



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



**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA EN FATIGA
ULTRASÓNICA DE ACERO AERONÁUTICO
MARAGING 300.**

TESIS.

**PARA OBTENER EL TÍTULO:
DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA.**

**PRESENTA:
M.C. JULIO ADRIÁN RUÍZ VÍLCHEZ**

**ASESOR:
DR. GONZALO M. DOMÍNGUEZ ALMARAZ**

Morelia, Michoacán, abril del 2023.

Con especial cariño, dedico es esfuerzo en el presente trabajo:

A mis hijos, Adrian Iker Ruiz Pérez y Paulina Jolette Ruiz Pérez.

A mi madre, Ma. Esther Vilchez Reyes.

A mi padre, Reynaldo Ruiz Suarez.

A mis hermanas, Esther y Angela Ruiz Vilchez.

A la madre de mis hijos, Azucena Pérez Pérez.

A toda mi familia.

AGRADECIMIENTOS.

Expreso mis más sinceros agradecimientos:

Dr. Gonzalo M. Domínguez Almaraz, le agradezco su esfuerzo, dedicación y compromiso que tuvo con la presente investigación, me ha dirigido y formado como persona profesional y ética, con el mejor ejemplo y un modelo a seguir, es un de un investigador digno de su función. Sin sus enseñanzas y recursos no fuese posible la conclusión de esta investigación ni el progreso profesional de mi persona.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), sin el soporte económico brindado por este organismo de ciencia no fuese posible ver logrado tanto.

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, gracias por darme un espacio para formarme profesionalmente desde la preparatoria hasta el doctorado, a todas las personas que la integran.

Facultad de Ingeniería Mecánica, agradezco a esta institución y todos los que la conforman, me dio las herramientas y el espacio para estudiar, a todas las personas que la integran.

A mis sinodales, que revisaron desde el inicio hasta el final el presente proyecto de investigación. Los investigadores que han aportado su experiencia y guiado este proyecto por un buen camino (Dr. Gonzalo M. Domínguez Almaraz, Dr. Gilberto González Avalos, Dr. Erasmo Correa Gómez, Dra. Lada Domratcheva Lvova y la Dra. Laura Alicia Ibarra Bracamontes).

Agradezco a todos mis compañeros que tuvieron la amabilidad de compartir sus experiencias y me apoyaron durante mis estudios de doctorado (Dra. Ishvari Fernanda Zúñiga Tello, Dr. Carlos Manuel Sánchez, Dr. Luis Miguel Torres Duarte, Dr. Manuel Guzmán Tapia y demás compañeros).

Mis hijos Paulina Jolette y Adrian Iker, mi mayor motivación de cada día y mi motor que le da impulso a mi vida.

A mi familia, le agradezco todo su apoyo a mi madre Ma. Esther, mis hermanas Angela y Esther a mi esposa Azucena y a todos mis familiares y amigos les agradezco mucho su acompañamiento en este proyecto y en todos los proyectos logrados y a los que vendrán, espero tener la fortuna de seguir contando con todos.

Muchas gracias a todos.

¡Gracias!

RESUMEN

Ensayos de fatiga ultrasónica se llevaron a cabo en el acero aeronáutico maraging 300, que pertenece a los aceros martensíticos envejecidos, con el fin de determinar la resistencia a la fatiga bajo carga a alta frecuencia (20 KHz). Este material utilizado en la industria aeronáutica; entre otras industrias, juega un papel importante en las aplicaciones de materiales de alta resistencia. No obstante su importancia industrial, pocas investigaciones se han desarrollado en relación con la resistencia a la fatiga ultrasónica de aceros de alta resistencia, tales como: micro-aleados, aceros maraging, etc. Un aspecto principal para llevar a cabo ensayos de fatiga ultrasónicas en este material es la determinación de 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 un cuello esbelto en el centro de la probeta: perfil de reloj de arena. De esta manera, bajo la condición de resonancia, una onda elástica estacionaria se genera a lo largo de la muestra que induce alta tensión en la sección de cuello y altos desplazamientos en los extremos.

Los resultados que se obtuvieron consisten en la vida de fatiga con diferentes niveles de tensión: alta, media y baja respecto de los valores de tensión de Von Mises en la sección de cuello. Se analizaron la iniciación y propagación de grietas mediante microscopia electrónica de barrido y microscopia óptica, con el objeto de obtener las conclusiones en relación con la resistencia a la fatiga de estas probetas de acero aeronáutico maraging 300, bajo pruebas de fatiga ultrasónica.

Palabras clave: Fatiga ultrasónica; Acero maraging 300; Iniciación y propagación de grietas; Inclusiones no metálicas; Simulación numérica.

ABSTRACT

Ultrasonic fatigue tests were carried out on the maraging 300 aeronautical steel, which belongs to the aged martensitic steels, in order to determine the fatigue resistance under high frequency load (20 KHz). This material used in the aeronautical industry; among other industries, plays an important role in the applications of high strength materials. Despite its industrial importance, few investigations have been developed in relation to the resistance to ultrasonic fatigue of high strength steels, such as: micro-alloys, maraging steels, etc. A main aspect for carrying out ultrasonic fatigue tests on this material is the determination of test sample dimensions, in order to adapt to the resonance condition. This aspect was solved by modal numerical simulation: test specimens are machined with a slender neck in the center of the specimen: hourglass profile. Thus, under the condition of resonance, an stationary elastic wave is generated along the sample which induces high tension in the neck section and high displacements at the ends.

The results obtained consist of the fatigue life with different tension levels: high, medium and low with respect to the Von Misses tension values in the neck section. The initiation and propagation of cracks were analyzed using scanning electron microscopy and optical microscopy, in order to obtain conclusions regarding the fatigue resistance of these maraging 300 aeronautical steel test pieces, under tests of ultrasonic fatigue.

Keywords: Ultrasonic fatigue; Maraging steel 300; Initiation and propagation of cracks; Non-metallic inclusions; Numerical simulation.

ÍNDICE.

RESUMEN.....	4
ABSTRACT	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
JUSTIFICACIÓN	20
OBJETIVOS	21
OBJETIVO PRINCIPAL.	21
OBJETIVOS SECUNDARIOS.....	21
HIPÓTESIS	21
CAPÍTULO I.- CONCEPTOS BÁSICOS Y GENERALIDADES.	22
1.1 FATIGA MECÁNICA DE LOS MATERIALES.	22
1.2. TIPOS DE CARGAS DINÁMICAS Y SUS CARACTERÍSTICAS.	22
1.3. ORIGEN DE LA ROTURA POR FATIGA.	26
1.4. MODELOS ANALÍTICOS PARA EL ESTUDIO DE LA FATIGA.	29
1.4.1. GRÁFICA DE WÖHLER O GRÁFICA S-N.	29
1.4.2 MODELO VIDA- DEFORMACIÓN (GRÁFICA DE COFFIN-MANSON O GRÁFICA σ -N).	31
1.4.3. GRÁFICA DE PARIS O GRÁFICA DE CRECIMIENTO DE FRACTURA da/dN. ...	34
1.5. FATIGA CONVENCIONAL.	35
1.5.1 FLEXIÓN ROTATIVA.	38
1.6. FATIGA ULTRASÓNICA.	39
1.7. FENÓMENO DE LA RESONANCIA MECÁNICA.	39
1.8. PROBLEMA DE LÍMITE DE FATIGA.	40
1.9 ANÁLISIS MODAL.	41
1.9.1 FORMULACIÓN MATRICIAL PARA OBTENER LA FRECUENCIA NATURAL DE OSCILACIÓN.....	41
1.10 ESFUERZO DE VON MISES.....	43
1.10.1. CÁLCULO DEL ESFUERZO VON MISES CON SIMULACIÓN NUMÉRICA EN ANSYS.....	43
CAPÍTULO II.- MATERIAL DE ENSAYO “ACERO MARAGING”.	46
2.1. ACERO MARAGING 300.	46
2.2. PROPIEDADES DEL ACERO MARAGING.	46

