



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



ESTUDIOS DE LA RESISTENCIA EN FATIGA ULTRASÓNICA DE ACEROS 4140T Y 1045 DE ALTA RESISTENCIA UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. JULIO ADRIÁN RUÍZ VÍLCHEZ

ASESOR:

DR. GONZALO MARIANO DOMÍNGUEZ ALMARAZ



Morelia, Michoacán. Marzo 2019

A mi hijo, Adrian Iker Ruiz Pérez.

A mi hija, Paulina Jolette Ruiz Pérez.

A mi esposa Asucena Pérez Pérez.

A mi madre, Ma. Esther Vilchez Reyes.

A mi padre, Reynaldo Ruiz Suarez.

A mis hermanas Ángela Ruiz Vilchis y Esther Ruiz Vilchez.

A mis hermanos, Isaac, Reynaldo, Benito y Benjamín.

Y toda mi familia, profesores y amigos que me apoyaron.

AGRADECIMIENTOS.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi asesor y director de tesis el Dr. Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz. Por compartir sus conocimientos y apoyo para la realización del presente proyecto de investigación.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada, para la realización de mis estudios de maestría.

A mi alma máter, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. La cual me ha guiado desde la preparatoria, licenciatura ahora me da la oportunidad de graduarme y titularme como maestro en ciencias en ingeniería mecánica.

La Facultad de Ingeniería Mecánica, especialmente al área de posgrado. Toda su planta docente, administrativa y de trabajadores que ha permitido tener un lugar digno para aprender y crecer.

Agradezco a mis sinodales que revisaron y retroalimentaron el presente proyecto de tesis. La Dra. Laura Alicia Ibarra Bracamontes, Dr. Juan Felipe Soriano Peña, M.C.I. Víctor López Garza, Dr. Christian David Schindler y M.C.I. Ishvari Fernando Zúñiga Tello.

Mis hijos que son y seguirán siendo mi principal motivación para avanzar, ser mejor persona, mejor profesionista y el mejor padre que ellos merecen, Paulina Jolette y Adrian Iker Ruiz Pérez. Mi esposa, mi madre, hermanos y familiares que siempre me han apoyado incondicionalmente en los proyectos que emprendo. A toda mi familia le agradezco mucho el apoyo y respaldo que siempre me han dado.

Es importante para mí también reconocer y agradecer al equipo de estudiantes de posgrado que dirige el Dr. Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, Siempre apoyaron en el presente proyecto compartiendo su experiencia y conocimientos en lo referente a la operación de los equipos de laboratorio, software y demás herramientas necesarias para este proyecto. Me refiero a los compañeros de posgrado y amigos; M.C.I. Ishvari Fernando Zúñiga Tello, Dr. Erasmo Correa Gómez, Dr. Julio Cesar Verduzco Juárez, M.C.I. Manuel Guzmán Tapia, M.C.I. Luis Miguel Torres Duarte.

RESUMEN.

Ensayos de fatiga ultrasónica se llevaron a cabo en aceros de uso automotriz 4140T y 1045, con el fin de determinar la resistencia a la fatiga bajo carga a muy alta frecuencia (20 KHz). Este material utilizado en la industria automotriz, juega un papel importante en la industria de materiales en esta industria. El estudio de sus propiedades físico-químicas es un continuo tema en la literatura; sin embargo, limitadas investigaciones son disponibles relacionadas con la resistencia a la fatiga de alta frecuencia. Una condición principal para llevar a cabo ensayos de fatiga ultrasónicas en este material fue determinar las dimensiones de la muestra de prueba con el fin de adaptarse a la condición de resonancia. Este aspecto fue resuelto por simulación numérica modal: los especímenes de prueba son probetas maquinadas con cuello esbelto en el centro de la probeta en forma de reloj de arena. De esta manera bajo la condición de resonancia, una onda estacionaria elástica se genera a lo largo de la muestra que induce esfuerzos máximos en la sección de cuello y altos desplazamientos en los extremos.

Los resultados obtenidos conciernen la vida de fatiga con el máximo esfuerzo de Von Mises en la sección estrecha del cuello. Se analizaron la iniciación y propagación de grietas con microscopía de barrido y se obtuvieron conclusiones en relación con la resistencia a la fatiga de estas probetas de acero 4140T y acero 1045 en pruebas de fatiga ultrasónica.

Palabras clave: Fatiga ultrasónica; Acero 4140T; Acero 1045; Esfuerzo Von Mises; Maquinado de probetas.

ABSTRACT

Ultrasonic fatigue tests were carried out in automotive steels 4140T and 1045, in order to determine the fatigue resistance under load at very high frequency (20 KHz). This material used in the automotive industry, plays an important role in the materials industry in this industry. The study of its physico-chemical properties is a continuous theme in the literature; however, limited investigations are available related to high frequency fatigue resistance. A major condition for carrying out ultrasonic fatigue tests on this material was to determine the dimensions of the test sample in order to adapt to the resonance condition. This aspect was solved by modal numerical simulation: the test specimens are machined specimens with slender neck in the center of the hourglass shaped specimen. In this way under the condition of resonance, an elastic standing wave is generated throughout the sample that induces maximum stresses in the neck section and high displacements at the ends.

The results obtained concern the life of fatigue with the maximum effort of von Mises in the narrow section of the neck. The initiation and propagation of cracks were analyzed with scanning microscopy and conclusions were reached in relation to the fatigue strength of these 4140T steel and 1045 steel specimens in ultrasonic fatigue tests.

Keywords: Ultrasonic fatigue; 4140T Steel; 1045 Steel; Von Mises Stress.

ÍNDICE

RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	13
OBJETIVOS.....	14
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	14
HIPÓTESIS.....	14
CAPITULO I.- INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Materiales de prueba, acero 4140T y acero 1045.	16
1.1.1 Acero 4140T	16
1.1.2 Acero 1045.....	17
1.2 Antecedentes de ensayos de fatiga en los aceros 4140T y acero 1045.....	19
CAPITULO II.- PRINCIPIO DE ENSAYO EN FATIGA ULTRASÓNICA.	21
2.1 Fatiga de materiales.....	21
2.2 Tipos de Cargas dinámicas y sus características.....	21
2.3 Origen de la rotura por fatiga.	25
2.4 Modelos analíticos para el estudio de la fatiga.....	29
2.4.1. Gráfica de Wohler o grafica S-N.....	29
2.4.2 Modelo vida- deformación (Gráfica de Coffin-Manson o gráfica ϵ -N).....	31
2.4.3. Gráfica de Paris o gráfica de crecimiento de fractura da/dN	33
2.5. Fatiga Convencional.....	34
2.5.1 Flexión Rotativa.....	35
2.6. Fatiga ultrasónica	36
2.7. Fenómeno de la Resonancia Mecánica.....	37
2.8. Problema de límite de fatiga.....	37
CAPÍTULO III.- SIMULACIÓN EN ANSYS.....	39
3.1 Análisis Modal.....	39
3.1.1 Formulación matricial para obtener la frecuencia natural de oscilación.	39
3.1.2 Simulación del Análisis Modal en ANSYS.....	41

3.2 Esfuerzo de Von Mises.....	45
3.2.1 Cálculo del esfuerzo Von Mises con simulación numérica en ANSYS.....	45
CAPITULO IV.- DISEÑO DE LAS PROBETAS PARA ENSAYOS DE FATIGA ULTRASÓNICA EN ACERO 4140T Y ACERO 1045.....	47
4.1. Simulación numérica, análisis modal con ANSYS.....	47
4.2. Pruebas de diseño.....	49
CAPÍTULO V.- CALIBRACIÓN DE LA MÁQUINA ULTRASÓNICA.....	53
5.1. Dispositivo ultrasónico	53
5.1.1. Características y funcionamiento del dispositivo ultrasónico	55
5.2 Calibración de los desplazamientos ultrasónicos por medio del sensor inductivo de alta sensibilidad.	55
CAPITULO VI.- MANUFACTURA DE LAS PROBETAS PARA ENSAYOS DE FATIGA ULTRASÓNICA EN ACERO 4140T Y ACERO 1045.....	58
6.1 Torneado.....	58
6.1.1. Cilindrado	59
6.1.2. Refrentado.....	61
6.1.3. Taladrado.....	64
6.1.4. Machueliado.....	65
6.1.5. Perfilado.....	66
CAPÍTULO VII.- ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	72
7.1. Protocolo de puesta en marcha.....	72
7.2 Condiciones experimentales.....	72
7.3 Programación de ensayos experimentales.....	73
7.4 Puesta en marcha de ensayos.....	73
7.5 Recolección de datos.....	76
CAPÍTULO VIII.- ANALISIS DE RESULTADOS.....	78
8.1. Análisis de resultados.....	78
8.2. Observación de la fractura en microscopio electrónico de barrido MEB	85
CONCLUSIONES	92
BIBLIOGRAFÍA.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
Figura 1.1.	Aplicaciones típicas automotrices del acero 4140T.	16
Figura 1.2	Aplicaciones típicas del acero 1045.	18
Figura 1.3.	Gráficos S-N y ϵ -N del estudio de fatiga al acero 4140T en condiciones de 111,750 ciclos de carga entre $\sigma_{\min} = 146$ MPa y $\sigma_{\max} = 731$ MPa para generar un daño por fatiga $D = 0,25$ [4].	19
Figura 1.4.	Grafico S-N obtenido por ensayos de fatiga en el acero 1045, variando el avance para tres lotes de prueba [5].	20
Figura 2.1	a) Cargas estáticas, b) cargas transitorias o dinámicas.	22
Figura 2.2	Forma de carga cíclica o periódica.	22
Figura 2.3	Tensión media nula.	24
Figura 2.4	Carga alternante.	24
Figura 2.5.	Carga pulsante de tracción.	25
Figura 2.6.	Carga pulsante compresiva.	25
Figura 2.7.	Ruptura por fatiga en cigüeñal de automóvil.	26
Figura 2.8.	Falla por fatiga en ejes de transmisión.	26
Figura 2.9	Falla por fatiga en engranes.	26
Figura 2.10.	Falla por fatiga en un avión comercial (1988) [7].	28
Figura 2.11	Gráfica de Wohler.	29
Figura 2.12	Zonas del diagrama S-N de metales ferrosos.	30
Figura 2.13	Modelo vida – deformación.	31
Figura 2.14.	Gráfica deformación – número de ciclos: Coffin – Manson.	32
Figura 2.15.	La gráfica de crecimiento de grietas o de Paris.	34
Figura 2.16 a.	Máquina de ensayo de fatiga tipo probeta de Moore.	34
Figura 2.16 b.	Máquina de ensayos de fatiga tipo viga.	35
Figura 2.16 c	Máquina de Brandolisio.	35
Figura 3.1.	Selección del método de simulación (Análisis Modal),	41

	para el diseño de las probetas de ensayos en fatiga ultrasónica.	
Figura 3.2.	Modelado del sólido para la probeta de ensayos en Workbench ANSYS.	42
Figura 3.3.	Construcción de la maya para el cálculo por elemento finito en ANSYS.	42
Figura 3.4.	Bloques de la simulación en ANSYS para el análisis modal.	43
Figura 3.5.	Simulación del análisis modal del acero 4140T con el método de elemento finito en ANSYS.	44
Figura 3.6.	Simulación del análisis modal del acero 1045 con el método de elemento finito en ANSYS.	44
Figura 3.7.	Bloques de simulación para obtener los esfuerzos en la probeta de ensayos.	45
Figura 3.8.	Bloques de simulación para obtener los esfuerzos en la probeta de ensayos.	46
Figura 3.9.	Bloques de simulación para obtener los esfuerzos en la probeta de ensayos.	46
Figura 4.1	Frecuencia longitudinal natural de vibración del acero 4140T obtenida por análisis modal.	47
Figura 4.2.	Frecuencia longitudinal natural de vibración del acero 1045 obtenida por análisis modal.	48
Figura 4.3	Dimensiones (mm), para la muestra de fatiga ultrasónica.	48
Figura 4.4	Resonancia de la probeta y comprobación con termografía.	49
Figura 4.5.	Esfuerzo en la probeta, simulado en ANSYS.	50
Figura 4.6.	Desplazamiento a lo largo de la probeta, simulado en ANSYS.	50

Figura 4.7.	Esfuerzo de Von Mises del acero 4140T, simulación numérica en ANSYS.	51
Figura 4.8.	Esfuerzo de Von Mises en el acero 1045, simulación numérica en ANSYS.	51
Figura 5.1 a)	Fabricación de muestras de calibración, b) Primeras muestras mecanizadas.	53
Figura 5.2 a)	Espécimen de prueba de fatiga ultrasónica conectado a la máquina de prueba, b), c) Imágenes termo gráficas de la muestra durante la prueba de fatiga ultrasónica.	53
Figura 5.3.	Dispositivo para ensayos de fatiga ultrasónica.	54
Figura 5.4.	Generador de alta frecuencia.	54
Figura 5.5.	Probeta de ensayo.	54
Figura 5.6	Sensor inductivo de proximidad, calibrando los desplazamientos.	55
Figura 5.7.	Calibración de desplazamiento con sensor inductivo.	57
Figura 5.8.	Máquina ultrasónica, siendo calibrada con sensor de proximidad inductivo.	57
Figura 5.9.	Gráfica de calibración de desplazamientos-voltaje	57
Figura 6.1.	Torno CNC para maquinado de probetas, utilizadas en ensayos de fatiga ultrasónica.	59
Figura 6.2	Cilindrado de probetas de acero, en torno CNC.	59
Figura 6.3.	Refrentado de probetas de acero para ensayos de fatiga ultrasónica.	61
Figura 6.4.	Broca de centros.	64
Figura 6.5	Barrenado de cilindros.	64
Figura 6.6.	Machueado para rosca interna.	65
Figura 6.7.	Cilindros roscados.	66
Figura 6.8.	Tipos de perfilados, imagen de SANDVIK Coromant.	66
Figura 6.9	a) y b) perfilado del cuello de las probetas de acero.	67
Figura 6.10.	Probetas terminadas de acero 4140 y 1045.	70

Figura 6.11.	Medida de las dimensiones en vernier electrónico.	71
Figura 7.1.	Vista parcial del programa de control de la máquina de la fatiga ultrasónica.	73
Figura 7.2.	Esquema del funcionamiento de una máquina de fatiga ultrasónica.	74
Figura 7.3.	Interfaz del programa de conteo de ciclos de la máquina de fatiga ultrasónica.	75
Figura 7.4.	Generador de voltaje de la máquina de fatiga ultrasónica.	75
Figura 7.5.	Programa de control de conteo de ciclos en LabView.	76
Figura 7.6.	Manejo de probetas fracturadas guardadas en bolsas cerradas, para evitar la contaminación de la superficie de fractura.	77
Figura 8.1.	Grafica de la resistencia de fatiga ultrasónica del acero 4140T	80
Figura 8.2.	Grafica de la resistencia de fatiga ultrasónica del acero 1045	80
Figura 8.3	Inicio de grieta en el centro del cuello de la muestra acero 4140T.	81
Figura 8.4	Inicio de grieta en el centro del cuello de la muestra acero 1045.	81
Figura 8.5.	Termo-gráfica acero 4140T.	81
Figura 8.6.	Termo-gráfica acero 1045.	81
Figura 8.7.	Termografía tomada en el momento de la ruptura por fatiga, en el acero 4140T	82
Figura 8.8.	Termografía tomada en el momento de la ruptura por fatiga, en el acero 1045	83
Figura 8.9.	Desplazamiento y tensión a lo largo de las aleaciones de acero bajo resonancia, obtenida por simulación	84

	numérica.	
Figura 8.10.	Muestras en la porta objetos del Microscopio Electrónico de Barrido.	85
Figura 8.11.	Fractura de la probeta de acero 1045 ensayada a 12 volts y 77% (239.4 Mpa) del límite elástico.	86
Figura 8.12.	Fractura de la probeta de acero 1045 ensayada a 13 volts y 84% (259.35 Mpa) del límite elástico.	87
Figura 8.13.	Fractura de la probeta de acero 1045 ensayada a 14 volts y 90% (279.3 Mpa) del límite elástico.	87
Figura 8.14.	Fractura de la probeta de acero 4140T ensayada a 15 volts y 72% (299.25 Mpa) del límite elástico.	88
Figura 8.15.	Fractura de la probeta de acero 4140T ensayada a 16 volts y 77% (319.2 Mpa) del límite elástico.	89
Figura 8.16.	Fractura de la probeta de acero 4140T ensayada a 17 volts y 82% (339.15 Mpa) del límite elástico.	89
Figura 8.17.	Fractura de la probeta de acero 4140T ensayada a 18 volts y 87% (359.1 Mpa) del límite elástico.	90
Figura 8.18.	Zonas de crecimiento y propagación de la grieta en las probetas de acero 1045 y 4140T.	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
Tablas 1.1	a) propiedades químicas y b) propiedades mecánicas del acero 4140 T.	17
Tablas 1.2	a) composición química y b) propiedades mecánicas del acero 1045.	18
Tabla 4.1.	Comportamiento de la probeta de acero 4140T con respecto al voltaje aplicado.	52
Tabla 4.2.	Comportamiento de la probeta de acero 1045 con respecto al voltaje aplicado.	52
Tabla 8.1.	Datos experimentales de fatiga ultrasónica en el acero 4140T.	78
Tabla 8.2.	Datos experimentales de fatiga ultrasónica en el acero 1045.	79
Tabla 8.3.	Probetas de ensayo visualizadas en el MEB, acero 1045 a tres niveles de carga.	86
Tabla 8.4.	Probetas de ensayo visualizadas en el MEB, acero 4140T en cuatro niveles de carga.	88

OBJETIVOS.

El objetivo principal de esta investigación se centra en llevar a cabo ensayos de fatiga ultrasónica en aceros de resistencia alta, acero 4140T y acero 1045, con el fin de determinar la resistencia a la fatiga bajo carga a muy alta frecuencia (20 KHz).

Además, también se tiene como objetivos secundarios:

- a) Determinar las dimensiones de la muestra de prueba con el fin de adaptarse a la condición de resonancia por simulación numérica modal,
- b) Obtener la vida de fatiga con la alta tensión de Von Mises en la sección de cuello,
- c) Analizar la iniciación y propagación de grietas con microscopía electrónico de barrido y microscopía óptica,
- d) Generar las conclusiones en relación con la resistencia a la fatiga de estas probetas de acero en pruebas de fatiga ultrasónica.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

El estudio de la resistencia en fatiga ultrasónica de los aceros 4140T y 1045 es relativamente limitado; esta conclusión resulta de una búsqueda exhaustiva bibliográfica al inicio de esta tesis. No obstante, el uso industrial de estos dos aceros es ampliamente difundido en las industrias modernas, particularmente en la industria automotriz.

HIPÓTESIS.

Es posible obtener resultados de fatiga ultrasónica en aceros de resistencia alta, como el acero 4140T y acero 1045 empleados en la industria automotriz. También es posible mediante análisis de microscopía electrónica de barrido llevar a cabo estudios sobre las causas de falla del material y de algunos parámetros involucrados.

CAPITULO I.- INTRODUCCIÓN.

Se llevaron a cabo ensayos de fatiga ultrasónica a aceros de resistencia alta denominado acero 4140T y del acero 1045.

La importancia de realizar ensayos mecánicos a los materiales tiene particular importancia para conocer y entender el comportamiento de los materiales sometidos a cargas que generan esfuerzos. Por esta razón, el estudio de fatiga es un ensayo que resulta necesario considerar en los materiales de diseño, como lo son los aceros que conciernen a esta investigación.

La fatiga mecánica es un fenómeno que se presenta en los materiales por cargas cíclicas repetitivas en donde los materiales sufren fallos micro-estructurales sin previo aviso, dando como consecuencia la ruptura súbita del material causado por micro-fisuras en el material las cuales se van propagando hasta formar una grieta que causa la falla por fatiga. Así, resulta necesario conocer el número de ciclos y a que esfuerzos suceden este fenómeno de fractura en los materiales para entender mejor su comportamiento y evitar en la medida de lo posible, llevar el material a las condiciones no deseadas de fallo. Los materiales deben trabajar por debajo de las condiciones de su esfuerzo de cedencia o límite elástico, para lograr esto resulta necesario estudiar el material y su comportamiento bajo cargas cíclicas, mejor conocido como fatiga mecánica de materiales [1].

Los aceros, son materiales con los que se construye la mayoría de componentes en las máquinas que se utilizan a diario para cubrir las necesidades de transporte, energía, alimentación, salud, etc.; estos componentes están en movimiento constante y sometidos a cargas que generan esfuerzos en su estructura; tal es el caso de: ejes de transmisión, cigüeñales en los automóviles, alabes y carcasas de turbinas, en las estructuras de las alas y tren de aterrizaje de los aviones, en los submarinos que bajan a profundidades considerables donde las fuerzas que ejerce la presión del agua someten al material a cargas grandes, entre muchas más aplicaciones de ingeniería donde se deben tomar en consideración el análisis y conocimiento de los materiales de construcción de estos elementos mencionados.

Para conocer el comportamiento a la fatiga ultrasónica de los materiales 4140T y 1045 abordados en este trabajo, se analizaron las propiedades físicas, mecánicas y su composición química de estos materiales. También fue necesario diseñar y maquinarse para dar forma a las probetas de ensayo, esto implicó trabajo de investigación de materiales y sus propiedades, procesos de manufactura por desprendiendo de material (corte), motivos de fallos en los materiales, método experimental de puesta en marcha de ensayos de fatiga y recolección de datos para llevar a cabo un análisis completo y obtener resultados de la vida en fatiga de los aceros antes mencionados. Este proceso se encuentra descrito a detalle en el desarrollo de esta tesis de Maestría.

1.1 Materiales de prueba, acero 4140T y acero 1045.

1.1.1 Acero 4140T

Propiedades mecánicas y propiedades químicas del acero 4140T (tratado).

Las propiedades químicas y mecánicas de acero 4140 T se muestran en la tabla 1.1. Es un acero de medio carbono, aleado con cromo y molibdeno de alta templeabilidad y buena resistencia a la fatiga, abrasión e impacto

Aplicaciones del acero 4140T:

Las aplicaciones de este acero son principalmente en la industria automotriz y se emplean para la fabricación de flechas, engranes, válvulas, pernos, coples, ejes, pernos de alta temperatura, rodillos, cuerpos de herramientas de corte, árbol de levas, ejes de tráiler, eslabones de cadena, resortes, cigüeñales, espárragos, flechas de mecanismos hidráulicos, etc. [2] En la figura 1.1 se ejemplifican algunas de las aplicaciones típicas del acero 4140T.



Figura 1.1. Aplicaciones típicas automotrices del acero 4140T

Este acero es tratado térmicamente, de donde su nominación T en la nomenclatura. Tiene un tratamiento de templeado de entre de 1100° – 1200°C, posteriormente, un enfriado lento, con el fin de adquirir las propiedades mecánicas y resistencia tales como tenacidad y dureza, requeridas en sus aplicaciones industriales.

Tablas 1.1 a) propiedades químicas y b) propiedades mecánicas del acero 4140 T.

Chemical Composition	[%]
C	0.40
Mn	0.90
Si	0.30
Cr	1.00
Mo	0.20
P	0.035
S	0.04

a)

Properties	
Density [Kg/m ³]	7850
Hardness, Brinell	321
σ_y [MPa]	415
σ_u [MPa]	655
E [GPa]	210

1.1.2 Acero 1045

Propiedades mecánicas y propiedades químicas del acero 1045.

Estas propiedades se enlistan en la tabla 1.2. El acero 1045 es utilizado cuando la resistencia y dureza son necesarios en su uso industrial. Este acero de medio carbono puede ser forjado mediante deformación mecánica y responde al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción; no obstante, no se recomienda para cementación o cianurado. Cuando se llevan a cabo soldaduras adecuadas, presenta también soldabilidad adecuada. Por su dureza y tenacidad se emplea con frecuencia para la fabricación de componentes de maquinaria. [3]

Aplicaciones del acero 1045:

Los usos principales para este acero son los siguientes: piñones, cuñas, ejes, tornillos, partes de maquinaria, herramientas agrícolas y remaches; algunas de estas aplicaciones se presentan mediante la Figura 1.2.



Figura 1.2 Aplicaciones típicas del acero 1045.

Tablas 1.2 a) composición química y b) propiedades mecánicas del acero 1045.

Chemical Composition	[%]
C	0.5
Mn	0.85
p	0.04
S	0.05

(a)

Properties	
Density [Kg/m ³]	7850
Dureza, Brinell	190
σ_y [MPa]	310
σ_u [MPa]	565
E [GPa]	200

(b)

1.2 Antecedentes de ensayos de fatiga en los aceros 4140T y acero 1045.

La búsqueda bibliográfica ha arrojado que se han realizado algunos estudios previos relacionados con el comportamiento en fatiga del acero 4140; un estudio se llevó a cabo mostrando resultados sobre este acero automotriz, como se ilustra en la Figura 1.3 a y . Los análisis van orientados a la obtención del gráfico S-N (esfuerzo contra número de ciclos) y ϵ -N (deformación contra número de ciclos), sin embargo son probados a muy bajo número de ciclos con las siguientes condiciones de ensayo: las muestras de acero se sometieron a 111,750 ciclos de carga entre $\sigma_{\min} = 146$ MPa y $\sigma_{\max} = 731$ MPa. Es de observarse que la amplitud de estos ensayos es $731 - 146 = 585$ MPa [4]

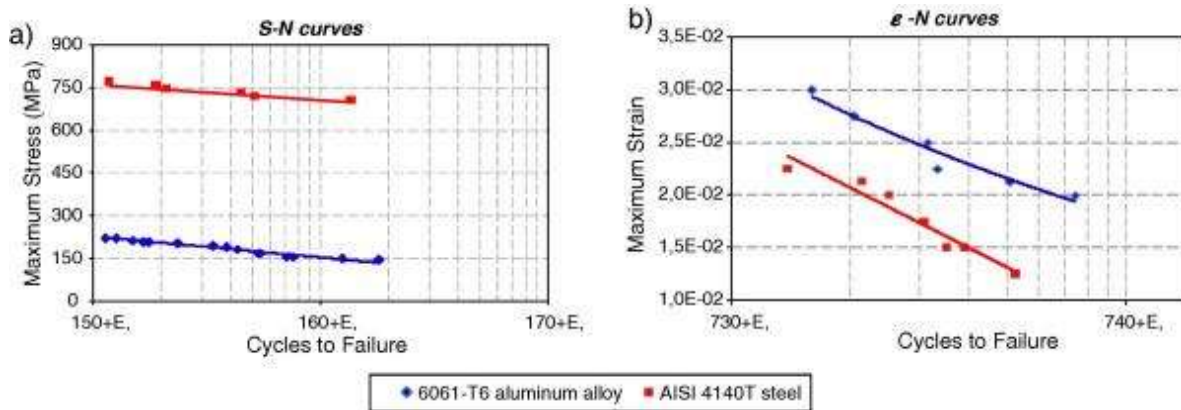


Figura 1.3. Gráficos S-N y ϵ -N del estudio de fatiga al acero 4140T en condiciones de 111,750 ciclos de carga entre $\sigma_{\min} = 146$ MPa y $\sigma_{\max} = 731$ MPa para generar un daño por fatiga $D = 0,25$ [4]

En una búsqueda bibliográfica se encontró estudios de fatiga del acero 1045, estos estudios están orientados a la obtención del gráfico S-N (esfuerzo contra el número de ciclos) Figura 1.4. Dichos resultados muestran cómo puede influir el acabado superficial de la muestra generado por el maquinado, particularmente con relación a la velocidad de avance, Figura 1.4: a menor avance de maquinado la tendencia a la vida en fatiga es más alta. Además, el proceso de maquinado puede resultar crítico para la resistencia del material sometido a fatiga; en efecto, la generación de esfuerzos residuales por ralladuras microscópicas en la superficie puede conducir a una disminución importante de la resistencia en fatiga.

De manera textual los autores dicen que “Sobre la base de los datos experimentales y las observaciones de las pruebas de fatiga para cada lote de muestras, la velocidad de alimentación afecta la vida de fatiga de las piezas de acero AISI1045 obtenidas por el proceso de torneado.

