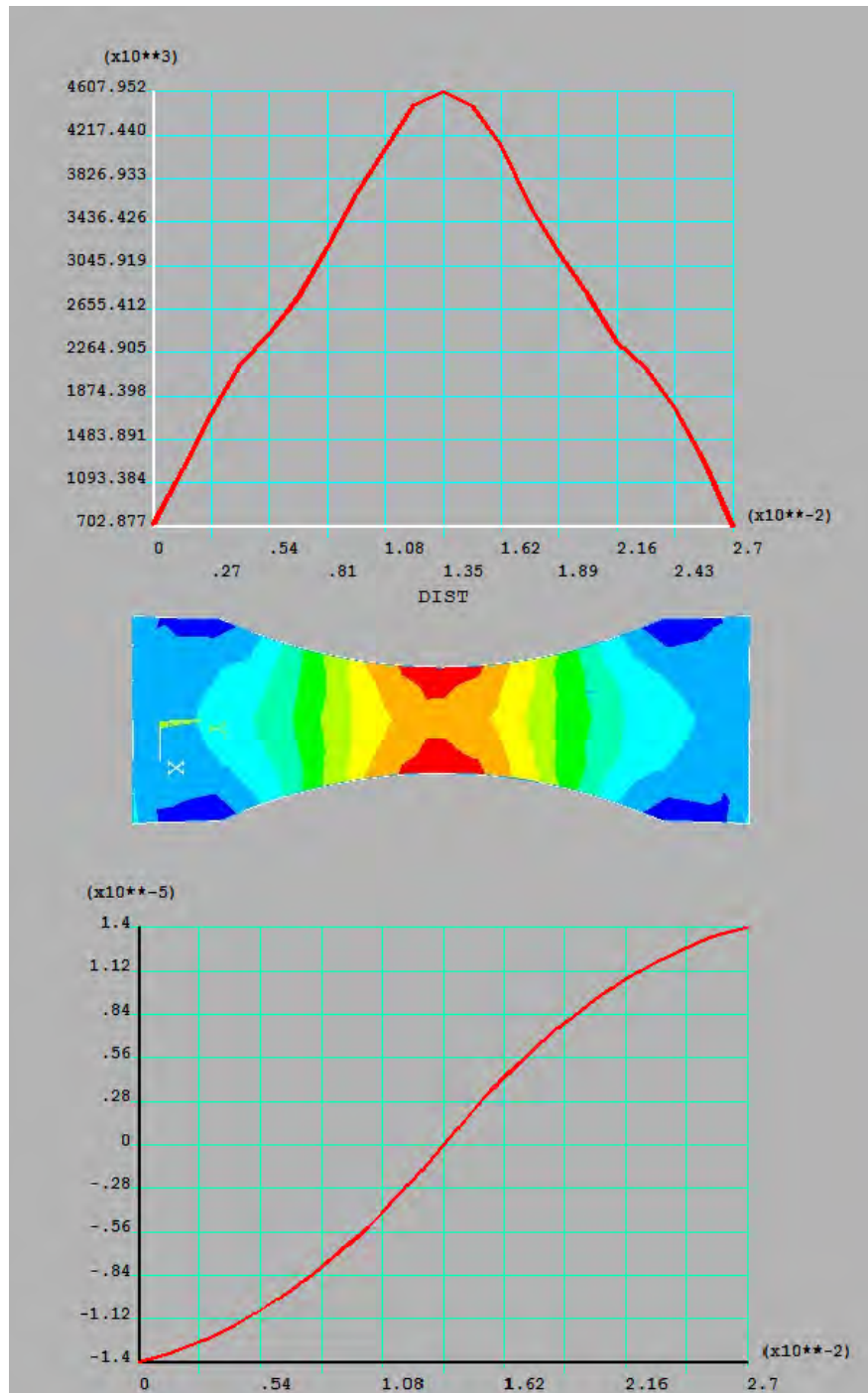


Fig. 2.2. Gráficas de desplazamiento y esfuerzos de material Nylon 6.

## 2.2 SIMULACIÓN EN ANSYS.

La finalidad de realizar el cálculo de la frecuencia natural de las probetas por medio de elemento finito, es el de contar con una herramienta para obtener un resultado aproximado y un perfil apropiado con la mayor rapidez posible, el cual podrá someterse a ensayos preliminares para comprobar que cumple la condición de resonancia. Esta es una herramienta confiable para realizar los ensayos y no constituye un objetivo principal del presente trabajo llevar a cabo simulaciones más detalladas para comprobar un método experimental con el método matemático de solución para la obtención de resultados en fatiga. La finalidad específica es llevar a cabo los ensayos experimentales y esta sección es un apoyo para esta finalidad.

Enseguida se desglosa el procedimiento para la obtención de la frecuencia natural de una probeta de ensayos en fatiga ultrasónica:

Como parte inicial es importante conocer algunas de las propiedades mecánicas y físicas del material, puesto que serán necesarias para simular las condiciones del material. Estas propiedades aparecen a continuación en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades del material ABS.

Propiedad	Valor para el ABS
Módulo de elasticidad	2.3 GPa
Módulo de Poisson	0.4
Densidad	1040 Kg/m <sup>3</sup>

La secuencia para obtener la frecuencia natural de oscilación en las probetas se presenta brevemente a continuación:

- a) Ingresamos al entorno principal para el cálculo por elemento finito, Fig. 2.3.

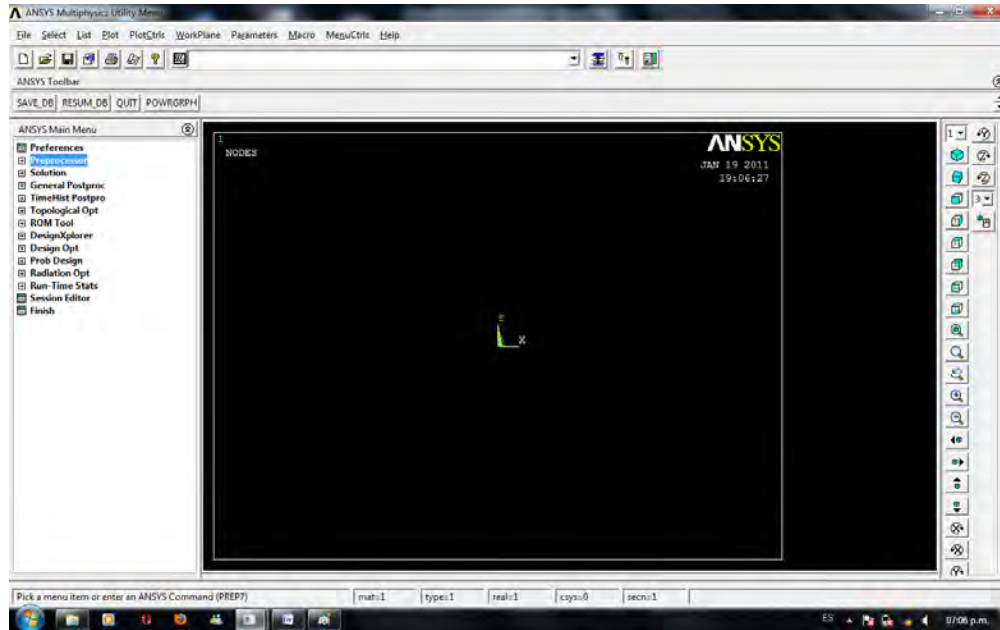


Fig. 2.3 Ventana principal de ANSYS.

- b) Se elige, en el apartado de preferencias, el tipo de análisis que realizaremos, Fig. 2.4. Es importante establecer, en este caso, que se trata de un análisis de tipo estructural ya que debido a la frecuencia natural y al modo de vibración, se inducen esfuerzos tanto de tensión como de compresión en distintos puntos de las probetas de ensayos.

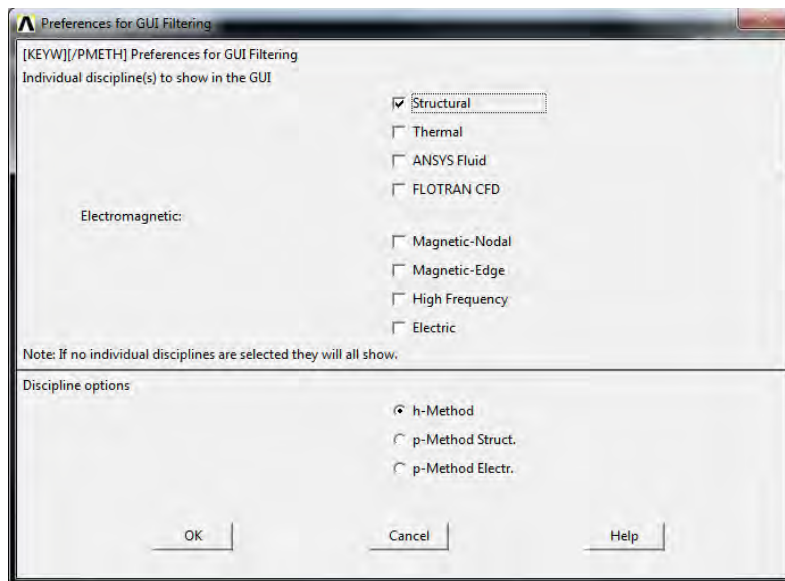


Fig. 2.4. Elección de preferencias.

- c) Se procede con la selección del tipo de elemento que se utilizará para la caracterización del material, Fig. 2.5, que para este caso se trata de un elemento sólido. El programa nos proporciona una cantidad amplia de distintos tipos de elementos y varios de ellos resultan apropiados para este tipo de solución, sin presentar gran diferencia en los resultados arrojados por el programa de cómputo.

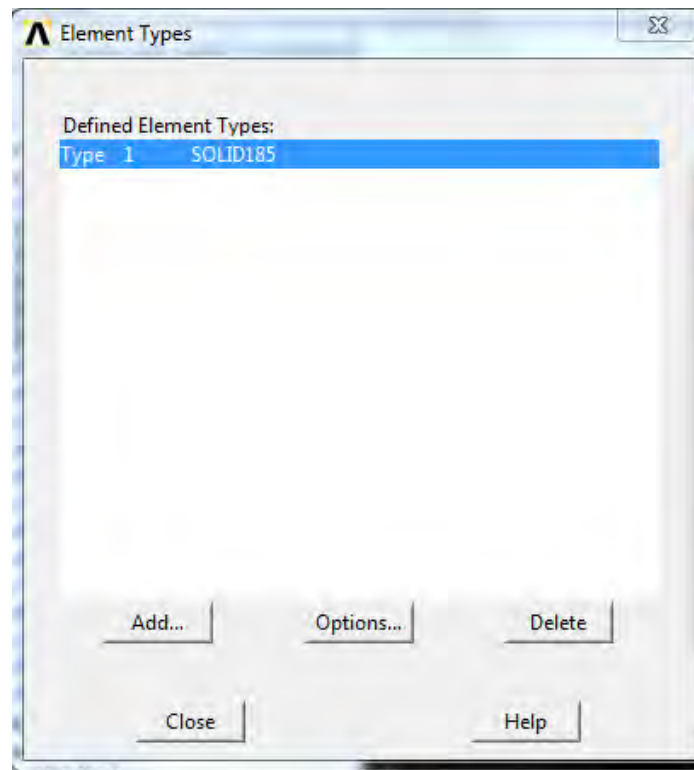


Fig. 2.5. Selección del tipo de elemento.

- d) Como se menciona anteriormente en este capítulo, es necesario caracterizar las propiedades del material original en la simulación numérica. Se introducen las propiedades en el apartado “propiedades del material”, como se muestra en la Fig. 2.6. Las propiedades a capturar son: módulo de elasticidad, densidad y módulo de Poisson.

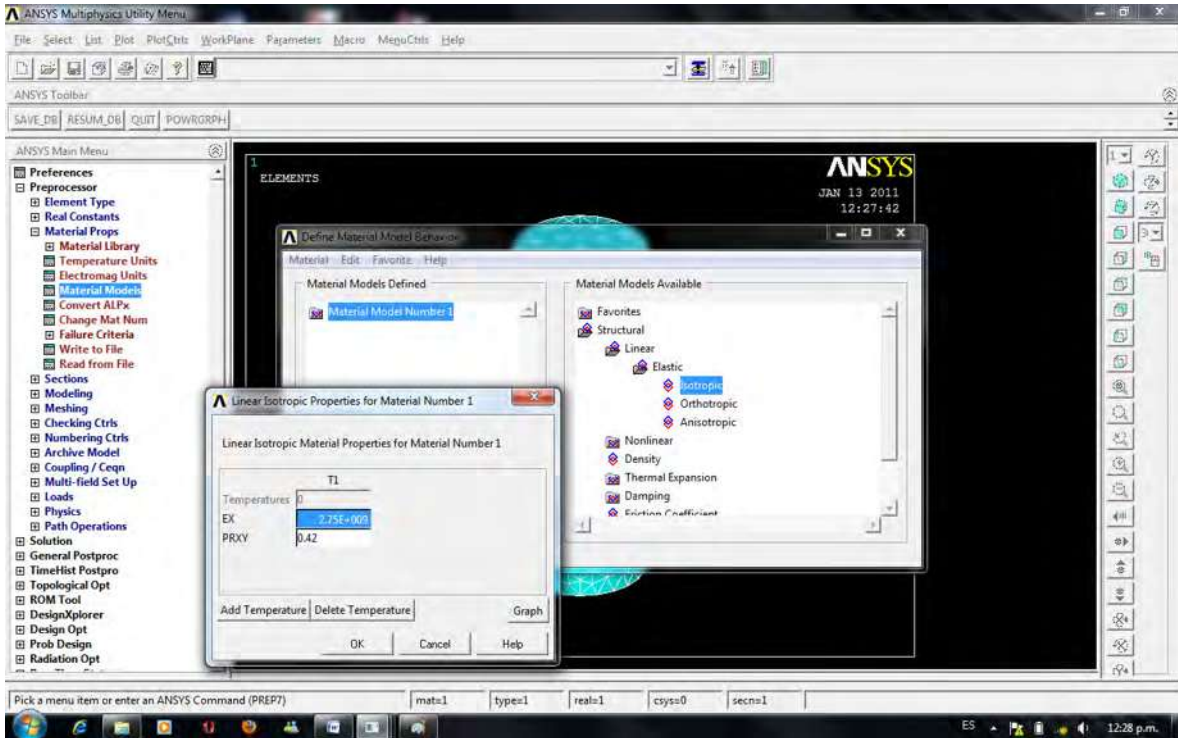


Fig. 2.6. Propiedades del material de trabajo.

- e) Una vez finalizado lo anterior podremos dibujar o exportar un perfil preliminar de probeta (Fig. 2.7), para obtener la solución de sus modos de vibración y sus frecuencias naturales.



Fig. 2.7. Perfil de la probeta.

- f) Como parte final del procedimiento se obtiene la solución para las frecuencias naturales de oscilación, estableciendo una solución del tipo modal, Fig. 2.8.

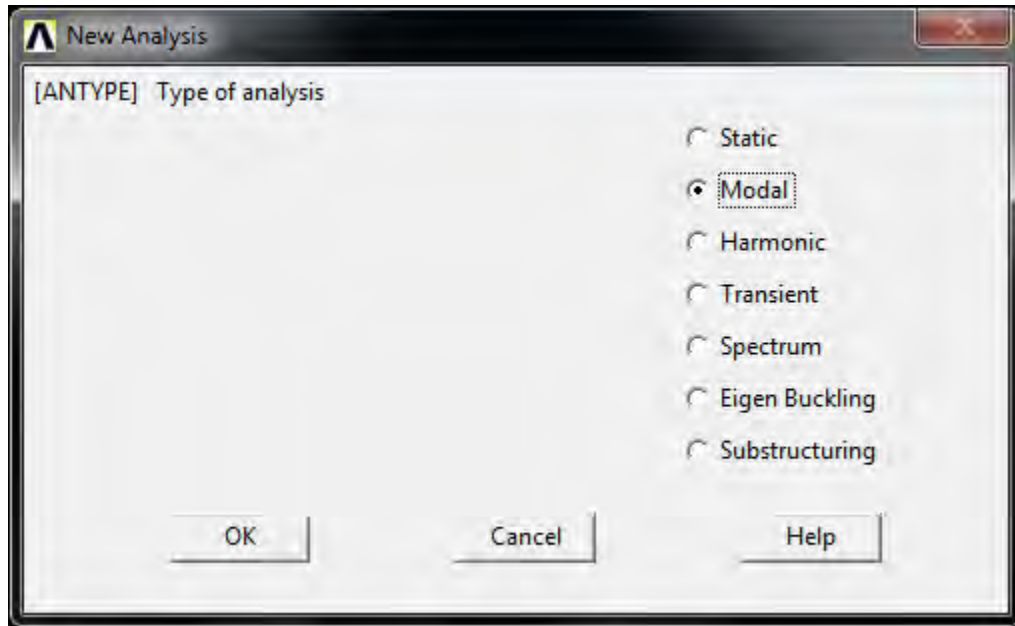


Fig. 2.8. Tipo de análisis.