2.3. APLICACIONES DEL ACERO MARAGING.....	47
2.3.1. PROPIEDADES DEL ACERO MARAGING.....	47
2.3.2. USOS COMUNES DEL ACERO DE MARAGING.....	48
2.4. ADQUISICIÓN DE ACERO MARAGING 300 PARA ENSAYOS.	51
CAPÍTULO III.- DISEÑO DEL ESPÉCIMEN DE PRUEBA.	56
CAPÍTULO IV.- MANUFACTURA DE LAS PROBETAS DE ACERO MARAGING 300.....	64
4.1 TORNEADO.....	64
4.2. REFRENTADO.	65
4.3. TALADRADO (BARRENADO).....	69
4.4. MACHUELIADO (ROSCA INTERNA).....	70
4.5. PERFILADO (TIPO RELOJ DE ARENA).	72
CAPÍTULO V.- ENSAYOS DE FATIGA ULTRASÓNICA EN EL ACERO MARAGING 300..	78
5.1. ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X DE ENERGÍA DISPERSIVA (EDS, TAMBIÉN ABREVIADA EDX O XEDS).	84
5.2. MEDIDA DE LA SUPERFICIE DE RUGOSIDAD Ra, EN LAS PROBETAS DE ACERO MARAGING 300.....	89
CAPÍTULO VI. ENSAYO DE TRACCIÓN DEL ACERO AERONÁUTICO MARAGING 300.	93
6.1. DISEÑO Y MANUFACTURA DE LA PROBETA PARA ENSAYO DE TRACCIÓN DEL ACERO AERONÁUTICO MARAGING 300.	95
6.2 CÓDIGO G PARA PROBETA DE ENSAYOS DE TRACCIÓN DEL ACERO MARAGING 300.....	96
6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TENSIÓN EN EL ACERO MARAGING 300.....	101
CAPÍTULO VII. ENSAYOS DE FATIGA ULTRASÓNICA EN EL ACERO MARAGING 300 CON TRATAMIENTO TÉRMICO.....	105
CAPÍTULO VIII.- ENSAYOS DE FATIGA ULTRASÓNICA EN EL ACERO MARAGING 300, CON INDUCCIÓN TÉRMICA DE 200 °C.....	111
CAPÍTULO IX.- ENSAYOS DE FATIGA ULTRASÓNICA EN EL ACERO MARAGING 300, CON PRE-CORROSIÓN.....	118
9.1. ATAQUE CORROSIVO EN PROBETAS DE ACERO MARAGING 300.....	120
9.2.- ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE LAS PROBETAS DE ACERO MARAGING 300, CORROÍDAS AL 3.5% CON NaCl.....	123
9.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE FATIGA ULTRASÓNICA EN PROBETAS DE ACERO MARAGING 300 PRE CORROÍDAS.	128

CAPÍTULO X.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.	130
10.1. EVALUACION DEL NUMERO DE CICLOS EN LA ZONA ESTABLE DE CRECIMIENTO DE FISURA, PARA LAS PROBETAS SOMETIDAS A TEMPERATURA CONSTANTE DE 200° C EN EL CUELLO.....	132
CONCLUSIONES.	134
BIBLIOGRAFÍA.....	136
ANEXO I.- TRABAJOS BIBLIOGRÁFICOS DE DIFUSIÓN.	139
ARTÍCULOS CIENTÍFICOS.	139
PRESENTACIÓN EN CONGRESOS INTERNACIONALES.....	144

ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA.	DESCRIPCIÓN.	PÁGINA.
Figura 1.1.	Falla en el tren de aterrizaje de un avión.	20
Figura 1.2.	a) Cargas estáticas, b) cargas transitorias o dinámicas.	23
Figura 1.3.	Forma de carga cíclica o periódica.	23
Figura 1.4.	Tensión media nula.	25
Figura 1.5.	Carga alternante.	25
Figura 1.6.	Carga pulsante de tracción intermitente.	26
Figura 1.7.	Carga pulsante compresiva.	26
Figura 1.8.	Falla por fatiga en un avión comercial (1988) [2].	28
Figura 1.9.	Gráfica de Wöhler [4].	30
Figura 1.10.	Zonas del diagrama S-N de metales ferrosos [5].	31
Figura 1.11.	Modelo vida – deformación [6].	32
Figura 1.12.	Gráfica deformación – número de ciclos: Coffin – Manson [7].	33
Figura 1.13.	La gráfica de crecimiento de grietas o de Paris [8].	35

Figura 1.14.	Esquema representativo de una máquina de ensayo de fatiga convencional.	36
Figura 1.15.	Máquina de ensayo de fatiga convencional, FIM UMSNH.	36
Figura 1.16.	Máquina de ensayo de fatiga tipo probeta de Moore [9].	37
Figura 1.17.	Máquina de ensayos de fatiga tipo viga [13].	37
Figura 1.18.	Máquina de Brandolisio [14].	38
Figura 1.19.	Bloques de simulación para obtener los esfuerzos en la probeta de ensayos.	44
Figura 1.20.	Bloques de simulación para obtener los esfuerzos en la probeta de ensayos.	45
Figura 1.21.	Bloques de simulación para obtener los esfuerzos en la probeta de ensayos.	45
Figura 2.1.	Aplicación del acero maraging en el tren de aterrizaje en la aeronáutica.	48
Figura 2.2.	Aplicación del acero maraging en alas y fuselaje de los aviones.	49
Figura 2.3.	Aplicación del acero maraging en los deportes, palo de golf.	49
Figura 2.4.	Aplicación del acero maraging en los deportes de esgrima.	50
Figura 2.5.	Aplicación del acero maraging en la impresión 3D, EOS maraging Steel MS1 [27].	50
Figura 2.6.	Certificado de la compra del acero maraging 300, Fry Steel Company.	51
Figura 2.7.	Composición química del acero maraging 300, Fry Steel Company.	52
Figura 2.8.	Propiedades Mecánicas del material, acero maraging 300.	53