Los resultados llevan a la conclusión que las muestras mecanizadas con una velocidad de avance baja $f = 0.05\text{mm/rev}$ tienen una vida útil más larga que especímenes maquinados con la velocidad de avance ($f = 0.15\text{mm / rev}$ y $f = 0.25 \text{ mm / rev}$) considerablemente más altas. También es de notar que cuando la velocidad disminuye de $f = 0.25 \text{ mm/rev}$ a $f = 0.15 \text{ mm/rev}$ con un paso de 0.1 mm/rev , el número de ciclos de vida en fatiga aumenta con un porcentaje del 17% para $\sigma_{\text{max}} = 550\text{MPa}$ y 135% para $\sigma_{\text{max}} = 500\text{MPa}$. No obstante, cuando disminuye de $f = 0.15 \text{ mm/rev}$ a $f = 0.05 \text{ mm/rev}$, el número de ciclos de vida en fatiga aumenta claramente con un porcentaje del 30% para $\sigma_{\text{max}} = 550 \text{ MPa}$ y 184% para $\sigma_{\text{max}} = 500 \text{ MPa}$ ” [5]

Es importante señalar que las condiciones de corte y tipo de herramienta de corte como el tipo de inserto, ángulos de ataque entre otras variantes, juegan un papel significativo en el acabado superficial de las muestras y no se puede generalizar los resultados pues solo son un referente de estudios previos de la fatiga del acero 1045. Pero si es importante resaltar que una muestra entre más fino sea su maquinado mejor resistencia mecánica.

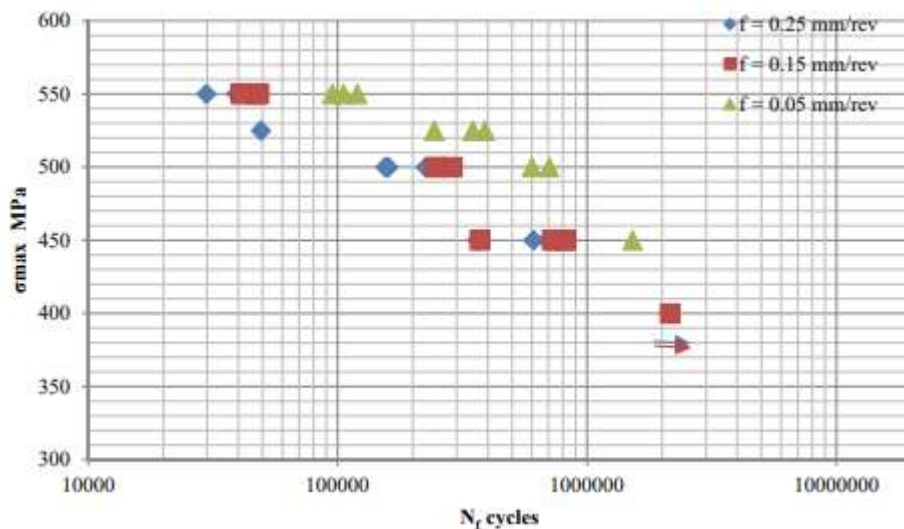


Figura 1.4. Grafico S-N obtenido por ensayos de fatiga en el acero 1045, variando el avance para tres lotes de prueba [5]

CAPITULO II.- PRINCIPIO DE ENSAYO EN FATIGA ULTRASÓNICA.

2.1 Fatiga de materiales.

En ingeniería y en especial en Ciencia de los Materiales, la fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas (fuerzas repetidas aplicadas sobre el material) se produce con cargas por debajo del límite elástico del material. Es un fenómeno que, sin definición formal, era reconocido desde la antigüedad. Este comportamiento no fue de interés real hasta la Revolución Industrial, cuando a mediados del siglo XIX comenzaron a producir las fuerzas necesarias para provocar la rotura con cargas dinámicas muy inferiores a las necesarias en el caso estático; y a desarrollar métodos de cálculo para el diseño de piezas confiables. Este no es el caso de materiales de aparición reciente, para los que es necesaria la fabricación y el ensayo de prototipos.

Un ejemplo de ello se tiene con un alambre: flexionándolo repetidamente se rompe después de un cierto número de flexiones (ciclos); por el contrario, un esfuerzo considerablemente grande sería necesario para romperlo en un sólo estiramiento. La fatiga conduce frecuentemente a la fractura en estructuras sometidas a cargas dinámicas fluctuantes (puentes, automóviles, aviones, etc.). Su principal riesgo es que la fractura puede iniciarse en el interior del material sin previa manifestación externa, causando una fractura súbita con posibles implicaciones materiales y humanas. La fatiga mecánica combinada con la fatiga-corrosión constituye más del 80% de causas de falla en elementos y sistemas mecánicos. Para aplicaciones industriales modernas en las que se involucran polímeros, cerámicos y materiales compuestos, las causas de falla también están ligadas frecuentemente a la fatiga mecánica.

La resistencia a la fractura, ligada a la fatiga, se mide por la capacidad de absorber energía de deformación; así, materiales con poca capacidad de almacenar energía de deformación, como el vidrio, tienen muy baja resistencia a la fractura: se fracturan antes que absorber energía de deformación. Por el contrario, un material dúctil tiene capacidad de absorber energía de deformación, luego entonces mayor resistencia a la fractura [6].

2.2 Tipos de Cargas dinámicas y sus características.

En las piezas de máquinas se pueden hallar diferentes tipos de sollicitaciones las cuales se pueden distinguir en dos tipos característicos: estáticas y dinámicas según que no varíen o que varíen con el tiempo. También se las suele llamar con otros apelativos. Así, las cargas estáticas suelen denominarse “estacionarias” o “monotónicas” y a las cargas dinámicas se las suele denominar “cíclicas” o “no estacionarias” o “transitorias”. En la Figura 2.1 se pueden apreciar las dos clases de fuerzas.

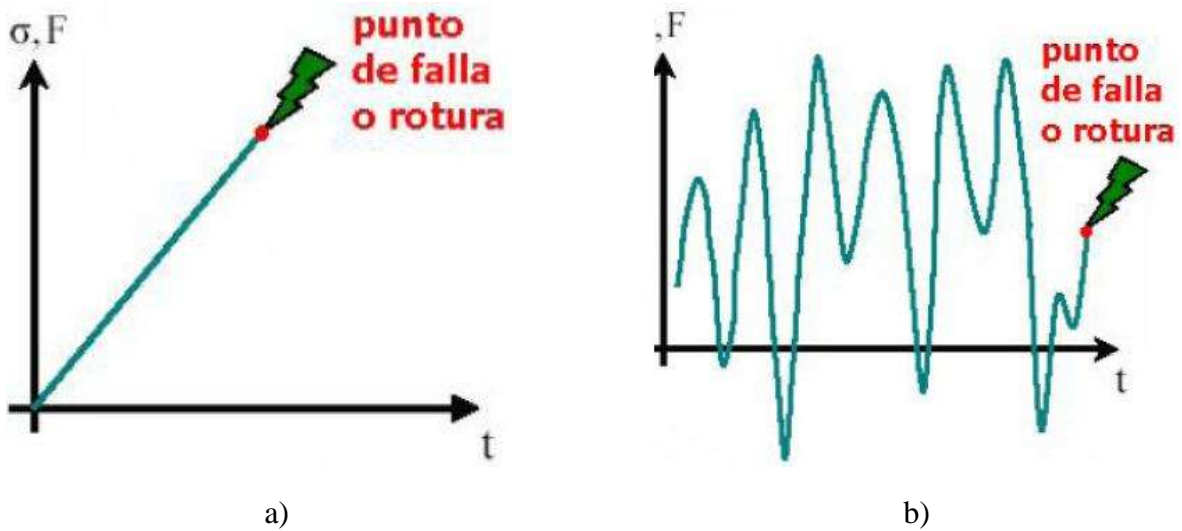


Figura 2.1 a) Cargas estáticas, b) cargas transitorias o dinámicas

En el caso de la Figura a) se dice que el tipo de análisis implica “Diseño y Cálculo por Resistencia” y en el caso de la Figura b) se dice que el tipo de análisis implica “Diseño y Cálculo para la duración”.

De la Figura 2.1 b) se pueden desprender varias configuraciones de sollicitación dinámica; sin embargo, dentro de ellas existe una muy característica y que por su sencillez descriptiva (en el sentido matemático) será la que se utilice en los modelos de análisis de falla por fatiga. En la Figura 2.2 se puede apreciar la denominada carga cíclica o periódica, que conduce a las tensiones cíclicas o periódicas. El tipo de fuerzas y/o cargas cíclicas puede tener diferentes casos, tales como axiales (de tracción o compresión), flexionantes o torsionales.

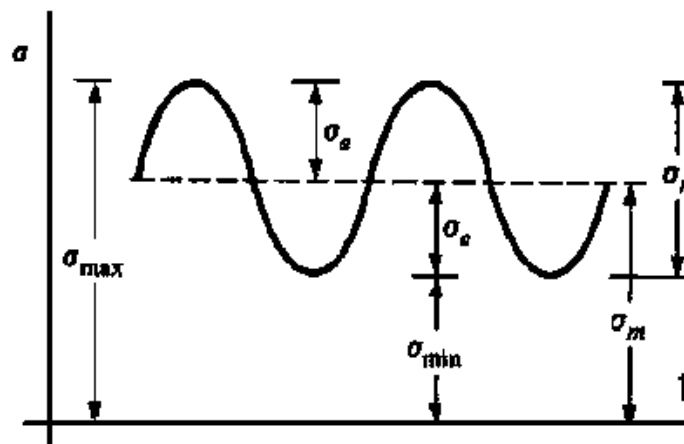


Figura 2.2 Forma de carga cíclica o periódica.

Es claro que la forma más elemental de representación de este tipo de sollicitación y/o tensión puede seguir una ley sinusoidal (2.1), a diferencia de otras que puedan ser fácilmente representables en términos matemáticos. En la ecuación (2.1), A , C y B son constantes que dependen de la condición y característica de la carga.

$$\sigma(t) = A * \sin(C * t) + B \quad (2.1)$$

Para la ecuación 2.1 u otra más compleja de la expresión genérica para calcular las cargas cíclicas siempre se podrán distinguir las siguientes cargas:

a) *Carga Máxima*: σ_{max}

b) *Carga Mínima*: σ_{min}

En función de las anteriores dos se pueden definir las siguientes cargas o entidades

a) *Carga Media*: que se obtiene de la siguiente relación:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$

b) *Amplitud de Carga*: se obtiene de la siguiente manera:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.3)$$

e) *Rango de Carga*: es la diferencia entre las cargas máxima y mínima:

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.4)$$

f) *Relación de carga*: es la razón entre la carga mínima a la máxima:

$$R_s = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.5)$$

g) *Relación de amplitud*: es la razón entre la amplitud de carga y la carga media:

$$A_a = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\sigma_{max} + \sigma_{min}} = \frac{1 - R_s}{1 + R_s} \quad (2.6)$$

De acuerdo a los valores relativos que tengan las expresiones (2.2) a (2.6) se pueden presentar cuatro casos característicos:

- 1) *Completamente alternante o Invertida*. Se verifica cuando se cumple que $\sigma_m = 0$, $R_S = -1$ y $Aa = \infty$. Tal como se puede ver en la Figura 2.3

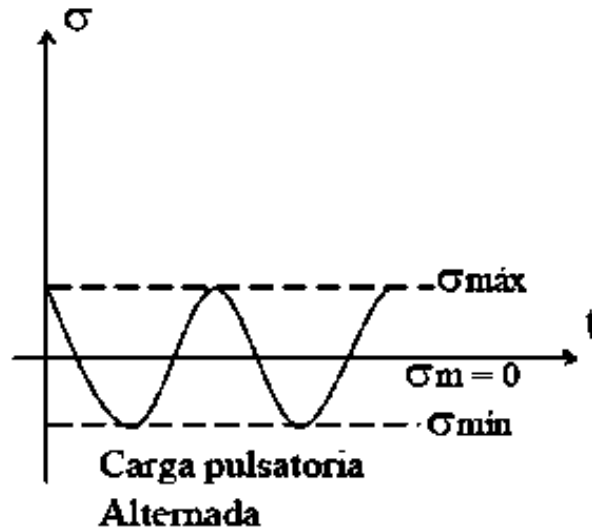


Figura 2.3 Tensión media nula.

- 2) *Caso de tensión media no nula*: Todas las expresiones (2.2) a (2.6) tienen un valor no nulo. Esto se puede apreciar en la Figura 2.4.

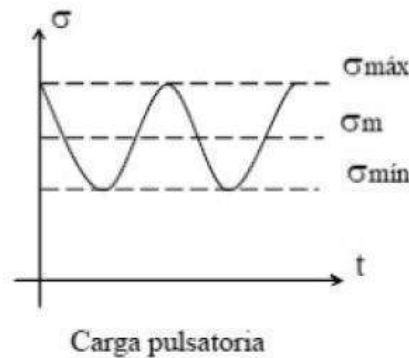


Figura 2.4 Carga alternante.

- 3) *Pulsante de tracción*: Se verifica cuando se cumple que $\sigma_{mín} = 0$, $\sigma_m = \sigma_{máx} / 2$, $R_S = 0$ y $Aa = 1$. Tal como se puede ver en la Figura 2.5.

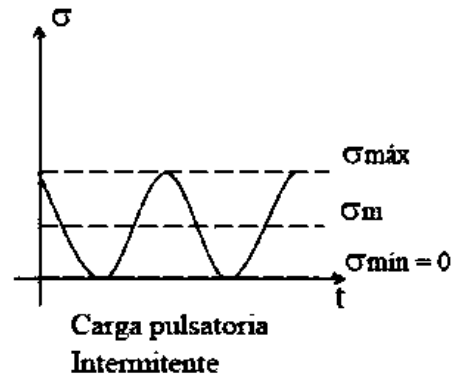


Figura 2.5. Carga pulsante de tracción.

4) *Pulsante compresiva*: Se verifica cuando se cumple que $\sigma_{\text{max}}=0$, $\sigma_m = \sigma_{\text{min}} / 2$, $R_S = \infty$ y $Aa = -1$. Tal como se puede ver en la Figura 2.6.

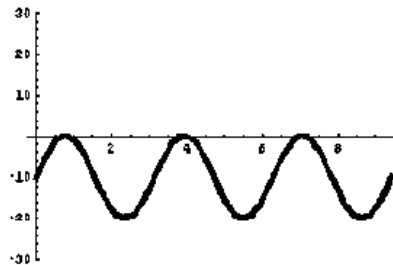


Figura 2.6. Carga pulsante compresiva.

2.3 Origen de la rotura por fatiga.

La Fatiga es uno de los más complejos fenómenos en el estudio de falla en piezas sometidas a la acción de cargas dinámicas. Este fenómeno puede aparecer súbitamente y sin aviso previo. Este fenómeno está asociado principalmente a la presencia de patrones de carga dinámicos de tipo cíclico, ejemplo de ello se muestra en la Figura 2.7, Figura 2.8 y Figura 2.9 donde se presentan fallos por fatiga en los materiales acero 4140T y acero 1045 empleados en la industria automotriz.

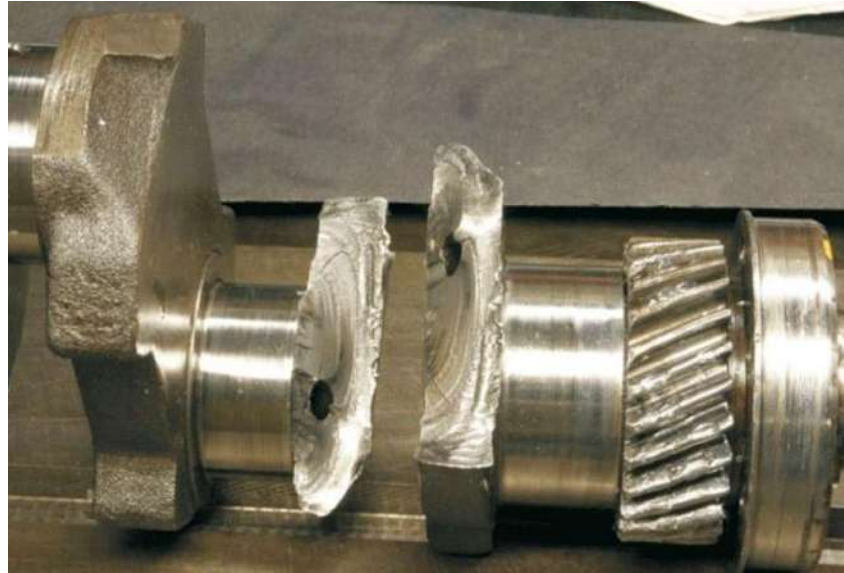


Figura 2.7. Ruptura por fatiga en cigüeñal de automóvil.



Figura 2.8. Falla por fatiga en ejes de transmisión.



Figura 2.9 Falla por fatiga en engranes.

La falla por fatiga de los materiales a cargas cíclicas también está íntimamente relacionada con alguna de las siguientes causas que a continuación se mencionan:

- presencia de irregularidades o discontinuidades internas (pequeñas grietas, inclusiones de elementos de impureza...),
- irregularidades originadas en los propios procesos de mecanización de las piezas,
- cambios de sección o de la geometría de las piezas, presencia de chaveteros, orificios, otras irregularidades, etc., o incluso la presencia en la superficie de marcas de fábrica.

En este sentido, la presencia de una pequeña grieta en una pieza, por ejemplo, podrá desencadenar un proceso que culmine con la rotura prematura de la pieza por fatiga.

En efecto, debido a la geometría típica de una grieta, los extremos de ésta suponen puntos de concentración de tensiones. Este hecho va a amplificar el efecto que sobre la pieza tiene la actuación de cargas cíclicas o variables. Así, las cargas cíclicas originarán un estado de tensión interior también de tipo fluctuante que hará progresar a la grieta por sus extremos, debido a que éstos son puntos donde se originan mayores niveles de concentración de tensiones.

De este modo, la grieta irá aumentando progresivamente de tamaño hasta que llega un momento donde el área o sección neta que queda útil en la pieza para resistir es tan pequeña que se produce su rotura repentina.

Es posible señalar que para la aparición de la rotura por fatiga, no hace falta sollicitaciones que originen niveles elevados de tensiones, sino que éstas pueden ser incluso muy inferiores al propio límite de fluencia del material:

$$S'_n < S_y < S_u \quad (2.7)$$

Donde,

S_u = límite de rotura
 S_y = límite de fluencia
 S'_n = límite de fatiga.

El mecanismo de Fatiga es uno de los más complejos fenómenos en el estudio de falla en piezas sometidas a la acción de cargas dinámicas. Este fenómeno está asociado principalmente a la presencia de patrones de carga dinámicos de tipo cíclico. El fenómeno de rotura súbita ya era conocido desde la era industrial asociado a la rotura o falla catastrófica de puentes con el advenimiento del ferrocarril se inició en distintos países del mundo el estudio científico de dicho fenómeno. Un Ejemplo puede verse en la Figura 2.10 donde el avión comercial Boeing 737-200 de Hawain Airlines, perdió un tercio de la parte superior de su cabina en pleno vuelo, a 25,000 pies de altitud. La causa fue la fatiga del material asociada con micro-corrosión [7].



Figura 2.10. Falla por fatiga en un avión comercial (1988) [7].

Desde mediados del siglo XIX se sabe que en aquellas piezas sometidas a cargas variables con un número grande de aplicaciones, se producía la rotura de la pieza prácticamente sin deformaciones; a este fenómeno se lo llamo “fatiga”, por semejanza al cansancio humano. Los distintos estudios efectuados, condujeron a distintas teorías, que tomadas en su conjunto pueden dejar las siguientes conclusiones:

- a) Los aceros de construcción de máquinas y en general los metales, no poseen homogeneidad en su estructura, ni continuidad de resistencia (aun a pesar de la hipótesis del continuo de la elasticidad clásica) en los metales que poseen cristales de una sola fase, que varían de tamaño y orientación, hacen que la resistencia promedio sea sólo válida para solicitaciones estáticas, debido a que estas solicitaciones permiten un acomodamiento adaptativo de los cristales a medida que aumenta la carga.
- b) A su vez las cargas variables tienen su aplicación prácticamente instantánea, lo cual no deja mucho margen temporal para el acomodamiento elástico, siendo este el motivo de la separación de los cristales en aquellos lugares donde hay menor cohesión inter-cristalina, generando el inicio de una micro-fisura, la que por el efecto de concentración de tensiones producida por la micro-entalla, crea en esa zona un incremento de tensiones que va aumentando rápidamente la fisura hasta que la sección resistente no puede soportar la carga, produciéndose en ese instante la rotura súbita de la pieza.
- c) Las micro-fisuras o grietas iniciales de fatiga comienzan sobre la superficie de las piezas en varios puntos simultáneamente y se propagan a los sustratos inferiores.

Estas grietas que son normalmente muy pequeñas y difíciles de observar, crecen y continúan su propagación.

2.4 Modelos analíticos para el estudio de la fatiga

Se han propuesto varios modelos para el estudio del comportamiento a fatiga de las piezas mecánicas que trabajan bajo esta condición como puede verse en [8]. En este trabajo, se mencionan los siguientes:

- Modelo vida – esfuerzo (Gráfica de Wohler o grafica S-N).
- Modelo vida- deformación (Gráfica de Coffin-Manson o grafica ϵ -N)
- Gráfica de Paris o gráfica de crecimiento de fractura da/dN

2.4.1. Gráfica de Wohler o grafica S-N

A mediados del siglo XIX, August Wöhler introdujo el concepto de amplitud de tensión límite (límite de fatiga) en la evaluación de la resistencia a la fatiga de las estructuras. La curva de Wohler representa un gráfico, Figura 2.11, relacionando la amplitud de tensión (S_a) con el número de ciclos necesarios para la fractura, indicando que cuanto mayor es la magnitud de la amplitud, menor será el número de ciclos que el material será capaz de soportar antes de la fractura.

Los métodos para caracterizar la resistencia a la fatiga en términos de amplitudes de tensión nominales utilizando datos experimentales obtenidos a partir de probetas lisas emergieron de los trabajos de Wöhler (1860) sobre fatiga de ejes de vagones ferroviarios.

Estas curvas se obtienen a través de una serie de ensayos donde una probeta del material se somete a tensiones cíclicas con una amplitud máxima relativamente grande (aproximadamente 2/3 de la resistencia estática a tracción). Se cuentan los ciclos hasta la fractura. Este procedimiento se repite en otras probetas a amplitudes máximas decrecientes.

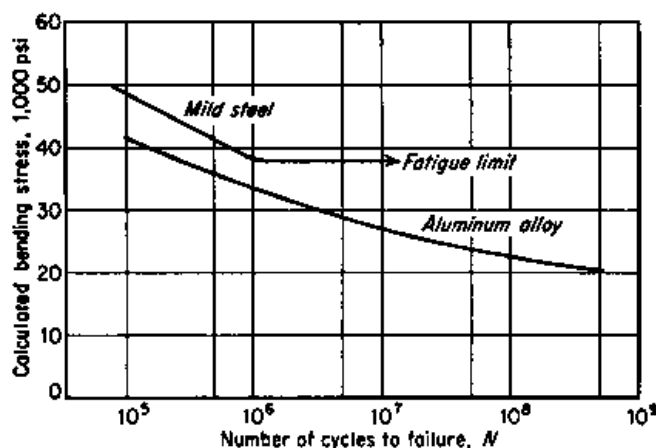


Figura 2.11 Gráfica de Wohler.

Este modelo es el más utilizado. Lo empleó por primera vez August Wöhler al publicar los resultados de sus ensayos. La curva obtenida se llama curva S-N o curva de Wöhler. Analíticamente se expresa por la ecuación 2.8 de Basquin.

$$S_a = S'_f (2N_f)^b \quad (2.8)$$

En donde:

S_a : Amplitud de tensiones.

S'_f : Coeficiente de resistencia a la fatiga.

N_f : Numero de ciclos de variación de la tensión hasta la falla del espécimen.

b: exponente cuyo valor oscila entre -0.05 a -0.12 en la mayoría de los materiales.

El exponente negativo vuelve a indicar la relación inversa entre la amplitud de tensiones y el número de ciclos de variación de tensión.

En esta Figura 2.12 se observa cómo se representa el campo de tensiones contra ciclos alternativos hasta la falla; puede verse que la escala de tensiones se expresa de dos maneras: como una relación entre el esfuerzo de falla y la resistencia a la tracción (S_{ut}) o bien, con los valores nominales de esfuerzo, sin dividir entre el valor de la resistencia a la tracción. La curva de la parte superior muestra el comportamiento a fatiga para metales ferrosos; se indica claramente que a partir del millón de ciclos (10^6), la resistencia a la fatiga S''_e se mantiene constante y su valor es aproximadamente la mitad del valor de la resistencia a la tracción S_{ut} . Dicha zona, a partir del millón de ciclos, se le conoce como zona de vida infinita, que es una de las zonas del diagrama S-N de metales ferrosos. En la misma figura se muestra este tipo de diagrama con sus zonas específicas

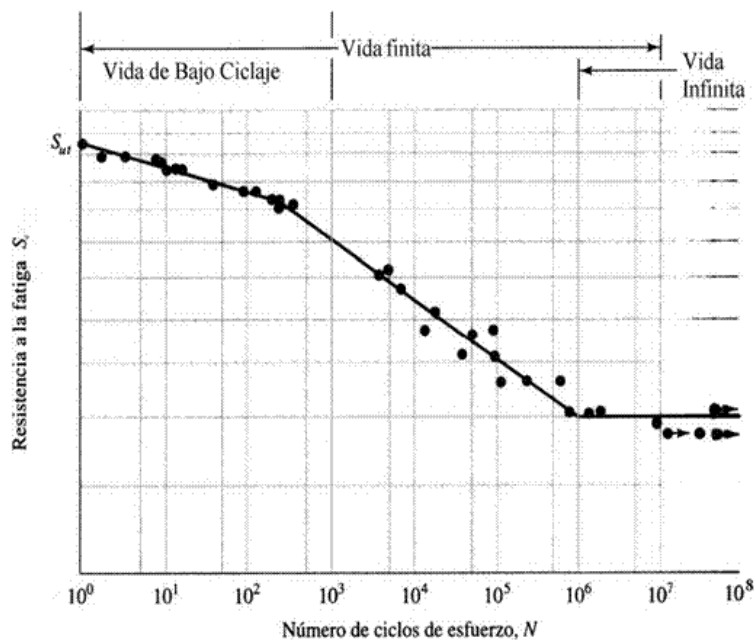


Figura 2.12 Zonas del diagrama S-N de metales ferrosos.

2.4.2 Modelo vida- deformación (Gráfica de Coffin-Manson o gráfica ϵ -N).

En este caso, se tiene el comportamiento asintótico del espécimen en fatiga. Analíticamente, se presenta a través de la ecuación de Mason- Coffin-Morrow. Esta ecuación se presenta como expresión de ajuste a las asíntotas creadas mediante la ecuación de Basquin, dada en (2.8) y la ecuación de amplitud de deformaciones dada por ecuación 2.8.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \epsilon'_f (2N_i)^c \quad (2.8)$$

En donde:

$\Delta\epsilon$: Amplitud de deformaciones.

ϵ'_f : Coeficiente de ductilidad a la fatiga.

C: exponente cuyo valor oscila entre -0.5 a -0.7.

El modelo de Mason – Coffin – Marrow se presenta, entonces, como en la ecuación 2.9.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{S'_e}{E} (2N_i)^b + \epsilon'_f (2N_i)^c \quad (2.9)$$

El mismo es válido para cualquier estado de cargas, la gráfica de este modelo se observa en la Figura 2.13.

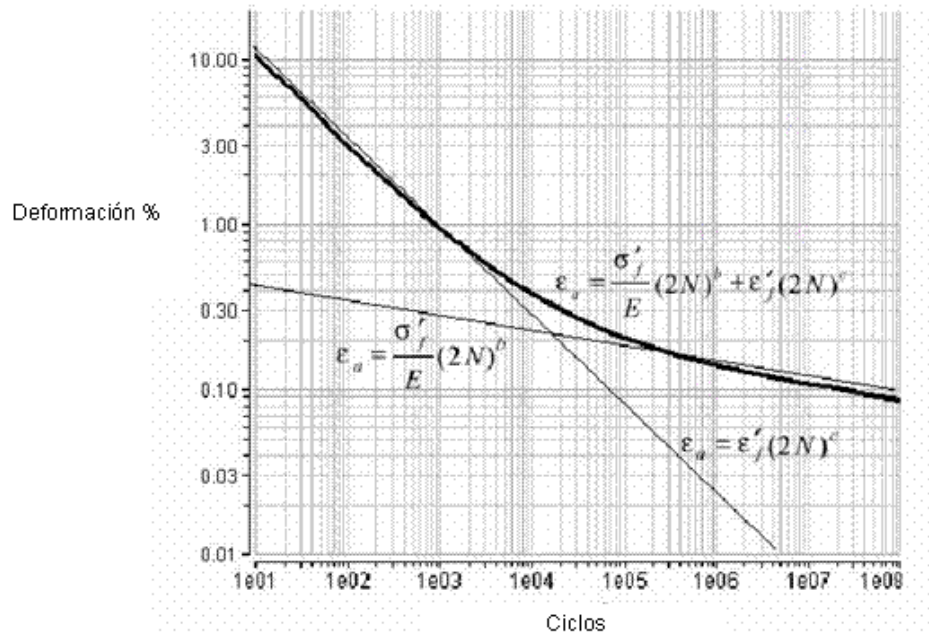


Figura 2.13 Modelo vida – deformación.