Adicionalmente se selecciona el método o modo de extracción, que para este caso es el block Lanczos (Fig. 2.9) y un número de posibles soluciones (20 para este caso).

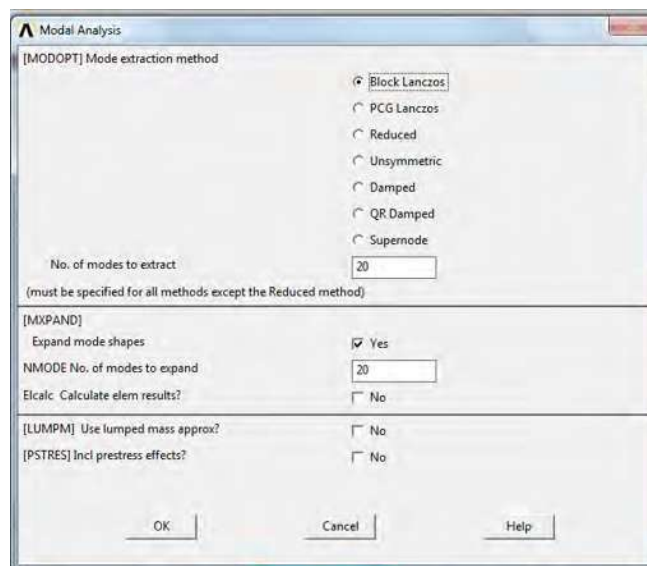


Fig. 2.9. Selección del modo “block Lanczos” para la extracción de las frecuencias naturales.

Una vez obtenida la solución del análisis modal, se analizan cada una de las frecuencias naturales de oscilación obtenidas; la frecuencia retenida es aquella donde se establece una onda estacionaria a lo largo de la probeta (modo de vibración longitudinal) y cumple con las condiciones de frecuencia necesarias para entrar en resonancia con la fuente excitadora.

En esta etapa, es muy difícil obtener una solución cercana a la deseada ya que se comienza el cálculo con un perfil arbitrario; por tal motivo, se hace necesario repetir varias veces este procedimiento con diversos perfiles. El perfil preliminar que se ha obtenido es un avance importante para las posteriores simulaciones puesto que la tarea consiste mayormente en aumentar o disminuir la dimensión longitudinal en los “muñones” o extremos de las probetas, para así disminuir o aumentar respectivamente su frecuencia natural.

Este procedimiento se lleva a cabo para encontrar una solución; como la solución obtenida y representada en la Fig. 2.10.

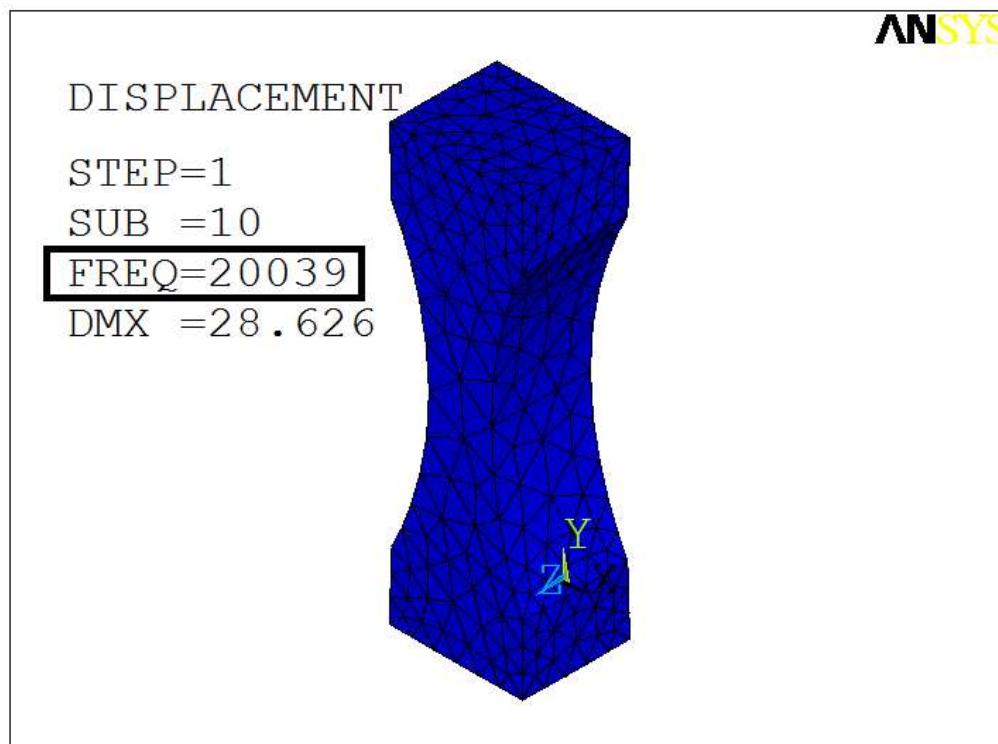


Fig. 2.10. Frecuencia natural obtenida cercana a 20 KHz.

Como es posible observar, la frecuencia natural es de 20039 Hz, la cual es muy cercana a la frecuencia de la fuente excitadora de 20 KHz. Un rango de 1000 Hz de diferencia respecto a la frecuencia base de 20 KHz (19500 Hz a 20500 Hz) es posible para mantener el equipo en funcionamiento. Así, el perfil obtenido cumple con la condición de resonancia mencionada.

*Nota:*

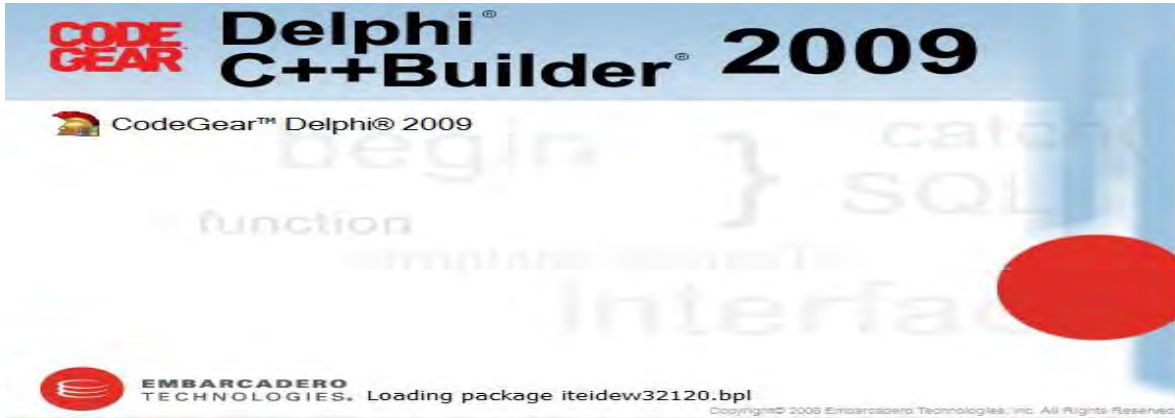
*Podemos apreciar que la obtención de un perfil que cumpla con las condiciones necesarias para que se establezca la condición de resonancia es una tarea que involucra una cantidad considerable de tiempo. Por tal motivo se plantea un modo de “optimización” mediante los paquetes comerciales o programas de cómputo ANSYS y de programación, DELPHY.*

### 2.3 OPTIMIZACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE LOS PERFILES DE PROBETAS.

A continuación se describe la herramienta que se desarrolló para llevar a cabo el cálculo de las probetas de ensayo. Los paquetes de computación empleados para llevar a cabo esta tarea fueron los paquetes comerciales ANSYS 12.1 y DELPHI C++ 2009, Fig. 2.11.



a)



b)

Fig. 2.11. Programas de cómputo: a) Elementos finitos y b) Programación.

El proceso para su desarrollo se siguió de la siguiente manera.

Como mencionado con anterioridad, debido a la disponibilidad del material en el mercado fue necesario cambiar el perfil de los especímenes, los cuales inicialmente eran de sección transversal circular para ensayos en fatiga ultrasónica y se ajustaron a probetas con sección transversal rectangular como se muestra en la Fig. 2.12.

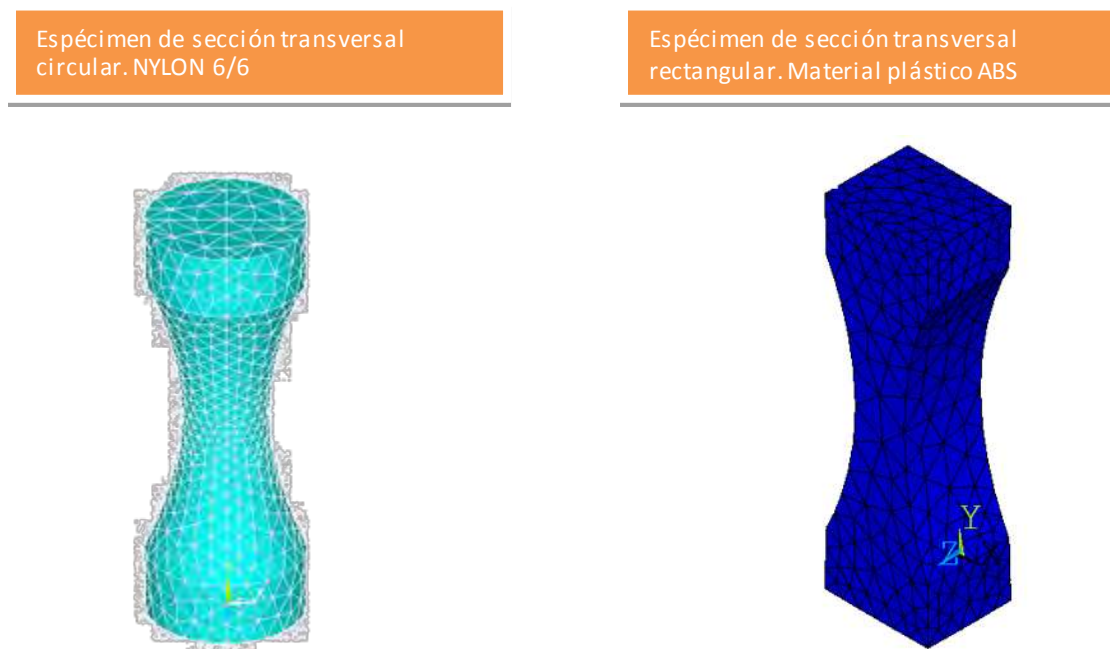


Fig. 2.12. Perfiles de probetas de materiales polímeros.

El punto de partida fue un espécimen que ya había sido calculado y ajustado a la frecuencia de trabajo del equipo (20KHz) y que por lo tanto cumplía con la condición de resonancia, tal y como se muestra en la Fig. 2.13.

SET	TIME/FREQ	LOADSTEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.0000	1	1	1
2	0.0000	1	2	2
3	0.0000	1	3	3
4	0.0000	1	4	4
5	0.0000	1	5	5
6	0.69233E-03	1	6	6
7	8486.9	1	7	7
8	10783.	1	8	8
9	11585.	1	9	9
10	20039.	1	10	10
11	21838.	1	11	11
12	24178.	1	12	12
13	35204.	1	13	13
14	40291.	1	14	14
15	40432.	1	15	15
16	48122.	1	16	16

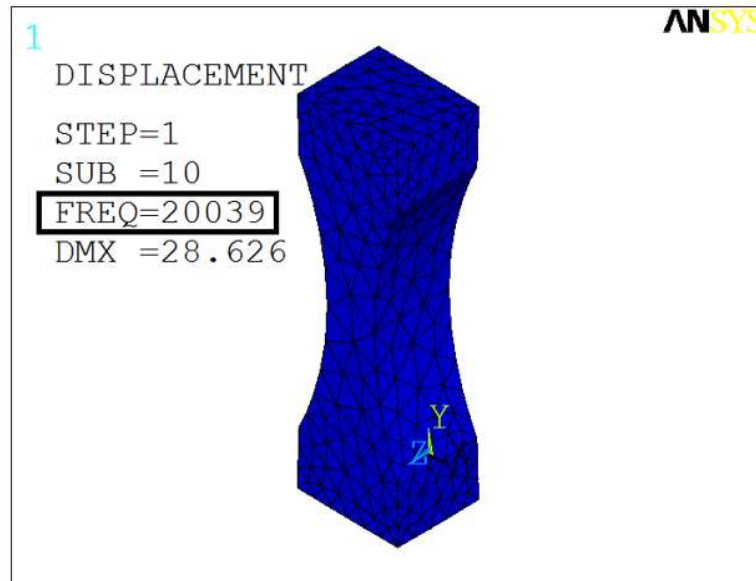


Fig. 2.13. Cálculo de la frecuencia natural en ANSYS.

Una vez que se obtuvo una probeta en estas condiciones, se procedió a obtener el código de ANSYS que era propio de esta probeta. Fig. 2.14.



Fig. 2.14. Código generado por ANSYS para cada simulación.

El archivo mostrado en la Fig. 2.14, es el código que ANSYS desarrolla para identificar cada una de las simulaciones que en él se realizan. Este fue el punto de partida, puesto que una vez obtenido este listado de comandos, la tarea posterior es reproducir dicho listado en el programa de DELPHI. El paso siguiente mediante el empleo del paquete DELPHI es la reproducción del perfil obtenido anteriormente en ANSYS: inicio del proceso de mejora y optimización de los parámetros que se involucran en el código y que afectan directamente las propiedades geométricas del espécimen.

Enseguida, se reproduce el código de ANSYS idénticamente en el programa de cómputo DELPHI. Fig. 2.15.

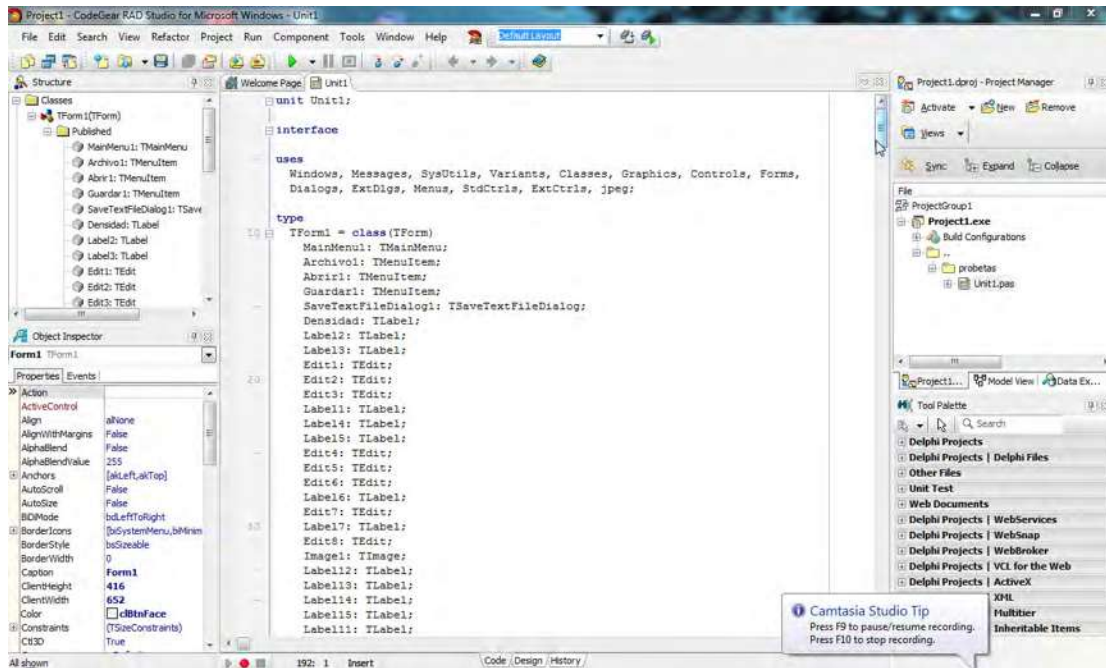


Fig. 2.15. Reproducción del código generado por ANSYS, en programa DELPHI.

Una vez reproducido el código, es necesario identificar las líneas que rigen las características de interés en cada material, tanto propiedades físicas como geométricas y de esta forma poder modificarlas en la etapa de programación, para finalmente obtener un perfil de probeta cumpliendo con las condiciones de resonancia.

La pantalla principal de la herramienta desarrollada se muestra en la Fig. 2.16.