Figura 2.9.	Distribución de esfuerzos y desplazamientos a lo largo de la probeta, bajo condición de resonancia.	55
Figura 3.1.	Máquina de fatiga ultrasónica, patentada por el Dr. Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz No. Patente: 323948.	56
Figura 3.2.	Modelado 3D de la probeta de acero maraging 300, en ANSYS workbench.	57
Figura 3.3.	Método de mayado por elemento finito, 2201 nodos y 432 elementos en la probeta del acero maraging 300.	57
Figura 3.4.	Análisis Modal del acero maraging 300 con frecuencia natural de oscilación de 20088 Hz.	58
Figura 3.5.	Dimensiones de la probeta de acero maraging 300.	59
Figura 3.6.	Probeta maquinada, acero maraging 300.	59
Figura 3.7.	Desplazamiento 13.5 micras en la probeta de acero maraging 300 con un voltaje de alimentación a la maquina ultrasónica 10 volts.	60
Figura 3.8.	Esfuerzo de Von Mises en la parte central de 195 Mpa. Con un desplazamiento de 13.5 micras inducido por un voltaje de 10 volts en la máquina de fatiga ultrasónica.	60
Figura 3.9.	Desplazamiento y tensión a lo largo de la muestra de Maraging 300 bajo resonancia, obtenido por simulación numérica en el software de diseño ANSYS.	61
Figura 3.10.	Relación de la concentración del esfuerzo en el centro de la muestra en relación a su desplazamiento a) vista en la muestra física, b) la simulación numérica en ANSYS y c) por imagen termográfica del mismo espécimen.	62
Figura 3.11.	Probeta 0 ensayada con fractura por fatiga ultrasónica en la parte central de la muestra, acero maraging 300.	63

Figura 4.1.	Torno CNC para maquinado de probetas, utilizadas en ensayos de fatiga ultrasónica ubicado en la FIM, UMSNH.	65
Figura 4.2.	Refrentado de probetas de acero maraging 300 para ensayos de fatiga ultrasónica.	66
Figura 4.3.	Interfaz del programa G de control Mach3 del torno CNC (FIM, UMSNH).	66
Figura 4.4.	Acercamiento del proceso de refrentado de los cilindros de acero maraging 300.	67
Figura 4.5.	Maquinado con la broca de centros, en las probetas de acero maraging 300.	70
Figura 4.6.	Barrenado de cilindros de maraging 300 con broca de 4.5 mm.	70
Figura 4.7.	Machueleado en barras de acero maraging 300 para hacer una rosca interna de 5mm.	71
Figura 4.8.	Cilindros roscados de acero maraging 300 (manufactura de probetas para ensayos de fatiga ultrasónica).	72
Figura 4.9.	Tipos de perfilados, imagen de SANDVIK Coromant [30].	73
Figura 4.10.	a) Perfilado del cuello de las probetas de acero maraging 300 en torno CNC de la FIM, UMSNH.	74
Figura 4.10.	b) Perfilado del cuello de las probetas de acero maraging 300 en torno CNC de la FIM, UMSNH.	74
Figura 4.11.	Probetas maquinadas y terminadas de acero maraging 300.	77
Figura 4.12.	Medida de las dimensiones en vernier electrónico de las probetas de acero maraging.	77
Figura 5.1.	Probeta ensayada con fractura por fatiga ultrasónica, acero maraging 300.	79

Figura 5.2.	Simulación numérica desplazamiento y tensión bajo resonancia, maraging 300.	80
Figura 5.3.	Análisis Modal del acero maraging 300 con frecuencia 20088hz.	81
Figura 5.4.	Probeta de acero maraging 300, sujeta a la máquina de ensayos de fatiga ultrasónica.	81
Figura 5.5.	Imágenes termográficas sobre material durante la prueba de fatiga ultrasónica (a) 20 V – 389 MPa., (b) 25 V 486.25MPa. (c) 30 V – 583.5 MPa.	83
Figura 5.6.	Gráfica Esfuerzo – Numero de ciclos del acero maraging 300, como recibido del proveedor.	83
Figura 5.7.	Análisis por microscopia electrónica y EDS del espécimen de prueba ensayado a 20 volts correspondiente a un esfuerzo de 389 Mpa.	85
Figura 5.8.	Composición química obtenida por análisis EDS del espécimen 36 ensayado a 20 volts del acero maraging 300.	85
Figura 5.9.	Inclusión de Titanio en fractura del acero maraging 300, ensayado en fatiga ultrasónica.	87
Figure 5.10.	Composición química de la inclusión de titanio, en probetas de acero maraging 300 analizadas por EDS en un MEB (Microscopio Electrónico de Barrido).	87
Figura 5.11.	Composición química del material de base maraging 300, analizadas por EDS en un MEB (Microscopio Electrónico de Barrido).	88
Figura 5.12.	Medición del parámetro Ra de rugosidad [35].	90
Figura 5.13.	Medición del parámetro de rugosidad Ra, en la probetade acero maraging 300, utilizada en pruebas de fatiga ultrasónica.	92
Figura 6.1.	Diagrama de la zona de fluencia del acero [41].	95
Figura 6.2.	Diseño de probeta de acero aeronáutico maraging 300 para ensayos de tracción.	96

Figura 6.3.	Listado en código GM de CNC, para el maquinado de la probeta de tracción, maraging 300.	94
Figura 6.4.	Interfaz del programa entre la computadora y el torno CNC con el código para la probeta de ensayos de tracción del acero maraging 300.	99
Figura 6.5.	Maquinado preliminar en la probeta de aluminio para ensayos en tracción.	100
Figura 6.6.	Probeta del acero maraging 300, para ensayos de tracción.	100
Figura 6.7.	Máquina hidráulica IBMU4-2000 para ensayos de tracción.	101
Figura 6.8.	Ensayo de tensión poco antes de la fractura de la muestra, IIM, UMSNH.	102
Figura 6.9.	Proceso representativo en un ensayo de tracción, esfuerzo-deformación.	103
Figura 6.10.	Ensayo de tracción en la probeta 1, del acero maraging 300, realizado en la máquina de tracción ubicada en el IIM, de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo UMSNH	104
Figura 6.11.	Ensayo de tracción en la probeta 1, del acero maraging 300, realizado en la máquina de tracción ubicada en el IIM, de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo UMSNH.	104
Figura 7.1.	Horno de inducción para tratamientos térmicos, ubicado en el Instituto de Física de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.	106
Figura 7.2.	Probetas de acero maraging 300 en el horno, para el tratamiento térmico.	106
Figura 7.3.	Probetas de acero maraging 300 sometidas a tratamiento térmico de envejecido, confrontadas con probetas sin tratamiento térmico.	107
Figura 7.4.	a), b). Termografía de las probetas ensayadas a 25 volts (486 MPa.) del acero maraging 300 tratado a 490 °C por 6 horas.	109

Figura 7.5.	a), b). Termografía de las probetas ensayadas a 30 volts (584 MPa.) del acero maraging 300 tratado a 490 °C, por 6 horas.	109
Figura 7.6.	a), b). Termografía de las probetas ensayadas a 35 volts (681 MPa.) del acero maraging 300, tratado a 490 °C por 6 horas.	110
Figura 7.7.	Gráfica, Esfuerzo – Número de ciclos para el acero maraging 300, tratado térmicamente.	110
Figura 8.1.	Imágenes termográficas a), b) de las probetas ensayadas de acero maraging 300, con inducción de temperatura de 200 °C inducida por inducción electromagnética y nivel de carga de 389 MPa.	112
Figura 8.2.	Imágenes termográficas a), b) de las probetas ensayadas de acero maraging 300, con inducción de temperatura de 200 °C inducida por inducción electromagnética y nivel de carga de 584 MPa.	113
Figura 8.3.	Montaje de la probeta de ensayo de acero maraging 300 en la máquina ultrasónica, rodeada por las bobinas de inducción electromagnéticas.	114
Figura 8.4.	Máquina de ensayos de fatiga ultrasónica con el equipo de termo-inducción electromagnética.	115
Figura 8.5.	Probeta de acero maraging 300 fracturada en el cuello durante fatiga ultrasónica, con temperatura inducida de 200 °C en el cuello.	116
Figura 8.6.	Gráfica esfuerzo – número de ciclos del acero maraging 300 con 200 °C en el cuello de la muestra, impuesta por inducción magnética.	116
Figura 9.1.	Probetas de acero maraging 300 y proceso de pre-corrosión.	118
Figura 9.2.	Control del equipo ultrasónico por medio de la interfaz en la computadora, con enlace remoto.	119
Figura 9.3.	Preparación de las muestras de acero maraging 300 para someterlas a pre corrosión.	120