Relación de esfuerzo – deformación.

$$\Delta\sigma = K'(\Delta\varepsilon)^{n'} \quad (2.10)$$

$$n' \approx 0.1 - 0.2$$

Vida en fatiga: relación de Coffin-Manson.

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon' f(2Nf)^c \quad (2.11)$$

$$c \approx -0.5 - 0.7$$

$$c = -1/(1+5n') \quad (2.12)$$

Si n' es de gran valor, la vida en fatiga aumenta.

Para el dominio elástico de los materiales Basquin adaptó la siguiente ecuación.

$$\sigma_a = E \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \sigma_f'(2N)^b \quad (2.13)$$

Intersección del esfuerzo en la línea elástica extrapolada

$$\frac{\sigma_a}{E} \quad (2.14)$$

Alto ciclo = control de deformación elástica: pendiente (en régimen elástico).

$$b = \frac{-n'}{(1 + 5n')} \quad (2.15)$$

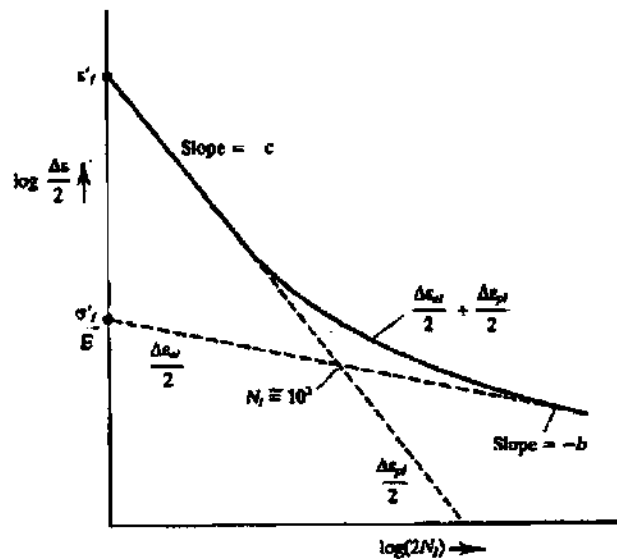


Figura 2.14. Gráfica deformación – número de ciclos: Coffin – Manson.

2.4.3. Gráfica de Paris o gráfica de crecimiento de fractura de/dN

Los resultados de los estudios de fatiga han mostrado que la vida de un componente estructural puede relacionarse con la velocidad de crecimiento de la grieta (2.16). La velocidad de propagación de la grieta es una función del nivel de tensiones y de la amplitud de la misma.

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad (2.16)$$

Dónde:

- A y m son constantes para un determinado material
- ΔK la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos (2.17) y (2.18).
- $\frac{da}{dN}$ pendiente de la curva de velocidad de crecimiento.

El valor de **m** normalmente está comprendido entre 1 y 6.

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (2.17)$$

O bien

$$\Delta K = Y\Delta\sigma\sqrt{(\pi a)} \quad (2.18)$$

Desarrollando estas expresiones a partir de gráficas generadas, se puede llegar a la siguiente ecuación:

$$N_f = \frac{da}{A\pi^{\frac{m}{2}}(\Delta\sigma)^m} \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{Y^m a^{\frac{m}{2}}} da \quad (2.19)$$

Donde:

- N_f Número de ciclos hasta la rotura.
- Y Parámetro independiente de la longitud de la grieta.
- **m y A** Siguen siendo parámetros definidos por el material.
- a_c Es la longitud crítica de la grieta (2.20).
- a_0 Longitud de grieta inicial.

a_c se puede calcular por ecuación:

$$a_c = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma Y \sqrt{\pi}} \right)^2 \quad (2.20)$$

Donde:

- K_{Ic} es la tenacidad de fractura de deformaciones planas.

Estas fórmulas fueron generadas por Paul C. Paris en 1961 realizando una gráfica logarítmica log-log de la velocidad de crecimiento de grieta, Figura 2.15, contra el factor de

intensidad de esfuerzos mostrando una relación lineal en la gráfica. Utilizando esta gráfica se puede realizar predicciones cuantitativas sobre la vida residual de una probeta dado un tamaño de grieta particular. Se encuentra así el comienzo de la iniciación o iniciación rápida de grieta.

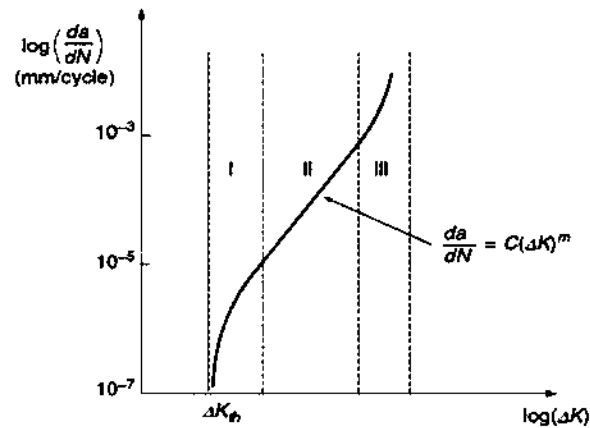


Figura 2.15. La gráfica de crecimiento de grietas o de Paris.

2.5. Fatiga Convencional.

Existen varios tipos de ensayos para determinar la vida a fatiga de un espécimen. El más empleado es el de viga rotatoria; este puede ser realizado bien sea con la máquina de Moore [9] o la de tipo viga en voladizo como se muestra en [10]. También existen variantes de dichas máquinas como se mencionan en [11], [12]; estas últimas emplean control por software. Las figuras 2.16 (a), (b) y (c) presentan los modelos de máquinas de ensayo de fatiga por flexión rotativa. Otros modelos como los elaborados por la casa Instron, adjuntan la función de fatiga por tensión axial a las máquinas universales de tracción.



Figura 2.16 a. Máquina de ensayo de fatiga tipo probeta de Moore.

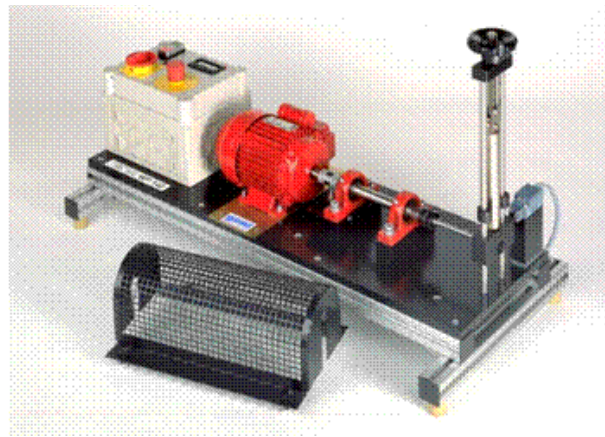


Figura 2.16 b. Máquina de ensayos de fatiga tipo viga.

En las Figura 2.16b puede observarse que la flexión es producida por un cilindro hidráulico, a diferencia del modelo de Moore en el cual, la flexión se aplica mediante unas pesas.

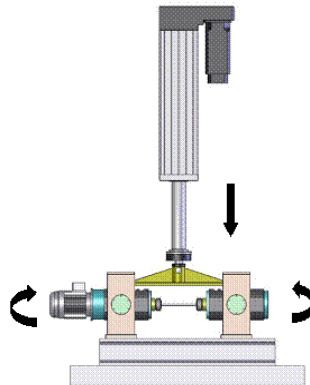


Figura 2.16 c Máquina de Brandolisio.

2.5.1 Flexión Rotativa

En los ensayos de fatiga por flexión rotativa, se aplica una carga de flexión al espécimen, enseguida se enciende el motor: este gira a un determinado número de rpm. Transcurrido un cierto tiempo la probeta rompe, y es entonces cuando se toma el valor del número de ciclos y el esfuerzo al cual la probeta rompió para construir el diagrama S-N descrito anteriormente. En el caso de un acero, la probeta tarda hasta medio día en alcanzar el millón de ciclos [13], lo cual indica que estos ensayos toman tiempo.

En esta modalidad de ensayos la probeta queda sometida a una flexión alternada, que se traduce en que un punto exterior cualquiera de la probeta queda sometido a un ciclo de cargas que va de tracción a compresión. Esto produce fisuras que se van propagando lentamente, reduciendo el área hasta un punto tal en que la probeta no pueda resistir la carga aplicada y se rompe.

2.6. Fatiga ultrasónica

Los ensayos de fatiga ultrasónica difieren de los convencionales debido a que la frecuencia de operación para estos últimos está limitada a los 100-200 Hz; mientras que el rango de frecuencia con el cual trabaja una máquina de fatiga ultrasónica es de 15GHz a 30GHz, con un valor típico de 20GHz. De esta manera el tiempo requerido para alcanzar 10^7 ciclos se encuentra en el orden de los 9 minutos en una máquina ultrasónica trabajando a 20 KHz, mientras que una máquina convencional de 100 Hz tomaría un día y tres horas, aproximadamente. Para ciclos más elevados, por ejemplo 10^9 ciclos (régimen giga cíclico), el método ultrasónico requiere de 14 horas aproximadamente, mientras que 100 Hz de 116 días aproximadamente para tan solo una probeta.

El fenómeno de fallo por fatiga ultrasónica ha sido estudiado por autores como Bathias, 2006 [14]; Kong, 1987 [15]; Ni, 1991 [16]; Thanigayarasu, 1988 [17]. En México recientemente también se hacen estudios sobre fatiga ultrasónica a materiales podemos ver un caso reciente de estudio por el autor Gonzalo M. Domínguez Almaraz [18].

En 1850, Wohler, introdujo el límite de fatiga en el 10^6 ciclos, porque en ese momento muchas aplicaciones industriales tales como máquinas de vapor tenían una vida más corta en fatiga en comparación con los límites modernos 10^9 - 10^{10} ciclos, que representan mucho más de 10^6 ciclos propuestos por Wohler. La curva de la fatiga S-N de los aceros se consideró siempre ser asintótica en el eje horizontal, cuando la vida en fatiga es más de 10^6 ciclos, pero no se realizaron pruebas más allá de 10^9 ciclos para comprobar la existencia algo más después de esta asíntota. La tecnología ultrasónica hace estas pruebas de fatiga posibles.

Actualmente es posible conocer la fatiga a los 10^9 ciclos, incluso se puede llegar a 10^{11} ciclos con tecnología ultrasónica. Los métodos de ensayo de fatiga gigacíclica han sido desarrollados y aplicados por muchos investigadores en todo el mundo. En 1950, Mason construyó los primeros piezoeléctricos de 20 KHz para una máquina. Gracias a la tecnología de la fatiga ultrasónica, podemos conocer la vida en fatiga de un gran número de los componentes que llegan a 10^9 - 10^{10} ciclos de vida en servicio. La función de un piezoeléctrico es convertir una señal de alta frecuencia generada por un sistema en oscilaciones mecánicas, las cuales se aplican a la pieza a ensayar. Dicha pieza tiene que estar previamente calculada para que su frecuencia natural de oscilación coincida con la frecuencia de excitación generada por la máquina [19].

2.7. Fenómeno de la Resonancia Mecánica.

La resonancia 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 se acerca al periodo de vibración característico de dicho cuerpo, en el cual, una fuerza relativamente pequeña aplicada en forma repetida hace que una amplitud de un sistema oscilante crezca.

El fenómeno de la resonancia requiere por tanto: a) De un sistema elástico que presente frecuencias naturales de vibración, b) De una fuerza externa de tipo periódico que actúe sobre el sistema elástico, c) De una coincidencia entre ambos tipos de frecuencia.

En estas circunstancias el cuerpo vibra, aumentando de forma progresiva la amplitud del movimiento tras cada una de las actuaciones sucesivas de la fuerza. En teoría, si se consiguiera que una pequeña fuerza sobre un sistema oscilara a la misma frecuencia que la frecuencia natural del sistema se produciría una oscilación resultante con una amplitud indeterminada.

Este efecto puede ser destructivo en algunos materiales rígidos como el vaso que se rompe cuando una soprano canta y alcanza y sostiene la frecuencia de resonancia del mismo.

Una forma de poner de manifiesto este fenómeno consiste en tomar dos diapasones capaces de emitir un sonido de la misma frecuencia y colocados próximos el uno del otro, cuando hacemos vibrar uno, el otro emite, de manera espontánea, el mismo sonido, debido a que las ondas sonoras generadas por el primero presionan a través del aire al segundo.

2.8. Problema de límite de fatiga.

Existen numerosas razones para que cada componente de una estructura falle bajo repetidas cargas. Algunas de las causas de esta falla en los materiales puede deberse a un único efecto o a una combinación de efectos, tales como: diseño, deficiencias en la manufactura, el inadecuado o insuficiente mantenimiento, sobrecargas en condiciones operativas, los factores ambientales como el calor o corrosión y esfuerzos no considerados en las condiciones normales de operación. En general, el término falla por fatiga es definido como la ruptura completa de un material o un componente, que también puede referirse a una condición cuando el componente ha excedido su carga máxima o límite de carga, por lo que no es capaz de funcionar en forma correcta. La fatiga es una falla progresiva de un componente bajo repetidas cargas, recurrentes o fluctuantes cargas frente al tiempo. Un material sometido a este tipo de cargas puede fracturar a niveles de subraya inferiores a los necesarios para causar la falla en condiciones estáticas y de tensión por debajo del límite elástico.

En varios sectores industriales, aeronáutica, aeroespacial, transporte ferroviario, generación de electricidad, marinos y terrestres, hay varios elementos estructurales que son sometidas a cargas periódicas de alta frecuencia y baja amplitud, muchas veces más de 10^7 ciclos durante su vida laboral. Un ejemplo puede ser la vida del motor de un automóvil cuyos componentes operan en el rango de 10^9 ciclos. Para los grandes motores de buques o

trenes de alta velocidad la vida de estos alcanzan 10^{10} ciclos, mientras que en las turbinas de los aviones, la vida en fatiga es de aproximadamente 10^{11} ciclos.

En 1984 los investigadores japoneses descubrieron que los materiales metálicos como los aceros de baja aleación pueden fracasar en fatiga después 10^7 ciclos; de estos estudios, más investigadores comenzaron a estudiar el fenómeno de la fatiga a gran número de ciclos. Varios trabajos de investigación revelaron que el límite de fatiga no existe, aunque se ha afirmado en el siglo pasado para algunos aceros. En las curvas S-N de algunos materiales muestran una asíntota en la gama gigacíclica, bajo ciertas condiciones, tales como alta temperatura o corrosión, esta asíntota desaparece. Entonces, es muy interesante investigar el fenómeno de la fatiga en el régimen gigacíclico para estudiar este comportamiento de los materiales. Sin embargo, para simular los daños por fatiga con máquinas convencionales de ensayo que sólo llegan a una frecuencia entre 10 y 200 Hz, el estudio de la fatiga en una gama completa sería imposible porque la capacidad de estas máquinas está muy lejos de la frecuencia de los trabajos de algunos componentes estructurales, tales como las turbinas. Además, estos componentes están sometidos a un gran número de ciclos (más de 10^9 ciclos) durante su vida laboral. Para realizar ensayos de fatiga a esa larga vida con una máquina convencional en 100 Hz, podría tomar más de 100 días.

El diseño y fabricación de prototipos de máquinas ultrasónicas de ensayo (altas frecuencias) ha hecho posible el estudio de la fatiga de materiales bajo carga a una frecuencia cíclica de 20 kHz, disminuyendo el tiempo de la prueba.

CAPÍTULO III.- SIMULACIÓN EN ANSYS.

3.1 Análisis Modal.

Se denomina análisis modal a las técnicas utilizadas para determinar los modos normales y sus respectivas frecuencias naturales de vibración. El análisis modal de las estructuras pasa necesariamente por una modelización matemática. La técnica más utilizada es el método de elementos finitos que consiste en dividir el continuo en un número finito de elementos articulados entre sí.

Las frecuencias naturales y modos de vibración son parámetros muy importantes en diseño de estructuras en condiciones de cargas dinámicas [20].

En este caso se debe realizar el cálculo por elemento finito para encontrar la geometría y dimensiones adecuadas de una probeta la cual posea una determinada frecuencia natural y modo de oscilación, con el fin de poder hacer que la probeta entre en resonancia y realizar las pruebas de fatiga ultrasónica.

Para realizar el cálculo se usó el programa ANSYS 10.0 en el cual se realizaron varios ensayos de prueba y error hasta poder encontrar el valor más aproximado a 20000 Hz en el modo de vibración en el eje vertical de esta probeta.

3.1.1 Formulación matricial para obtener la frecuencia natural de oscilación.

La relación entre la masa de un sistema y su rigidez viene expresada por la ecuación matricial siguiente:

$$[K]\{\varphi_i\} = \lambda_i[M]\{\varphi_i\} \quad (3.1)$$

Que para un sistema discretizado en i elementos representan:

[K] = matriz de rigidez estructural
{ φ_i } = vector de direcciones propias
 λ_i = valores propios
[M] = matriz de masa estructural

El objetivo en esta ecuación es determinar los valores propios del sistema λ_i que constituyen las frecuencias naturales de oscilación del sistema.

Paso siguiente: reducción de matrices (el número de grados de libertad seleccionados debe ser al menos el doble del número de frecuencias naturales solicitadas).

Así la ecuación reducida es:

$$[K]'\{\varphi_i\}' = \lambda_i[M]'\{\varphi_i\}' \quad (3.2)$$

Donde:

$[K]'$ = matriz reducida de rigidez estructural (conocida)
 $\{\varphi_i\}'$ = vector reducido de direcciones propias (desconocido)
 λ_i = valores propios (desconocido)
 $[M]'$ = matriz de masa estructural (conocida)

Cambiando la matriz de masa al primer miembro de la ecuación resulta:

$$[K]'^{-1}\{\varphi_i\}' = \lambda_i[M]'\{\varphi_i\}' \quad (3.3)$$

Descomponiendo por Cholesky la matriz reducida $[M]'$ en $[L] [L]^T$ donde $[L]$ es una matriz triangular inferior. Combinando con la ecuación (3.3) resulta:

$$[L]^T [L]^{-1}[K]'\{\varphi_i\}' = \lambda_i\{\varphi_i\}' \quad (3.4)$$

Ahora es conveniente definir:

$$\{\varphi_i\}' = [L]^T \{\psi\} \quad (3.5)$$

Combinando la ecuación (3.4) con la ecuación anterior (3.5) tenemos:

$$[L]^{-1} [K]' [L]^T \{\psi\} = \lambda_i\{\psi\} \quad (3.6)$$

O bien

$$[A] \{\psi\} = \lambda_i\{\psi\} \quad (3.7)$$

Dónde:

$$[A] = [L]^{-1} [K]' [L]^T \quad (3.8)$$

Siguiente paso reducir $[A]$ a la forma tridiagonal.

Este paso se realiza por el método de Householder's, a través de una serie de transformaciones de semejanza rendimiento

$$[B] = [T]^T [A] [T] \quad (3.9)$$

Donde:

$[B]$ = forma tridiagonalizada de $[A]$
 $[T]$ = matriz construida para tridiagonalizar $[A]$ resuelta por iteración

Finalmente este problema se reduce a la siguiente expresión:

$$[B] \{\psi\} = \lambda_i \{\psi\} \quad (3.10)$$

A partir de esta ecuación (3.10) lo que resta es resolver para encontrar los valores de λ_i los cuales serán los valores propios es decir, las frecuencias naturales de oscilación.

3.1.2 Simulación del Análisis Modal en ANSYS.

Con la finalidad de encontrar las dimensiones de probeta que entren en resonancia con la frecuencia d excitación de la máquina de fatiga ultrasónica, se llevaron a cabo simulaciones numéricas de análisis modal. La frecuencia constante de vibración de la máquina ultrasónica es 20KHz; por esta razón se implementó un análisis modal Figura 3.1. La figura anterior muestra la elección del módulo análisis modal en la ventana de interfaz de usuario de ANSYS Workbench como se muestra en esa figura. en este bloque se modela la probeta con las dimensiones propuestas, Figura 3.2; y mediante un procedimiento de ensayo - error variando las dimensiones de la probeta, se obtienen sus dimensiones que generen una frecuencia natural de oscilación en dirección longitudinal cercanas a la frecuencia de excitación de 20Khz.

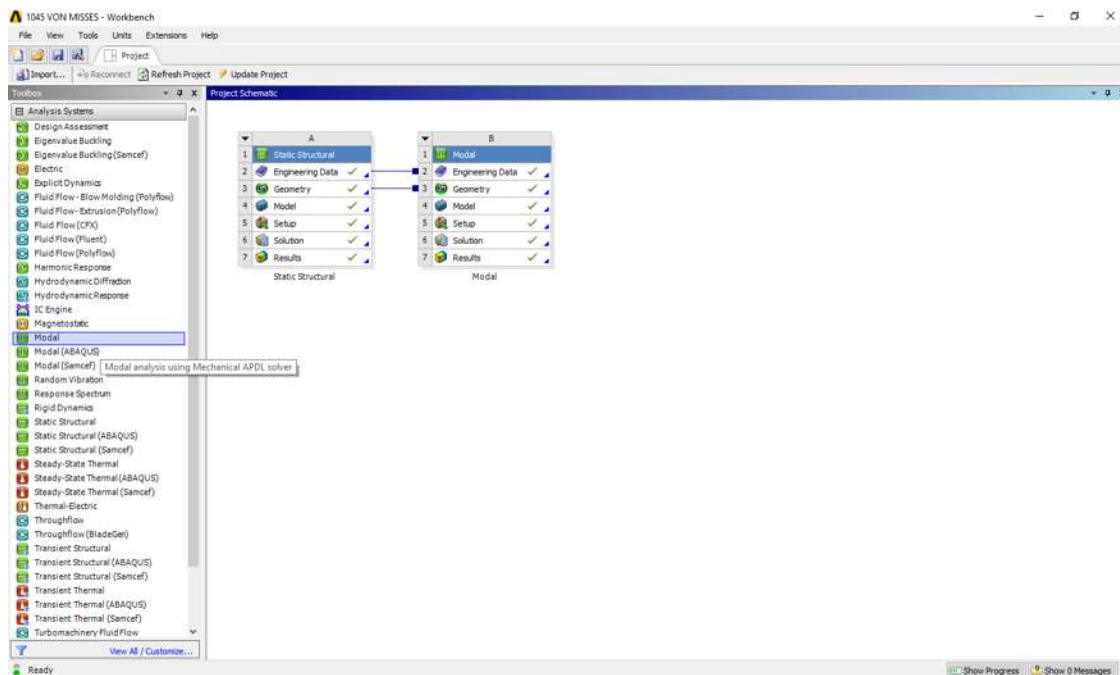


Figura 3.1. Selección del método de simulación (Análisis Modal), para el diseño de las probetas de ensayos en fatiga ultrasónica.

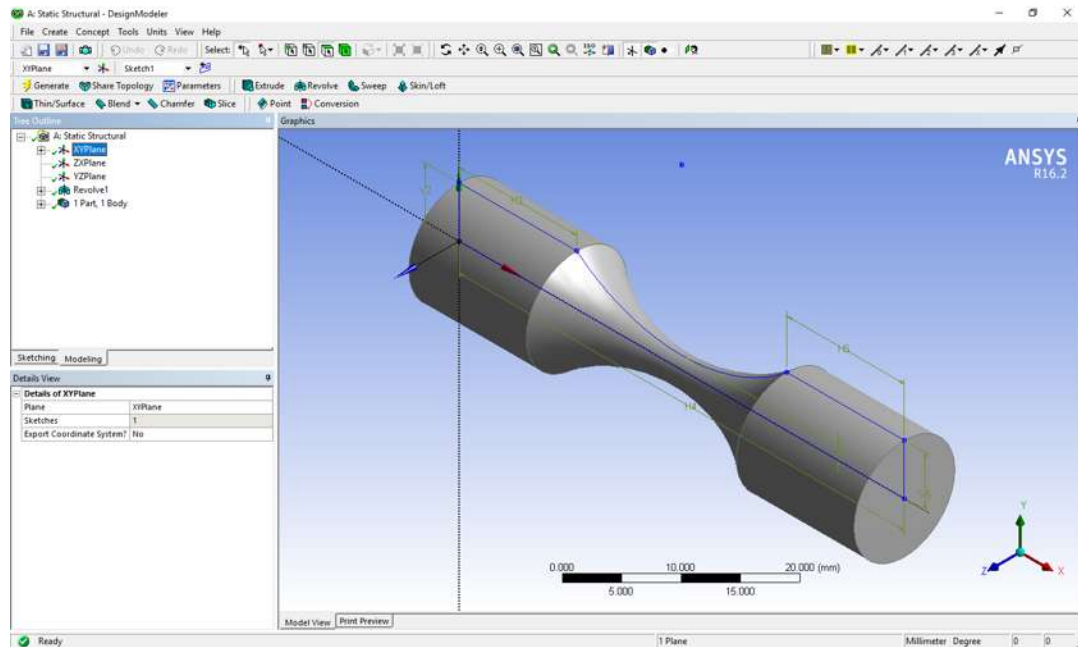


Figura 3.2. Modelado del sólido para la probeta de ensayos en Workbench ANSYS.

Para encontrar la frecuencia natural de la probeta se usa el método del elemento finito por simulación en ANSYS [21]. La Figura 3.3 muestra el mado aplicado a la probeta con un número de elementos de 528 de tipo hexaédrico y 2705 nodos.

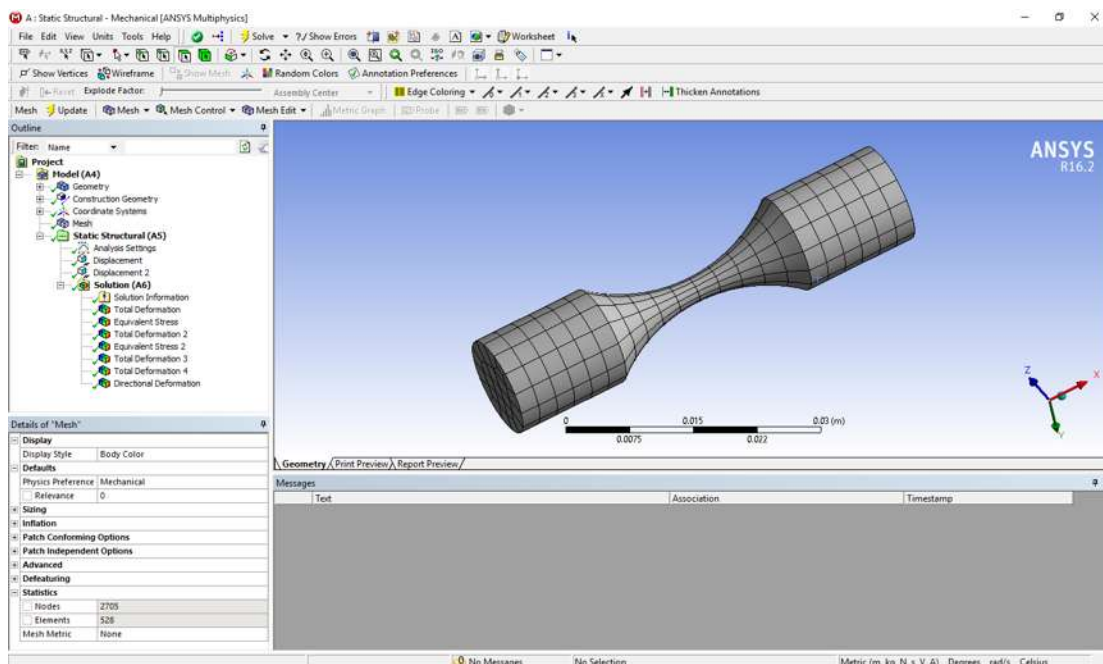


Figura 3.3. Construcción de la maya para el cálculo por elemento finito en ANSYS.

Los resultados del análisis modal permiten obtener diferentes frecuencias de vibración del espécimen simulado. La frecuencia de oscilación de interés es la longitudinal y cercana a los 20 KHz. Para el acero 4140T la simulación numérica modal permitió obtener una frecuencia natural de oscilación de 19990 Hz Figura 3.5. Para el acero 1045 la simulación numérica modal nos da como solución una frecuencia de 19965 Hz Figura 3.6. Para obtener esta frecuencia es necesario hacer una serie de secuencias de simulación en ANSYS en bloques como se aprecia en la Figura 3.4.