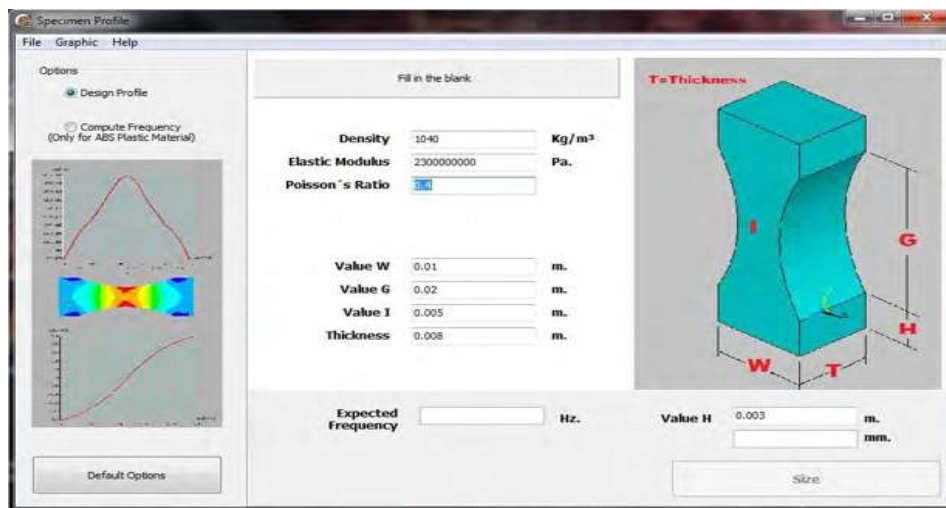


Fig. 2.16. Pantalla principal para la optimización del perfil de ensayos ABS.

Como se muestra en la figura anterior, el usuario tiene opción de cambiar la mayoría de las propiedades físicas y geométricas de un espécimen (siempre y cuando se trate de cualquier material diferente de ABS, ya que para este material, solo se puede modificar el parámetro H), y una vez introducidos, el mismo programa se encarga de hacer la conversión y ajuste y poder generar un archivo de texto reconocible para ANSYS. El archivo se genera desde la opción “GUARDAR” de la herramienta, y es posible guardarlo en cualquier directorio del equipo de cómputo, Fig. 2.17.

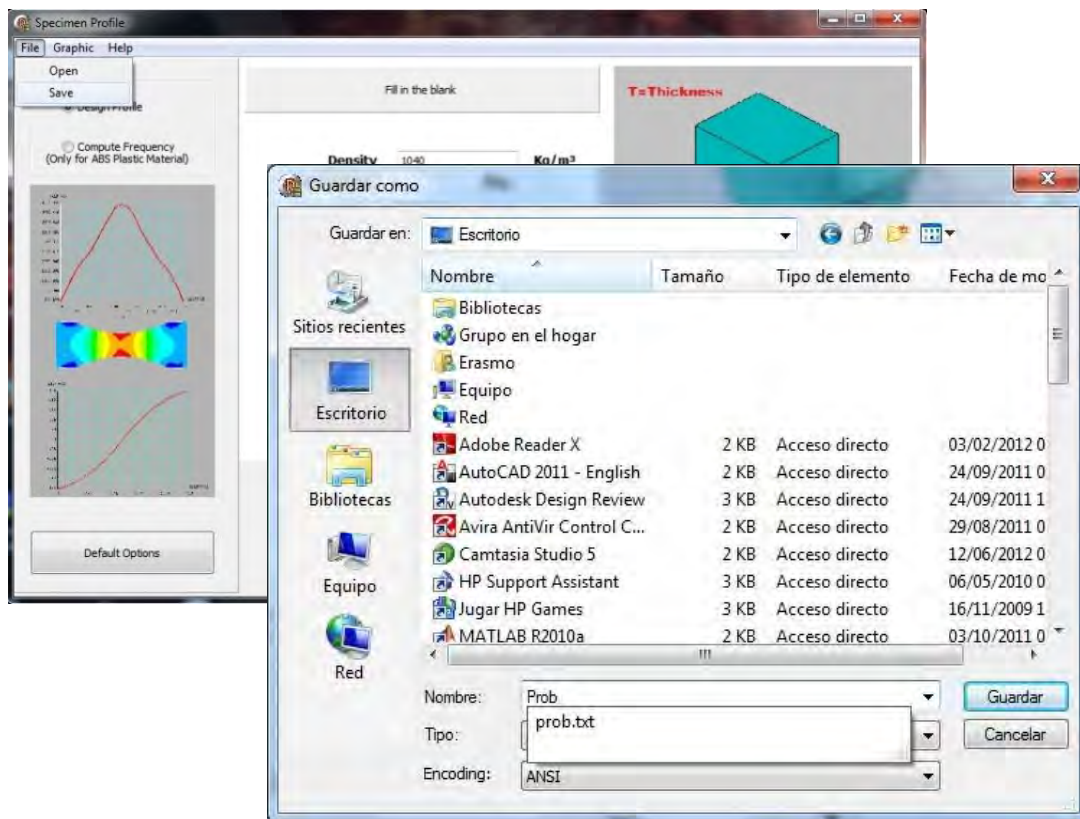


Fig. 2.17. Opción guardar.

Una vez que se ha guardado el nuevo archivo, el siguiente paso es la identificación del archivo, como se muestra en la Fig. 2.18.

```
Profile: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
/BATCH
! /COM, ANSYS RELEASE 12.1   UP20091020   18:57:25   12/04/2011
! /input, menuust, tmp, .....1
! /GRA, POWER
! /GST, ON
! /PLO, INFO, 3
! /GRO, CURL, ON
! /CPLANE, 1
! /REPLOT, RESIZE
WPSTYLE, .....0
/POST1
! **
! **
! /NOPR
! /PMETH, OFF, 0
KEYW, PR_SET, 1
KEYW, PR_STRUC, 1
KEYW, PR_THERM, 0
KEYW, PR_FLUID, 0
KEYW, PR_ELMAG, 0
KEYW, MAGNOD, 0
KEYW, MAGEDG, 0
KEYW, MAGHFE, 0
KEYW, MAGELC, 0
KEYW, PR_MULTII, 0
KEYW, PR_CFD, 0
/GO
! **
! **
! /COM,
! /COM, Preferences for GUI filtering have been set to display:
! /COM, Structural
! **
! **
! /NOPR
! /PMETH, OFF, 0
KEYW, PR_SET, 1
KEYW, PR_STRUC, 1
```

Fig. 2.18. Listado generado por la herramienta.

Este archivo ahora puede ser utilizado en el programa ANSYS y de este modo generar el perfil deseado, Fig. 2.19.

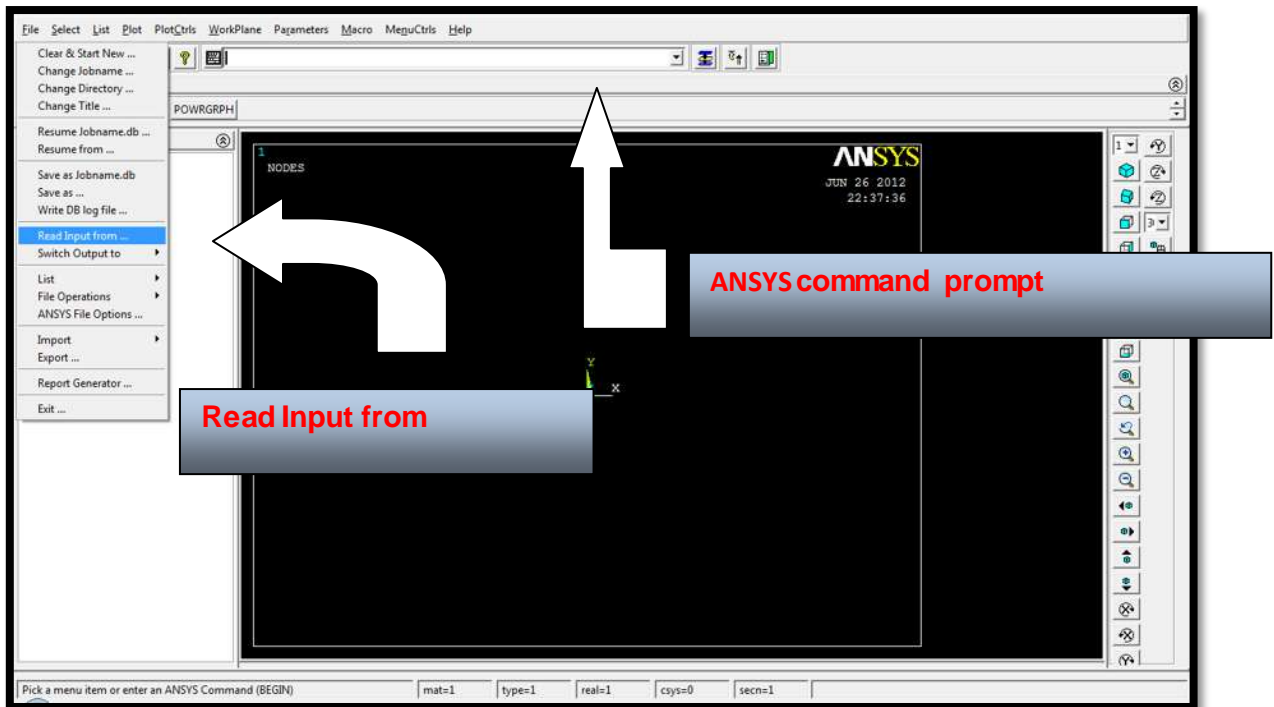


Fig. 2.19. Introducción del listado producido en DELPHI en el programa ANSYS.

El archivo puede ser integrado de dos formas diferentes:

1. Haciendo el copiado de todo el código generado e introducirlo en el ANSYS command promp, o bien.
2. Indicar la ubicación del archivo y leerlo directamente desde el menú de archivo en la opción “read input from”.

Con lo anterior se generará el perfil deseado, Fig. 2.20.

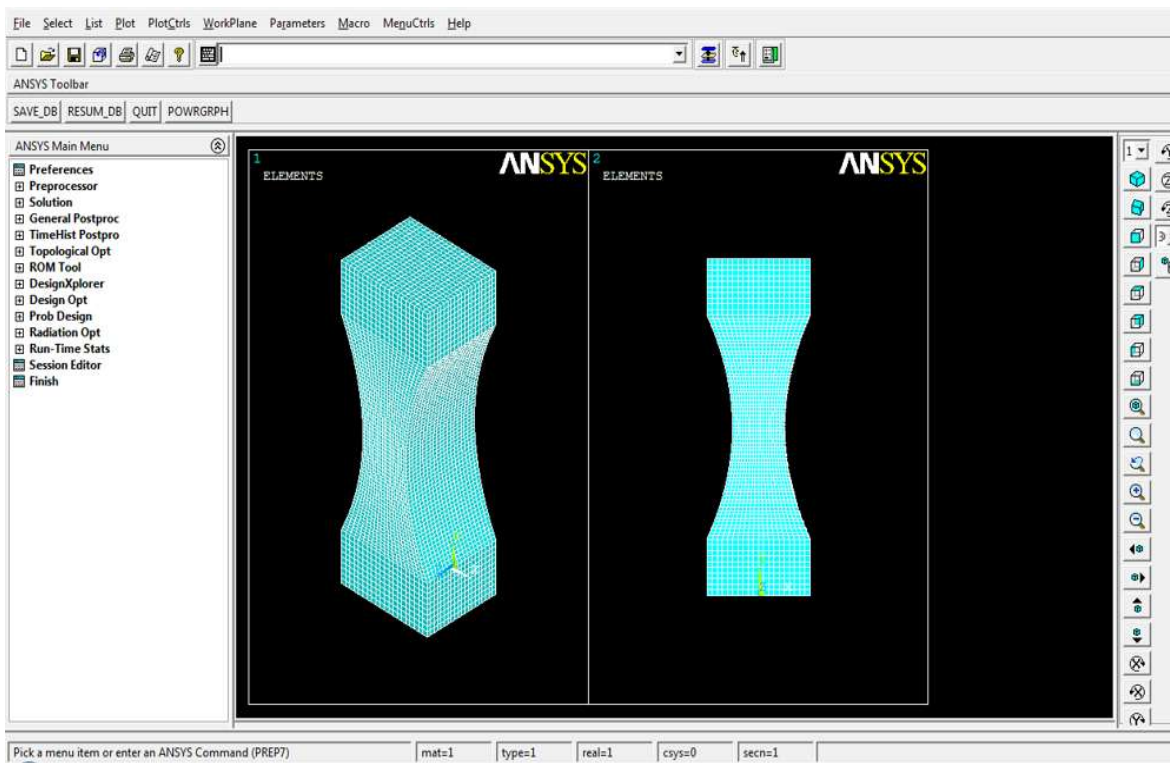


Fig. 2.20. Perfil generado en ANSYS a partir del código generado en DELPHI.

El paso final es generar una solución modal ANSYS y comprobar la frecuencia natural del espécimen; este último paso no requiere un empleo importante de tiempo.

Adicionalmente, como se puede observar en la pantalla principal de la herramienta desarrollada en DELPHI, Fig. 2.16, se cuenta con dos opciones principales para poder generar un perfil, que son:

- a) *Design profile*. Que se utiliza para crear un perfil de cualquier material y con las dimensiones que nosotros especifiquemos, pero será necesario evaluar la frecuencia natural de ese perfil en ANSYS.
- b) *Compute frequency*. Con esta opción es necesario establecer las propiedades predeterminadas ya que se utiliza para calcular perfiles exclusivamente para el material plástico ABS a partir de una frecuencia dada. Las propiedades de este material se incluyen automáticamente al presionar el botón “default options”, Fig. 2.21.

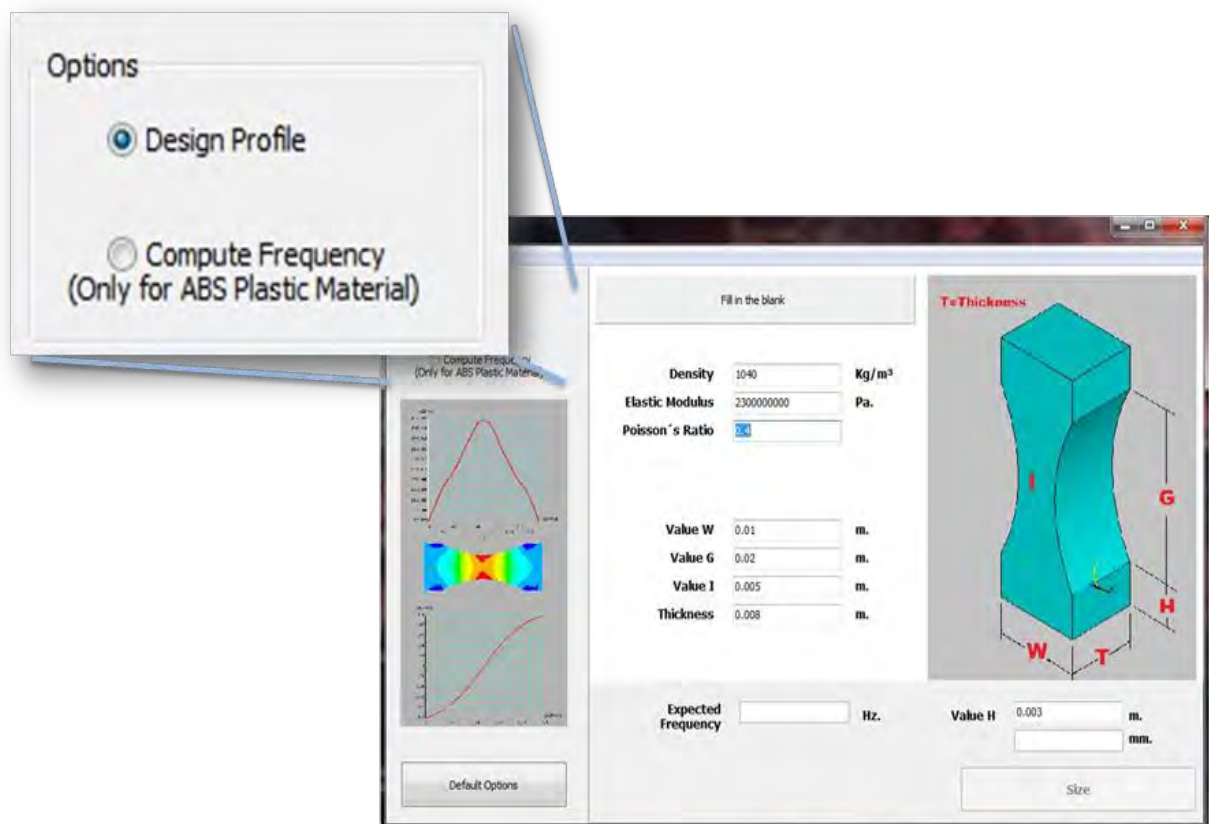


Fig. 2.21. Opciones principales del programa.