Figura 9.4.	Medida de la masa del NaCl (3.5 gramos) para la preparación del agente corrosivo al 35% con agua destilada.	121
Figura 9.5.	Probetas de acero maraging 300, sumergidas en solución corrosiva, mezcla de 3.5 % NaCl.	121
Figura 9.6.	Probetas de acero maraging 300 después de una estancia de 30 días bajo ataque corrosivo en NaCl al 3.5 %.	122
Tabla 9.7.	Probetas pre corroídas en la sección estrecha, disponibles para los ensayos de fatiga ultrasónica del acero maraging 300.	122
Figura 9.8.	Microscopio Electrónico de Barrido, marca JOEL, modelo JCM-6000 PLUS, en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH.	123
Figura 9.9.	Esquema de los componentes internos de un microscopio electrónico de barrido marca JOEL.	124
Figura 9.10.	a) Probeta 3, maraging 300 con ataque de pre-corrosión, ensayada a 20 volts (389 MPa).	125
Figura 9.10.	b) Probeta 3, maraging 300 con ataque de pre corrosión, ensayada a 20 volts (389 MPa).	125
Figura 9.11.	a) Probeta 6, maraging 300 con ataque de pre corrosión, ensayada a 25 volts (486 MPa).	126
Figura 9.11.	b) Probeta 6, maraging 300 con ataque de pre corrosión, ensayada a 25 volts (486 MPa).	126
Figura 9.12.	a) Probeta 4, maraging 300 con ataque de pre corrosión, ensayada a 30 volts (584 MPa).	127
Figura 9.12.	b) Probeta 4, maraging 300 con ataque de pre corrosión, ensayada a 30 volts (584 MPa).	127
Figura 9.13.	Gráfica: Esfuerzo – Número de ciclos del acero maraging 300 con probetas de ensayo pre corroídas.	129

Figura 10.1.	Resultados de fatiga ultrasónica para cuatro modalidades de ensayos en el acero maraging 300.	130
Figura 10.2.	Compendio de ensayos de fatiga ultrasónica de maraging 300, bajo las modalidades: a) recibido del proveedor, b) envejecimiento, c) 200o C, impuestos, d) pre corrosión.	132

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla.	Descripción.	Página.
Tabla 2.1.	Propiedades físicas y mecánicas del acero maraging [25].	46
Tabla 2.2.	Composición química del acero maraging 300 [26].	47
Tabla 2.3.	Composición química por peso de Maraging 300 [28].	54
Tabla 2.4.	Principales propiedades mecánicas de Maraging 300 [29].	54
Tabla 5.1.	Ensayos de fatiga ultrasónica del acero maraging 300 a condiciones ambiente.	78
Tabla 5.2.	Principales propiedades mecánicas de Maraging 300.	80
Tabla 5.3.	Composición química obtenida por análisis EDS del espécimen de prueba 36 ensayado a 20 volts del acero maraging 300.	86
Tabla 5.4.	Composición química de la inclusión en la probeta fracturada por fatiga ultrasónica del acero maraging 300.	88
Tabla 5.5.	La composición química del acero maraging 300 en la probeta fracturada por fatiga ultrasónica, analizada por espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS).	89
Tabla 5.6.	Medidas del parámetro de rugosidad Ra para algunas aplicaciones típicas [36].	90
Tabla 5.7.	Medidas de del parámetro de rugosidad Ra, según la norma DIN 4769 [37].	91
Tabla 5.8.	Indicaciones de diseño y rugosidad superficial [38].	91
Tabla 6.1.	Resultado de los ensayos de tracción de 2 probetas del material Maraging 300.	103
Tabla 7.1.	Ensayos de acero maraging 300 tratado a 490 grados centígrados por 6 horas.	108

Tabla 8.1.	Ensayos de acero maraging 300 con temperatura inducida de 200 grados centígrados.	111
Tabla 9.1.	Ensayos de acero maraging 300 con pre corrosión en las probetas.	128

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Actualmente la investigación en México relacionada con resistencia en fatiga ultrasónica del acero maraging 300 es nula; lo que representa una oportunidad de investigación para las aplicaciones industriales de este acero especial de alta resistencia. El uso de fatiga convencional, implicando frecuencias de 1 hasta 1000 Hz, puede implicar periodos de días, meses o hasta años en presentar la falla. El uso de fatiga ultrasónica acelera el proceso de ensayo y permite obtener los resultados de fatiga ultrasónica a alto número de ciclos en tiempos relativamente reducidos; representando algunos días o aún algunas horas de ensayo, aportando un ahorro en tiempo para obtener los resultados. Por ejemplo, una vida en fatiga de 10^9 ciclos (1000 millones de ciclos), se obtiene con una máquina ultrasónica trabajando a 20KHz en medio millón de segundos sea 139 horas o 5.8 días; mientras que una máquina convencional a 100Hz implicaría 100 millones de segundos, sea 27,777 horas, ó 1,157 días. La problemática que se abordó estuvo centrada en investigar la resistencia a la fatiga de aceros de alta resistencia, como lo es el acero maraging 300. Estos aceros tienen aplicaciones en la industria aeronáutica en la parte del tren de aterrizaje de los aviones, así como en resortes de retroceso rápido, Otras aplicaciones comprenden: cascarones de submarinos de alta profundidad; matrices de forja de colada bajo presión; centrifugadores de gas; aplicaciones deportivas como bastones de golf, sables de esgrima, etc. Este tipo de aplicaciones pueden presentar cargas repetitivas y esfuerzos altos con cambios de temperatura y ataque corrosivo; lo que representa una amplia gama de condiciones de trabajo de estos aceros bajo las aplicaciones industriales. Para estos efectos, se llevaron a cabo ensayos de fatiga ultrasónica considerando diferentes condiciones de la probeta de ensayo: probetas ensayadas como recibidas del proveedor, probetas ensayadas después del tratamiento térmico de envejecimiento, probetas ensayadas con imposición de temperatura de 200 grados centígrados y probetas sometidas a ensayo después de un proceso de pre corrosión.

JUSTIFICACIÓN

El mecanismo de fatiga es fenómeno considerablemente complejo en el estudio de falla en piezas sometidas a la acción de cargas dinámicas. Este fenómeno puede aparecer súbitamente y sin aviso previo. La fatiga mecánica está asociado principalmente a la presencia de patrones de carga dinámicos de tipo cíclico. La rotura súbita fue detectada desde antes de la era industrial asociado a la rotura o falla catastrófica de puentes. Mas marcadamente, con el advenimiento del ferrocarril se inició en distintos países el estudio científico del inicio y propagación de grietas.

Un Ejemplo puede verse en la Figura 1.1. donde el tren de aterrizaje fue dañado por la acción de cargas cíclicas de impacto, debidas a repetidas acciones de aterrizaje en este avión comercial.