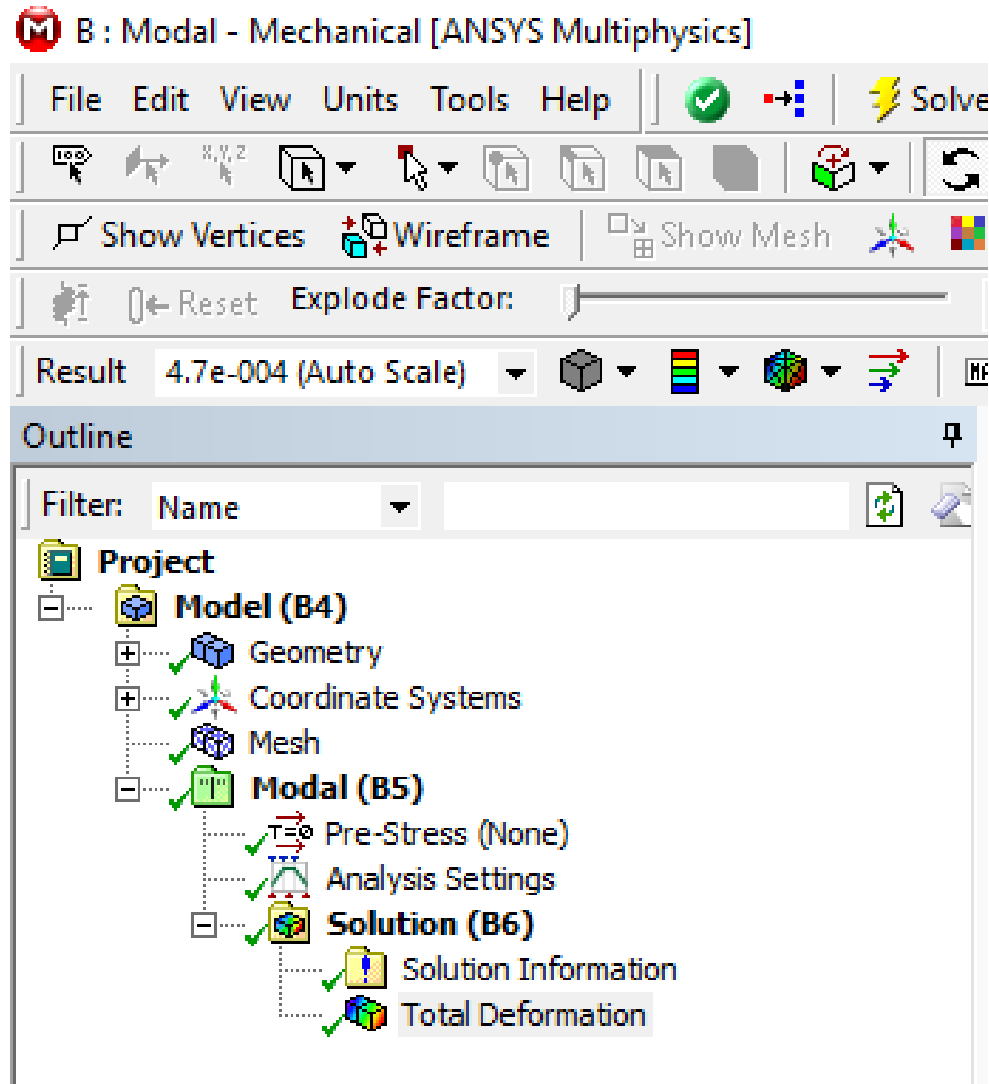


Figura 3.4. Bloques de la simulación en ANSYS para el análisis modal.

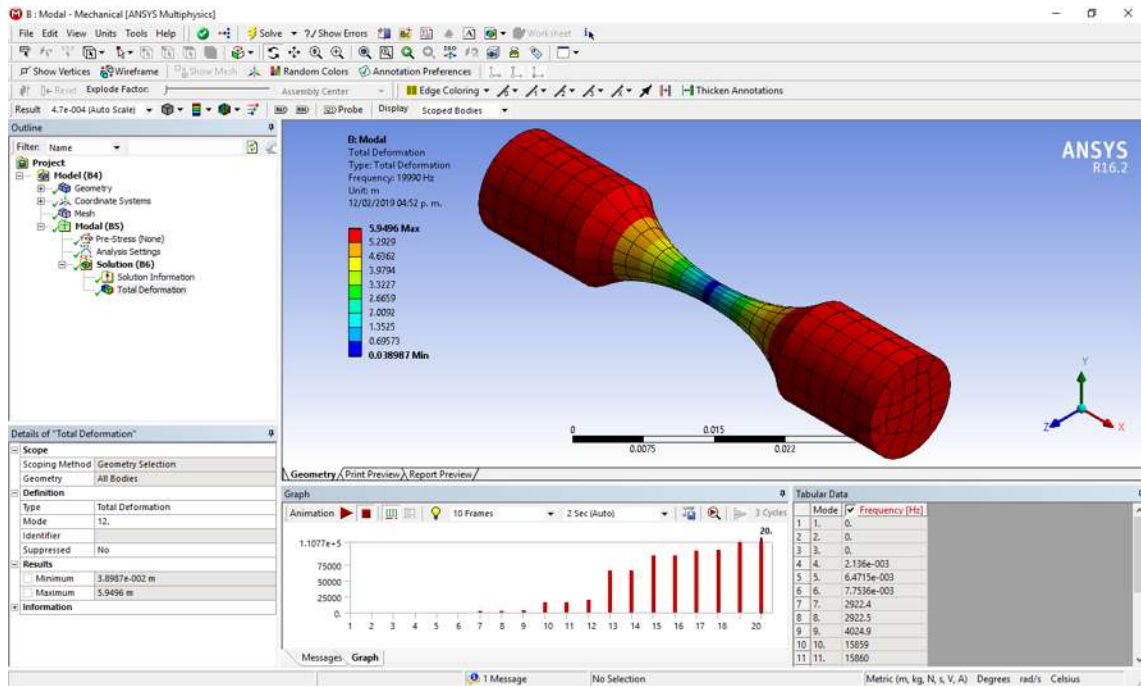


Figura 3.5. Simulación del análisis modal del acero 4140T con el método de elemento finito en ANSYS.

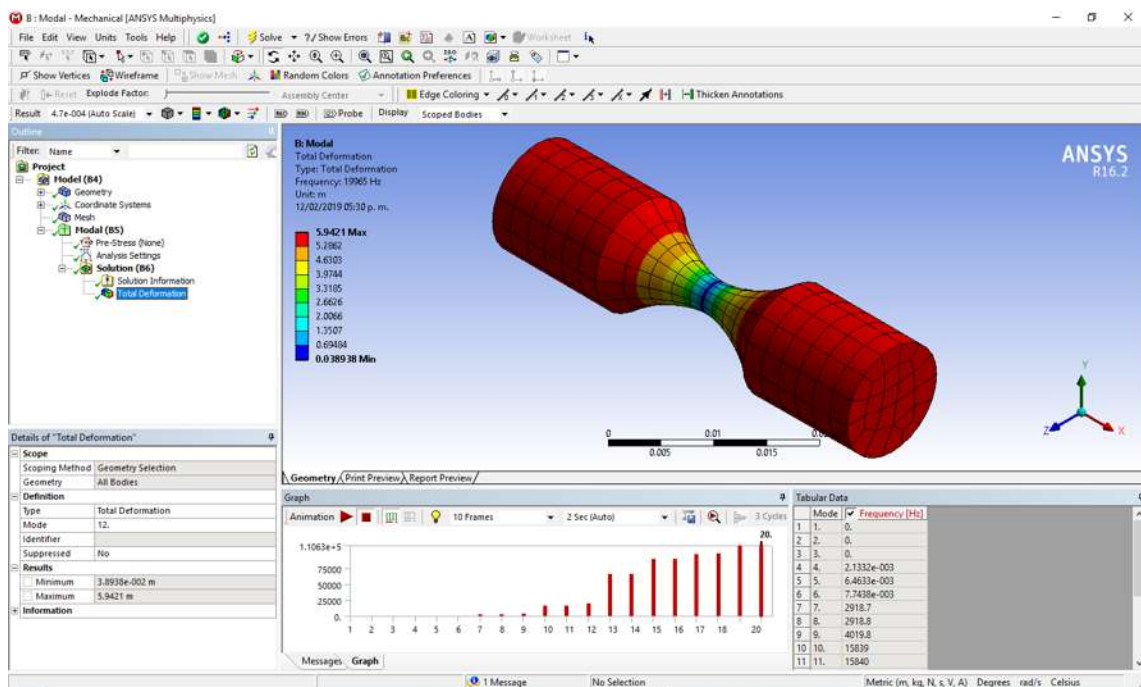


Figura 3.6. Simulación del análisis modal del acero 1045 con el método de elemento finito en ANSYS.

3.2 Esfuerzo de Von Mises.

El esfuerzo de Von Mises es un criterio ingenieril de diseño que se utiliza para analizar la concentración de esfuerzos como el promedio de los esfuerzos principales que actúan en un cuerpo de materiales dúctiles sometidos a cargas o esfuerzos [22].

El esfuerzo o tensión de Von Mises (3.11) puede calcularse mediante las tensiones principales del tensor de esfuerzo en un punto de un sólido deformable, con la expresión matemática:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (3.11)$$

Donde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ son los 3 esfuerzos principales que actúan en un sólido deformable en un punto sometido a carga.

3.2.1 Cálculo del esfuerzo Von Mises con simulación numérica en ANSYS.

Es necesario obtener el esfuerzo en la zona más delgada 3mm de las probetas para ambos aceros, para calcular este esfuerzo en la zona estrecha se realizó mediante bloques de programación en ANSYS Workbench Figura 3.7. El software utiliza el método de elemento finito, por lo cual es necesario utilizar la maya que se utilizó también para el cálculo del análisis modal. Además, generar un desplazamiento en los extremos de la muestra los cuales simulan el efecto de la maquina ultrasónica sobre la probeta montada en esta.

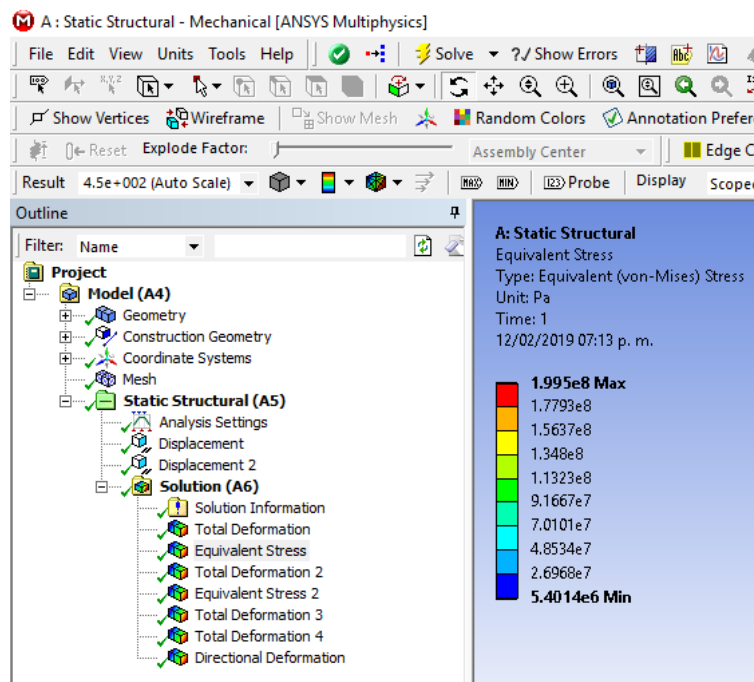


Figura 3.7. Bloques de simulación para obtener los esfuerzos en la probeta de ensayos.

Los resultados que nos arroja esta simulación es principalmente el esfuerzo de Von Mises para lograrlo debemos elegir el apartado de stress Von Mises en la interfaz de ANSYS como lo muestra la Figura 3.8. De esta manera el programa soluciona los esfuerzos en la probeta mostrando de manera gráfica el perfil de esfuerzos a lo largo de la muestra Figura 3.9.

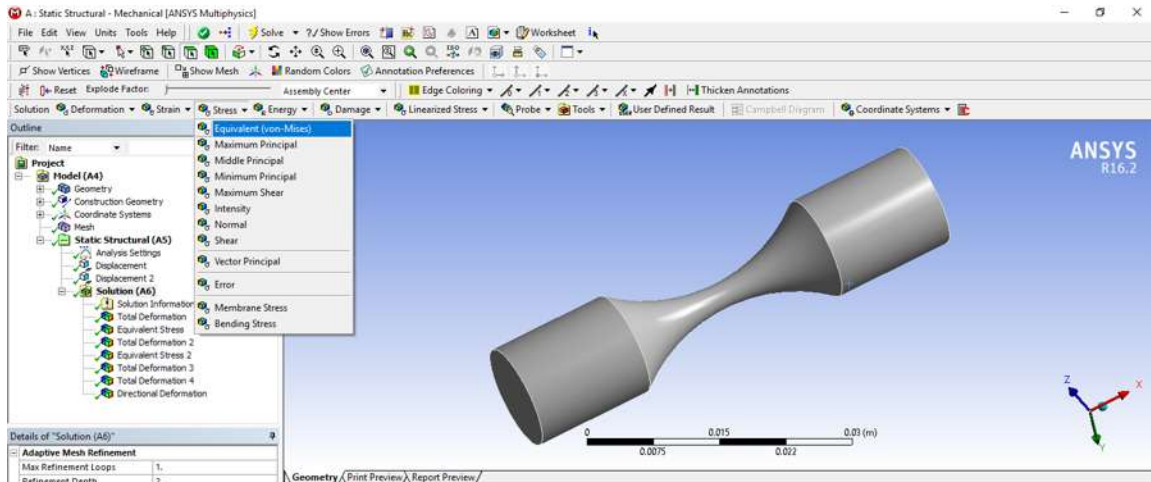


Figura 3.8. Bloques de simulación para obtener los esfuerzos en la probeta de ensayos.

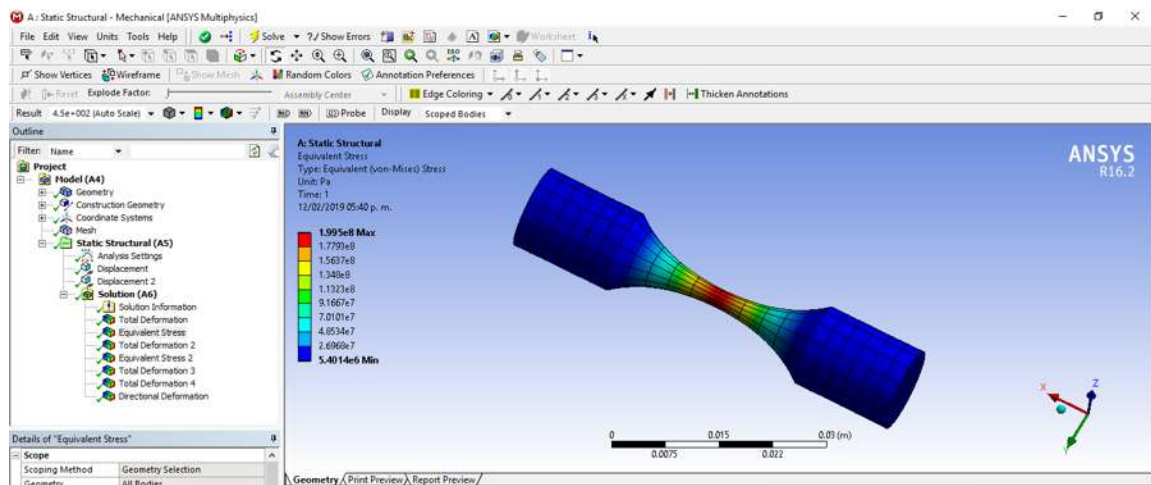


Figura 3.9. Bloques de simulación para obtener los esfuerzos en la probeta de ensayos.

CAPITULO IV.- DISEÑO DE LAS PROBETAS PARA ENSAYOS DE FATIGA ULTRASÓNICA EN ACERO 4140T Y ACERO 1045.

4.1. Simulación numérica, análisis modal con ANSYS.

El perfil óptimo de la muestra se obtiene mediante un análisis numérico modal, que consiste en determinar la frecuencia natural de vibración en ambos aceros 4140T y 1045 en la dirección longitudinal de la muestra de prueba para adaptarla a la condición de resonancia requerida para este método de prueba de fatiga (≈ 20000 Hz). La Figura 4.1 presenta el resultado de este análisis modal para el acero 4140T con una frecuencia de 19990 Hz y en la Figura 4.2 presenta el resultado del análisis modal para el acero 1045 obteniendo una frecuencia de 19965 Hz frecuencias muy cercanas a la fuente de excitación de la muestra por lo cual se espera que entre en resonancia con las probetas. Para determinar estas frecuencias se debe tomar en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales como son el límite elástico (σ_y), esfuerzo ultimo de sedencia (σ_u), módulo de elasticidad (E) y coeficiente de Poisson ($\nu=0.29$ para ambos materiales). Estos parámetros están listados en las Tablas 1 a, b y 2 a, b, para el acero 4140T y acero 1045, respectivamente.

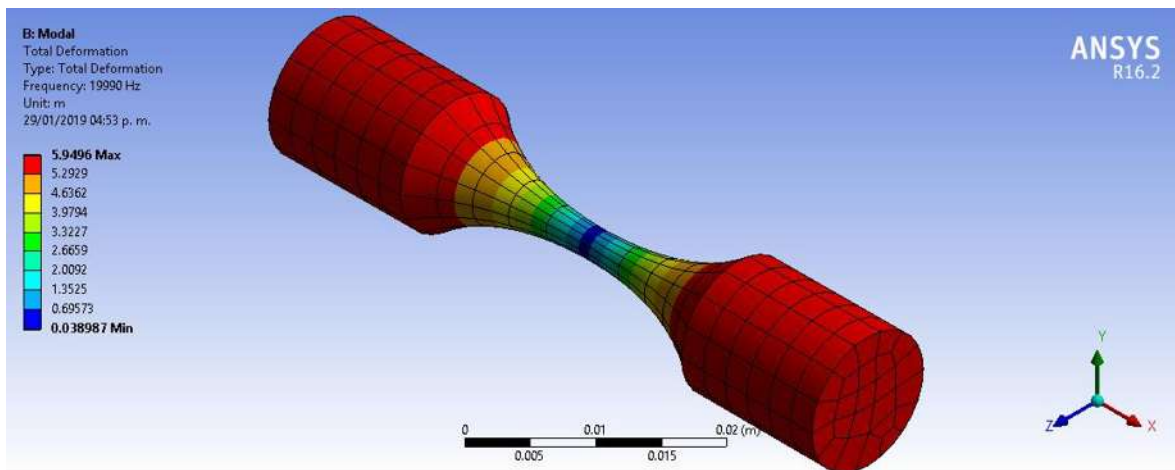


Figura 4.1 Frecuencia longitudinal natural de vibración del acero 4140T obtenida por análisis modal.

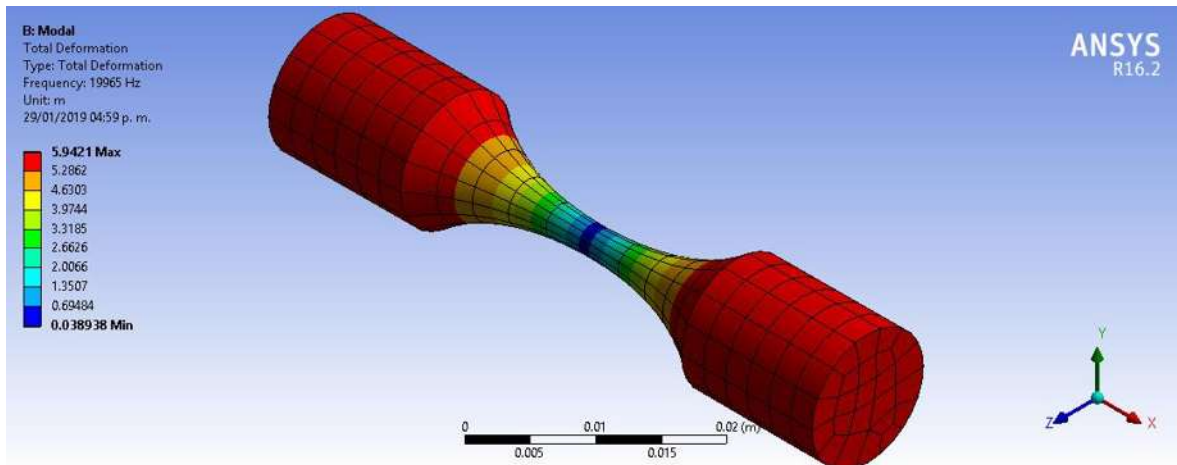


Figura 4.2. Frecuencia longitudinal natural de vibración del acero 1045 obtenida por análisis modal.

La Figura 4.3 muestra las dimensiones de las probetas de prueba que son unidas a la máquina de fatiga ultrasónica, ambas aleaciones de acero 1045 y 4140T tienen las mismas dimensiones debido a que sus propiedades mecánicas son muy similares teniendo ligeras variaciones que no presentan cambios significativos en la simulación entre uno y otro material.

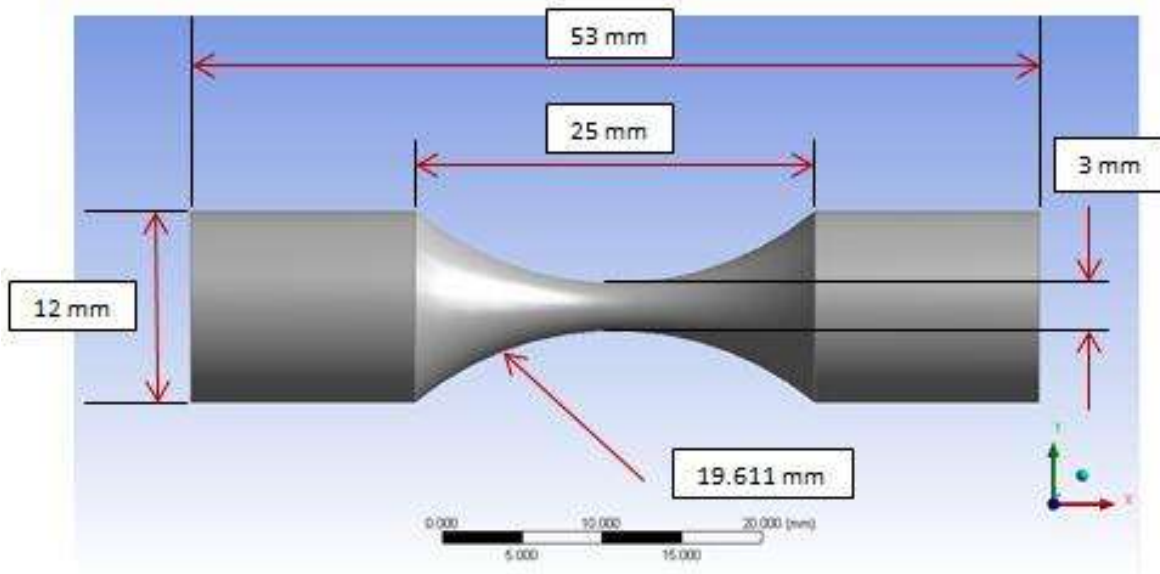


Figura 4.3 Dimensiones (mm), para la muestra de fatiga ultrasónica.

4.2. Pruebas de diseño.

Para corroborar que las condiciones de diseño y simulación son satisfactorias y están dentro de la realidad física, tenemos que construir una probeta de cada material con las dimensiones de diseño y llevarlas a prueba en la fuente de excitación para comprobar la resonancia entre la máquina y las probetas. Para este fin se monta la probeta en la máquina ultrasónica y se lanza en el nivel más bajo de carga (10 volts) elevando la carga de un volt en un volt para comprobar que la vibración se transmita a la probeta, provocando el desplazamiento que para este caso es de 1.25 micras/volt como lo muestra la Figura 4.4 donde se observa la probeta sujeta a la máquina ultrasónica donde se aprecia con una máquina ultrasónica que los esfuerzos están concentrados en el centro de la probeta es decir en la parte más estrecha de 3mm de diámetro.

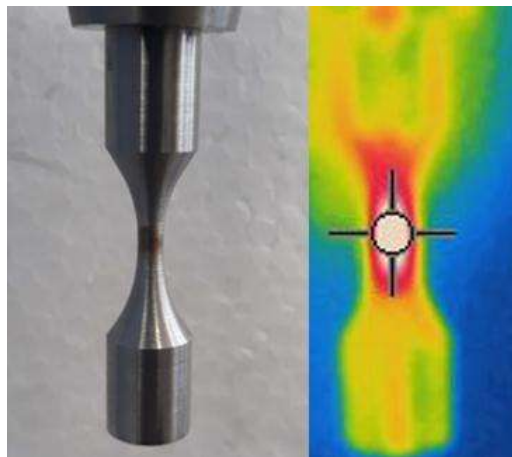


Figura 4.4 resonancia de la probeta y comprobación con termografía.

Con la ayuda de un sensor de proximidad inductivo se calibro el desplazamiento de la máquina ultrasónica, se discutirá este proceso más adelante, pero cabe señalar que siguiendo con el diseño y simulación de las muestras de acero se realizó una simulación de los desplazamientos con la finalidad de observar el esfuerzo en la zona estrecha de 3mm de diámetro que se encuentra ubicado en el centro de la probeta, de esta manera poder determinar por simulación numérica en ANSYS 10.0 el esfuerzo en esta zona como lo muestra la Figura 4.5; lo anterior se simula con el nivel más bajo de carga proporcionado por la máquina a 10 volts que corresponde a 12.5 micras de estiramiento en los extremos de la muestra. Lo anterior se observa en la Figura 4.6, con un valor de cero para el desplazamiento en la parte central y un esfuerzo máximo en esta zona, induciendo la ruptura por fatiga en esta zona estrecho de la muestra.

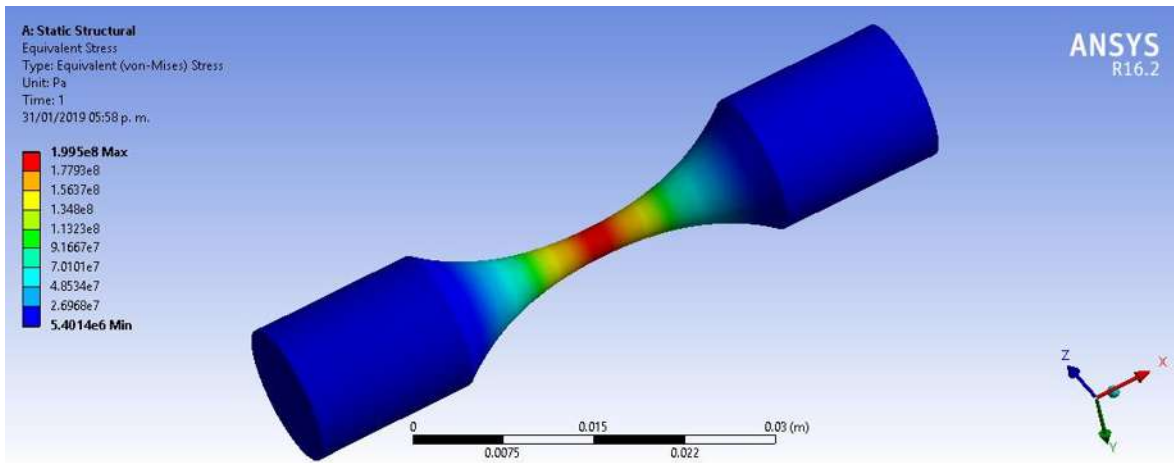


Figura 4.5. Esfuerzo en la probeta, simulado en ANSYS.

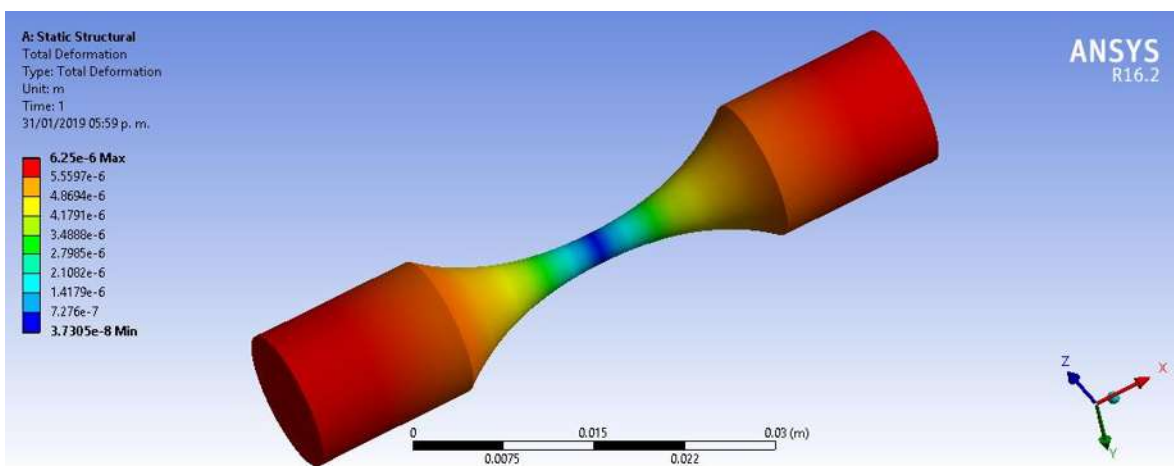


Figura 4.6. Desplazamiento a lo largo de la probeta, simulado en ANSYS.