Es importante mencionar que para poder obtener el perfil adecuado del material ABS correspondiente a su frecuencia natural, fue necesario realizar una cantidad importante de simulaciones mediante el programa ANSYS. Con los datos obtenidos en cada simulación se construyó una tabla para ajustar una ecuación que se acercara a la variación de su frecuencia natural de oscilación, respecto de la longitud de la probeta (parámetro H), como se muestra en la Fig. 2.22.

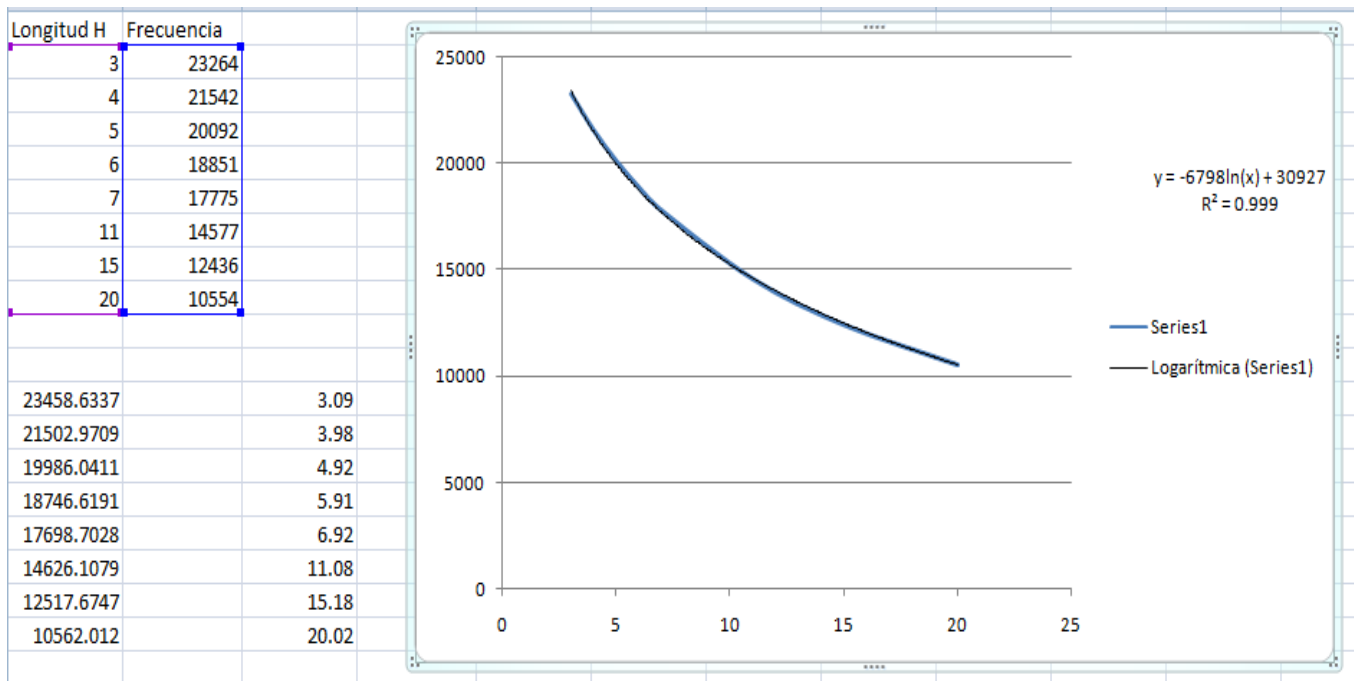


Fig. 2.22. Ajuste de ecuación para relacionar la longitud de la probeta con su frecuencia natural.

Los valores mostrados en la parte superior de esta figura, son los valores obtenidos en la simulación en ANSYS. Los valores que aparecen en la parte inferior, son los obtenidos mediante la ecuación ajustada  $Y = -6798 \ln(x) + 30927$ , obtenida con ayuda del programa de cómputo Excel. Con la solución obtenida en DELPHI, se desarrolla de igual manera la gráfica de estos resultados con dicha herramienta y se genera la curva de variación de frecuencia con la variación del parámetro geométrico H, resultando una gráfica idéntica a la mostrada en la Fig. 2.22.

## ***CAPÍTULO 3. MAQUINADO DE LAS PROBETAS***

### **3.1 MAQUINADOS**

El maquinado de las probetas es una de las tareas que involucra una gran cantidad de trabajo adicional, ya que, por las dimensiones reducidas de las probetas, hubo la necesidad de buscar y acoplar distintos elementos al equipo principal, que en este caso fue la fresadora, para poder lograr así el maquinado de dichos perfiles. Este material pudo adquirirse bajo una presentación no muy conveniente para dar paso a maquinados inmediatos como se venía haciendo previamente en los ensayos. Estos últimos maquinados se llevaron a cabo mediante el torno de control numérico puesto que se trataba de probetas muy parecidas a las actuales (con forma de reloj de arena); es decir, probetas de sección transversal circular. En este caso, por tratarse de probetas con sección transversal rectangular, se procede de la siguiente manera:

Primeramente fue necesario cortar estas “placas” de material, en prismas rectangulares de aproximadamente 12 X 8 mm. y 21 cm. de largo y hacer un refrentado inicial en la fresadora, tal como se muestra en la Fig. 3.1, para obtener así las medidas deseadas: 10 X 8 mm. de sección transversal.



Fig. 3.1. Refrentado lateral de material ABS.

Una vez obtenida la medida deseada, se corta dicha barra en bloques de entre 3.5 y 4 cm para llevar a cabo un nuevo refrentado, pero esta vez, en los extremos de los bloques obtenidos. La finalidad de este refrentado, es dimensionar los prismas rectangulares de manera que la longitud total corresponda a la dimensión final de la probeta de ensayos (30 mm), dejando así elementos base para los maquinados finales tal y como se muestra en la Fig. 3.2.

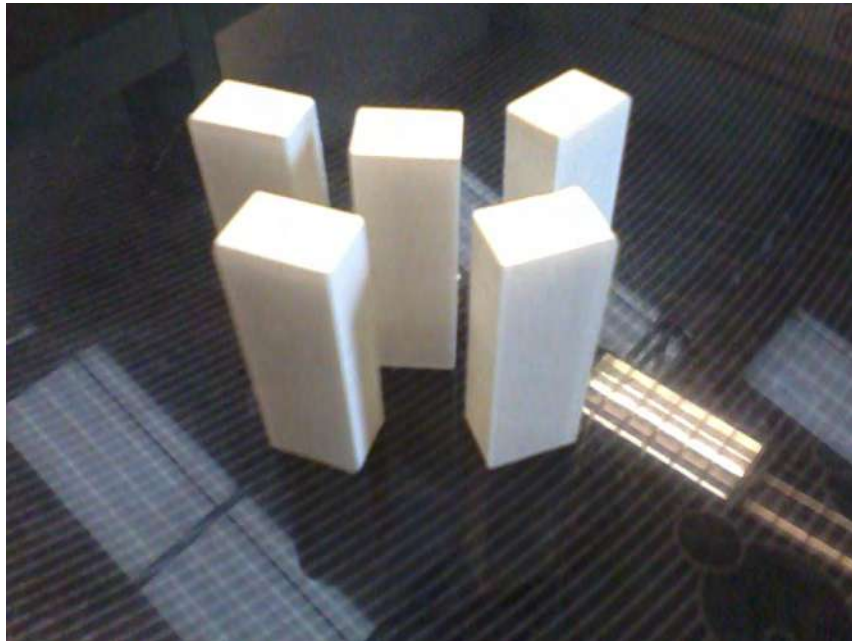


Fig. 3.2. Prismas rectangulares base.

Puesto que las probetas requieren un roscado interno para poder ser acopladas al equipo de fatiga, se hace necesario hacer una perforación (Fig. 3.3) en uno de los extremos del espécimen con la finalidad de que esta perforación aloje un perno para el acoplamiento. En dicha perforación se procede a hacer el machueleado, Fig. 3.4. Es importante señalar que esta tarea se recomienda poner en práctica una vez que ya se tienen los perfiles con la forma final.



Fig. 3.3. Máquina para el taladrado de los perfiles.



Fig. 3.4. Bloques perforados.

Siendo los bloques muy pequeños, la sujeción en la fresadora es una tarea complicada, puesto que el tamaño de las mordazas que se emplean en ella es de medidas muy específicas y sobrepasan por mucho las necesidades de sujeción que se requieren. La solución al problema se obtuvo de la siguiente manera.

Como se muestra en la Fig. 3.5. Se emplearon elementos de las mordazas originales, aunque en este caso se acopla un tornillo al cual se le hace una perforación en el centro y a todo lo largo del mismo que a su vez lleva un roscado.



Fig. 3.5. Base para mordaza.

Esta pieza nos sirve de base para la sujeción con un nuevo diseño de mordazas que fueron fabricadas y utilizadas en esta tesis. Las mordazas presentan la forma y dimensiones que aparecen en la Fig. 3.6.

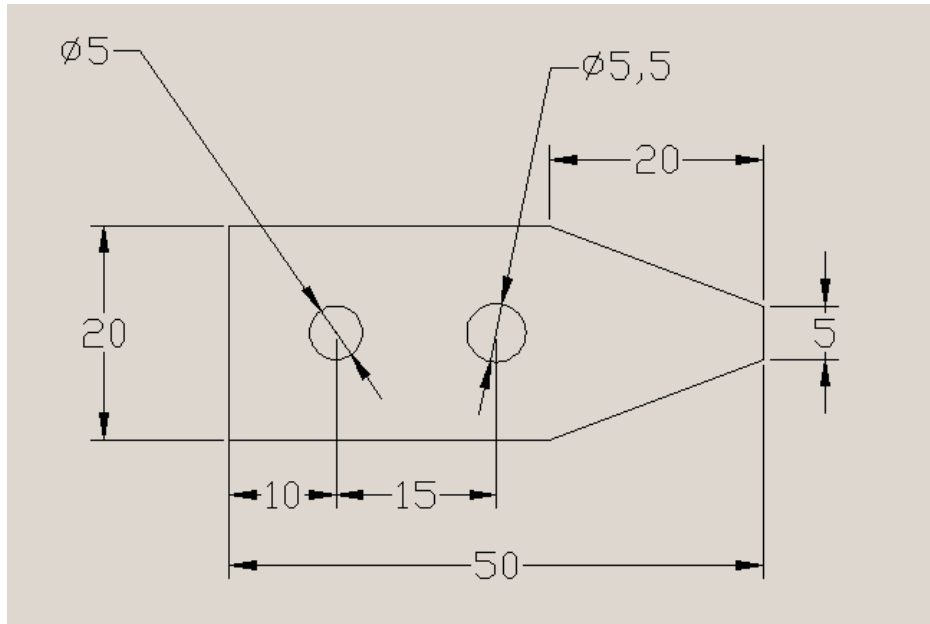


Fig. 3.6. Mordaza, dimensiones en mm.

Para finalmente obtener la configuración mostrada en la Fig. 3.7. para una de las mordazas.



Fig. 3.7. Acoplamiento de mordaza.

El conjunto de las dos mordazas que permiten el maquinado de las probetas ABS se muestra en la Fig. 3.8.



Fig. 3.8. Modo de sujeción para el maquinado de las probetas ABS.

Una vez solucionado el problema de la sujeción y para evitar desajustes al momento del maquinado, se procede con la alineación de las probetas mediante la ayuda de un indicador de carátula, esencial para comenzar cada operación de maquinado en este equipo. Cabe señalar que la calibración debe hacerse en cada una de las probetas, ya que el programa que se generó para que la fresadora lleve a cabo los maquinados depende de los valores de la alineación y de las medidas específicas de cada perfil, Fig.3.9.



Fig. 3.9. Alineación de los prismas preliminares.

Una vez terminado el paso anterior, se requiere un par de minutos para que la fresadora realice el maquinado del cuello de la probeta, Fig. 3.10.



Fig. 3.10. Fresado.

Obteniéndose finalmente perfiles de probeta como los mostrados en la Fig. 3.11.



Fig. 3.11. Perfiles terminados para el material ABS.

Al final de la tesis, un segundo método se adoptó para los maquinados. Este método permite de maquinar un número mayor de probetas en un tiempo considerablemente menor. Este segundo método consiste en el maquinado preliminar de una placa de acero en la que se incrustan los prismas rectangulares de material ABS y se procede a su maquinado con la fresadora de control numérico computarizado, como se aprecia en la Fig. 3.12.

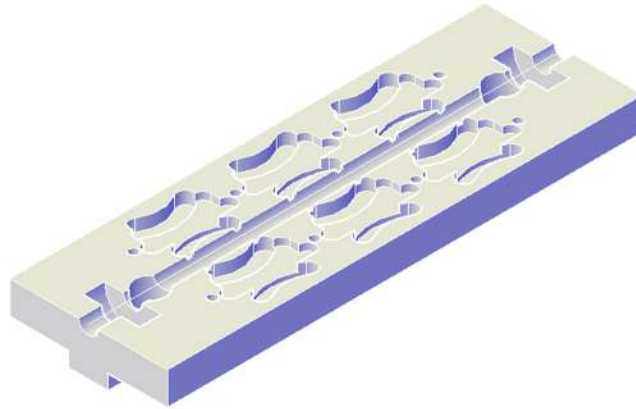


Fig. 3.12. Placa para maquinados.

La fabricación de esta placa para maquinado consistió en realizar una serie de programas para determinar las trayectorias de la herramienta de corte y evitar de este modo algún error. Antes de efectuar cualquier maquinado, se verifica el programa hecho mediante un simulador y posteriormente se procede al maquinado como tal, Fig. 3.13, Fig. 3.14.

```

EDIT 1/3  \PROG\ERASF.TXT  RUN:  ERASF.TXT  0:10:35
ROW  1  COL  1  INSERT
N001 G54;
N002 G21;
N003 %;
N004 G90;
N005 M03;
N12870 G00 Z25;
N12871 G00 X44.545 Y6.905;
N12872 G00 Z-4;
N12873 G01 X44.816 Y7.073 Z-4;
N12874 G01 X45.089 Y7.236 Z-4;
N12875 G01 X45.365 Y7.394 Z-4;
N12876 G01 X45.644 Y7.547 Z-4;
N12877 G01 X45.926 Y7.695 Z-4;
N12878 G01 X46.21 Y7.838 Z-4;
N12879 G01 X46.497 Y7.976 Z-4;
N12880 G01 X46.786 Y8.109 Z-4;
N12881 G01 X47.078 Y8.237 Z-4;
N12882 G01 X47.371 Y8.36 Z-4;
N12883 G01 X47.667 Y8.478 Z-4;
N12884 G01 X47.965 Y8.59 Z-4;
G00 GOF  G40 OFF_COMP G50 OFF_TRAN
G01 GO  G41 COMP_L  G51 SCALE
G02 ARCL G42 COMP_R G68 ROTATE
G03 ARCR G43 COMP_TL G51.1 MIRROR
G04 DWELL G49 OFF_TL G51.2 XY2
G08 ARC  G90 ABS
G2.1 SPLL G91 INC  M70 DNC
G3.1 SPLR G20 IN  M71 IF
G28 GO_HOME G21 MM  M72 GOTO
G24 RECT_PKT G52 ZERO_AT M73 REPEAT
G25 CIR_PKT G92 CURRENT M74 RPT_END
G34 CIR_CVC G53 COORD0 M98 CALL
G81 DRILL  G54 COORD1 M99 SUB_END
G83 DRILL_Q G55 COORD2 M00 STOP
G84 TAP  G56 COORD3 M01 OPT_STOP
G85 BORE  G57 COORD4 M02 END
G17 XOY  F FEED M03 SPDL_ON
G19 YOZ  S SPEED M05 SPDL_OFF
G18 ZOY  T TOOL  M08 CLNT_ON
                M09 CLNT_OFF
0: 9:42
0: 9:50
MARK COPY DELETE UNDELE SEARCH SYNTAX SAVE
MACH HLP
CONTOUR
HOLE
APPEND
CLEAR
MARK ALL
SAVE AS
EXIT
MONT
HELP
    
```

Fig. 3.13. Editor de programa para fresadora CNC.

ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA ULTRASÓNICA DEL PLÁSTICO INDUSTRIAL ABS  
(ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO)

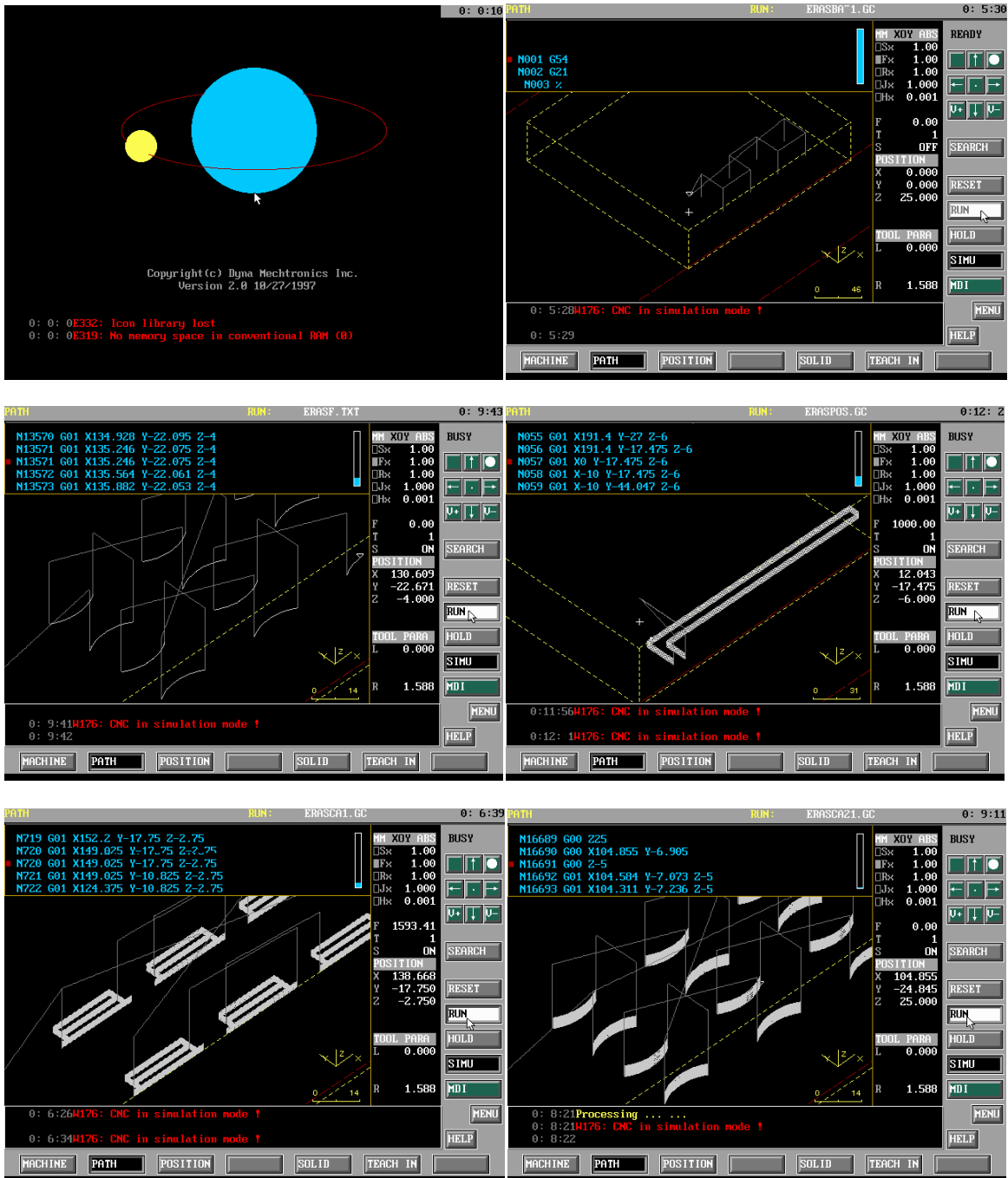


Fig. 3.14. Simulador de maquinados para fresadora CNC.

Terminada la tarea anterior se realizan los maquinados correspondientes para la construcción de la placa y se acoplan los programas para después ser empleados con el objeto de maquinar las probetas y conseguir las mismas trayectorias de la herramienta de corte.

Siguiendo este procedimiento, se consigue un maquinado más uniforme en el resto de las probetas, Fig. 3.15, Fig. 3.16



Fig. 3.15. Maquinados finales.



Fig. 3.16. Probetas finales.

Es importante mencionar que el aumento de productividad en la cantidad de probetas maquinadas, pasó de maquinar 1 probeta por hora, a maquinar 12 probetas por hora.

Información concerniente a este proceso de maquinado, se pueden mencionar los siguientes puntos de interés:

- a) El diámetro de la herramienta de corte es de 6.25 mm.
- b) La calibración para el maquinado en la fresadora CNC se toma al centro del extremo derecho de placa de maquinados, tal como se representa en la Fig. 3.17.
- c) Los diámetros de los arcos de trayectoria en la probeta se indican en la Fig. 3.18.

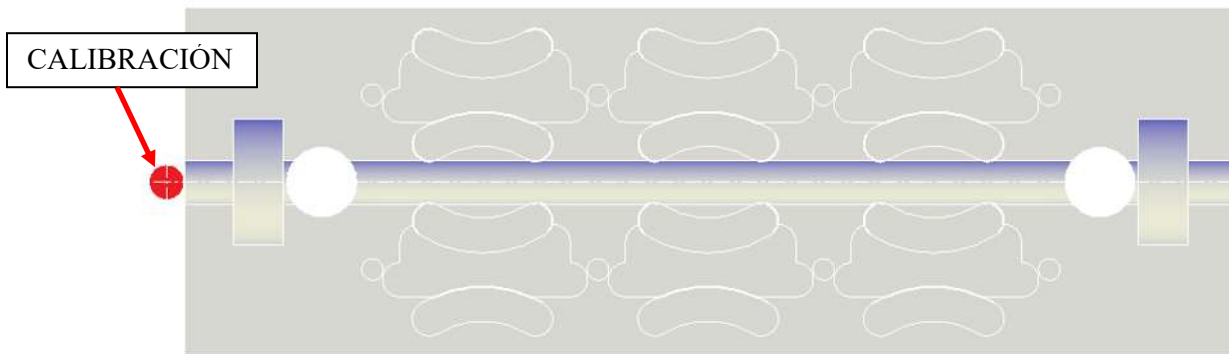


Fig. 3.17. Ubicación de la calibración para la fresadora CNC.

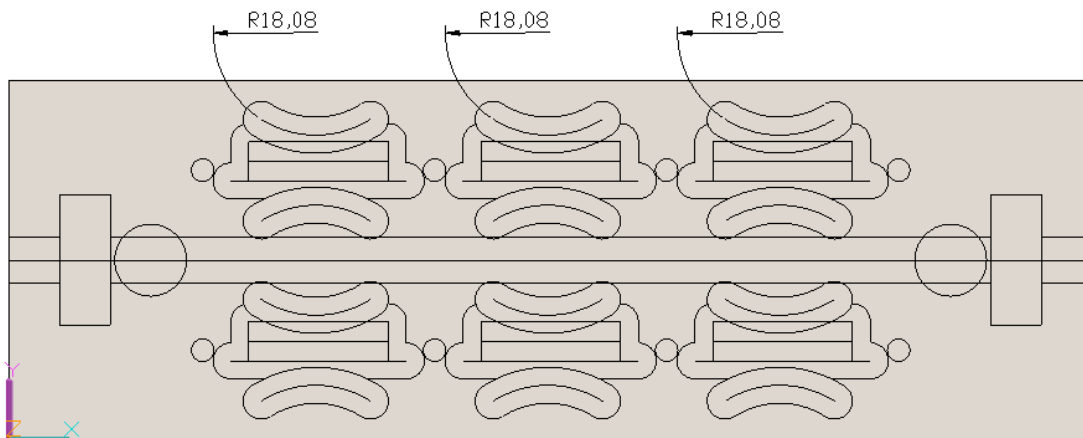


Fig. 3.18. Radio de los arcos para el maquinado de las probetas, dimensiones en mm.

## **CAPÍTULO 4. PUESTA EN MARCHA DE ENSAYOS EXPERIMENTALES.**

### 4.1 NECESIDADES.

Este inciso también incluye la necesidad de hacer cambios en el equipo de fatiga ultrasónica, como son: principalmente, el cambio del booster amplificador de desplazamiento. Tarea que será descrita, así como resultados de los ensayos.

La columna de ensayos y probeta se muestran en la Fig. 4.1. Las probetas soportan un calor intenso por la disipación térmica y se deforman en la zona estrecha de la misma, antes de poder fracturarse por la carga cíclica mecánica. El máximo esfuerzo inducido se localiza en la zona estrecha de la probeta, provocando en esta zona un incremento máximo de temperatura. Esta condición para los ensayos en fatiga ultrasónica es particularmente crítica para materiales poco conductores de calor y baja propiedad de disipación térmica, como es el caso del ABS; por lo que ha sido necesario implementar sistemas de refrigeración con agua y con aceite para los ensayos en el polímero ABS.



Fig. 4.1. Primeros ensayos.

La restricción anterior implicó, entre otras medidas, modificar el equipo original de ensayos mediante el reemplazo de uno de los componentes de la columna: el “booster”, encargado de multiplicar el desplazamiento en el modo de vibración de los ensayos.

La columna para ensayos en fatiga ultrasónica se compone de tres partes principales:

- a) Piezoeléctrico.
- b) Booster.
- c) Sonotrodo.

Las vibraciones mecánicas obtenidas en la salida del piezoeléctrico son pequeñas (alrededor de 20  $\mu\text{m}$ ), resulta entonces necesario conectar un par de dispositivos multiplicadores; estos son: el “booster” multiplicador con ganancias máximas de 2.5 y el “sonotrodo” con una ganancia de 2.75, obteniéndose un desplazamiento total de aproximadamente 137  $\mu\text{m}$  a la carga máxima del generador (100 V).

Con este objetivo, se llevó a cabo la construcción de una segunda columna con un “booster” de menor valor en la multiplicación del desplazamiento, que ajustara a menores valores de carga aplicada para el material polímero ABS. Se construyó una segunda columna en la que todos los elementos son iguales a los de la primera, con la excepción del “booster”; en este caso este elemento multiplicador tiene una ganancia de amplificación inferior de 1.75, siendo adecuada para la aplicación de cargas más bajas en los ensayos de fatiga ultrasónica sobre el polímero ABS.

#### 4.2 CONSTRUCCIÓN Y ARMADO DE SEGUNDA COLUMNA PARA ENSAYOS EN FATIGA ULTRASÓNICA.

La segunda columna fabricada para los ensayos en fatiga ultrasónica del material plástico, tuvo como modelo la columna anterior que comprende: una serie de piezas de sujeción, necesarias en la columna con el objeto de mantener la alineación y soporte de las piezas en contacto (piezoeléctrico, booster, sonotrodo). Para la estructura de soporte se requirió la compra del material y su posterior maquinado y soldado para obtener la estructura de soporte de la nueva columna.

Todas las piezas de sujeción fueron maquinadas en el laboratorio de metal-mecánica de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH. En las figuras de la 4.2 a la 4.8 se presentan las diferentes etapas en la construcción de la segunda columna, hasta su terminación, Fig. 4.8.



Fig. 4.2. Piezas de soporte de la segunda columna.

Una serie de tareas se realizaron para la obtención de estas piezas, tareas que incluyen: perforado, corte, fresado y torneado, principalmente.



Fig. 4.3. Torneado de la pieza de sujeción.

Este conjunto de tareas consumieron una cantidad importante de tiempo, debido al ajuste, medidas y alineamientos que se requieren realizar para el montaje de las piezas.



Fig. 4.4. Fresado de elementos de sujeción de la segunda columna.



Fig. 4.5. Roscados internos de un elemento de sujeción de la segunda columna.

Un importante consumo de trabajo manual fue necesario en la construcción de la segunda columna que implicó: el diseño, corte, maquinado, soldado y ajuste de los elementos que constituyeron esta segunda columna.

Adicionalmente, el armado de la segunda columna involucró procesos en los cuales fue necesario llevar a cabo tareas de prueba en materiales de desecho para poner en marcha un proceso de prueba y error, particularmente para el proceso de soldado en piezas de acero comercial.



Fig. 4.6. Base para columna de ensayos en fatiga ultrasónica.

Al concluir con la estructura de soporte, Fig. 4.6, la parte final en la construcción de la segunda columna fue la colocación de los elementos: piezoeléctrico, “booster” y “sonotrodo”, Fig. 4.7.



Fig. 4.7. Montaje (piezoeléctrico y booster).

La consecución de este procedimiento en la construcción de la segunda columna se presenta en la Fig. 4.8, donde se aprecia esta columna en su totalidad y como fue utilizada para los ensayos en fatiga ultrasónica en el material ABS.



Fig. 4.8. Segunda columna para ensayos en fatiga ultrasónica.

### 4.3 ENSAYOS

Debido al incremento considerable de temperatura al momento de llevar a cabo los ensayos en fatiga a alto número de ciclos, el armado y puesta en marcha de una segunda columna permitiendo cargas más bajas fueron necesarios. Esta fue una tarea que trajo consigo la viabilidad para poder trabajar con el material mencionado (ABS) a los niveles más bajos del generador de alta frecuencia (10-15 V.), si bien no garantizaba una temperatura estable de trabajo. Una medida adicional se tomó al momento de llevar a cabo los ensayos; ésta fue la de sumergir las probetas en agua. Fueron necesarias múltiples pruebas para evaluar el comportamiento de los ensayos, Fig. 4.9. Finalmente, se comprobó que la inmersión en agua o aceite no influye de manera determinante en los resultados, llevándose la totalidad de los ensayos bajo estas condiciones.



Fig. 4.9. Condiciones de los ensayos con inmersión en agua.

A partir de la infraestructura y el saber hacer desarrollados, se llevaron a cabo los primeros ensayos en fatiga ultrasónica para el material ABS, con un número limitado de probetas, Fig. 4.10. A pesar de tomar en cuenta este comportamiento, se comprobó la grave afectación en las probetas debido a una mala disipación de calor, Fig. 4.11, aún y cuando el esfuerzo inducido en la zona estrecha de la probeta es reducido (9% del límite elástico).



Fig. 4.10. Probetas para ensayos en fatiga ultrasónica.



Fig. 4.11. Ensayos preliminares con el equipo nuevo.

Haciendo referencia a lo planteado al inicio de este capítulo, concerniente a la necesidad de hacer cambios en el equipo existente, se muestran a continuación un par de ejemplos que demuestran el cambio sustancial y la influencia al momento de llevar a cabo los ensayos en fatiga ultrasónica.

Inicialmente se dispuso de un equipo que era capaz de provocar un desplazamiento en el extremo libre de la probeta de  $13.7 \mu\text{m}$  por cada volt en el generador. Este desplazamiento genera un esfuerzo máximo en la parte estrecha de la probeta de 3.3 MPa, como se muestra en la Fig. 4.12, que corresponde al límite inferior del generador: 10 volts.

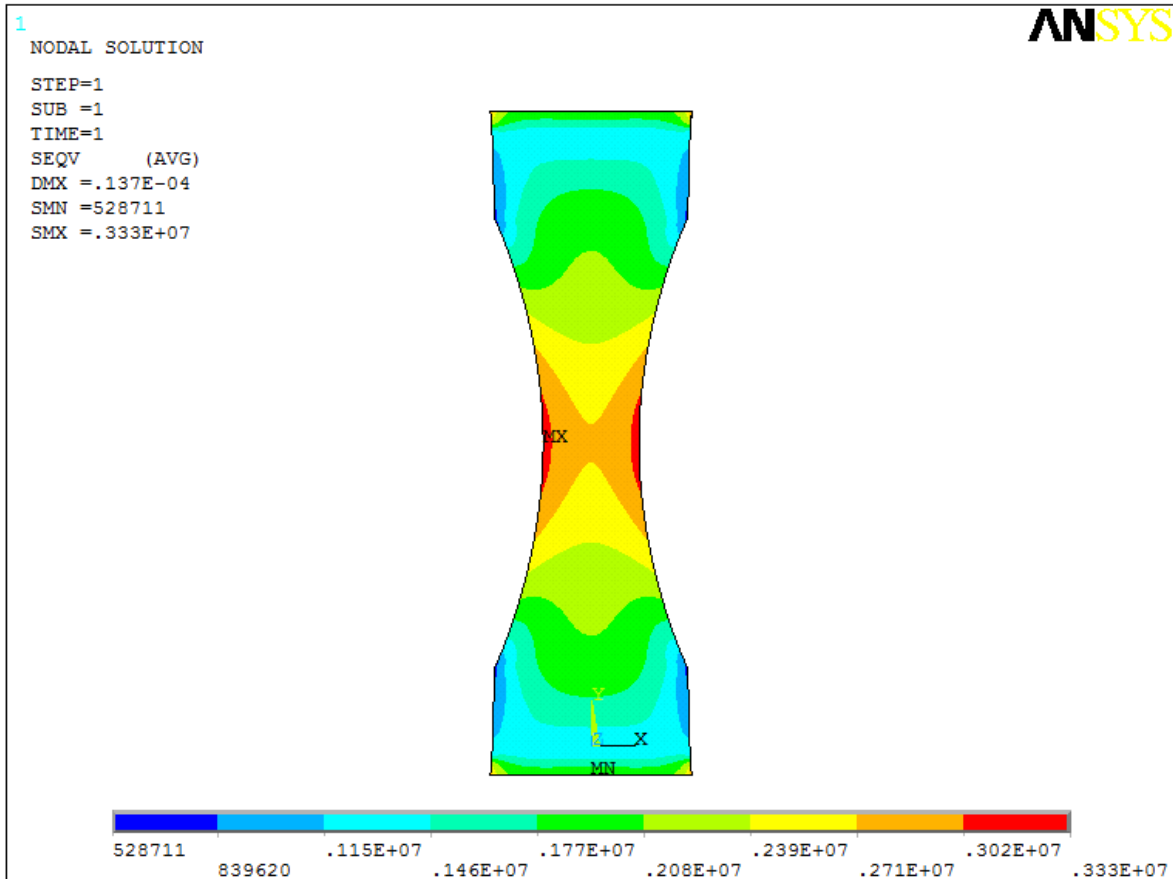


Fig. 4.12. Esfuerzo inducido para un desplazamiento de  $13.7 \mu\text{m}$  en el extremo de la probeta.