Figura 2.1. Falla en el tren de aterrizaje de un avión.

OBJETIVOS

OBJETIVO PRINCIPAL.

El objetivo primordial de esta investigación se centró en llevar a cabo ensayos de fatiga ultrasónica en el acero maraging 300, con el fin de determinar la resistencia a la fatiga bajo carga a alta frecuencia (20 KHz).

OBJETIVOS SECUNDARIOS.

- Determinar las dimensiones de la muestra de prueba por simulación numérica modal, con el fin de cumplir con la condición de resonancia.
- Obtener la vida en fatiga ultrasónica de este acero, con valores de tensión de Von Mises en la sección del cuello: altos, medios y bajos.
- Analizar la iniciación y propagación de grietas mediante microscopia electrónica de barrido y microscopia óptica; con objeto de establecer las posibles causas de falla.
- Investigar el comportamiento en fatiga ultrasónica del acero maraging 300, bajo diferentes condiciones: temperatura ambiente, como se recibió del proveedor, después del tratamiento térmico de envejecido, con la imposición de temperatura de 200 grados Celsius durante el ensayo, y después un proceso de pre corrosión.

HIPÓTESIS

Es posible obtener resultados de fatiga ultrasónica en acero de alta resistencia maraging 300, con aplicaciones importantes en la industria aeronáutica. También es posible mediante análisis de microscopia electrónica de barrido y microscopia óptica, llevar a cabo estudios sobre las causas de falla del material y de algunos factores de ensayo involucrados, como la temperatura y la pre corrosión en el material.

CAPÍTULO I.- CONCEPTOS BÁSICOS Y GENERALIDADES.

1.1 FATIGA MECÁNICA DE LOS MATERIALES.

En ingeniería, y en especial en Ciencia de los Materiales, la fatiga se refiere al fenómeno por el cual la rotura de elementos o estructuras bajo cargas dinámicas cíclicas (fuerzas repetidas aplicadas) se produce con cargas aplicadas por debajo del límite elástico. El efecto de fractura en materiales, sin haber tenido una definición formal, fue reconocido desde la antigüedad. Este comportamiento no fue de interés analítico y sistemático, hasta el advenimiento de la Revolución Industrial: a mediados del siglo XIX (Gustav Wöhler) se comenzaron a producir los dispositivos y ensayos para provocar la rotura con cargas dinámicas inferiores a las necesarias en el caso estático; al mismo tiempo se comenzó a desarrollar métodos de cálculo para el diseño de piezas confiables.

Un ejemplo convencional de rotura por fatiga es el efectuado sobre 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 solo proceso estático de 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 catástrofes 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 [1].

1.2. TIPOS DE CARGAS DINÁMICAS Y SUS CARACTERÍSTICAS.

En las piezas de máquinas se pueden distinguir diferentes tipos de sollicitaciones las cuales se pueden enumerar en dos tipos principales de carga: estáticas y dinámicas, según que no varíen o que varíen con el tiempo. También se las suele llamar con otros sinónimos: 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 1.2 a) y b). se pueden apreciar las dos clases de cargas.

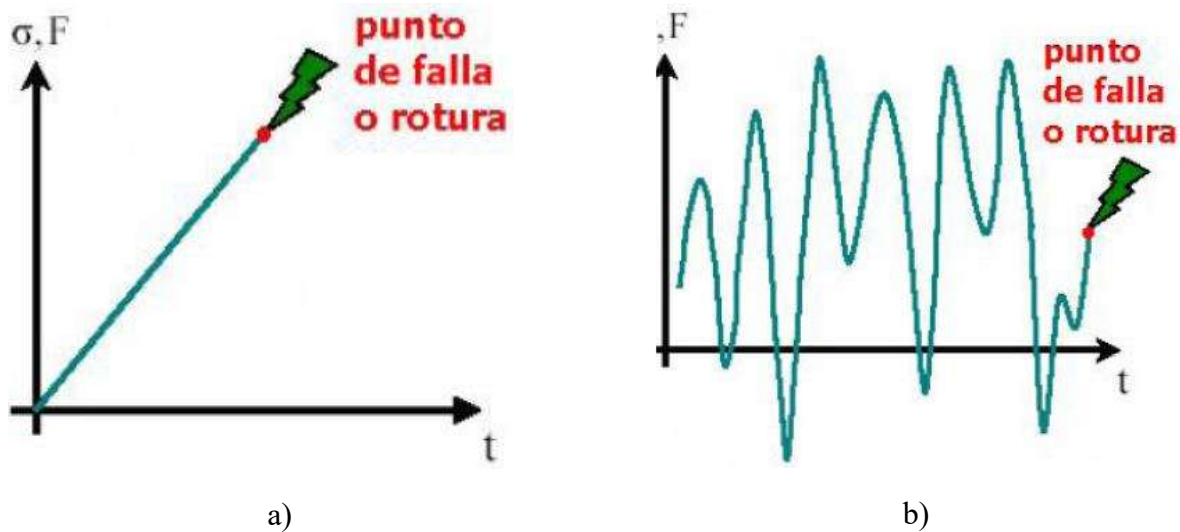


Figura 1.2. a) Cargas estáticas, **b)** cargas transitorias o dinámicas.

En el caso de la Figura 1.2 a), se dice que el tipo de análisis implica “Diseño y Cálculo por Resistencia”, y en el caso de la Figura 1.2 b), se dice que el tipo de análisis implica “Diseño y Cálculo para la duración”.

De la Figura 1.2 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 1.3 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 modalidades; tales como axiales (de tracción o compresión), de flexión o torsionales.

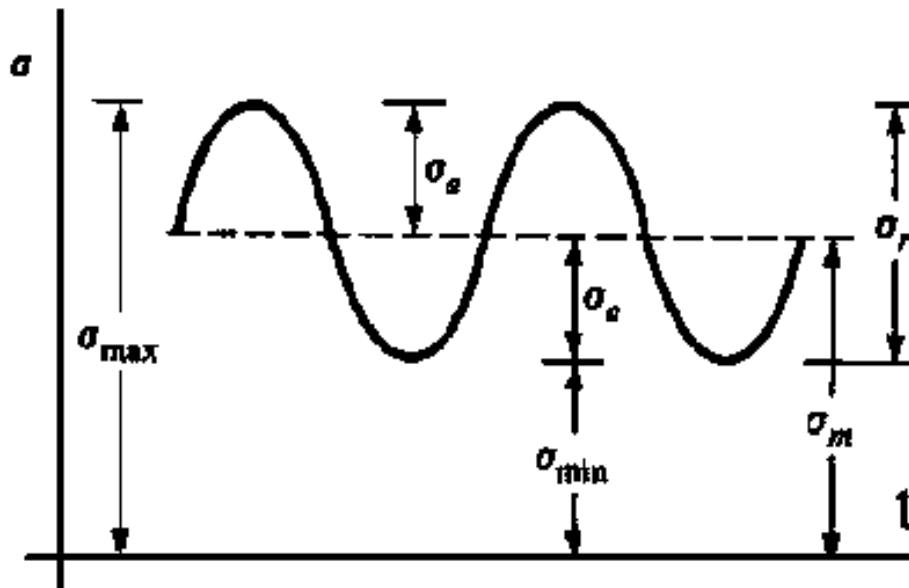


Figura 1.3. Forma de carga cíclica o periódica.