Con la maquina ultrasónica el nivel más bajo de carga son 10 volts que representa 12.5 micras de desplazamiento lo que representa mediante simulación numérica un esfuerzo de Von Mises en la zona estrecha de 199.5 MPa para ambos materiales; esto se debe a que poseen propiedades mecánicas similares como aceros de uso automotriz; no obstante, su límite elástico presenta una diferencia importante. Es por ello que mientras para el acero 4140T el esfuerzo de 199.5 MPa Figura 4.7 y su porcentaje del límite elástico a 10 volts es de 48% casi la mitad de la zona elástica lo que permite afirmar que se trabaja sin deformaciones plásticas en el material. Para el material 1045 el esfuerzo en el centro de la prueba a 10 volts es también de 199.5 MPa figura 4.8, pero esta vez representa un 64% del límite elástico de este material.

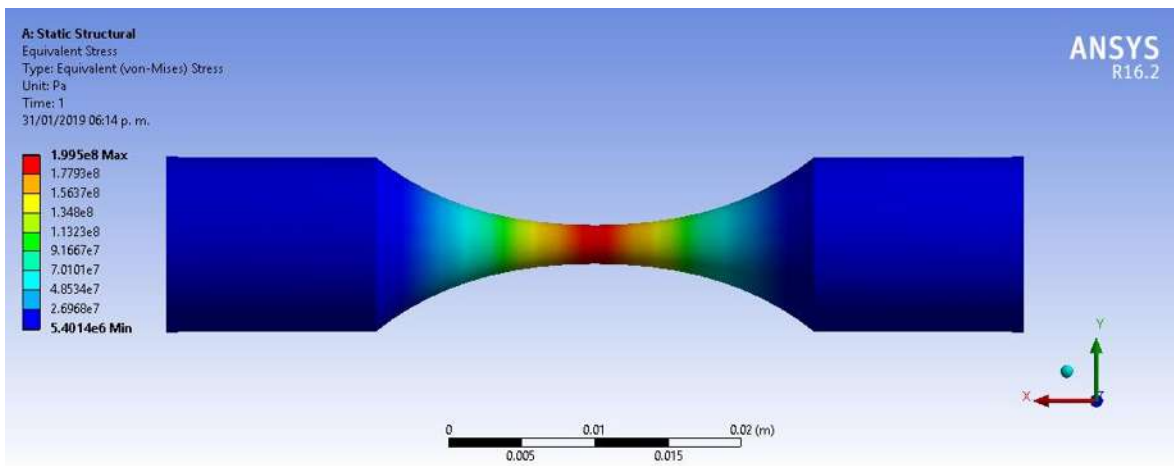


Figura 4.7. Esfuerzo de Von Mises del acero 4140T, simulación numérica en ANSYS.

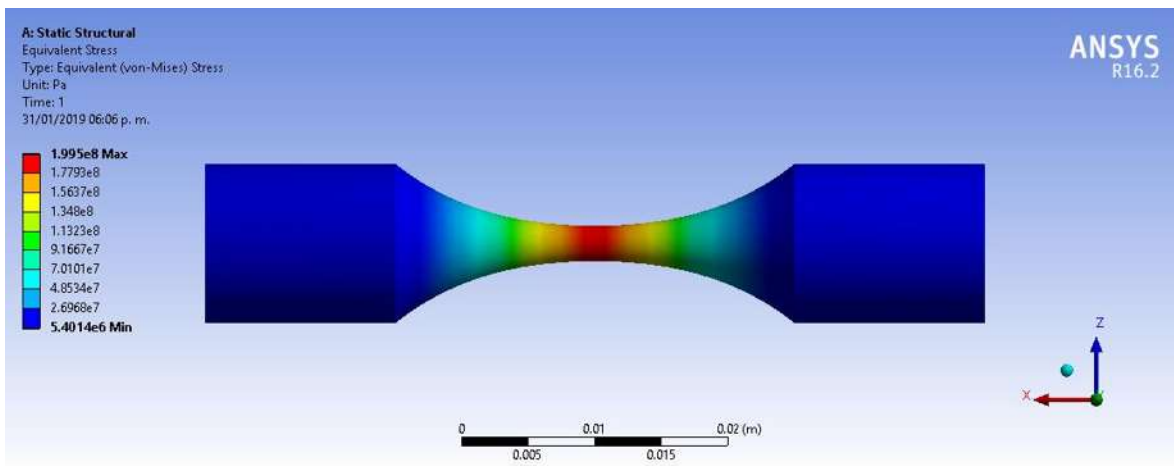


Figura 4.8. Esfuerzo de Von Mises en el acero 1045, simulación numérica en ANSYS.

Con esta simulación se parte de la base del nivel más bajo de carga que limita la máquina ultrasónica, pero proporciona un punto de referencia para programar los niveles de carga a los cuales se llevarán a cabo los ensayos sobre las probetas de acero. Con este procedimiento se elaboró la Tabla 4.1 para el acero 4140T y la Tabla 4.2 para el acero 1045 con valores de voltaje, desplazamiento, esfuerzo, porcentaje con respecto al límite elástico, y temperatura aproximada. La Tabla 4.1 permite establecer el límite más bajo de carga y el límite mayor de carga en los materiales a probar para garantizar el trabajo en una zona elástica donde el material no sufre deformaciones plásticas. Para lo anterior, se debe tomar el límite superior por debajo del límite elástico del material, que para el acero 4140T es de $\sigma_y = 415 \text{ MPa}$ y en el caso del acero 1045 el esfuerzo del límite elástico es de $\sigma_y = 310 \text{ MPa}$.

Tabla 4.1. Comportamiento de la probeta de acero 4140T con respecto al voltaje aplicado.

Acero 4140T, Limite elástico 415 Mpa				
Voltaje (volts)	Desplazamiento (micras)	Esfuerzo (Mpa)	% del límite elástico	Temperatura (°C)
10	12.5	199.5	48	30
11	13.75	219.45	53	30
12	15	239.5	58	31
13	16.25	259.35	62	31
14	17.5	279	67	31
15	18.75	299.25	72	31
16	20	319	77	31
17	21.25	339	82	31
18	22.5	359	87	32
19	23.75	379	91	33

Tabla 4.2. Comportamiento de la probeta de acero 1045 con respecto al voltaje aplicado.

Acero 1045, Limite elástico 310 Mpa				
Voltaje (volts)	Desplazamiento (micras)	Esfuerzo (Mpa)	% del límite elástico	Temperatura (°C)
10	12.5	199.5	64	30
11	13.75	219.45	71	31
12	15	239.4	77	32
13	16.5	259	84	33
14	17.5	279.3	90	34
15	18.75	299.25	97	35

Con los procedimientos antes descritos, se procede a los ensayos experimentales para determinar el número de ciclos en cada punto, así como su tiempo a la fractura para poder construir los gráficos de esfuerzo número de ciclos correspondientes y determinar la vida en fatiga ultrasónica de los aceros estudiados. Antes de esto es indispensable fabricar las probetas necesarias para probar varias veces algunos de los puntos seleccionados ya que no se prueban todos los valores de carga. En efecto, los valores cercanos de carga pueden arrojar valores similares de la vida en fatiga de estos dos materiales; los ensayos se llevan a cabo con suficiente separación entre la carga aplicada, para obtener la tendencia en vida en fatiga de los dos aceros estudiados.

CAPÍTULO V.- CALIBRACIÓN DE LA MÁQUINA ULTRASÓNICA.

En el proceso de mecanizado, Figura 5.1a, se muestra el maquinado de una probeta, necesaria para el calibrado de la máquina de fatiga ultrasónica. Después de verificar que la muestra trabaja en condición de resonancia, se procede a maquinar el resto de las muestras para la prueba experimental del resto de probetas; lo anterior para garantizar que las muestras están correctamente diseñadas, Figura 5.1b.

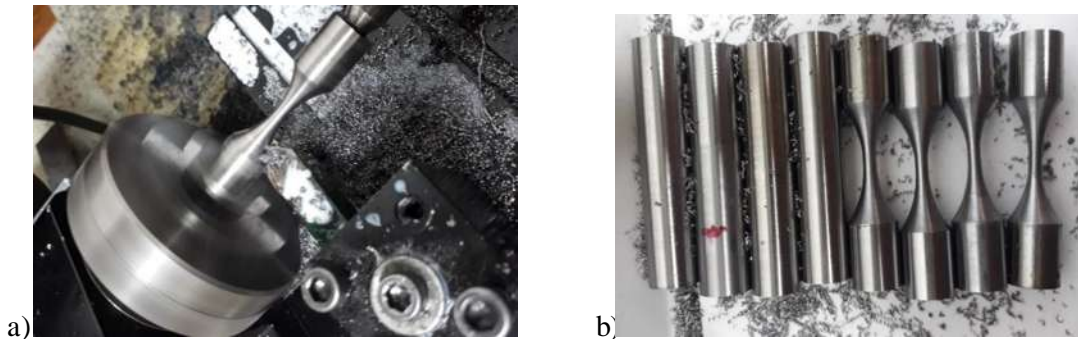


Figura 5.1 a) Fabricación de muestras de calibración, b) Primeras muestras mecanizadas.

Para la calibración de la muestra de prueba (Figuras 5.2 a, b, c) en el extremo libre se implementó mediante un sensor de proximidad inductivo que tiene una resolución de $\pm 4 \mu\text{m}$, trabajando a 1,5 KHz mostrado en la Figura 5.6

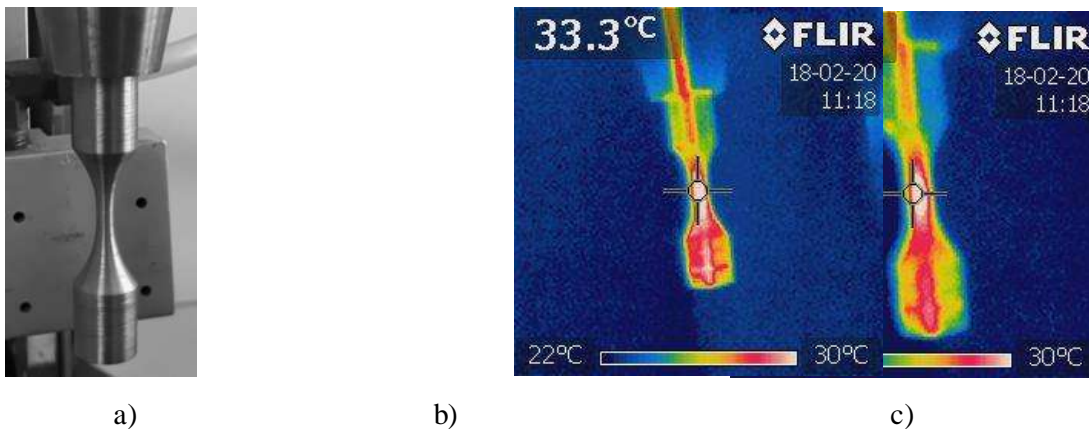


Figura 5.2 a) Especimen de prueba de fatiga ultrasónica conectado a la máquina de prueba, b), c) Imágenes termo gráficas de la muestra durante la prueba de fatiga ultrasónica.

5.1. Dispositivo ultrasónico

La máquina para ensayos de fatiga ultrasónica consta de una serie de componentes que permiten la puesta en marcha de ensayos vibratorios en condiciones de resonancia.

Uno de los componentes principales es el generador ultrasónico, Figura 5.4, el cual tiene una potencia de 2200 W y genera oscilaciones eléctricas de 20 KHz. Dicho generador está acoplado a una columna que aloja los demás componentes, entre los cuales se encuentran; el piezoeléctrico (o convertidor), booster y un sonotrodo. Este dispositivo ha sido patentado (agosto 2014), por el Dr. Domínguez Almaraz ante el IMPI (Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial), con el número de patente: 323948.



Figura 5.3. Dispositivo para ensayos de fatiga ultrasónica.



Figura 5.4. Generador de alta frecuencia.



Figura 5.5. Probeta de ensayo.

5.1.1. Características y funcionamiento del dispositivo ultrasónico

Piezoeléctrico (Convertidor)

El generador de ultrasonidos genera oscilaciones eléctricas de alta frecuencia. Estas son convertidas por un piezoeléctrico (transformador acústico) en oscilaciones mecánicas de misma frecuencia, es decir 20 KHz.

Booster

Al convertidor se encuentra acoplado un booster o amplificador de desplazamiento que permite pasar de unas cuantas micras a la salida del piezoeléctrico a varias decenas de micras a la salida del booster. El valor de la multiplicación del desplazamiento se determina mediante una selección de diferentes colores.

Sonotrodo

El propósito del sonotrodo es concentrar las oscilaciones mecánicas longitudinales transmitidas a la probeta (limitando las oscilaciones transversales), y también su función es el de amplificar el valor del desplazamiento para alcanzar valores de varias decenas de micras para inducir los esfuerzos previstos en la parte estrecha de la probeta.

5.2 Calibración de los desplazamientos ultrasónicos por medio del sensor inductivo de alta sensibilidad.

La medición de los desplazamientos longitudinales en las probetas es de vital importancia para poder conocer el valor del esfuerzo inducido en la parte estrecha de la misma, lo que condiciona el valor del esfuerzo aplicado en un ensayo. Si bien es posible saber el valor nominal del desplazamiento en las probetas realizando cálculos de acuerdo a los valores de los componentes del dispositivo ultrasónico especificados por el fabricante, resulta necesario verificar experimentalmente dichos desplazamientos.



Figura 5.6 sensor inductivo de proximidad, calibrando los desplazamientos.

Para realizar esta medición se utilizó un sensor inductivo de alta sensibilidad Figura 5.6, el cual es capaz de medir desplazamientos en materiales metálicos del orden de micras. El sensor viene acompañado por un software interactivo en el cual es posible visualizar gráficamente los desplazamientos respecto al tiempo que sufre la probeta en condiciones de tiempo real y en estado vibratorio Figura 5.7.

Se presentan algunas imágenes donde aparecen las gráficas de evolución respecto al tiempo del desplazamiento en el extremo libre de la probeta. La calibración del sensor respecto a la potencia aplicada del generador de alta frecuencia arrojó siguiente valor: 1 volt de incremento en el generador representa un incremento en el desplazamiento de 1.25 micras, aproximadamente. El voltaje mínimo aplicado al generador fue de 10 volts; lo que representa un desplazamiento de 12.5 micras en cada extremo de la probeta.

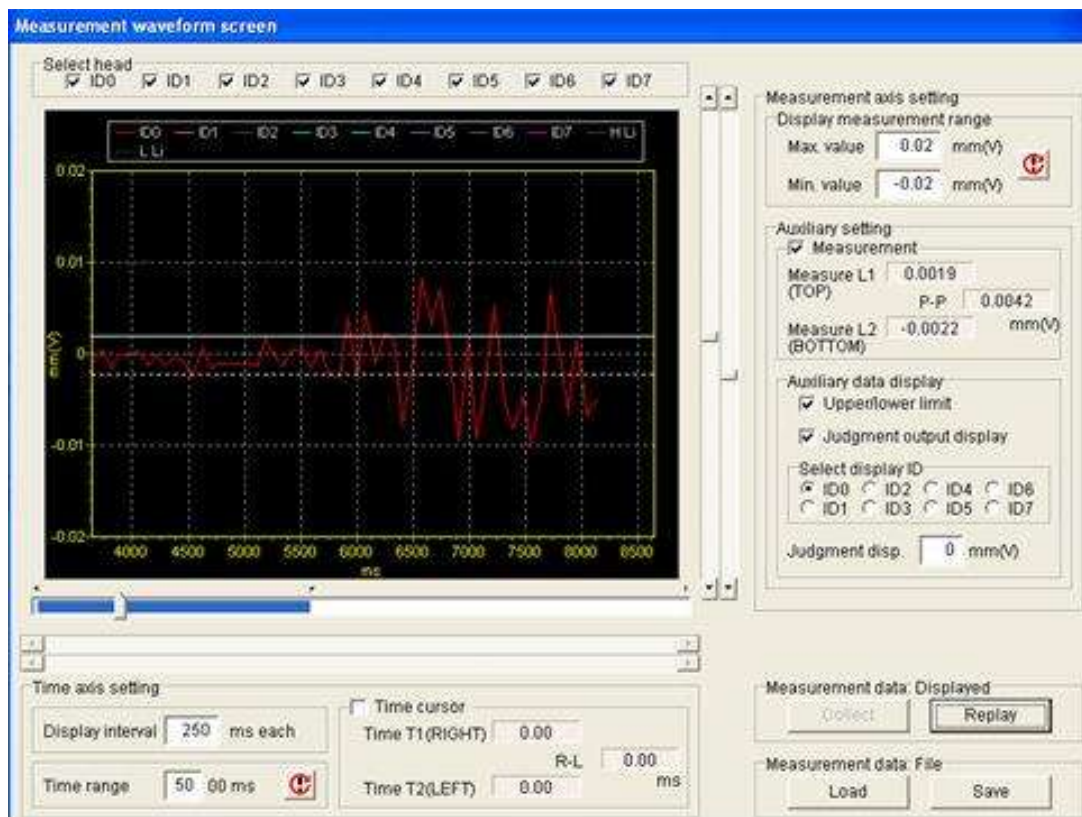


Figura 5.7. Calibración de desplazamiento con sensor inductivo.

En la Figuras 5.6 es posible distinguir los desplazamientos en el extremo libre de la probeta registrados por el sensor en dos condiciones diferentes: para muy bajos desplazamientos (del orden de 3-4 micras), el voltaje aplicado fue de cero; esto significa que el desplazamiento registrado corresponde al ruido en el sistema de medición. Los desplazamientos más importantes registrados en las gráficas corresponden a voltajes de 10 o más volts aplicados en el generador (el voltaje mínimo aplicado fue de 10 volts). El software del sensor permite condicionar las escalas de variación de pico a pico de la señal de desplazamiento registrado, como se muestran en la Figura 5.7. Para la figura 5.6 anterior

el desplazamiento P-P fue de un valor de 18.1 micras, al que es necesario restarle aproximadamente 4 micras correspondientes al valor del ruido para este ensayo. Debido a que el voltaje aplicado fue de 10 volts y que el resultado del desplazamiento una vez sustraído el ruido fue de aproximadamente 13 micras, reencontramos la relación 1.3 micras por volt.

La máquina ultrasónica Figura 5.8 cuenta con un sistema de aplicación de potencia que está relacionado con el desplazamiento mediante la variación del voltaje. Dichos valores guardan una relación lineal por lo que se puede deducir fácilmente el desplazamiento correspondiente a un cierto voltaje. La Figura 5.9 muestra la calibración del desplazamiento-voltaje en un rango amplio para los ensayos experimentales.

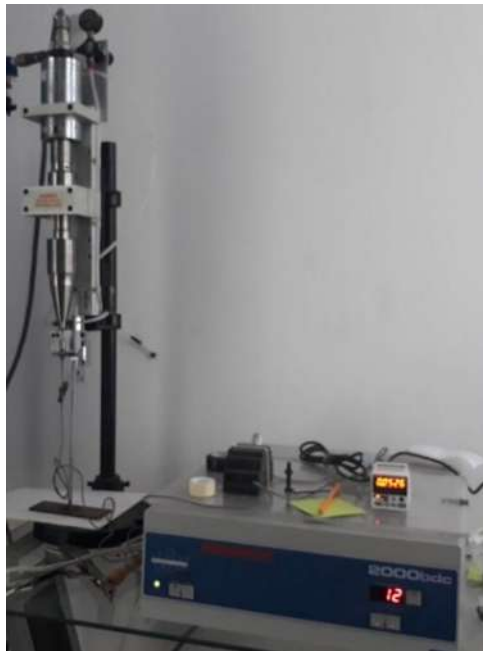


Figura 5.8. Máquina ultrasónica, siendo calibrada con sensor de proximidad inductivo.

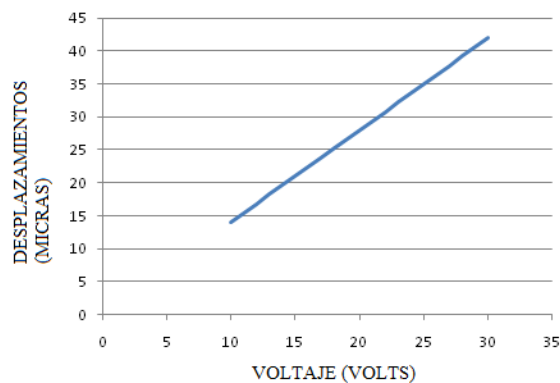


Figura 5.9. Gráfica de calibración de desplazamientos-voltaje

CAPITULO VI.- MANUFACTURA DE LAS PROBETAS PARA ENSAYOS DE FATIGA ULTRASÓNICA EN ACERO 4140T Y ACERO 1045.

Para llevar a cabo los ensayos en fatiga ultrasónica de los aceros 4140T y 1045, se requiere tener probetas con dimensiones bien establecidas por el diseño figura 1.5, para ello se requiere manufacturar las probetas de ensayo, esto es, darle forma al material para obtener las dimensiones y características geométricas necesarias. Para lograr este objetivo es necesario recurrir a los procesos de manufactura como lo es el torneado y machueado. Con el torneado se realiza una remoción de material por medio de herramientas de corte que van desprendiendo material hasta obtener las dimensiones y perfiles deseados. En el caso del machueado, es la acción de hacer una rosca interna en un orificio con la herramienta llamada machuelo, este proceso se describe a detalle con la finalidad de ilustrar estos procesos que resultan laboriosos y minuciosos, para obtener probetas de ensayo con calidad necesaria en la puesta en marcha de las pruebas de fatiga ultrasónica.

6.1 Torneado.

El torneado se puede describir como la acción de desprender material con una herramienta de corte de un perfil de material determinado. Para nuestro caso se usaron barras de acero 4140T y acero 1045 con un diámetro de 12.7 mm.

Para tornear las probetas se requirieron hacer 4 procesos de torneado como son cilindrado, refrentado, taladrado y perfilado. Se obtuvo una probeta de cuello esbelto tipo reloj de arena de 25 mm y un radio de 19.611mm y un diámetro mínimo en el centro de 3 mm ubicado a la mitad de la barra de 53 mm de largo. Esta barra presenta un diámetro de 12 mm en la sección constante. Se describe a detalle cada proceso en este capítulo.

Para realizar estos trabajos de desbaste de material con herramientas de corte se necesitó un torno de control numérico por computadora CNC (por sus siglas en ingles), este torno se tiene en el taller del director de tesis Dr. Gonzalo M. D. Almaraz. El torno se controla mediante una computadora de escritorio que hace la interfaz de control entre el torno y el usuario. Una imagen general de este torno CNC se muestra en la Figura 6.1 donde se aprecia que es de tamaño pequeño pero cumple con las características técnicas para maquinar las probetas en las dimensiones que se requieren para los ensayos de fatiga ultrasónica.

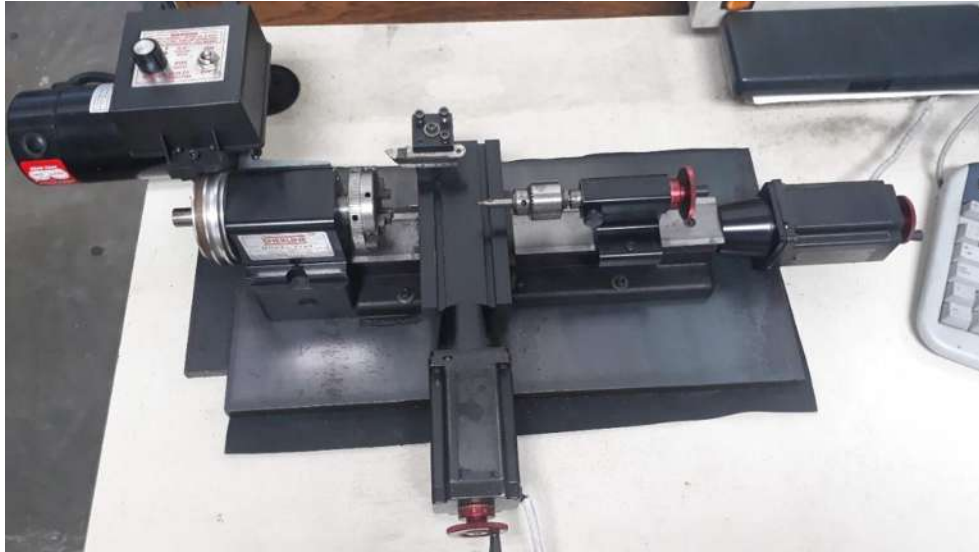


Figura 6.1 Torno CNC para maquinado de probetas, utilizadas en ensayos de fatiga ultrasónica.

6.1.1. Cilindrado

Como mencionado anteriormente, las barras de los dos aceros se adquirieron con un diámetro de 12.7 mm, es por esto que se realizó un cilindrado para desprender material con la herramienta de corte y llegar a la dimensión de 12 mm de diámetro. Este proceso de cilindrado se muestra en la Figura 6,2, cuyo objetivo es el de disminuir el diámetro de la barra de donde se maquina la probeta.



Figura 6.2 Cilindrado de probetas de acero, en torno CNC.

Para esta operación se tomaron las siguientes condiciones de corte: revoluciones del husillo $n=180$ rpm velocidad de corte $V_C = 7.5$ m/min; avance $f_n = 50$ mm/r y una profundidad de corte de $a_n = 0.1$ mm/rev .

En el cilindrado se programó en código G, el programa que controla el torno por medio de la interfaz de la computadora que permite llevar a cabo este proceso de maquinado. Este código se presenta a continuación.

Código G para el cilindrado.

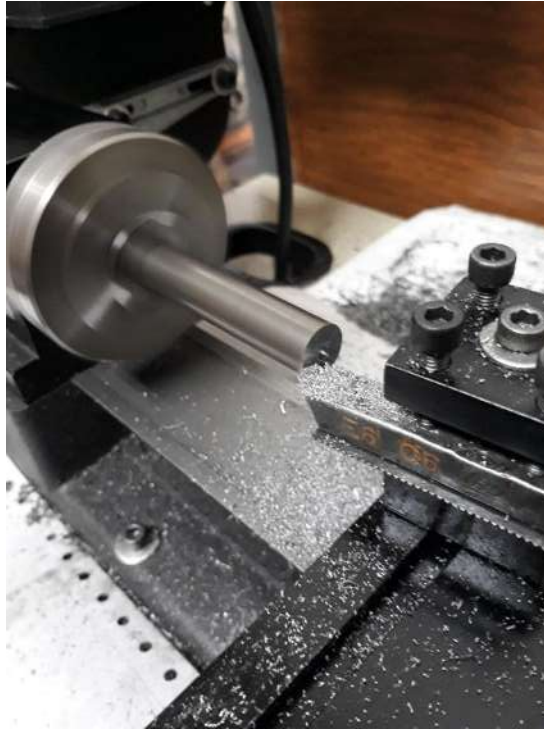
% Probetas para fatiga ultrasónica cilindrado

- | | |
|----------------------------------|--------------------|
| 1. G54;(coordenadas absolutas) | 19. G00 X-1; |
| 2. G21;(unidades mm) | 20. G00 X-1 Z0; |
| 3. M43; | |
| 4. M03;(prender Chuck) | |
| 5. M08;(prender refrigerante) | 21. G01 X0.35; |
| 6. F50; | 22. G01 X0.35 Z54; |
| 7. %Código para desbaste a 12 mm | 23. G00 X-1; |
| 8. G00 X0 Z0; | 24. G00 X-1 Z0; |
| | |
| 9. G01 X0.1; | |
| 10. G01 X0.1 Z54; | 25. G01 X0.4; |
| 11. G00 X-1; | 26. G01 X0.4 Z54; |
| 12. G00 X-1 Z0; | 27. G00 X-1; |
| 13. G01 X0.2; | 28. G00 X-1 Z0; |
| 14. G01 X0.2 Z54; | |
| 15. G00 X-1; | |
| 16. G00 X-1 Z0; | 29. G01 X-3; |
| | |
| 17. G01 X0.3; | |
| 18. G01 X0.3 Z54; | 30. M02; |

Donde se pueden apreciar dos códigos principales: el G01 que lleva la herramienta de corte a hacer una entrada en el material (profundidad de corte) de 0.1 mm en la dirección X y con esa profundidad recorrer 54 mm en Z realizando un avance por la pieza que tiene 53 mm de largo poco menos del recorrido de la herramienta de corte para garantizar el desbaste en toda la superficie. Mientras que el código G00 tiene la función de posicionar la herramienta para volver a comenzar el ciclo de desbaste de la pieza.