El esfuerzo inducido en la zona estrecha de la probeta de 3.33 MPa, corresponde a un 7.4 % del límite elástico del material estudiado; dicho esfuerzo resulta muy cercano al valor máximo permitido (9 % del límite elástico para controlar la disipación de calor y mantenerse debajo de la temperatura de transformación vítrea del ABS), con el objeto de poder llevar a cabo los ensayos en fatiga ultrasónica.

Con la segunda columna construida, se genera un desplazamiento total en los extremos de la probeta de  $0.96 \mu\text{m}$  por volt en el generador, o un desplazamiento de  $9.625 \mu\text{m}$  a la carga mínima de 10 V. en el generador.

La simulación numérica imponiendo este último desplazamiento arroja los resultados de la distribución de esfuerzos, como se muestra en la Fig. 4.13.

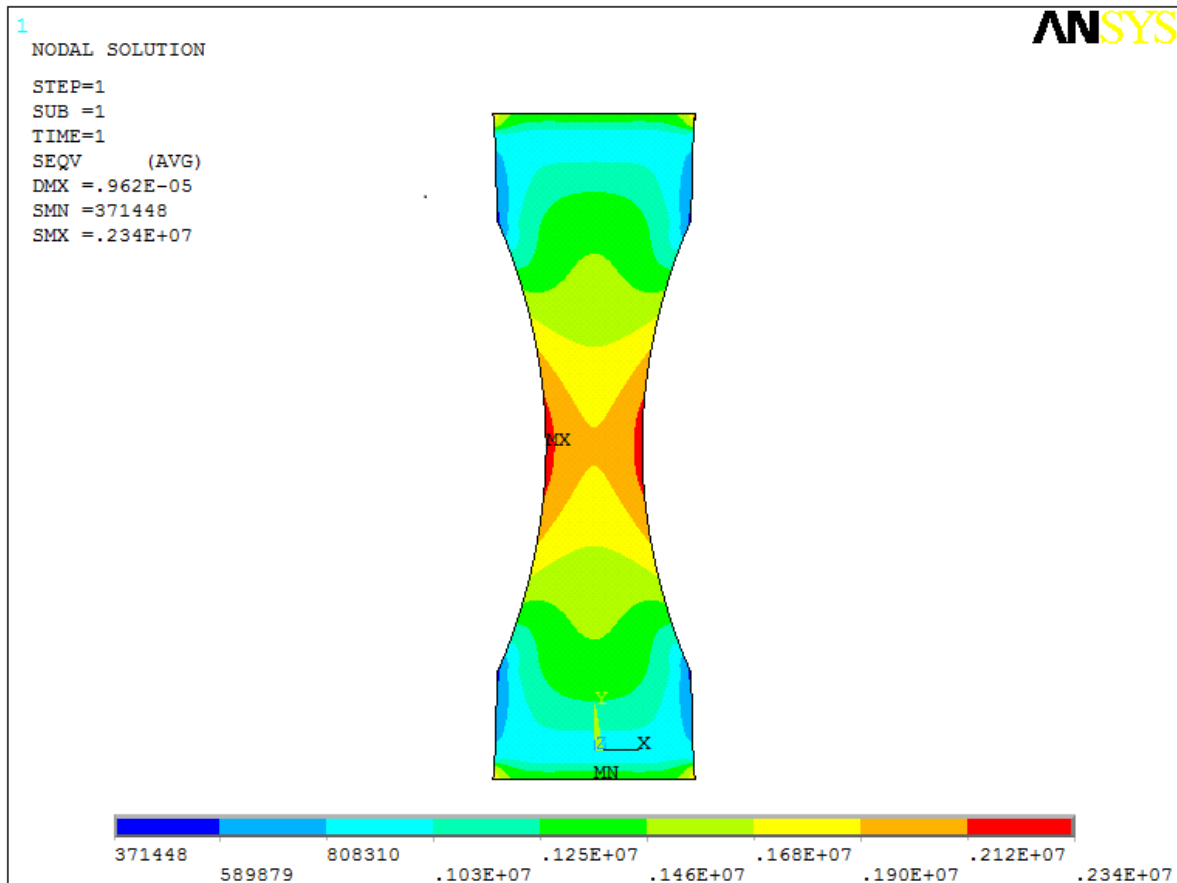


Fig. 4.13. Esfuerzo inducido para un desplazamiento de  $9.62 \mu\text{m}$  en el extremo de la probeta, segunda columna de ensayos.

En este caso, el esfuerzo inducido en la zona estrecha de la probeta disminuyó de un valor de 3.33 MPa a 2.34 MPa, lo que permite incrementar las posibilidades de trabajo con este nuevo equipo de ensayos en fatiga ultrasónica.

Los valores de los esfuerzo inducidos para cada ensayo logrado con este equipo se muestran en el capítulo siguiente, así como los resultados de ensayos en fatiga ultrasónica para el material plástico ABS y el rango permitido para poder llevar a cabo este tipo de ensayos.

Adicionalmente, en la Fig. 4.14, se presenta una imagen mostrando el desplazamiento (longitudinal en este caso) para las probetas, que para 10 volts es de  $9.62 \mu\text{m}$ .

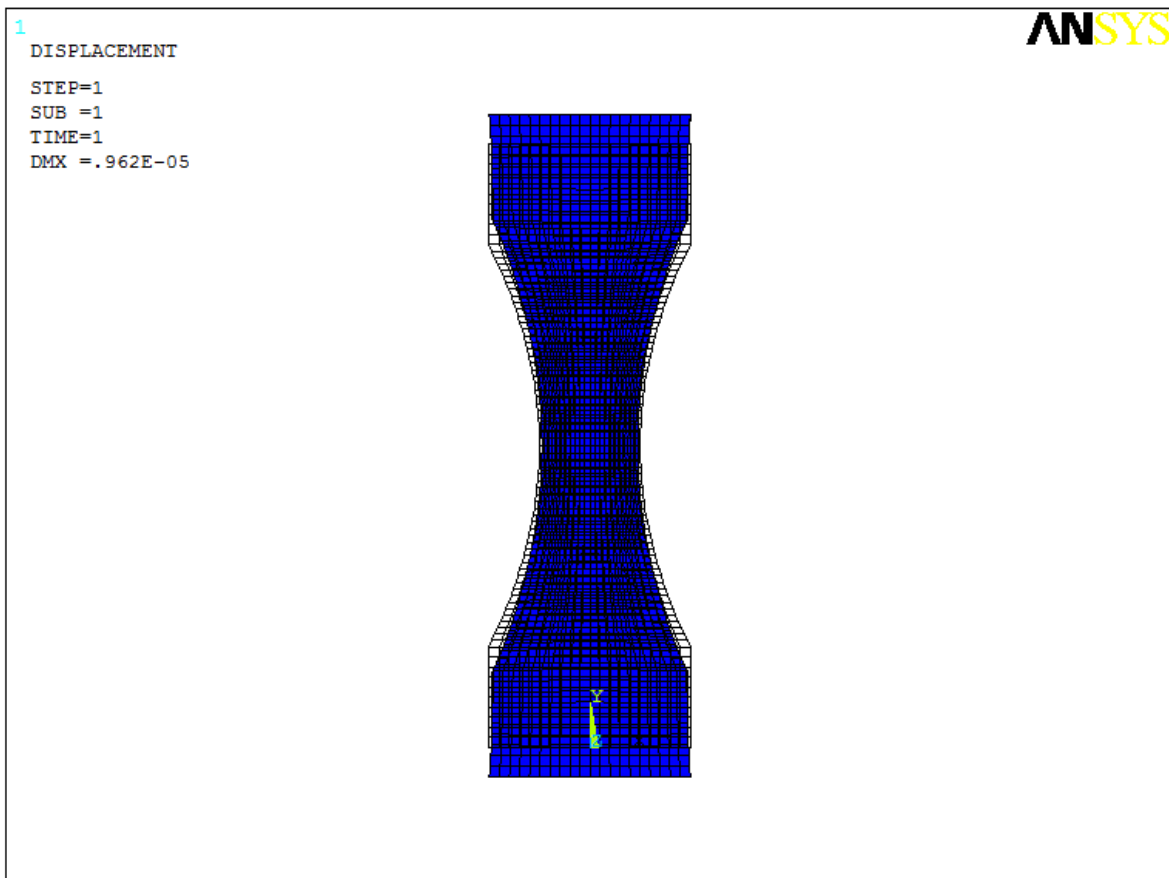


Fig. 4.14. Desplazamiento longitudinal para las probetas.

En la figura anterior (Fig. 4.14) se aprecia la distorsión o deformación total que alcanza la probeta de ensayos, partiendo de su forma y dimensiones originales.

## CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

### 5.1 RESULTADOS.

Los resultados en fatiga ultrasónica son registrados en relación al esfuerzo inducido y el número de ciclos de vida del material correspondiente a ese esfuerzo, teniendo en cuenta la pertinencia de registrar únicamente resultados que representan fractura por fatiga mecánica. A continuación se presentan una serie de simulaciones numéricas que fueron obtenidos mediante el paquete de cómputo ANSYS y que nos arrojan resultados precisos correspondientes al esfuerzo inducido en la zona estrecha de la probeta dependiendo de los desplazamientos impuestos en los extremos de la misma. Se muestran los valores de las simulaciones para los dos tipos de columnas que utilizamos, para los cuales, la única diferencia es el desplazamiento inducido por volt aplicado en el generador.

Tabla 5.1. Valores de esfuerzos inducidos en la zona estrecha de la probeta para un desplazamiento longitudinal de 0.96  $\mu\text{m/volt}$  (segunda columna).

Voltaje	Desplazamiento ( $\mu\text{m}$ )	Esfuerzo Inducido (MPa)	$\frac{\sigma}{\sigma_n} \%$
1	0.9625	0.234	0.52
2	1.925	0.468	1.04
3	2.8875	0.702	1.56
4	3.85	0.936	2.08
5	4.8125	1.17	2.6
6	5.775	1.404	3.12
7	6.7375	1.638	3.64
8	7.7	1.872	4.16
9	8.6625	2.106	4.68
10	9.625	2.34	5.2
11	10.5875	2.574	5.72
12	11.55	2.808	6.24
13	12.5125	3.042	6.76
14	13.475	3.276	7.28
15	14.4375	3.51	7.8

Tabla 5.2. Valores de esfuerzos inducidos en la zona estrecha de la probeta para un desplazamiento longitudinal de 1.37  $\mu\text{m}$ /volt (primera columna).

Voltaje	Desplazamiento ( $\mu\text{m}$ )	Esfuerzo Inducido (MPa)	$\frac{\sigma}{\sigma_n}$ %
1	1.37	0.333	0.74
2	2.74	0.666	1.48
3	4.11	0.999	2.22
4	5.48	1.332	2.96
5	6.85	1.665	3.7
6	8.22	1.998	4.44
7	9.59	2.331	5.18
8	10.96	2.664	5.92
9	12.33	2.997	6.66
10	13.7	3.33	7.4
11	15.07	3.663	8.14
12	16.44	3.996	8.88
13	17.81	4.329	9.62
14	19.18	4.662	10.36
15	20.55	4.995	11.1

Los títulos en las dos tablas anteriores corresponden a:

- *Voltaje*. Es el valor en volts proporcionado por el generador de alta frecuencia.
- *Desplazamiento* ( $\mu\text{m}$ ). Es el valor máximo de elongación que alcanza un espécimen de prueba a determinado valor del voltaje del generador.
- *Esfuerzo Inducido* (MPa). Es el esfuerzo máximo inducido en el espécimen de prueba, provocado por la aplicación de un determinado desplazamiento.
- $\frac{\sigma}{\sigma_n}$ . Es el porcentaje del esfuerzo inducido, en referencia al límite elástico del material de prueba.

En las tablas anteriores se presentan los valores entre 10 y 15 V, ya que es el rango en el cual se llevaron a cabo ensayos en fátiga ultrasónica para este material (ABS). Lo

anterior obedece al hecho que con voltajes superiores no es posible controlar la disipación de calor ni el ensayo en fatiga ultrasónica para este material. Una vez conocidos los esfuerzos que se generan a determinados valores en el generador se procede a la realización de los ensayos en fatiga ultrasónica, en los cuales se encuentran y se registran tanto la carga a la cual se llevo el ensayo (voltaje en el generador y el correspondiente esfuerzo inducido en la probeta), así como el tiempo de vida del material, reflejado en número de ciclos.

Tabla 5.3. Tiempos de vida del material ABS (Probetas sumergidas en agua).

	Probeta	Voltaje	Esfuerzo Inducido (MPa)	Tiempo (s)	No. Ciclos (Hz)	$\frac{\sigma}{\sigma_n} \%$
Columna 0.96 $\mu\text{m}$ por Volt	1	15	3.51	104.32	2086400	7.8
	2	14	3.276	137.33	2746600	7.28
	3	13	3.042	120.71	2414200	6.76
	4	13	3.042	148.29	2965800	6.76
	5	12	2.808	183.37	3667400	6.24
	6	11	2.574	1246	24920000	5.72
	7	15	3.51	61.13	1222600	7.8
	8	12	2.808	1086.26	21725200	6.24
	9	14	3.276	75.62	1512400	7.28
	11	15	3.51	66.57	1331400	7.8
	12	14	3.276	104.54	2090800	7.28
	13	13	3.042	118.08	2361600	6.76
	15	12	2.808	3446.61	68932200	6.24
	16	11	2.574	4230	84600000	5.72
	1e	11	2.574	3146.42	62928400	5.72
	2e	10	2.34	***	***	5.2
	3e	10	2.34	3888.12	69762400	5.2
4e	10	2.34	***	***	5.2	
Columna 1.34 $\mu\text{m}$ por Volt	1a	12	3.996	23.95	479000	8.88
	2a	11	3.663	29.09	581800	8.14
	3a	10	3.33	25.4	508000	7.4
	4a	10	3.33	37.54	750800	7.4
	5a	11	3.663	29.86	597200	8.14
	6a	12	3.996	22.22	444400	8.88
	7a	10	3.33	35.05	701000	7.4
	8a	11	3.663	20.09	401800	8.14
	9a	12	3.996	16.6	332000	8.88

Con estos valores experimentales para el número de ciclos y el esfuerzo inducido, se construyó la gráfica característica S-N (gráfica de Wöhler), para este material, Fig. 5.1.