Es claro que la forma más elemental de representación de este tipo de sollicitación y/o tensión puede seguir una ley sinusoidal (1.1), a diferencia de otras que puedan ser fácilmente representables en términos matemáticos. En la ecuación (1.1), A , C y B son constantes que dependen de la condición y característica de la carga.

$$\sigma(t) = A * \sin(C * t) + B \quad (1.1)$$

Para la ecuación 1.1 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 los dos anteriores parámetros, se pueden definir las siguientes cargas o entidades

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

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (1.2)$$

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

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (1.3)$$

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

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1.4)$$

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

$$R_s = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (1.5)$$

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

$$A_a = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\sigma_{max} + \sigma_{min}} = \frac{1 - R_s}{1 + R_s} \quad (1.6)$$

De acuerdo a los valores relativos que tengan las expresiones (1.2) a (1.6) se pueden presentar cuatro modalidades de carga características:

- 1) *Completamente alternante o Invertida.* Se verifica cuando se cumple que $\sigma_m = 0$, $R_S = -1$ y $Aa = \infty$, como se ilustra en la Figura 1.4.

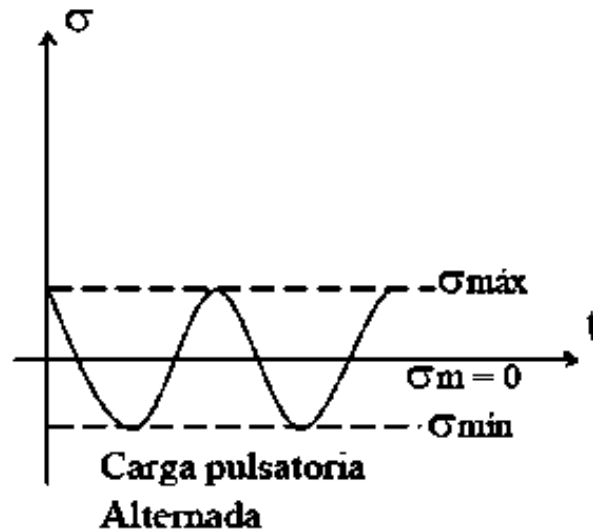


Figura 1.4. Tensión media nula.

- 2) *Caso de tensión media no nula:* Todas las expresiones (1.2) a (1.6) tienen un valor no nulo. Esto se puede apreciar en la Figura 1.5.

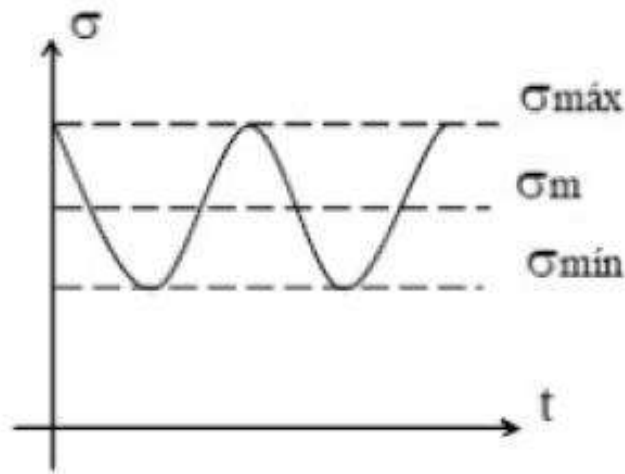


Figura 1.5. Carga alternante.

- 3) *Pulsante de tracción*: Se verifica cuando se cumple que $\sigma_{\min}=0$, $\sigma_m = \sigma_{\max}/2$, $R_S = 0$ y $A_a = 1$. Tal como se puede ver en la Figura 1.6.

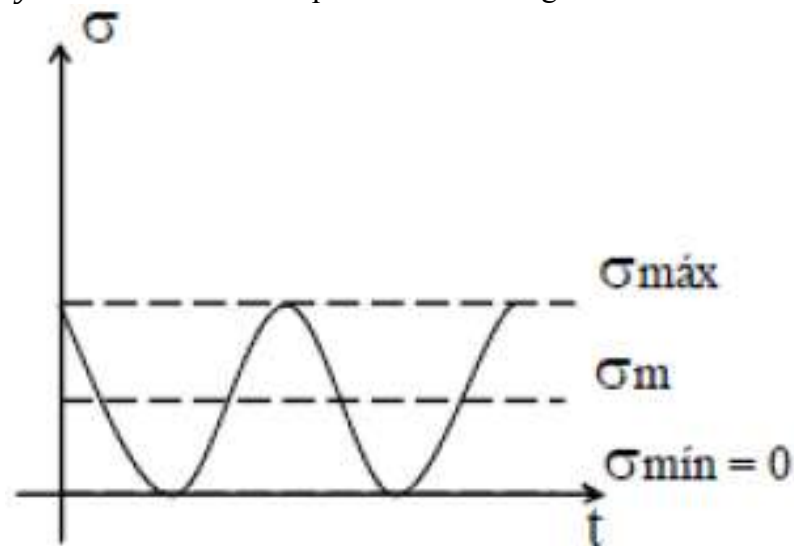


Figura 1.6. Carga pulsante de tracción intermitente.

- 4) *Pulsante compresiva*: Se verifica cuando se cumple que $\sigma_{\max}=0$, $\sigma_m = \sigma_{\min}/2$, $R_S = \infty$ y $A_a = -1$. Tal como se puede ver en la Figura 1.7.

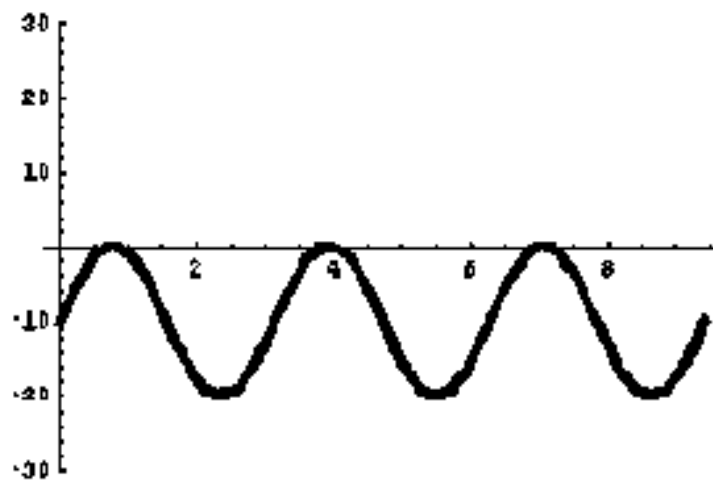


Figura 1.7. Carga pulsante compresiva.

1.3. 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. La fisuración puede aparecer súbitamente y

sin aviso previo y puede estar asociado a la presencia de patrones de carga dinámicos de tipo cíclico.

La falla por fatiga de los materiales soportando 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, como esfuerzos residuales.
- 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 (concentradores de esfuerzos).

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

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 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 la aparición de la rotura por fatiga, puede aparecer sin que se impliquen solicitaciones con niveles elevados de tensiones; dichas roturas pueden aparecer cuando la carga aplicada se encuentra por debajo del límite elástico o de fluencia del material:

$$S'_n < S_y < S_u \quad (1.7)$$

Donde,

S_u = límite de rotura en tensión monotónica (“ultimate tensile stress”)

S_y = límite de fluencia

S'_n = límite de fatiga.