6.1.2. Refrentado.

El refrentado es una operación de quitar material a las caras de los cilindros por medio de una herramienta de corte llamada buril con la finalidad de obtener caras totalmente planas, como lo muestra la Figura 6.3 en donde se muestra el cilindro de 12 mm de



diámetro que está siendo refrentado con el torno CNC.

Figura 6.3. Refrentado de probetas de acero para ensayos de fatiga ultrasónica.

En el refrentado se programó en código G, el programa que obedece el torno por medio de la interfaz de la computadora que controla las operaciones del torno; este código se presenta a continuación.

Para esta operación se tomaron las siguientes condiciones de corte: revoluciones del husillo $n=180$ rpm velocidad de corte $V_C=7.5$ m/min; avance $f_n = 50$ mm/r y una profundidad de corte de $a_n= 0.05$ mm/rev .

Código G para el refrentado.

%Probeta para ensayos en fatiga ultrasónica –refrentado (comentario)

El programa se lee de izquierda a derecha.

G54;(coordenadas absolutas)	G00 Z-0.35; G00 Z-0.35 X0;	G00 Z-0.8; G00 Z-0.8 X0;
G21;(unidades mm)		
M43;	G01 Z-0.4;	G01 Z-0.85;
M03;(prender Chuck)	G01 Z-0.4 X6.4;	G01 Z-0.85 X6.4;
M08;(prender refrigerante)	G00 Z-0.4; G00 Z-0.4 X0;	G00 Z-0.85; G00 Z-0.85 X0;
F50;		
%Código para desbaste a 12 mm	G01 Z-0.45; G01 Z-0.45 X6.4;	G01 Z-0.9; G01 Z-0.9 X6.4;
G00 X0 Z0;	G00 Z-0.45; G00 Z-0.45 X0;	G00 Z-0.9; G00 Z-0.9 X0;
G01 Z-0.05; G01 Z-0.05 X6.4; G00 Z-0.05; G00 Z-0.05 X0;	G01 Z-0.5; G01 Z-0.5 X6.4; G00 Z-0.5; G00 Z-0.5 X0;	G01 Z-0.95; G01 Z-0.95 X6.4; G00 Z-0.95; G00 Z-0.95 X0;
G01 Z-0.1; G01 Z-0.1 X6.4; G00 Z-0.1; G00 Z-0.1 X0;	G01 Z-0.55; G01 Z-0.55 X6.4; G00 Z-0.55; G00 Z-0.55 X0;	G01 Z-1; G01 Z-1 X6.4; G00 Z-1; G00 Z-1 X0;
G01 Z-0.15; G01 Z-0.15 X6.4; G00 Z-0.15; G00 Z-0.15 X0;	G01 Z-0.6; G01 Z-0.6 X6.4; G00 Z-0.6; G00 Z-0.6 X0;	G01 Z-1.05; G01 Z-1.05 X6.4; G00 Z-1.05; G00 Z-1.05 X0;
G01 Z-0.2; G01 Z-0.2 X6.4; G00 Z-0.2; G00 Z-0.2 X0;	G01 Z-0.65; G01 Z-0.65 X6.4; G00 Z-0.65; G00 Z-0.65 X0;	G01 Z-1.1; G01 Z-1.1 X6.4; G00 Z-1.1; G00 Z-1.1 X0;
G01 Z-0.25; G01 Z-0.25 X6.4; G00 Z-0.25; G00 Z-0.25 X0;	G01 Z-0.7; G01 Z-0.7 X6.4; G00 Z-0.7; G00 Z-0.7 X0;	G01 Z-1.15; G01 Z-1.15 X6.4; G00 Z-1.15; G00 Z-1.15 X0;
G01 Z-0.3; G01 Z-0.3 X6.4; G00 Z-0.3; G00 Z-0.3 X0;	G01 Z-0.75; G01 Z-0.75 X6.4; G00 Z-0.75; G00 Z-0.75 X0;	G01 Z-1.2; G01 Z-1.2 X6.4; G00 Z-1.2; G00 Z-1.2 X0;
G01 Z-0.35; G01 Z-0.35 X6.4;	G01 Z-0.8; G01 Z-0.8 X6.4;	G01 Z-1.25; G01 Z-1.25 X6.4;

G00 Z-1.25; G00 Z-1.25 X0;	G01 Z-1.6; G01 Z-1.6 X6.4; G00 Z-1.6; G00 Z-1.6 X0;	G00 Z-1.9 X0; G01 Z-1.95; G01 Z-1.95 X6.4; G00 Z-1.95; G00 Z-1.95 X0;
G01 Z-1.3; G01 Z-1.3 X6.4; G00 Z-1.3; G00 Z-1.3 X0;	G01 Z-1.65; G01 Z-1.65 X6.4; G00 Z-1.65; G00 Z-1.65 X0;	G01 Z-2; G01 Z-2 X6.4;
G01 Z-1.35; G01 Z-1.35 X6.4; G00 Z-1.35; G00 Z-1.35 X0;	G01 Z-1.7; G01 Z-1.7 X6.4; G00 Z-1.7; G00 Z-1.7 X0;	G00 Z-2; G00 Z-2 X0;
G01 Z-1.4; G01 Z-1.4 X6.4; G00 Z-1.4; G00 Z-1.4 X0;	G01 Z-1.75; G01 Z-1.75 X6.4; G00 Z-1.75; G00 Z-1.75 X0;	G01 Z-2.05; G01 Z-2.05 X6.4; G00 Z-2.05; G00 Z-2.05 X0;
G01 Z-1.45; G01 Z-1.45 X6.4; G00 Z-1.45; G00 Z-1.45 X0;	G01 Z-1.8; G01 Z-1.8 X6.4; G00 Z-1.8; G00 Z-1.8 X0;	G01 Z-2.1; G01 Z-2.1 X6.4; G00 Z-2.1; G00 Z-2.1 X0;
G01 Z-1.5; G01 Z-1.5 X6.4; G00 Z-1.5; G00 Z-1.5 X0;	G01 Z-1.85; G01 Z-1.85 X6.4; G00 Z-1.85; G00 Z-1.85 X0;	G01 Z-2.15; G01 Z-2.15 X6.4; G00 Z-2.15; G00 Z-2.15 X0;
G01 Z-1.55; G01 Z-1.55 X6.4; G00 Z-1.55; G00 Z-1.55 X0;	G01 Z-1.9; G01 Z-1.9 X6.4; G00 Z-1.9;	G01 X-3; M02;

Donde se pueden apreciar dos códigos principales: el G01 que lleva la herramienta de corte a hacer una entrada en el material (profundidad de corte) de 0.05 mm en la dirección Z y con esa profundidad recorrer 6.4 mm en dirección X realizando un avance por el radio de la pieza que es de 6.4 mm. El segundo código G00 que posiciona la herramienta para volver a comenzar el ciclo de desbaste de la pieza. La instrucción M02 permite apagar el chuck y terminar el programa.

Cuando se termina el proceso de refrentado en ambas caras del cilindro de 53 mm de largo y un diámetro de 12 mm, se maquinaron un total de 25 cilindros de cada acero. Las dimensiones para las probetas de ensayo en fatiga ultrasónica fueron iguales para ambos

aceros puesto que, como se mencionó anteriormente, las dimensiones de las probetas para ambos materiales resultaron iguales a partir de las simulaciones numéricas de análisis modal, para obtener la frecuencia natural de oscilación de los dos aceros.

6.1.3. Taladrado.

En el taladrado se procede a maquinar un barreno (agujero), con la ayuda de una broca de corte que despende material hasta formar una perforación de profundidad de 8 mm. Después de la perforación, se máquina una rosca donde se alojará el perno de sujeción de la probeta con la máquina de fatiga ultrasónica. Este proceso se lleva a cabo de forma manual y velocidad baja, colocando una broca en el porta herramientas; el mismo es relativamente lento ya que se tiene que montar cada probeta y hacer la operación de forma manual sin la utilización de la computadora ni un cogido G. El taladrado se ilustra en la Figura 6.4 donde se parecían las condiciones antes descritas.

Se debe mencionar que para poder hacer un barrenado primero es necesario hacer un pequeño orificio con la broca de centros para ayudar a centrar la broca al momento de hacer el barreno, también se aprecia esta operación en la Figura 6.5



Figura 6.4. Broca de centros.



Figura 6.5 Barrenado de cilindros

6.1.4. Machueliado.

Con un machuelo que es una herramienta para hacer roscas internas en un barreno, se realiza la rosca interna de los cilindros de acero como se muestra en la Figura 6.6. Es necesario sujetar la probeta de ensayos ultrasónicos con un opresor roscado, para ello se hacen las roscar a los cilindros y poder cumplir con el requerimiento de sujeción. Para este proceso se utilizó un juego de machuelos 5M; este juego de machuelos consta de 3 piezas, semicónica, cónica y plana. En un proceso de tres machueliados se obtiene la rosca adecuada, destinada al opresor de rosca 5mm.



Figura 6.6. Machueliados para rosca interna.

Con este proceso se obtuvieron 25 cilindros machueliados de acero 4140T y 25 cilindros machueliados de acero 1045 con las siguientes dimensiones: 53 mm de largo, 12 mm de diámetro, una rosca interna de 8 mm de profundidad y con una rosca milimétrica de 5 mm. Una imagen de cilindros machueliados y un cilindro con su opresor, se muestran en la Figura 6.7. A partir de los cilindros mostrados en la figura anterior, se procede a maquinar el arco en el centro de la probeta.



Figura 6.7. Cilindros roscados.

Para este fin se implementa un proceso manual del torno relativamente consumidor de tiempo y minucioso, para obtener las tolerancias y las roscas bien centradas en el cilindro.

6.1.5. Perfilado.

Este proceso consiste en realizar el cuello de la probeta; el mismo se lleva a cabo conformando el cuello de la probeta como se describe en la siguiente sección.

De manera general, se distinguen varios tipos de perfilados, como se ilustra en la Figura 6.8.



Figura 6.8. Tipos de perfilados, imagen de SANDVIK Coromant.

Para los cilindros de acero 4140T y acero 1045 se requiere llevar a cabo un perfilado con las siguientes parámetros: un radio de 19.6 mm de largo 25 mm y un cuello esbelto de 3 mm; estas dimensiones fueron obtenidas por diseño como ya se mencionó anteriormente. Para este proceso se tiene una herramienta de corte llamada buril, que desprende material del centro de la probeta para lograr un perfil tipo reloj de arena como se observa en la Figura 6.9 a y b.

En este proceso se utilizó un código G que se carga en la interfaz de la computadora con el torno, y se imponen las siguientes condiciones de corte: revoluciones del husillo $n=180$ rpm velocidad de corte $V_C=7.5$ m/min; avance $f_n = 50$ mm/r y una profundidad de corte de $a_n= 0.1$ mm/rev .



a



b

Figura 6.9 a) y b) perfilado del cuello de las probetas de acero.

Código G para el perfilado tipo reloj de arena.

Leer programa de izquierda a derecha.

G54;(coordenadas absolutas)	G03 X0.7 Z12.5 R-19.01;	G03 X1.6 Z12.5 R-19.01;
G21;(unidades mm)	G03 X-3.8 Z25 R-19.01;	G03 X-2.9 Z25 R-19.01;
M43;		
M03;(prender Chuck)	G00 X-3.7 Z0;	G00 X-2.8 Z0;
M08;(prender refrigerante)	G03 X0.8 Z12.5 R-19.01;	G03 X1.7 Z12.5 R-19.01;
F50;	G03 X-3.7 Z25 R-19.01;	G03 X-2.8 Z25 R-19.01;
G00 X0 Z0;	G00 X-3.6 Z0;	G00 X-2.7 Z0;
G00 X-4.5 Z0;	G03 X0.9 Z12.5 R-19.01;	G03 X1.8 Z12.5 R-19.01;
G03 X0 Z12.5 R-19.01;	G03 X-3.6 Z25 R-19.01;	G03 X-2.7 Z25 R-19.01;
G03 X-4.5 Z25 R-19.01;		
G00 X-4.4 Z0;	G00 X-3.5 Z0;	G00 X-2.6 Z0;
G03 X0 Z12.5 R-19.01;	G03 X1 Z12.5 R-19.01;	G03 X1.9 Z12.5 R-19.01;
G03 X-4.4 Z25 R-19.01;	G03 X-3.5 Z25 R-19.01;	G03 X-2.6 Z25 R-19.01;
G00 X-4.3 Z0;	G00 X-3.4 Z0;	G00 X-2.5 Z0;
G03 X0.2 Z12.5 R-19.01;	G03 X1.1 Z12.5 R-19.01;	G03 X2 Z12.5 R-19.01;
G03 X-4.3 Z25 R-19.01;	G03 X-3.4 Z25 R-19.01;	G03 X-2.5 Z25 R-19.01;
G00 X-4.2 Z0;	G00 X-3.3 Z0;	G00 X-2.4 Z0;
G03 X0.3 Z12.5 R-19.01;	G03 X1.2 Z12.5 R-19.01;	G03 X2.1 Z12.5 R-19.01;
G03 X-4.2 Z25 R-19.01;	G03 X-3.3 Z25 R-19.01;	G03 X-2.4 Z25 R-19.01;
G00 X-4.1 Z0;	G00 X-3.2 Z0;	G00 X-2.3 Z0;
G03 X0.4 Z12.5 R-19.01;	G03 X1.3 Z12.5 R-19.01;	G03 X2.2 Z12.5 R-19.01;
G03 X-4.1 Z25 R-19.01;	G03 X-3.2 Z25 R-19.01;	G03 X-2.3 Z25 R-19.01;
G00 X-4 Z0;	G00 X-3.1 Z0;	G00 X-2.2 Z0;
G03 X0.5 Z12.5 R-19.01;	G03 X1.4 Z12.5 R-19.01;	G03 X2.3 Z12.5 R-19.01;
G03 X-4 Z25 R-19.01;	G03 X-3.1 Z25 R-19.01;	G03 X-2.2 Z25 R-19.01;
G00 X-3.9 Z0;	G00 X-3 Z0;	G00 X-2.1 Z0;
G03 X0.6 Z12.5 R-19.01;	G03 X1.5 Z12.5 R-19.01;	G03 X2.4 Z12.5 R-19.01;
G03 X-3.9 Z25 R-19.01;	G03 X-3 Z25 R-19.01;	G03 X-2.1 Z25 R-19.01;
G00 X-3.8 Z0;	G00 X-2.9 Z0;	G00 X-2.0 Z0;

G03 X2.5 Z12.5 R-19.01; G03 X-2.0 Z25 R-19.01;	G00 X-1.1 Z0; G03 X3.4 Z12.5 R-19.01; G03 X-1.1 Z25 R-19.01;	G00 X-0.2 Z0; G03 X4.3 Z12.5 R-19.01; G03 X-0.2 Z25 R-19.01;
G00 X-1.9 Z0; G03 X2.6 Z12.5 R-19.01; G03 X-1.9 Z25 R-19.01;	G00 X-1 Z0; G03 X3.5 Z12.5 R-19.01; G03 X-1 Z25 R-19.01;	G00 X-0.1 Z0; G03 X4.4 Z12.5 R-19.01; G03 X-0.1 Z25 R-19.01;
G00 X-1.8 Z0; G03 X2.7 Z12.5 R-19.01; G03 X-1.8 Z25 R-19.01;	G00 X-0.9 Z0; G03 X3.6 Z12.5 R-19.01; G03 X-0.9 Z25 R-19.01;	G00 X0 Z0; G03 X4.5 Z12.5 R-19.01; G03 X0 Z25 R-19.01;
G00 X-1.7 Z0; G03 X2.8 Z12.5 R-19.01; G03 X-1.7 Z25 R-19.01;	G00 X-0.8 Z0; G03 X3.7 Z12.5 R-19.01; G03 X-0.8 Z25 R-19.01;	G00 X0.1 Z0; G03 X4.6 Z12.5 R-19.01; G03 X0.1 Z25 R-19.01;
G00 X-1.6 Z0; G03 X2.9 Z12.5 R-19.01; G03 X-1.6 Z25 R-19.01;	G00 X-0.7 Z0; G03 X3.8 Z12.5 R-19.01; G03 X-0.7 Z25 R-19.01;	G00 X0.2 Z0; G03 X4.7 Z12.5 R-19.01; G03 X0.2 Z25 R-19.01;
G00 X-1.5 Z0; G03 X3 Z12.5 R-19.01; G03 X-1.5 Z25 R-19.01;	G00 X-0.6 Z0; G03 X3.9 Z12.5 R-19.01; G03 X-0.6 Z25 R-19.01;	G00 X0.3 Z0; G03 X4.8 Z12.5 R-19.01; G03 X0.3 Z25 R-19.01;
G00 X-1.4 Z0; G03 X3.1 Z12.5 R-19.01; G03 X-1.4 Z25 R-19.01;	G00 X-0.5 Z0; G03 X4 Z12.5 R-19.01; G03 X-0.5 Z25 R-19.01;	G00 X0.4 Z0; G03 X4.9 Z12.5 R-19.01; G03 X0.4 Z25 R-19.01;
G00 X-1.3 Z0; G03 X3.2 Z12.5 R-19.01; G03 X-1.3 Z25 R-19.01;	G00 X-0.4 Z0; G03 X4.1 Z12.5 R-19.01; G03 X-0.4 Z25 R-19.01;	G01 X-3;
G00 X-1.2 Z0; G03 X3.3 Z12.5 R-19.01; G03 X-1.2 Z25 R-19.01;	G00 X-0.3 Z0; G03 X4.2 Z12.5 R-19.01; G03 X-0.3 Z25 R-19.01;	M02;

La programación de este código es muy similar a los anteriores, pues todos deben tener un posicionamiento rápido de la herramienta de corte con el código G00 y en este caso que se requiere hacer un perfil donde tenemos en X la profundidad de corte para cada pasada de 0.1mm, la longitud del perfilado que es de 12.5 mm y un R radio de 19.6 mm, este perfilado se lleva a cabo en dos secuencias: la primera empezando de izquierda a derecha haciendo la mitad del arco iniciando de la orilla del extremo izquierdo, la segunda iniciando a la mitad de la probeta hasta completar la segunda parte del arco, hasta la orilla derecha del otro extremo del arco.

Con estos procesos de maquinado se obtienen las probetas terminadas Figura 6.10 que fueron utilizadas en ensayos de fatiga ultrasónica, las cuales cumplen con las dimensiones solicitadas por el diseño



Figura 6.10. Probetas terminadas de acero 4140 y 1045.

Se verificaron las dimensiones durante el proceso de manufactura, Figura 6.11, con ayuda de instrumentos de medición precisa como el vernier para tener la certeza de que las probetas cumplan de manera precisa con las dimensiones planteadas en el diseño. Este es un vernier electrónico digital que proporciona lecturas precisas.



Figura 6.11. Medida de las dimensiones en vernier electrónico.

CAPÍTULO VII.- ENSAYOS EXPERIMENTALES

7.1. Protocolo de puesta en marcha

El protocolo para la puesta en marcha comprende los siguientes puntos:

- Verificar todas las conexiones eléctricas tanto del compresor como del generador ultrasónico y del sensor inductivo.
- Comprobar que todos los dispositivos estén libres de cualquier clase de objeto que pudiera ocasionar algún daño y estropear la prueba.
- Anclar la probeta al sonotrodo.
- Encender el generador de alta frecuencia.
- Verificar en un bajo nivel de voltaje que la probeta entre en resonancia.
- Medir la temperatura de la probeta.
- Seleccionar voltaje deseado para la realización de la prueba.
- Iniciar el ensayo mediante el dispositivo electrónico para conteo de ciclos.
- Medir variaciones de temperatura y estabilizar su valor.

7.2 Condiciones experimentales

Con el fin de llevar a cabo pruebas experimentales, dos problemas principales se han resuelto para las pruebas de fatiga ultrasónica en el acero 4140T y acero 1045, estas fueron: el perfil de la muestra y dimensiones para ajustar la condición de resonancia [23, 24], y su adherencia al sistema de vibración ultrasónica. El primero se resolvió con la ayuda de la simulación numérica modal, realizado en el software de elementos finitos ANSYS, lo que permite la verificación de la frecuencia natural de vibración de la muestra cuando el material y las dimensiones están definidas.

Las pruebas se llevaron a cabo a temperatura ambiente 292°K - 297°K (19°C - 24°C), con la humedad ambiental entre 45% y 65% y a cero tensión media ($R = -1$). Una máquina de ensayos de fatiga por ultrasonidos se ha desarrollado en nuestro laboratorio con el objetivo de investigar resistencia a la fatiga ultrasónica de los materiales industriales. Esta máquina está totalmente controlada por un programa LabView desarrollado que permite la iniciación de prueba, el registro del número de ciclos y el paro automático cuando se produce la falla en la muestra. Además, si la condición de resonancia no se cumple, la máquina se detiene automáticamente: cuando la frecuencia natural de vibración de la muestra es mayor de 20.400 Hz, o inferior a 19.600 Hz. En la Figura 7.1 se presenta una vista parcial de programa de control de la máquina de la fatiga ultrasónica.

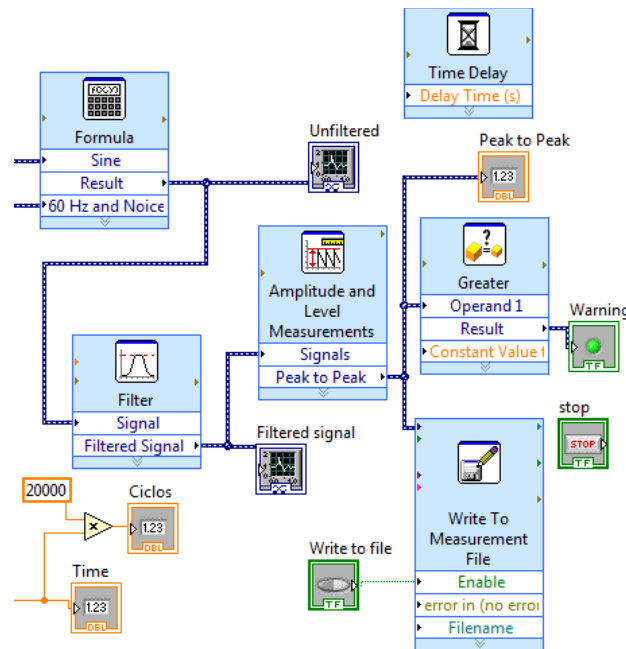


Figura 7.1. Vista parcial del programa de control de la máquina de la fatiga ultrasónica.

7.3 Programación de ensayos experimentales.

Con la finalidad de llevar a cabo ensayos de manera ordenada se elabora un plan de ensayos, este permite tener la distribución de las probetas de acuerdo al esfuerzo aplicado que está directamente relacionado con el voltaje en la máquina y este voltaje a su vez está relacionado con el porcentaje del límite elástico a los cuales son ensayados las probetas. Los resultados experimentales y parámetros de ensayo se enlistan en la Tabla 8.1 y 8.2.

Los ensayos deben ser programados de acuerdo al límite elástico del material donde este es el 100% y los ensayos se llevan a cabo por debajo de este valor. Para el acero 4140T se tomaron 4 puntos de prueba que fueron cercanos al: 60%, 70%, 80% y 90% del límite elástico; estos porcentajes con la finalidad de garantizar el estudio de las muestras en un rango elástico del material. En el caso del acero 1045 se eligieron 3 puntos de prueba que representan aproximadamente el: 70%, 80% y 90% con la misma justificación anterior. Los puntos por debajo del 60% del límite elástico para el acero 4140T y 70% correspondiente al acero 1045, fueron considerablemente largos: hasta 180 horas de ensayo donde la probeta no fracturó. Estos son tiempos de ensayo inusuales permiten predecir que la probeta está en un porcentaje de carga bajo y que la vida en fatiga tiende a infinito a medida que se disminuye la carga.

7.4 Puesta en marcha de ensayos.

En los ensayos experimentales se probaron las muestras en una máquina ultrasónica. Las máquinas de fatiga pueden variar en su diseño sin embargo tienen una serie de

elementos que permiten generar una onda a lo largo de la columna para inducir los desplazamientos en la probeta: un esquema de este sistema se muestra en la Figura 7.2, [25].

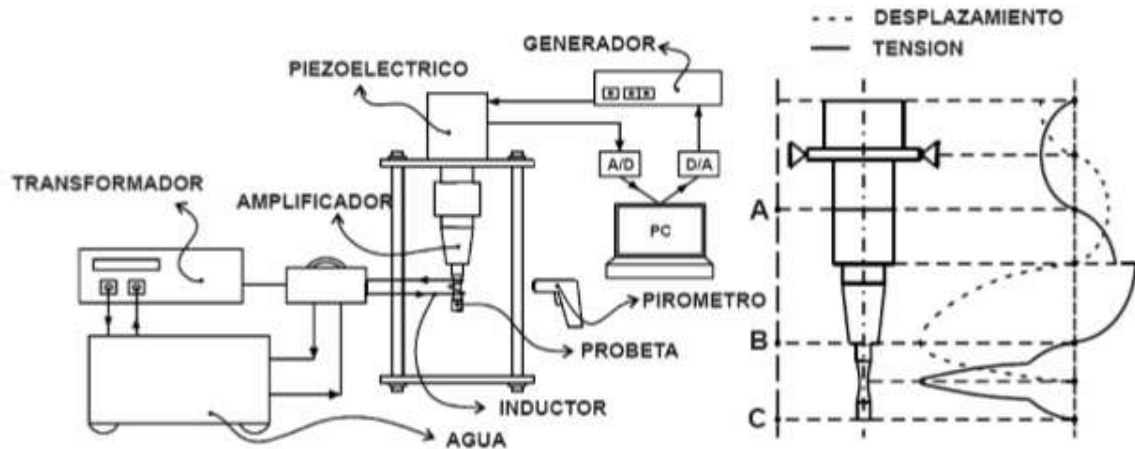


Figura 7.2. Esquema del sistema de funcionamiento de una máquina de fatiga ultrasónica.

Anclar la probeta al sonotrodo.

Uno de los factores relevantes para iniciar con los ensayos es colocar la probeta en la máquina; esto es logrado con un opresor roscado que se introduce en la probeta de 8 mm de profundidad de rosca, y del mismo modo se debe introducir en la maquina sujetándose con la rosca del opresor con una profundidad aproximada de 10 mm. Esta sujeción entre la probeta y la maquina por medio del opresor debe ser con un apriete suficiente, para garantizar que la probeta permanece sujeta a la máquina ultrasónica todo el tiempo de ensayo.

Encender el generador de alta frecuencia.

Para encender el generador es necesario, primero tener la computadora encendida con el programa de conteo de ciclos abierto Figura 7.3. Es indispensable verificar primero que el cable de la columna esté conectado al generador y la rosca del cable hasta el apriete adecuado; enseguida se debe encender el generador una vez verificado lo anterior. Una vez encendido el generador, es recomendable dejar 10 segundos en lo que se estabiliza la corriente; se puede verificar por un ruido en asenso que se escucha al encenderlo y después de unos 10 segundos este ruido se estabiliza.

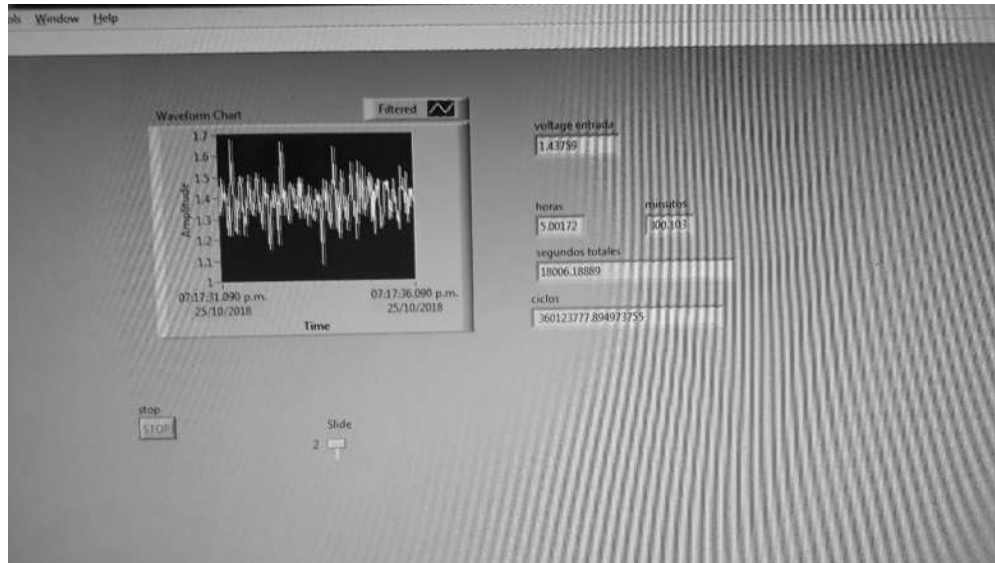


Figura 7.3. Interfaz del programa de conteo de ciclos de la máquina de fatiga ultrasónica.