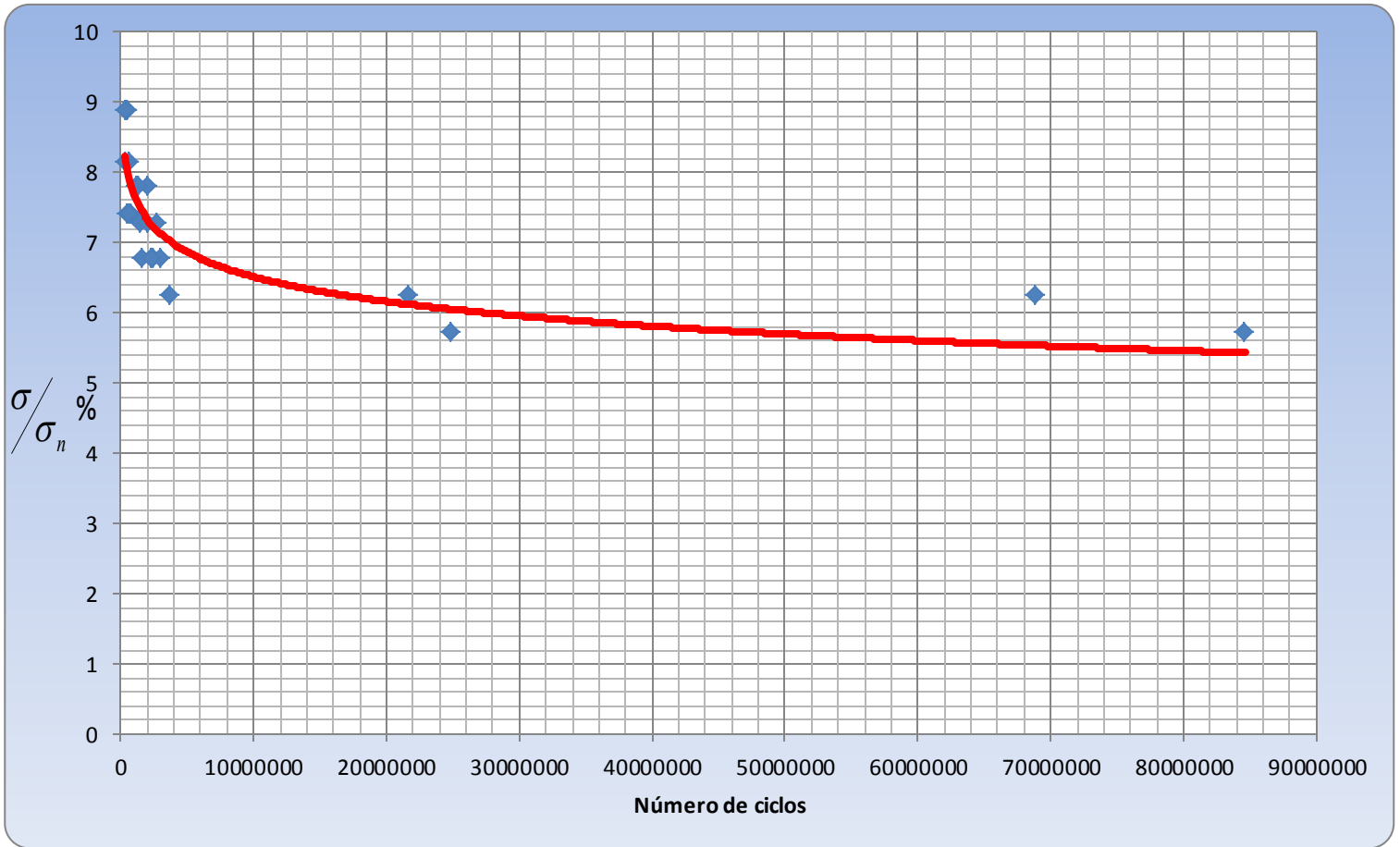


Fig. 5.1. Gráfica de Wöhler (Probetas sumergidas en agua).

La línea de tendencia de los puntos de dispersión, corresponden a una tendencia logarítmica que obedece a la ecuación  $y = -0.50\ln(x) + 14.67$ , obtenida con ayuda del programa Excel.

La finalidad de sumergir las probetas en agua, es para mantener los ensayos a una temperatura muy inferior a la temperatura de transformación vítrea de este material que es de alrededor de 80° C. Bajo estas circunstancias, los ensayos en fatiga ultrasónica son posibles. Con el objeto de corroborar la mínima variación de resultados debida al medio de enfriamiento, se utilizó en una segunda serie de ensayos en aceite hidrosoluble; este mismo refrigerante se utiliza para enfriar piezas en el proceso de maquinado.

Tabla 5.4. Tiempos de vida del material ABS (Probetas sumergidas en aceite).

	Probeta	Voltaje	Esfuerzo Inducido (MPa)	Tiempo (s)	No. Ciclos (Hz)	$\frac{\sigma}{\sigma_n} \%$
Columna 0.96 $\mu\text{m}$ por Volt	1f	15	3.51	76.39	1527800	7.8
	2f	15	3.51	69.58	1391600	7.8
	3f	15	3.51	53.4	1068000	7.8
	4f	14	3.276	57.06	1141200	7.28
	5f	14	3.276	38.68	773600	7.28
	6f	14	3.276	49.25	985000	7.28
	7f	13	3.042	86.31	1726200	6.76
	8f	13	3.042	63.48	1269600	6.76
	9f	13	3.042	27.62**	**	6.76
	10f	12	2.808	86.52	1730400	6.24
	11f	12	2.808	***	***	6.24
	12f	12	2.808	89.78	1795600	6.24
	13f	11	2.574	***	***	5.72
	14f	11	2.574	144.19	2883800	5.72
	15f	11	2.574	267.34	5346800	5.72
	16f	10	2.34	***	***	5.2
	17f	10	2.34	3488.12	69762400	5.2
	18f	10	2.34	***	***	5.2
Columna 1.34 $\mu\text{m}$ por Volt	1b	12	3.996	18.21	364200	8.88
	2b	11	3.663	26.94	538800	8.14
	3b	10	3.33	35.32	706400	7.4
	4b	10	3.33	21.08	421600	7.4
	5b	11	3.663	26.29	525800	8.14
	6b	12	3.996	16.96	339200	8.88
	7b	10	3.33	28.43	568600	7.4
	8b	11	3.663	20.14	402800	8.14
	9b	12	3.996	15.78	315600	8.88

Comparando los resultados obtenidos por inmersión en agua y en aceite; algunos valores de la tabla anterior son muy similares a los valores de la tabla correspondiente a la inmersión en agua. Lo anterior significa que el medio de enfriamiento no influye de manera decisiva en la resistencia a la fatiga ultrasónica de este material, ensayado en las condiciones descritas. No obstante, se obtuvieron algunos resultados que se alejaban de esta

tendencia o tenían un comportamiento aleatorio. Estos últimos resultados no fueron registrados en la tabla.

La gráfica correspondiente a los ensayos en fatiga ultrasónica del material ABS sumergido en aceite se presenta en la Fig. 5.2.

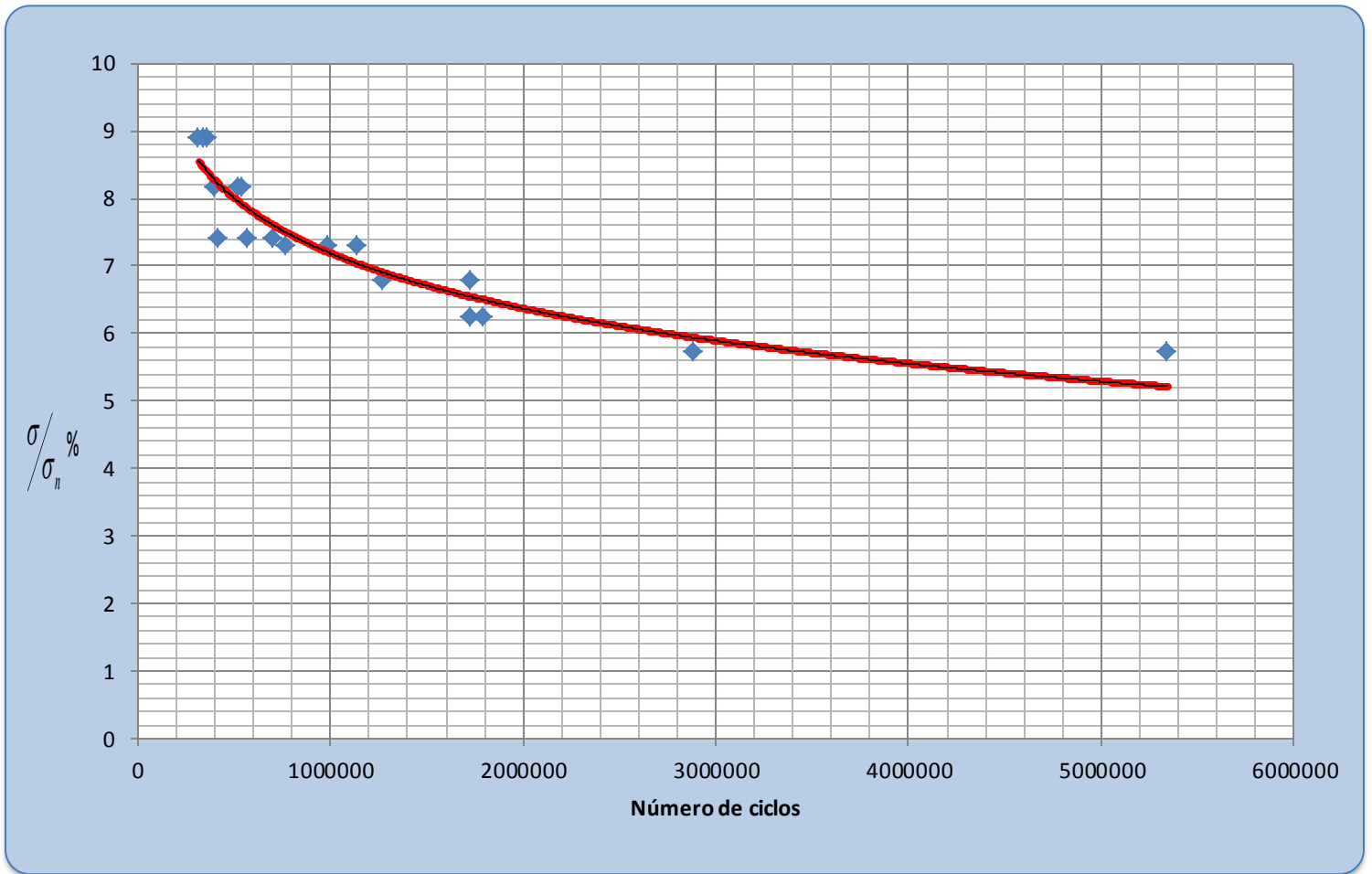


Fig. 5.2. Gráfica de Wöhler (Probetas sumergidas en aceite).

Al igual que en la gráfica de la Fig. 5.1, también tenemos marcada una línea de tendencia logarítmica muy semejante pero ahora en correspondencia a la ecuación  $y = -1.17\ln(x) + 23.47$ , igualmente obtenida en Excel. Idealmente las ecuaciones resultantes deberían ser iguales, pero se puede comprobar la concordancia de las mismas a partir de las gráficas señaladas en estas figuras.

Las variaciones de vida en fatiga ultrasónica del material ABS son limitadas y presentan una neta tendencia, como se observa en los Fig. 5.1 y 5.2. Los medios refrigerantes utilizados, agua y aceite, parecen no influir de manera importante en la vida en fatiga de este material polímero. Lo anterior se verifica al comparar los mismos niveles de carga: al 6% de carga del límite elástico, la vida en fatiga es de aproximadamente 2.5 millones de ciclos para los dos casos usando agua o aceite como refrigerante.

## 5.2 IMÁGENES DE FRACTURAS.

Algunas de las superficies de fractura se muestran a continuación.

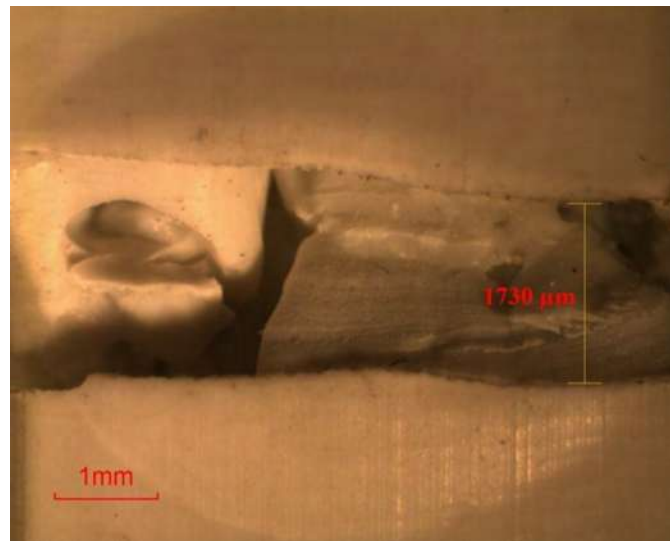


Fig. 5.3. Muestra ensayada a 5.72 % del límite elástico del material.

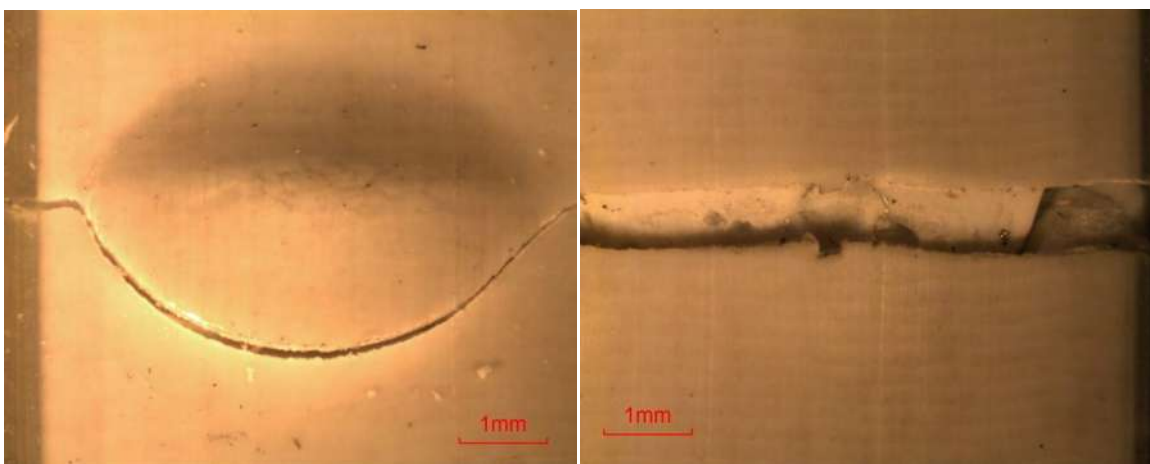


Fig. 5.4. Muestra ensayada a 6.24 % del límite elástico del material.

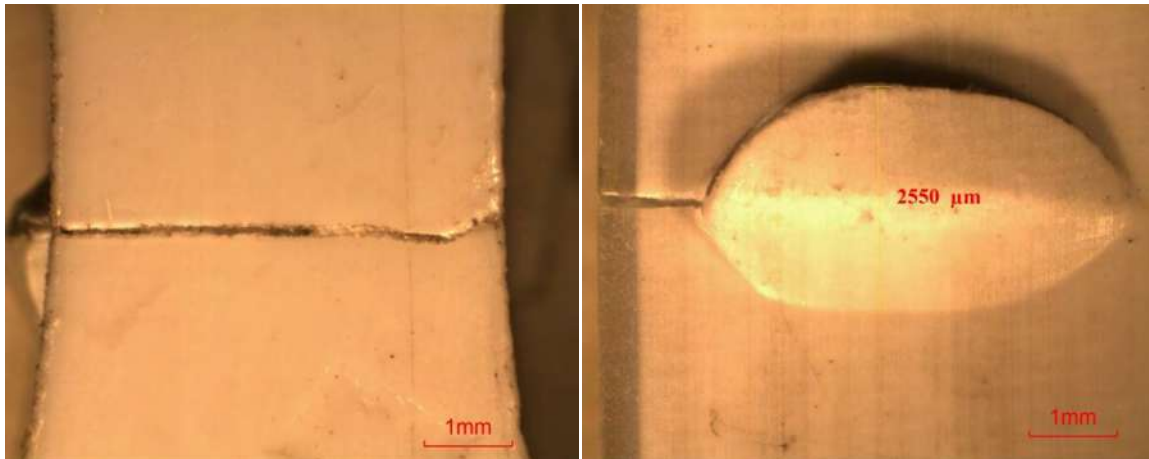


Fig. 5.5. Muestras ensayadas a 6.76% del límite elástico del material.