El mecanismo de fatiga mecánica presenta importante complejidad relacionada con la falla en piezas sometidas a la acción de cargas dinámicas oscilatorias. Este fenómeno está asociado principalmente a la presencia de patrones de carga dinámicos de tipo cíclico. La rotura súbita en materiales fue conocido desde antes de la era industrial, asociado a la rotura o falla de elementos manuales como flechas e instrumentos en piedra. Con el advenimiento del ferrocarril se inició en distintos países del mundo el estudio científico de dicho fenómeno.

Un Ejemplo de falla catastrófica puede apreciarse en la Figura 1.8. 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 (1988). La causa fue la fatiga del material asociada con micro-corrosión [2].



Figura 1.8. Falla por fatiga en un avión comercial (1988) [2].

Desde mediados del siglo XIX se sabe que en piezas sometidas a cargas variables con un número grande de ciclos, 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 (aún 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 sollicitaciones estáticas, debido a que estas sollicitaciones permiten un reacomodamiento 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 reacomodamiento elástico, siendo este el motivo de la separación de los cristales en aquellos lugares donde hay menor cohesión intercrystalina, generando el inicio de una micro fisura. Entonces, el efecto de concentración de tensiones producida por la micro entalla crea en esa zona una

concentración de tensiones que va aumentando rápidamente la fisura hasta que la sección de concentración de esfuerzos no puede soportar la carga, produciéndose en ese instante la rotura súbita de la pieza. Este comportamiento es particularmente típico en aleaciones metálicas; en materiales polímeros puede presentarse una rotura súbita o una deformación plástica considerable antes de la rotura.

- c) Las micro fisuras o grietas iniciales de fatiga comienzan sobre la superficie de las piezas, particularmente para el caso de altas cargas, propagándose enseguida en varios puntos simultáneamente y en los sustratos inferiores. Estas grietas que son normalmente muy pequeñas y difíciles de observar, crecen y continúan su propagación.

1.4. 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 consultarse en la referencia [3]. En este trabajo, se mencionan los siguientes:

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

1.4.1. GRÁFICA DE WÖHLER O GRÁFICA 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 Wöhler representa un gráfico, Figura 1.9., relacionando la amplitud de tensión (S_a) con el número de ciclos necesarios para la fractura. Esta curva indica también 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.

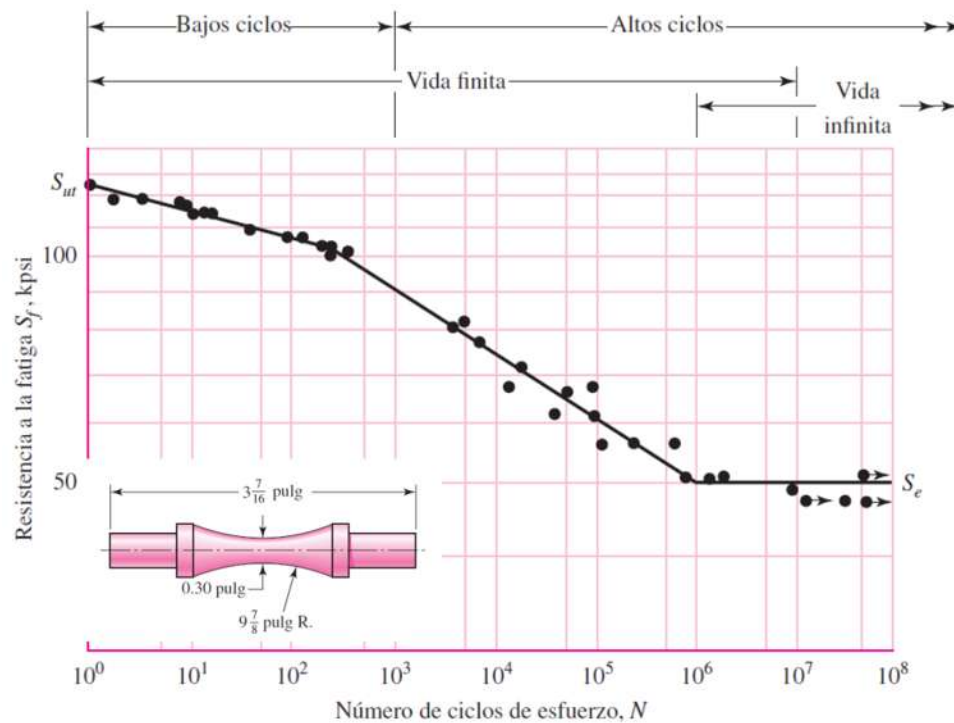


Figura 1.9. Gráfica de Wöhler [4].

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 1.8 de Basquin.

$$S_a = S'_f (2N_f)^b \quad (1.8)$$

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 la Figura 1.10 se observa cómo se representa el campo de tensiones contra el número de ciclos alternativos hasta la falla; se puede apreciar 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 hasta antes del millón de ciclos muestra el comportamiento en fatiga para ciertos metales; se indica claramente que a partir del millón de ciclos (10^6 ciclos), 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.

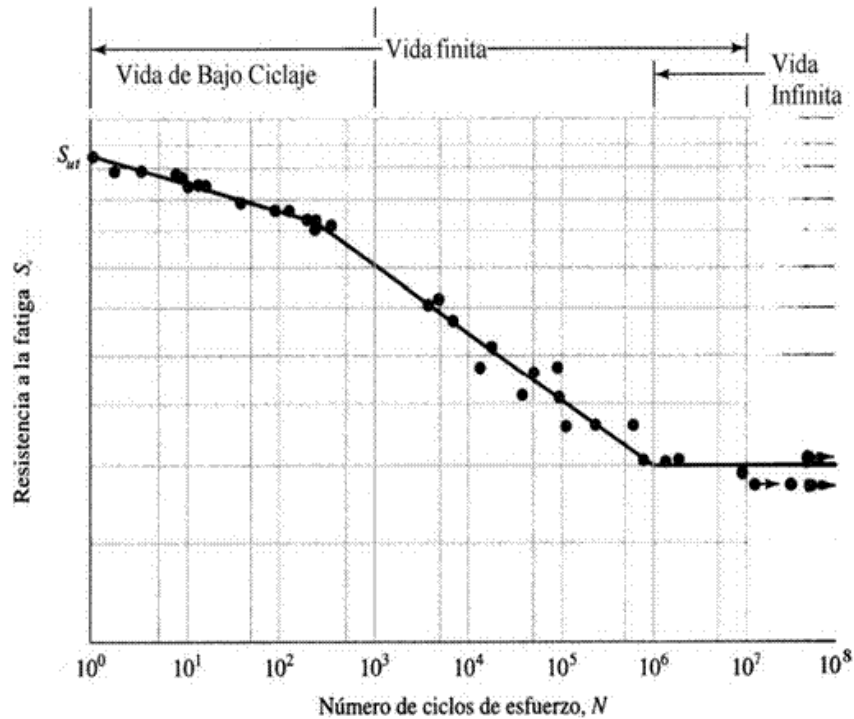


Figura 1.10. Zonas del diagrama S-N de metales ferrosos [5].

1.4.2 MODELO VIDA- DEFORMACIÓN (GRÁFICA DE COFFIN-MANSON O GRÁFICA σ -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 por la ecuación 1.8, y la ecuación de amplitud de deformaciones dada por ecuación 1.9.