El generador de voltaje, Figura 7.4, cuenta con un "display" digital que muestra el voltaje de operación; también tiene dos botones uno para subir el voltaje y uno más para bajar el voltaje cuando sea necesario. Un tercer botón se usa para "resetear", esto sucede cuando la muestra sale de resonancia con la columna de la máquina o cuando fractura la probeta.

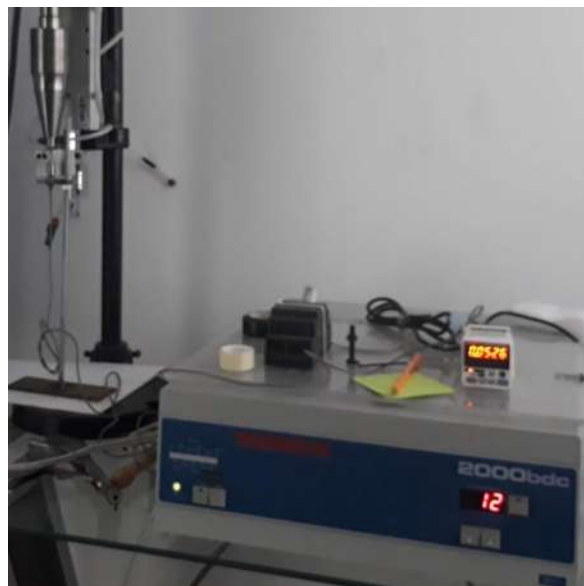


Figura 7.4. Generador de voltaje de la máquina de fatiga ultrasónica.

Verificar en un bajo nivel de voltaje que la probeta entre en resonancia.

Para verificar que la muestra entra en resonancia con la máquina, se lanza el ensayo en el voltaje más bajo permitido por el generador que es de 10 volts. Primero se verifica que el generador esté funcionando a 10volts, esto es posible con el indicador de voltaje. Es posible lanzar el ensayo con la ayuda del programa de LabView, Figura 7.5, en la interfaz de usuario Figura 7.3.

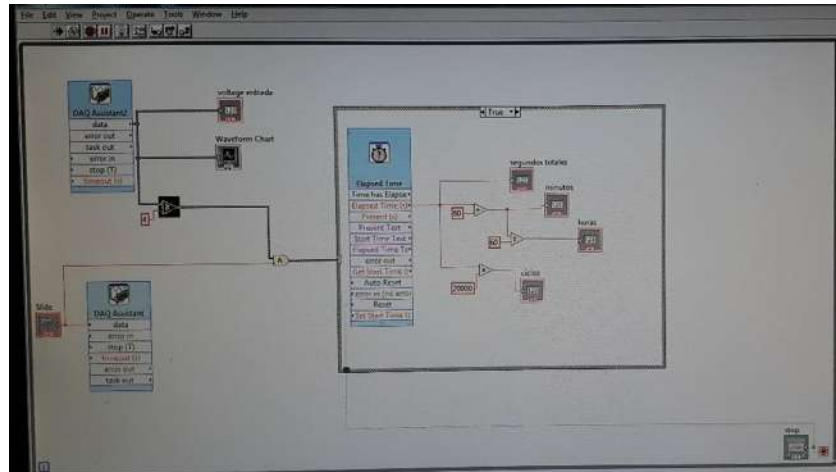


Figura 7.5. Programa de control de conteo de ciclos en LabView.

Si no se tiene cuidado de verificar el voltaje más bajo (10 volts) al momento de iniciar los ensayos, o se inicia con valores elevados de voltaje (ejemplo 15 volts), la probeta puede fracturar instantáneamente y no tener un valor de ciclos representativo.

Medir la temperatura de la probeta.

Con una cámara termográfica se midió la temperatura de las muestras durante el ensayo con la finalidad de relacionar el comportamiento de la temperatura con las causas de falla concentración del esfuerzo en la muestra.

Seleccionar voltaje deseado para la realización de la prueba.

De acuerdo al límite de prueba que corresponda el voltaje se eleva iniciando en 10 volts y variando un volt cada segundo hasta llegar al valor de ensayo, dejando la probeta ensayando todo el tiempo que sea necesario en este último valor.

7.5 Recolección de datos

En la recolección de datos, la máquina ultrasónica tiene un programa de paro automático, en la cual al momento de la fractura se queda registrada en la interfaz de usuario el número de ciclos y tiempo de ensayo. Para registrar estos valores se elaboró una tabla en la libreta de registro con los valores de número de probeta, voltaje del ensayo, numero de ciclos, tiempo de ensayo hasta la fractura, temperatura durante el ensayo,

imágenes térmicas capturadas y porcentaje del límite elástico correspondiente a cada ensayo, listadas en la Tabla 81 para el acero 4140 y 8.2 para el acero 1045.

Además una vez retirado la mitad de probeta de la máquina ultrasónica se recolecta con la otra mitad desprendida, se guardan en bolsas siplot, Figura 7.6. Se guardan las probetas en dichas bolsas procurando un cierre hermético con la finalidad de que no tengan contacto con el polvo o otros objetos extraños que contaminen la superficie fracturada. En esta bolsa se colocó una etiqueta con la información recolectada del ensayo número de probeta, voltaje del ensayo, numero de ciclos, tiempo de ensayo hasta la fractura, temperatura durante el ensayo, íágen térmica. Estas precauciones se tuvieron con las probetas porque también fueron llevadas para el análisis de la fractura en el microscopio electrónico de barrido, de donde la pertinencia de evitar partículas extrañas y tener una visualización de mayor calidad.



Figura 7.6. Manejo de probetas fracturadas guardadas en bolsas cerradas, para evitar la contaminación de la superficie de fractura.

CAPÍTULO VIII.- ANALISIS DE RESULTADOS.

8.1. Análisis de resultados.

Todas las pruebas se llevaron a cabo a temperatura ambiente, con una humedad ambiental entre 45% y 65% y una relación de carga inversa completa $R = -1$. Como resultado de los ensayos en fatiga ultrasónica se midió la temperatura en el cuello de la probeta durante la fractura pudiendo captar con imagen termografica segundos antes de la fractura. Se registró el número de ciclos, el tiempo de ensayo y el voltaje, de esta manera se calculó el esfuerzo con relación al desplazamiento medido por sensor que relacionamos directamente con el esfuerzo en la zona estrecha. Estos datos recolectados fueron registrados en las Tablas 8.1 para el acero 4140T y la Tabla 8.2 para el caso del acero 1045.

Tabla 8.1. Datos experimentales de fatiga ultrasónica en el acero 4140T.

No.	Voltaje (VOLTS)	% Limite elástico	Esfuerzo (Mpa)	No. Ciclos	Tiempo de ensayo (Seg)	Temperatura (°C)
9	15	72%	299	10935425.47	546.77	150
15			299	3979287.6	198.96	185
17			299	10475279.15	523.76	152
5	16	77%	319	7480247.84	374.01	132
6			319	8296474.52	414.82	118
8			319	3191302.53	159.59	151
11	17	82%	339	3533862.13	176.7	185
12			339	2829641.84	141.48	214
14			339	3121498.53	156	208
1	18	87%	360	845068.33	42.25	218
3			360	1237910.8	61	146
4			360	455926.08	22	113

Tabla 8.2 Datos experimentales de fatiga ultrasónica en el acero 1045

No.	Voltaje (VOLTS)	% Limite elástico	Esfuerzo (Mpa)	No. Ciclos (Hz)	Tiempo de ensayo (Seg)	Temperatura (°C)
12	12	90%	239	360123777.9	18000	131
13	12		239	526993002.3	26280	129
15	12		239	120628639.6	6012	111
4	13	84%	259	102404077.2	5120.2	170
5	13		259	57873250.16	2893.6	149
6	13		259	7671706.9	230148	147
1	14	77%	279	227533.01	11.37	242
2	14		279	242433.87	12.12	270
3	14		279	222592.72	11.13	172

Los resultados experimentales de resistencia de fatiga ultrasónica se representan en la Figura 8.1 para el acero 4140T y Figura 8.2 para acero 1045, con carga comprendida entre 299 y 360 MPa de máxima tensión de Von Mises medido en la sección del cuello de la muestra para el acero 4140T; y con carga comprendida entre 239 y 279 MPa de máxima tensión de Von Mises medido en la sección del cuello de la muestra para el acero 1045. Los resultados experimentales representados en estas figuras son el valor medio de tres pruebas en el acero 4140T y tres pruebas en el caso del acero 1045. Estos resultados muestran que para el acero 4140T la resistencia a la fatiga es cerca de 1.2×10^6 ciclos cuando la carga aplicada es de 360 MPa; mientras que la vida de fatiga alcanza los 10×10^6 ciclos con la disminución de la carga hasta 299 MPa. En el caso del acero 1045 los resultados experimentales muestran que la resistencia a la fatiga es cerca de 2×10^5 ciclos cuando la carga aplicada es de 279 MPa; mientras que la vida de fatiga alcanza los 5×10^8 ciclos con la disminución de la carga hasta 239 MPa.

Las curvas mostradas en las Figuras 8.1 y 8.2 se obtuvieron por interpolación logarítmica a partir de los puntos experimentales.

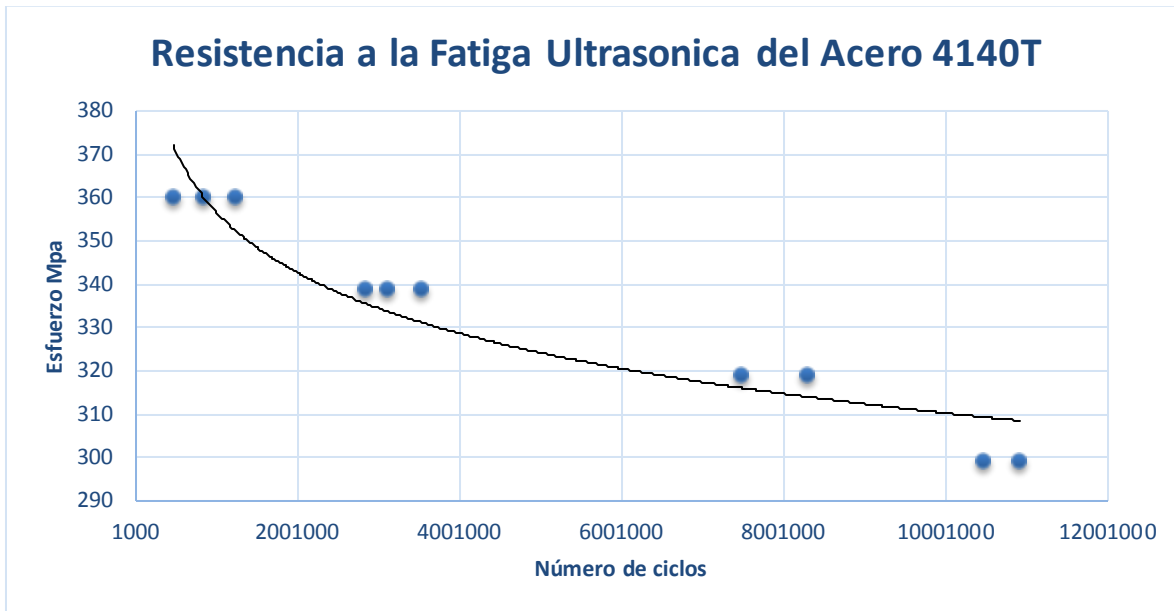


Figura 8.1. Grafica de la resistencia de fatiga ultrasónica del acero 4140T

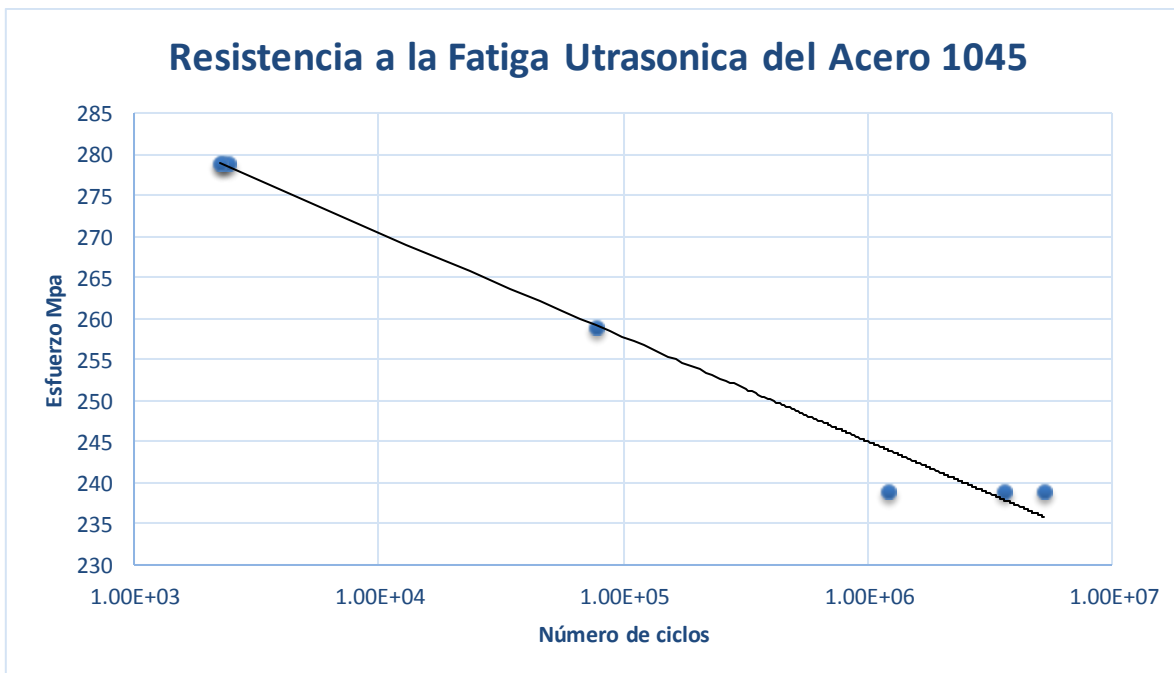


Figura 8.2. Grafica de la resistencia de fatiga ultrasónica del acero 1045

Se observó la iniciación de grieta en el centro de la sección de cuello de la muestra, como se muestra en la Figura 8.3 para el acero 4140T y 8.4 en el caso del acero 1045. Este comportamiento se debe atribuir a la concentración de tensiones en esta zona, tal como ha

sido revelado por imágenes termo-gráficas tomadas en la sección de cuello de la muestra durante las pruebas: Figura 8.5 para el acero 4140T y Figura 8.6 para el acero 1045.

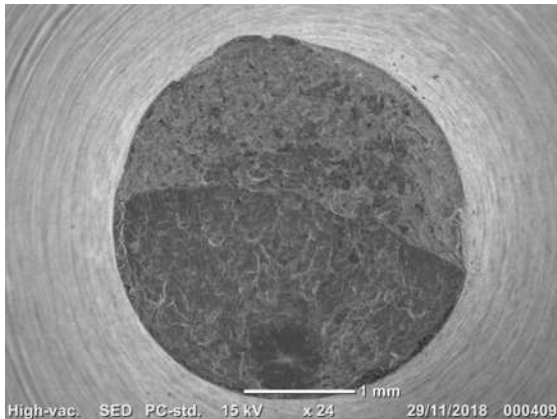


Figura 8.3 inicio de grieta en el centro del cuello de la muestra acero 4140T.

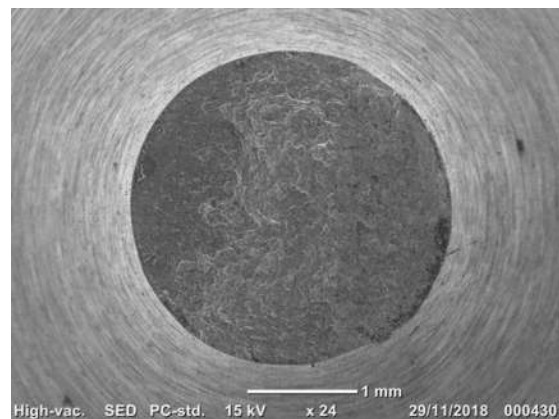


Figura 8.4 inicio de grieta en el centro del cuello de la muestra acero 1045.

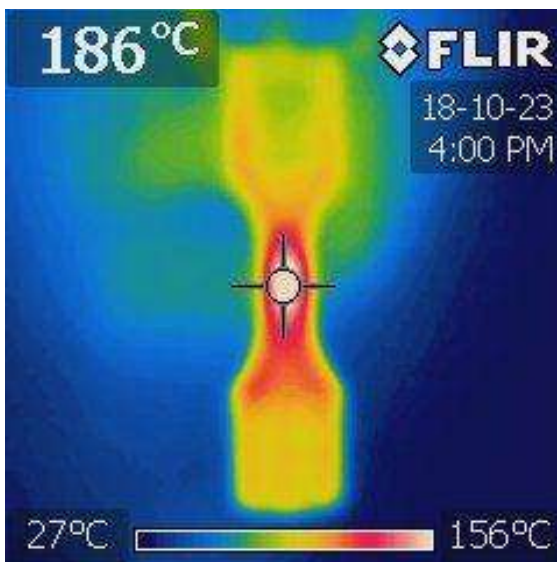


Figura 8.5. Termo-gráfica acero 4140T.

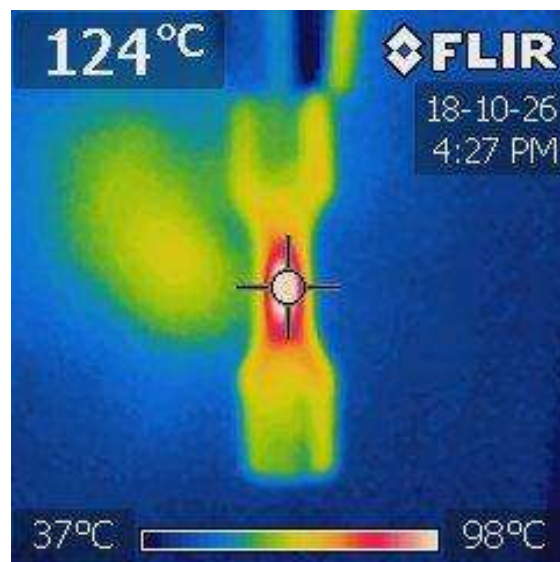


Figura 8.6. Termo-gráfica acero 1045.

Altas tensiones a lo largo de la sección de cuello de la muestra están asociados con altas temperaturas registradas con imágenes termográficas: en la Figura 8.7 y 8.8 las altas temperaturas registradas fueron 186°C para el acero 4140T, cuando la carga aplicada fue 360 Mpa y 124°C para el acero 1045, cuando la carga aplicada fue de 279 MPa. Sin embargo, la variación de temperatura entre las zonas blancas y rojas en las imágenes termográficas es apenas 2 o 3 grados Celsius; entonces, se observa que la alta tensión se

encuentra en el punto medio a lo largo de la sección de cuello de la muestra, para estos materiales [26].

Por otra parte, bajo alta carga de frecuencia (20 KHz) la localización instantánea de alta temperatura y alta tensión no debe ser idénticas. Sin embargo, este hecho se observó la rotura de la probeta sistemáticamente en la zona estrecha de 3mm de la sección de cuello de la muestra donde se localiza la concentración de esfuerzos y la temperatura de 186°C en el momento de la fractura a una carga de 360 Mpa, como se muestra en la Figura 8.7. Para ambos se constató el mismo comportamiento donde se concentra los esfuerzos en el centro de la probeta con una temperatura de 124°C mostrado en la Figura 8.8 para el acero 1045. De acuerdo al análisis modal y la simulación de esfuerzos en la sección del cuello de la probeta para ambos casos los esfuerzos se concentran en el centro y coincide claramente con aumento de la temperatura en la zona más estrecha de la muestra.

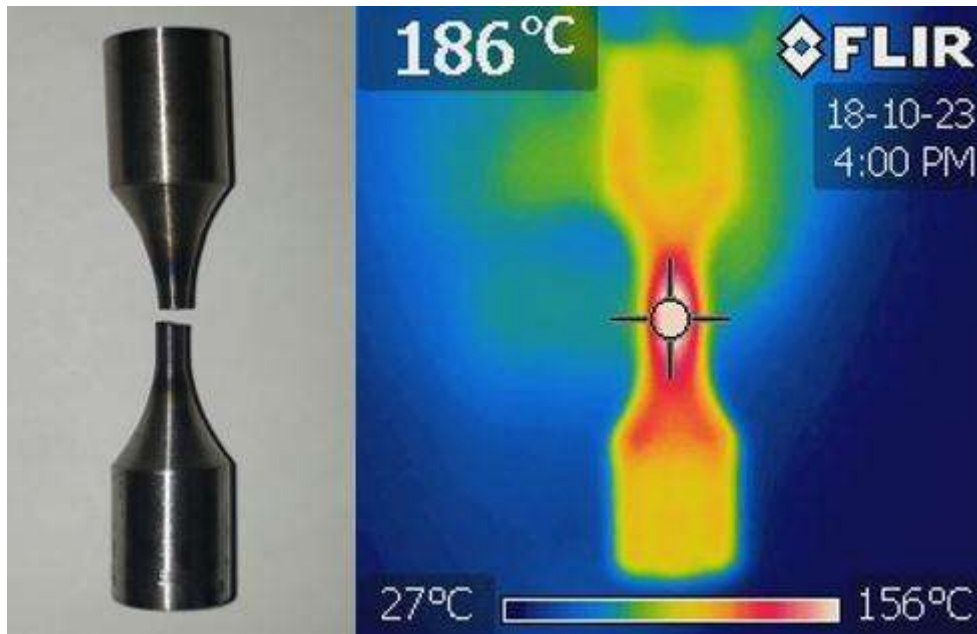


Figura 8.7. Termografía tomada en el momento de la ruptura por fatiga, en el acero 4140T

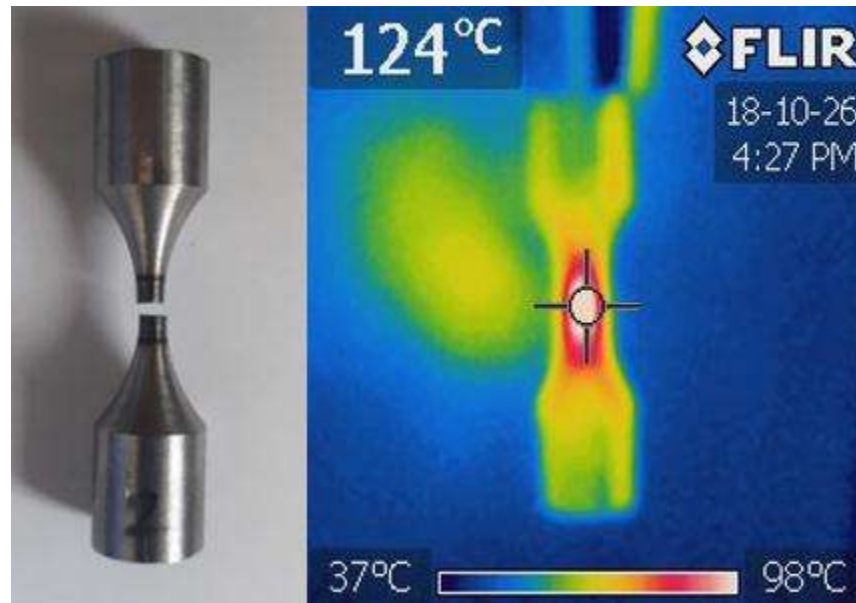


Figura 8.8. Termografía tomada en el momento de la ruptura por fatiga, en el acero 1045

Imágenes termográficas muestran que la temperatura alta se localiza a lo largo de la sección de cuello de la muestra; está asociada con la zona de altas tensiones tal como se obtiene por los resultados numéricos de simulación. La temperatura más alta se ha registrado en el centro de la sección de cuello de la muestra. Esta observación física se relaciona con la resonancia real del espécimen, condicionado por el método de fijación utilizado en la fijación de la muestra a la máquina de fatiga ultrasónica [27, 28].

A fin de evaluar la iniciación y propagación de fisuras en este material bajo ensayo de fatiga ultrasónica, un estudio sistemático se llevó a cabo para determinar la amplitud del factor de intensidad de tensiones umbral ΔK_{th} . Los ensayos de fatiga ultrasónicos fueron interrumpidos de manera sistemática durante algunos segundos y la longitud de la grieta se midió con la ayuda de una cámara óptica; la longitud de la grieta mínima detectable con esta cámara fue de 20 μm .

Se desarrolla una onda elástica estacionaria a lo largo de la muestra de prueba que induce una alta tensión en la sección del cuello y altos desplazamientos en los dos extremos de ambos materiales. El estrés y el desplazamiento a lo largo de la muestra de prueba se han obtenido por simulación numérica, como se muestra en la Figura 8.9.

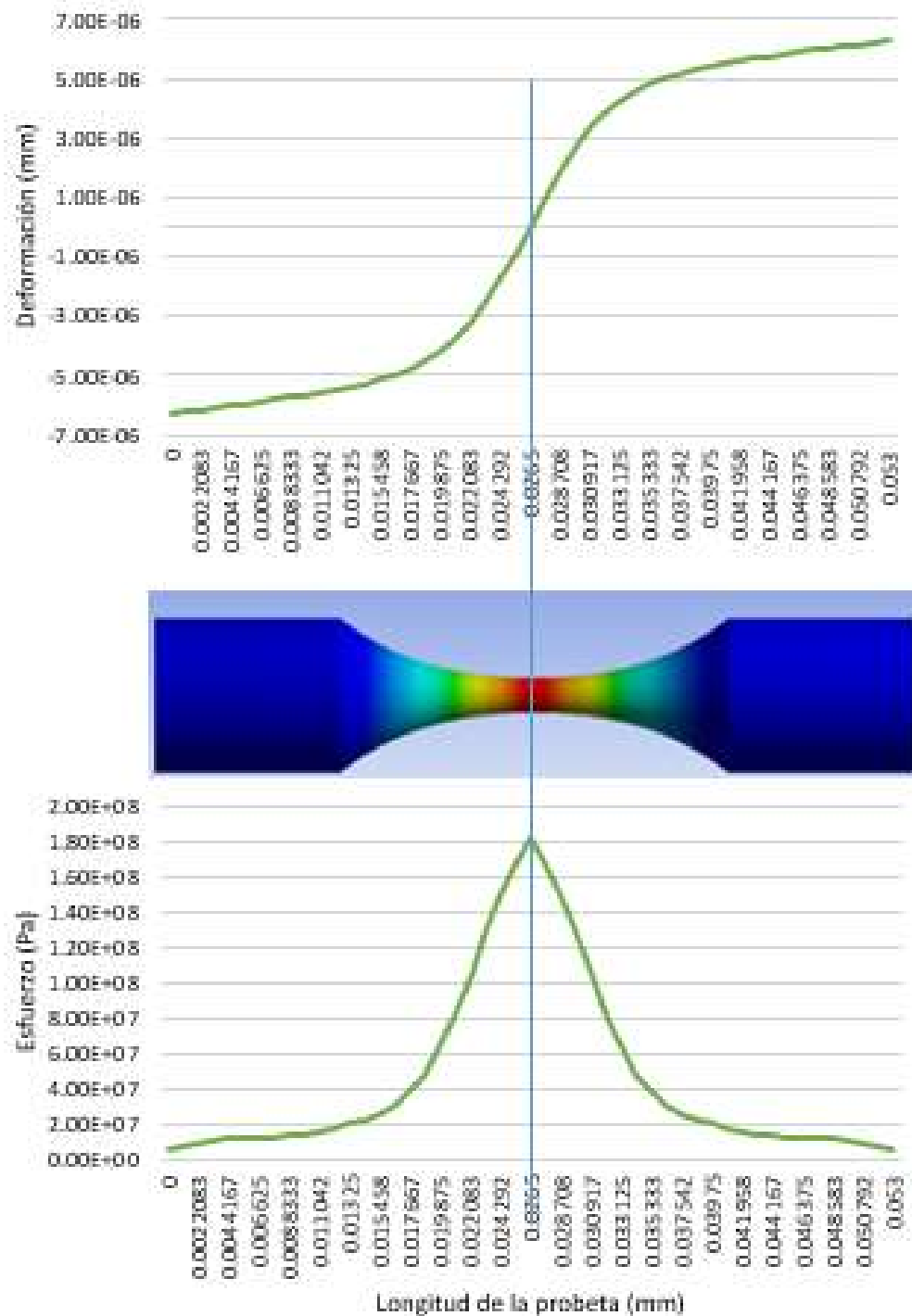


Figura 8.9. Desplazamiento y tensión a lo largo de las aleaciones de acero bajo resonancia, obtenida por simulación numérica.