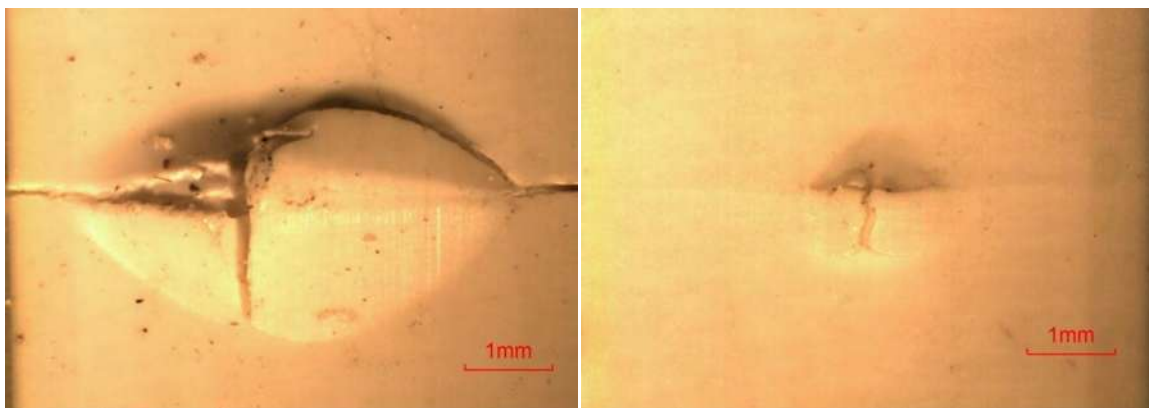


Fig. 5.6. Muestra ensayada a 7.28 % del límite elástico del material.

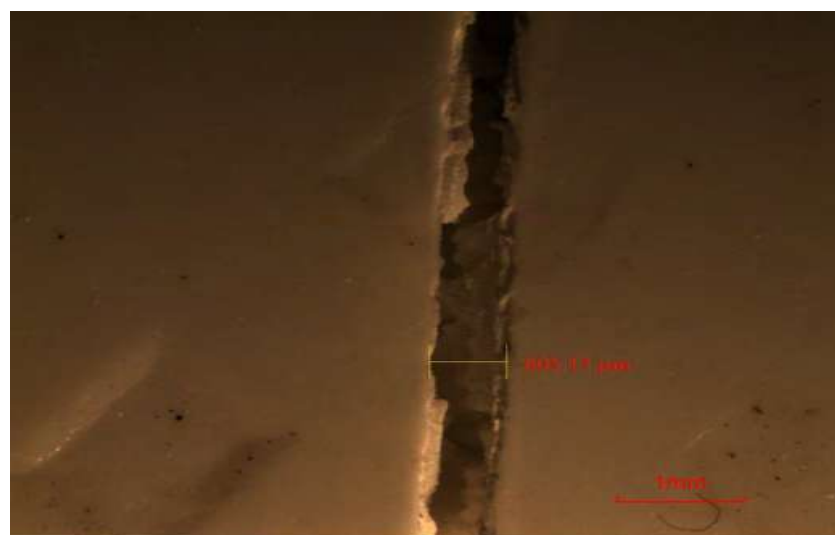


Fig. 5.7. Muestra ensayada a 7.8% del límite elástico del material.

En las figuras anteriores se muestran imágenes de fracturas representativas de los distintos niveles de carga del generador. La línea de fractura mostrada se localizó, en todos los casos, en la zona estrecha de la probeta, como era de esperarse puesto es allí donde se localiza los mayores esfuerzos. Algunas figuras contrastan imágenes en las que se aprecia una “burbuja” en la línea de fractura, contra otra en las que solo se aprecia la fisura como tal. Como una conclusión preliminar, se cree que esa burbuja fue un efecto de cavitación ocasionado en las probetas debido al medio de enfriamiento que se utilizó en estos casos (agua y aceite), por tal motivo se desecharon la gran mayoría de resultados en los que se aprecia este comportamiento. Serán necesarios estudios posteriores para el análisis de este fenómeno.

## **DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.**

Se ha observado el comportamiento del material Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), sometido a ensayos en fatiga ultrasónica (20 KHz) y al igual que en estudios previos, realizados en esta misma facultad, se observó y persistió la dificultad de separar el efecto por degradación térmica del efecto puramente mecánico o por fatiga mecánica; si bien todo fenómeno de fatiga mecánica implica en menor o mayor grado la disipación térmica. Es sabido que la disipación térmica en este tipo de materiales es muy baja y que a pesar de su resistencia a la temperatura, se presenta este tipo de problema en un periodo de tiempo relativamente corto después de comenzado el ensayo.

Para estos fines, se utilizó dos medios de enfriamiento adicionales al enfriamiento por aire como se ha venido utilizado anteriormente. La finalidad de esta implementación, como se pudo observar, fue la de mantener los ensayos a una temperatura mínima posible durante el ensayo y asegurar que el resto de las pruebas cumplieran con la misma condición. Los resultados que fueron registrados en el capítulo 5, fueron los que cumplieron con esta condición y en los que se pudo obtener un ensayo en el cual no se reflejaba algún tipo de degradación por consecuencia de las altas temperaturas.

Se llevaron a cabo un número importante de ensayos fallidos antes de obtener condiciones adecuadas, desde maquinados, nuevo equipo de fatiga y control de temperatura. En la Fig. D.1 se muestra una imagen representativa de un ensayo en el que no se tuvo control sobre la temperatura. Este tipo de ensayos fue relativamente fácil de separarlos de los ensayos validos, ya que su periodo de vida fue relativamente corto y se podía apreciar una deformación considerable en el espécimen de prueba y se registraban temperaturas en la zona estrecha de la probeta que rebasaban los 100°C. Esta última temperatura se encuentra por arriba de la correspondiente temperatura de transformación vítrea de este material.

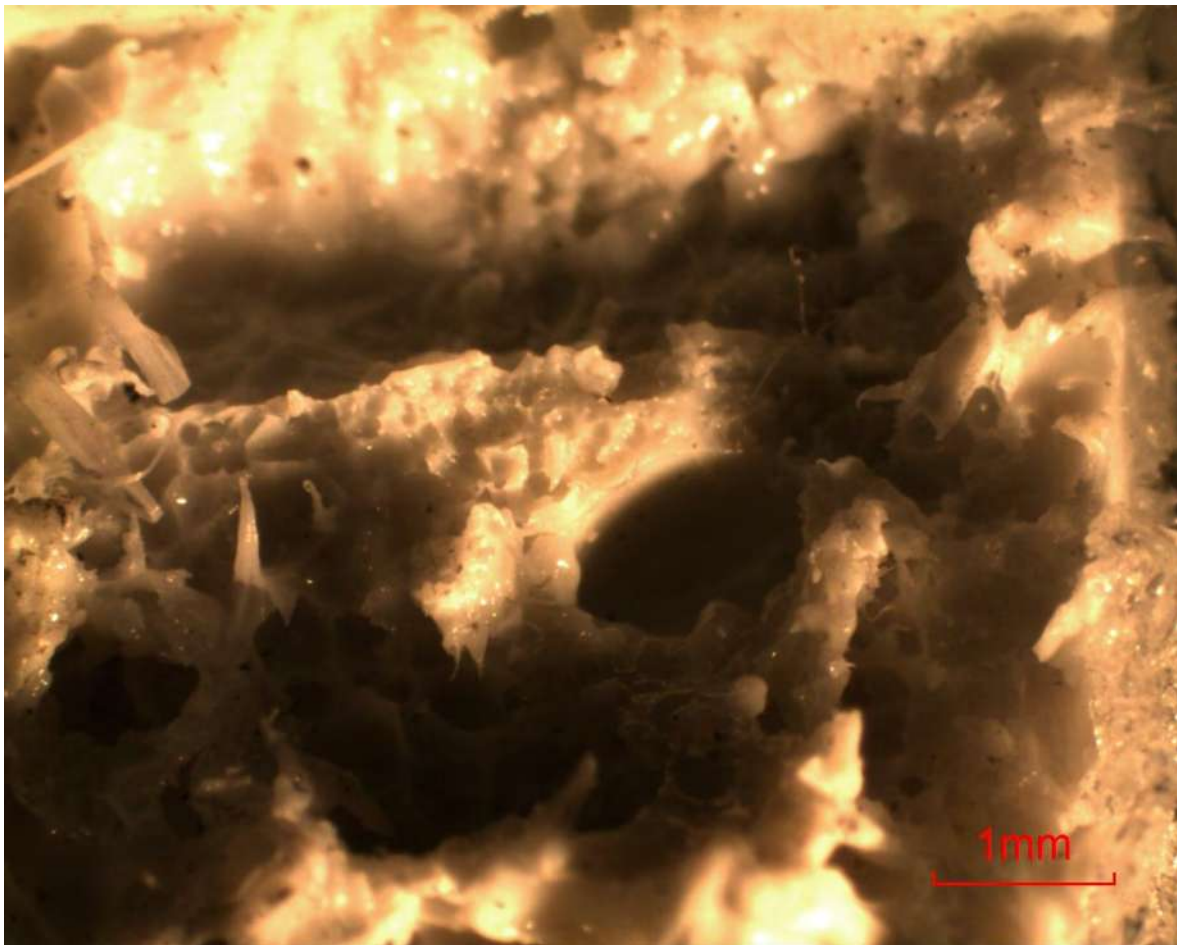


Fig. D.1. Efecto del incremento de temperatura al momento de los ensayos.

Todas y cada una de las tareas realizadas a lo largo de la tesis, tenían como finalidad la reducción del incremento de la temperatura en la zona estrecha de la probeta, algunos rasgos destacados son:

- Diseño de un perfil de prueba que cumpla con la condición de resonancia y que posea un cuello relativamente pequeño en la zona media de dicho espécimen, a través del cual se pudiera disipar energía más rápidamente.
- Control de variaciones de temperatura mediante un medio de enfriamiento. Agua y aceite hidrosoluble en este caso.
- Obtención y armado de una segunda columna de ensayos en fatiga ultrasónica para reducir el esfuerzo inducido en la zona estrecha de la probeta.
- Esfuerzos inducidos limitados en la zona estrecha de la probeta entre el 5% y el 9% del límite elástico de este polímero.

Referente a las superficies de fractura, un hecho interesante es que ninguna de las probetas sometidas a prueba presentó una separación total entre ellas, sino que solo se registró la aparición de una grieta a lo largo del perímetro de la zona estrecha, justo en la parte central de la probeta. Se esperaba una separación en dos partes debido a la fractura, tal y como se ha venido observando en estudios previos tanto de plástico como de algún material metálico. Serán necesario estudios posteriores para evaluar el comportamiento de la fractura en este tipo de polímeros.

De los resultados obtenidos en el presente estudio es posible enlistar las siguientes conclusiones:

- a) Resulta difícil de establecer una separación total entre el efecto ocasionado por la degradación térmica y el efecto puramente por fatiga mecánica en este tipo de materiales polímeros.
- b) La vida en fatiga de este material plástico se reflejó comprendida entre  $4E5$  ciclos y  $8.5E7$  ciclos cuando la carga se sitúa entre 5% y 9% del límite elástico respectivamente.

- c) Es necesario realizar ensayos en fatiga ultrasónica a un porcentaje muy bajo del límite elástico del material ABS. Porcentaje inferior al 10% del límite elástico, con la finalidad de obtener resultados de vida en fatiga en el rango del medio millón de ciclos hasta cerca de la centena de millones de ciclos.
- d) Se hace necesaria la implementación de equipos de enfriamiento para mantener una temperatura baja en los ensayos realizados.
- e) La comprensión de los efectos combinados de disipación térmica y fatiga mecánica requiere de un estudio adicional y de un número mayor de materiales de ensayo, en los que se aprecie igualmente este comportamiento.
- f) Se hace necesario un análisis interno de las superficies de fractura ya que no se muestra una separación de las piezas en la línea de fractura.

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Sauer J. A., Richardson G.C. Fatigue of Polymers. College of Engineering, Rutgers University, New Brunswick, N.J. USA. International Journal of fracture, vol. 16, No. 6, December 1980.
- [2] Hertzberg R. W., Nordberg H. Department of Metallurgy and Materials Science. Manson J. A. Department of Chemistry, Lehigh University, Bethlehem, PA., USA Fatigue Crack Propagation in Polymeric Materials. Journal of Materials Science 5 521-526
- [3] Janssen R.P.M., Govaert L.E., Meijer H.E.H. Fatigue Life Estimation of Polymers. Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering.
- [4] Domínguez Almaraz G. M., Correa Gómez E. Análisis de la resistencia a la fatiga ultrasónica del plástico industrial poliamida (Nylomaq). Marzo de 2011. Tesis de Licenciatura.
- [5] Wróbel G., Kaczmarczyk J. Numerical Simulation of Fatigue Degradation Process of Polymer Materials Using Diagnostic Acoustic Characteristics. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Volume 36, issue 2 October 2009.
- [6] Domínguez Almaraz G. M., Cadenas Calderón E. Solución analítica para el perfil de una probeta de ensayos en fatiga a gran número de ciclos. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 1º foro académico de la DES de Ingenierías y Arquitectura de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 30 de noviembre a 2 de diciembre 2005. Morelia, Michoacán, México.

- [7] Domínguez Almaraz G. M., Correa Gómez E., Quintana Zepeda V.H., Gómez Sánchez A. Ultrasonic Fatigue Tests on Plastic Material: “NYLOMAQ”. VHCF5. Fifth International Conference on Very High Cycle Fatigue.
- [8] Domínguez Almaraz G. M., Correa Gómez E., Quintana Zepeda V.H., Gómez Sánchez A. Análisis de la resistencia a la fatiga ultrasónica en el material plástico: “NYLOMAQ”. CIINDET 2011.
- [9] Domínguez Almaraz G. M., Correa Gómez E. Ultrasonic Fatigue Endurance Investigation on Plastic Material Nylon 6. *Materials Sciences and Applications*, **2011, 2, 1293-1297** doi:10.4236/msa.2011.29174 Published Online September 2011 (<http://www.SciRP.org/journal/msa>).
- [10] Domínguez Almaraz G. M., Quintana Zepeda V.H., Gómez Sánchez A., Correa Gómez E., Hinojosa Ramírez J.I. Resistencia a la fatiga ultrasónica de la aleación de aluminio, nominación AISI-SAE 6061-t6, con huecos artificiales de corrosión. XII Congreso y Exposición Latinoamericana de Turbomaquinaria. Febrero de 2011.
- [11] Sauer, J.A., Foden, E. and Morrow, D.R. *Polymer Engineering and Science* 17 (1977) 246.
- [12] Crawford, R.J. and Benham, P.P. *Polymer* 16 (1975) 908; *Journal of Materials Science* 9(1974) 18.
- [13] Buchnall, C.B. and Stevens, W.W. Papers No. 24, International Conference on Toughening of Plastics, London, July (1978).
- [14] Askeland, D.R., Phulé P.P. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Edit. Thomson. Cuarta edición. Pag.14, 668, 669.
- [15] Myer Kutz Editors. *Handbook of Materials Selection*. Edit. Wiley.

- [16] ASM Handbook Volume 8. Mechanical Testing and Evaluation. ASM international. Pag. 679, 717-767.
- [17] Lörcks, J. Properties and Applications of Compostable Starch-Based Plastic Material Polymer Degradation and Stability, 59 (1998), No. 1-3, pp. 245-249.
- [18] Moaveni, S. FINITE ELEMENT ANALYSIS, Theory and application with ANSYS. PRENTICE HALL.
- [19] Sommerville, I. Ingeniería del software, séptima edición. PEARSON Addison wesley.
- [20] Schaffer. Saxena. Antolovich. Sanders. Warner. Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería. Segunda edición en inglés, primera edición en español. Compañía editorial Continental. Pag. 350-361, 383-394, 590, 591.
- [21] Boresi, A.P., Schmidt, R.J. Advanced Mechanics of Materials. Sixth edition. JOHN WILEY & SONS, INC.
- [22] ANSYS Parametric Design Language Guide. Release 12.0, April 2009. ANSYS, Inc.
- [23] Larry J. Segerlind. Applied Finite Element Analysis. Second edition. JOHN WILEY & SONS.
- [24] Schmidt A., Siebert K. G. Design of Adaptive Finite Element Software. The finite element toolbox ALBERTA. Springer.
- [25] Moaveni, S. Finite Element Analysis Theory and Applications with ANSYS. PRENTICE HALL.
- [26] Cantú, M. Delphi 2009 Handbook. Publisher: Wintech Italia, first edition December 2008.

- [27] Frassine, R and Pavan, A. An application of viscoelastic fracture criteria to steady crack propagation in a polymeric material under fixed deformation. *International Journal of Fracture* 43: 303-317, 1990.
- [28] Rink, M., Guidetti B., Frassine R. Effect of notch severity on fatigue fracture in a rubber-modified glassy polymer. *Journal of Materials Science* (1994) 3071-3079.

## **PRESUPUESTO Y FINANCIAMIENTO**

El financiamiento de equipo e implementos así como becas de licenciatura y una de maestría está soportado mediante el proyecto de ciencia básica numero 82403 aprobado por el CONACYT desde marzo 2009.