Los resultados de simulación numérica en las muestras de ambos aceros, Figura 8.9, resulta similar para ambos materiales. En ambos casos, se observan esfuerzo más alto en el cuello de la muestra y desplazamiento cero en esta zona; mientras que en los extremos de la muestra se observa máxima deformación y esfuerzos cercanos a cero.

8.2. Observación de la fractura en microscopio electrónico de barrido MEB

Con la finalidad de obtener una visualización de las muestras después de fracturar se llevaron a el microscopio electrónico de barrido, recursos materiales proporcionados por el director de tesis. Estas visualizaciones permiten analizar el inicio y propagación de fisuras así como observar la presencia de algunas inclusiones o defectos del material que pueden estar asociados a posibles causas de falla en los materiales estudiados.

El microscopio electrónico de barrido permite obtener una imagen mediante un haz de electrones que impactan la superficie de la muestra para formar una imagen de alta resolución utilizando las interacciones electrón – materia. El MEB puede penetrar la superficie del material estudiado para observar partes superficiales y ligeramente internas. La preparación de las muestras es relativamente fácil pues son conductoras, y en la mayoría de los MEB este requisito es indispensable. Una vez preparadas las muestras en el porta objetos como lo muestra la Figura 8.10 son introducidos al microscopio donde después de quedar al vacío se barre la superficie con electrones acelerados que viajan a través del cañón donde posteriormente un detector formado por lentes basados en electroimanes, mide la cantidad e intensidad de los electrones que devuelve la muestra siendo capaz de formar la imagen.



Figura 8.10. Muestras en la porta objetos del Microscopio Electrónico de Barrido.

Con el microscopio electrónico de barrido se obtienen las imágenes de la fractura para el acero 1045 donde observamos tres probetas las cuales se ensayaron a diferentes niveles de carga como lo muestra la Tabla 8.3. Con la visualización de estas pruebas se observa el crecimiento de la fractura en la Figura 8.11, 8.12 y 8.13. En estas imágenes de fractura se puede apreciar dos zonas características: zona de iniciación de fisuras y zona de propagación de fisuras. En el inicio de figuración y una parte de propagación se distingue la zona denominada de lento crecimiento de fisura, diferenciada del rápido crecimiento al final de la propagación.

Tabla 8.3. Probetas de ensayo visualizadas en el MEB, acero 1045 a tres niveles de carga.

No.	Voltaje (VOLTS)	% Limite elástico	Esfuerzo (Mpa)	No. Ciclos (Hz)	Tiempo de ensayo (Seg)	Temperatura (°C)
15	12	77	239	120628639.6	6012	111
6	13	84	259	7671706.9	230148	147
2	14	90	279	242433.87	12.12	270

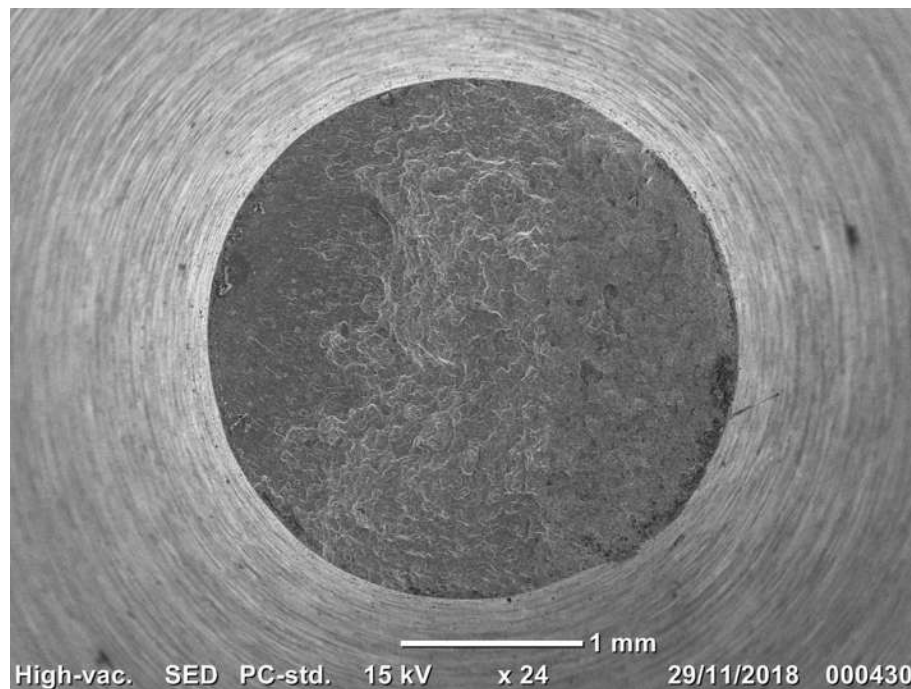


Figura 8.11. Fractura de la probeta de acero 1045 ensayada a 12 volts y 77% (239.4 Mpa) del límite elástico.

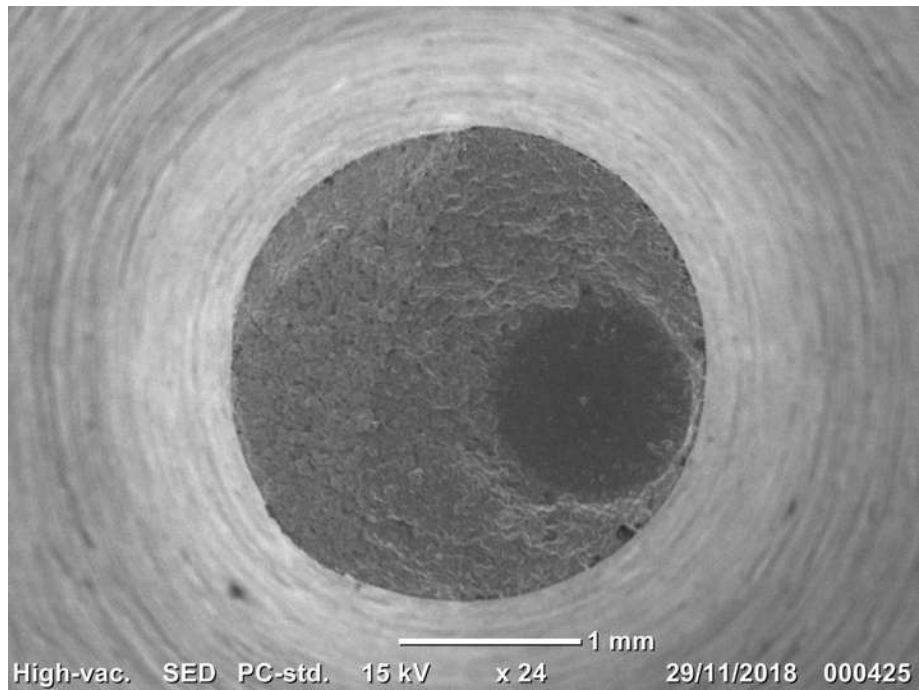


Figura 8.12. Fractura de la probeta de acero 1045 ensayada a 13 volts y 84% (259.35 Mpa) del límite elástico.

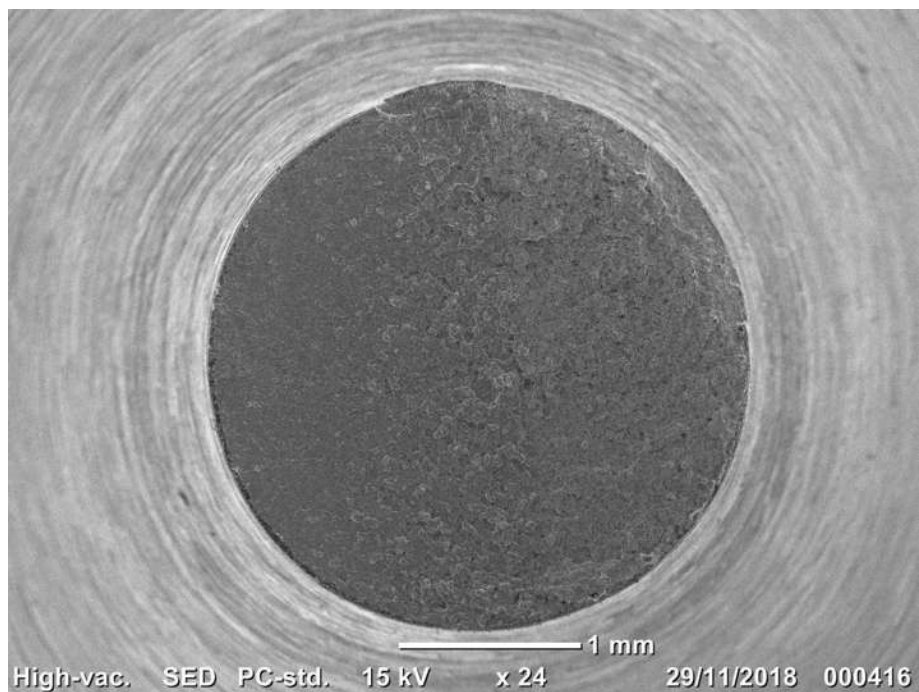


Figura 8.13. Fractura de la probeta de acero 1045 ensayada a 14 volts y 90% (279.3 Mpa) del límite elástico.

Con el microscopio electrónico de barrido, se obtienen las imágenes de la fractura para el acero 4140T donde se observa cuatro probetas las cuales se ensayaron a diferentes niveles de carga, Tabla 8.4. Con la visualización de estas pruebas observamos el crecimiento de la fractura en la Figura 8.14, 8.15, 8.16 y 8.17. Se puede apreciar las zonas de fractura: lento crecimiento de fisura y de rápido crecimiento de fisura. En este acero 4140T tenemos 4 niveles de carga donde fueron hechos los ensayos experimentales y que por calibración de la máquina y diseño de la probeta son obtenidos para la vida en fatiga del material.

Tabla 8.4. Probetas de ensayo visualizadas en el MEB, acero 4140T en cuatro niveles de carga.

No.	Voltaje (VOLTS)	% Limite elastico	Esfuerzo (Mpa)	No. Ciclos	Tiempo de ensayo (Seg)	Temperatura (°C)
9	15	72%	299	10935425.47	546.77	150
6	16	77%	319	8296474.52	414.82	118
14	17	82%	339	3121498.53	156	208
4	18	87%	360	455926.08	22	113

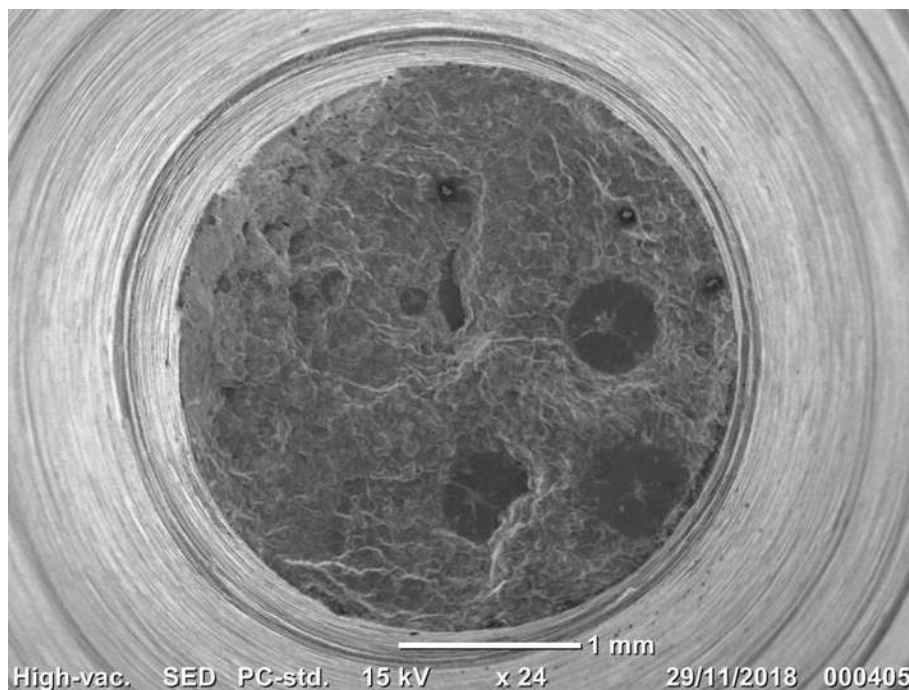


Figura 8.14. Fractura de la probeta de acero 4140T ensayada a 15 volts y 72% (299.25 Mpa) del límite elástico.

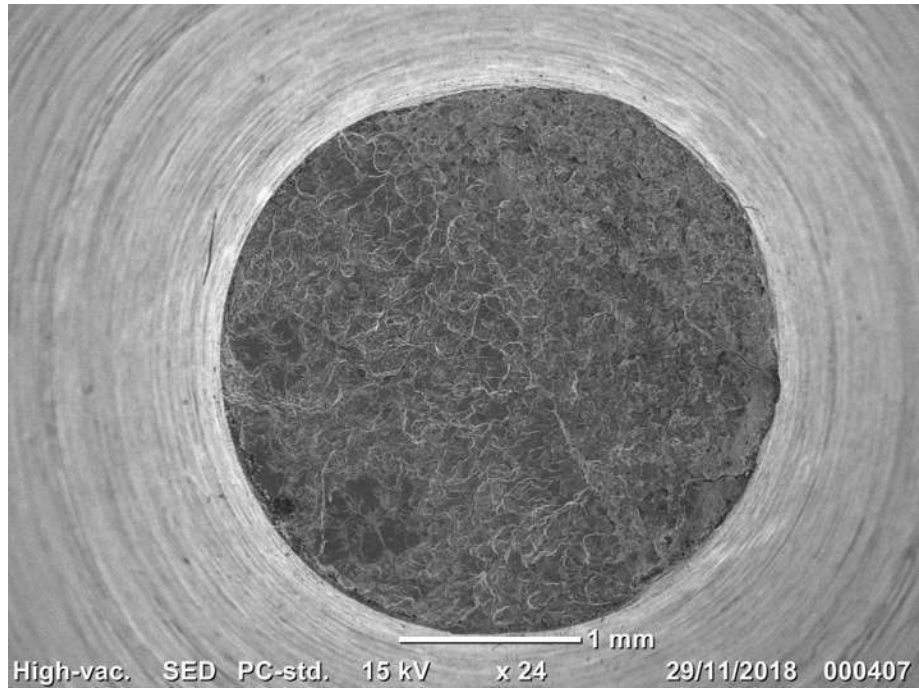


Figura 8.15. Fractura de la probeta de acero 4140T ensayada a 16 volts y 77% (319.2 Mpa) del límite elástico.

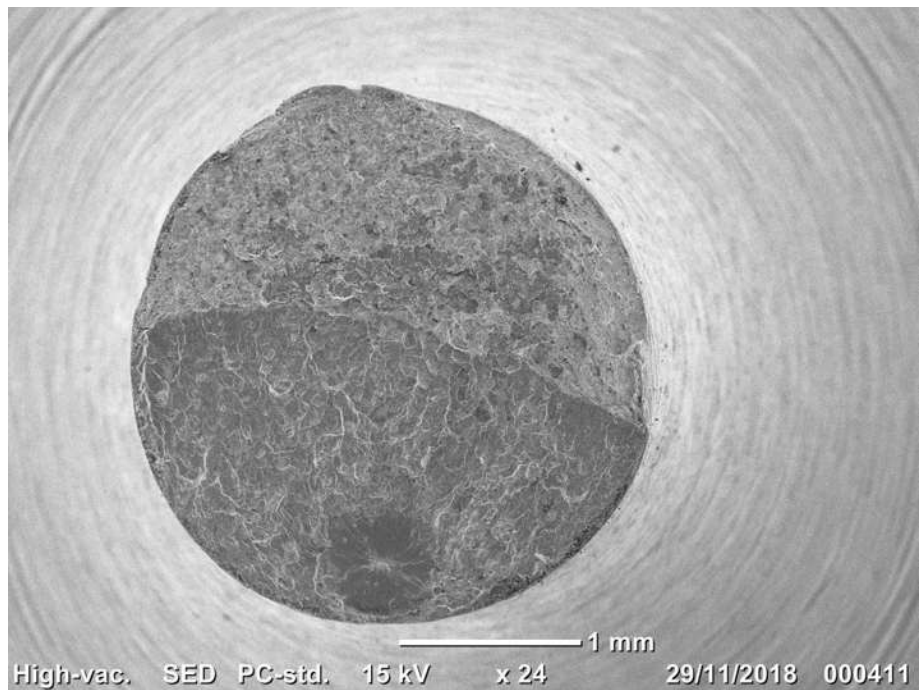


Figura 8.16. Fractura de la probeta de acero 4140T ensayada a 17 volts y 82% (339.15 Mpa) del límite elástico.

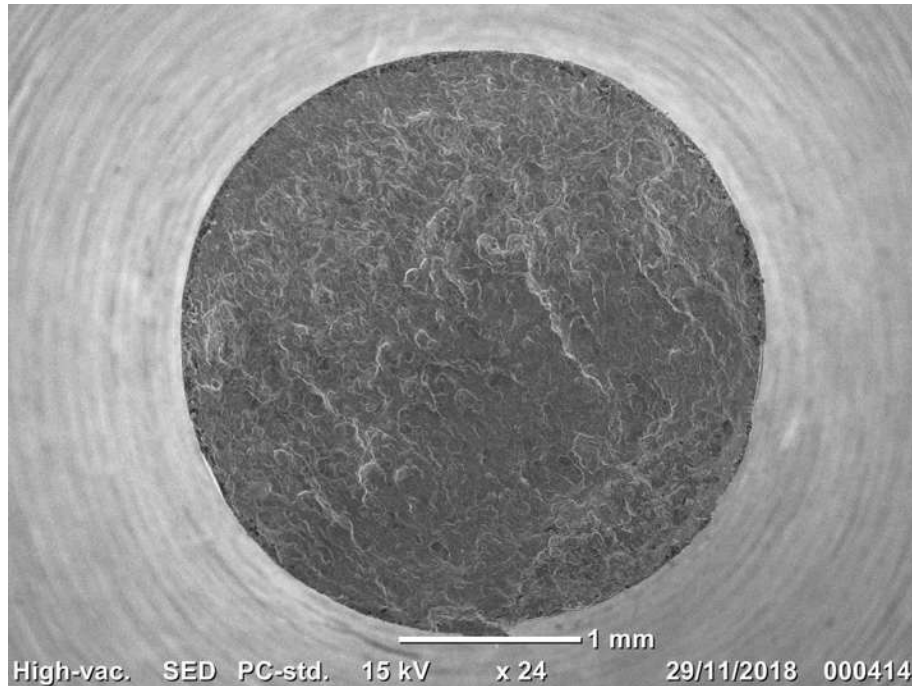


Figura 8.17. Fractura de la probeta de acero 4140T ensayada a 18 volts y 87% (359.1 Mpa) del límite elástico.

En las imágenes por microscopio electrónico de barrido, anteriores podemos encontrar dos zonas Figura 8.17, la zona de lento crecimiento donde se observa el inicio de la grieta la propagación de la misma y la zona de fractura rápida donde el material termina por romperse y separarse de manera más rápida. Se presentan también concentradores de esfuerzos llamados por algunos autores como ojos de pescado estos suelen formarse por inclusiones en el material que nos da una forma de ruptura en forma de círculo con un centro donde se puede suponer está presente la inclusión [29, 30].

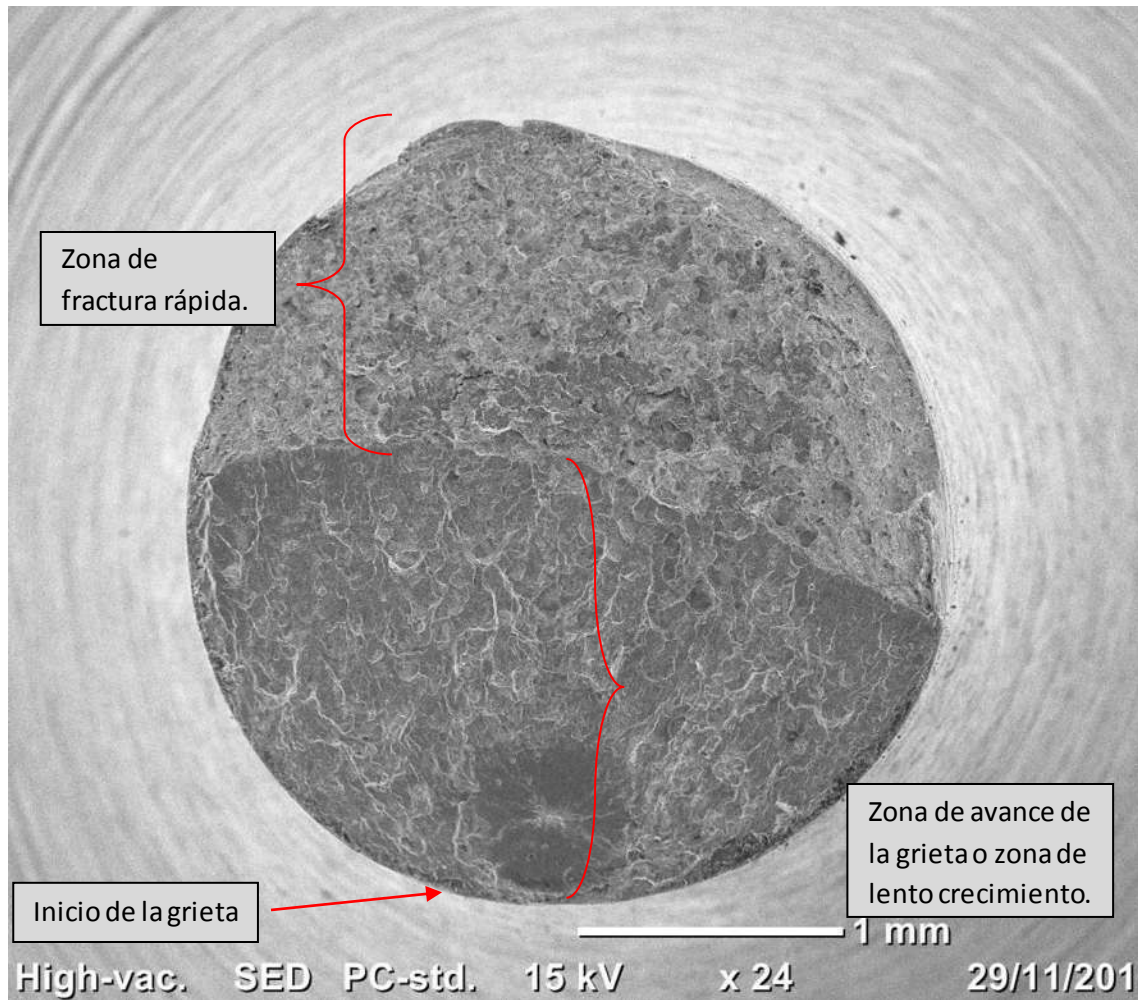


Figura 8.18. Zonas de crecimiento y propagación de la grieta en las probetas de acero 1045 y 4140T.

CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones se pueden elaborar a partir de este trabajo:

- Ensayos de fatiga ultrasónicos se han llevado a cabo en aceros utilizados en la industria automotriz, acero 4140T y acero 1045.
- Para el acero 4140T la resistencia a la fatiga es cerca de 1.2×10^6 ciclos cuando la carga es de 360 MPa; mientras que la vida de fatiga alcanza los 10×10^6 ciclos con la disminución de la aplicación de la carga a 299 MPa.
- En el caso del acero 1045 los resultados experimentales muestran que la resistencia a la fatiga es cerca de 2×10^5 ciclos cuando la carga de la aplicación es de 279 MPa; mientras que la vida de fatiga alcanza los 5×10^8 ciclos con la disminución de la aplicación de la carga a 239 MPa.
- Las altas tensiones están relacionadas a las altas temperaturas registradas por imágenes termográficas; la temperatura más alta estuvo cerca de 218°C con una carga aplicada de 360 MPa en el acero 4140T y 270°C con una carga aplicada de 242 MPa para el acero 1045.
- El acabado superficial del maquinado juega un papel importante en los ensayos de fatiga, este parámetro para las probetas ensayadas fue entre $R_0 = 30 - 40$ micras para evitar concentradores de esfuerzo.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Donald R. Askeland, (1998)*Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Mexico D.F., Thomson. Pp 150 – 153.
- [2] <http://iirsacero.com.mx/acero-4140/>
- [3] <http://iirsacero.com.mx/acero-1045/>
- [4] <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.02.031>. /06-02-2019-1:29pm/ U.Sánchez-Santana et al
- [5] <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.06.039>. /08-02-2019-4:48pm/ Khadija Kimakh. et al.
- [6] Suresh, S. “Fatigue of Materials”, Cambridge University Press, 2nd Edition, 2004.
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Aloha_Airlines.
- [8] Yung-Li-lee, J.P., Richard Hataway, Mark Barkey. *Fatigue. Testing and analysis. Theory and Practice*. In Butterworth-Heinemann, E., ed (Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005).
- [9] GUNT. *Fatigue Testing Machine*. Hamburgo, 2007).
- [10] Instron. *Portable Rotate Beam Fatigue System*.
- [11] D. Brandolisio, G.P., G. De Corte, J. Symynck, M. Juwet, F. De Bal. *Rotating bending machine for high cycle fatigue testing*. p. 72009).
- [12] International, E. *Máquina de ensayo de fatiga*. p. 3Madrid, 2009).
- [13] Norton L., R. *Diseño de Máquinas*. México, 1999).
- [14] Bathias, “*Piezoelectric fatigue testing machine and device*”. *Internacional Journal of Fatigue*, 28(11), 1439 – 1445 (2006)
- [15] Kong, “*Theoretical and numerical study on vibratory fatigue*”, These to doctorat, University of Campiege (1987).
- [16] Ni, J., “*Mechanical Behavior of Alloys in Ultrasonic Fatigue*”, These to doctorat, CNAM (1991)
- [17] Thanigaiyarasu, G., “*Contribution to the study of fatigue life and crack growth in vibration fatigue*”, These to doctorat, University of Thechnology of Compiegne (1991)
- [18] Gonzalo M. Domínguez Almaraz, “*Ultrasonic Fatigue Endurance of Thin Carbon Fiber Stheets*”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 47, pp 1654 – 1660 (2016).

- [19] Pérez Mora Rubén, Domínguez Gonzalo, Palin-Luc Thierry, Bathias Claude, Arana José Luis, “resistencia a la fatiga gigacíclica de aleaciones metálicas (un caso específico de estudio)”, xi congreso y exposición latinoamericana de turbomaquinaria (2008), memorias del congreso, pp. 1-4.
- [20] Modal Analysis Theory and Testing, w.Heylen, S.Lammens, P.Sas – KU Leuven, Belgica. Exploring I-deas Test, version 9, MTS.
- [21] Mary Kathryn Thompson PhD, (2017), “ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis”, Science Direct, pp 1-199.
- [22] Paul Doru Barsanescu, “Von Mises Hypothesis revised” Acta Mechanica, February 2017, vol. 228.
- [23] G.M. Dominguez Almaraz, A. Dueñas Aburto, E. Correa Gómez: *Met. Mat. Trans. A*, 2014, vol. 45, pp. 280-86.
- [24] D.S. Paolino, A. Tridello, G. Chiandussi, M. Rossetto: *Fat. & Fract. of Eng. Mat. & Struct.*, 2014, vol. 37(5), pp. 570-79
- [25] Federico Cavaliere, “Análisis de Fatiga a muy Alto Número de Ciclos”. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica Vol. 15, pp 03-12 (2011).
- [26] G.M. Dominguez Almaraz, E. Correa Gomez, F.M. Zeidan, E.R. Mena Mena: *Int. J. of Emerging Tech. and Adv. Eng.*, 2013, 3(11), pp. 404-9.
- [27] P. Bajons, W. Kromp: *Ultrasonics*, 1978, vol. 16(5), pp. 213-17.
- [28] A. Puškár: *Ultrasonics*, 1993, vol. 31(1), pp. 61-7.
- [29] Chong Wang et al, “Investigation of crack initiation mechanisms responsible for the fish eye formation in the Very High Cycle Fatigue regime” International Journal of Fatigue Vol. 119, February (2019), pp 320-329.
- [30] H.Q.Nguyen et al., “Numerical simulation of fish-eye fatigue crack growth in very high cycle fatigue” Engineering Fracture Mechanics Vol. 135, February 2015, pp 81-93.