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \varepsilon_f' (2N_i)^c \quad (1.9)$$

En donde:

$\Delta \varepsilon$: 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 – Morrow se presenta, entonces, como en la ecuación 1.10.

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{S'_e}{E} (2N_i)^b + \varepsilon'_f (2N_i)^c \quad (1.10)$$

La ecuación 1.10 basada en la amplitud de la deformación, para medir fallas por fatiga, junto con la corrección de esfuerzos medios de Morrow, es utilizada para la predicción del número de ciclos en los cuales inicia la grieta (N_i) de un elemento estructural sometida a fatiga, donde $\Delta \varepsilon$ es el rango de deformación local, E el módulo de elasticidad del material, los parámetros b y c son los exponentes de resistencia y ductilidad respectivamente y por último tenemos que S'_e y ε'_f son los coeficientes de resistencia a la fatiga y a la ductilidad (P. Darcis, 2006).

El mismo es válido para cualquier estado de cargas, la gráfica de este modelo se observa en la Figura 1.11.

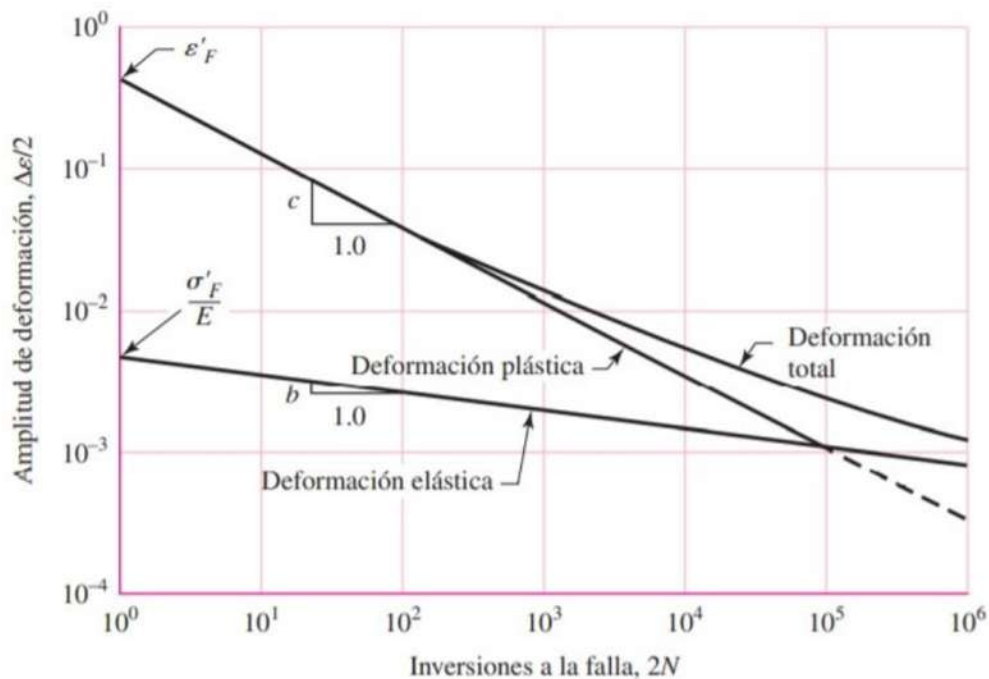


Figura 1.11. Modelo vida – deformación [6].

Relación de esfuerzo – deformación.

$$\Delta \sigma = K' (\Delta \varepsilon)^{n'} \quad (1.11)$$

$$n' \approx 0.1 - 0.2$$

Vida en fatiga: relación de Coffin-Manson.

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2Nf)^c \quad (1.12)$$

$$c \approx -0.5 - 0.7$$

$$c = -1/(1+5n') \quad (1.13)$$

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

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

$$\sigma_a = E \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \sigma'_f (2N)^b \quad (1.14)$$

Intersección del esfuerzo en la línea elástica extrapolada

$$\frac{\sigma_a}{E} \quad (1.15)$$

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

$$b = \frac{-n'}{(1 + 5n')} \quad (1.16)$$

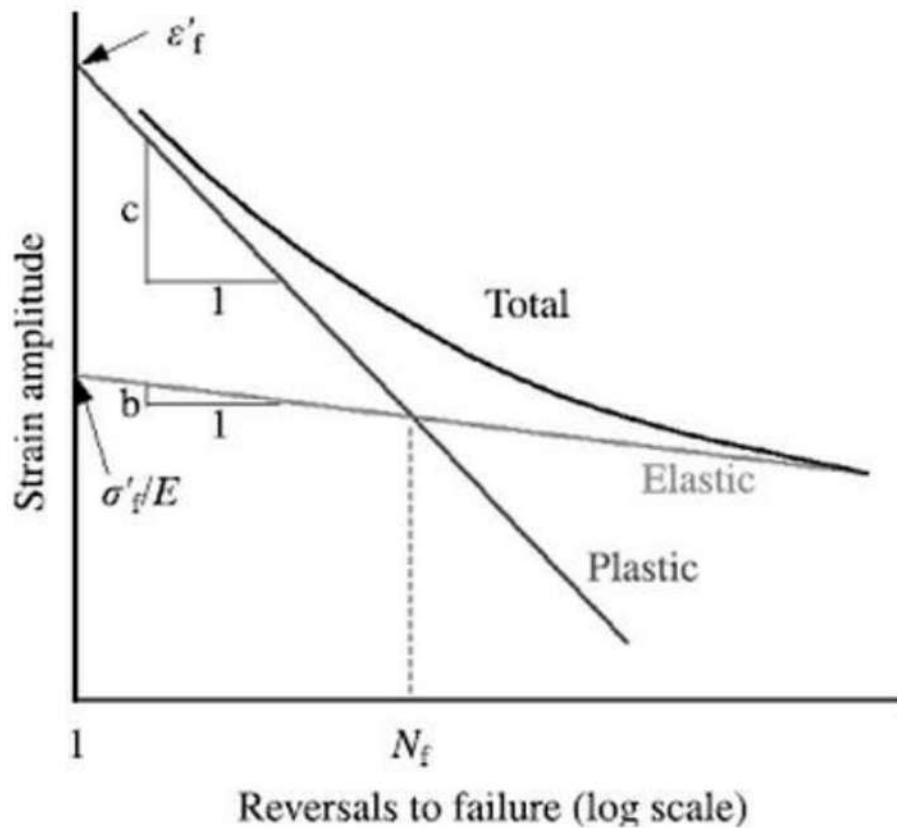


Figura 1.12. Gráfica deformación – número de ciclos: Coffin – Manson [7].

1.4.3. GRÁFICA DE PARIS O GRÁFICA DE CRECIMIENTO DE FRACTURA da/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 (ecuación 1.17). La velocidad de propagación de la grieta es una función del nivel de tensiones y de la amplitud de la misma.

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad (1.17)$$

Dónde:

- A y m son constantes para un determinado material
- ΔK la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos en las ecuaciones (1.17) y (1.18).
- $\frac{da}{dN}$ pendiente de la curva de velocidad de crecimiento.

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

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (1.18)$$

O bien

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{(\pi a)} \quad (1.19)$$

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

$$N_f = \frac{da}{A \pi^{\frac{m}{2}} (\Delta \sigma)^m} \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{Y^m a^{\frac{m}{2}}} da \quad (1.20)$$

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 (1.21).
- a_0 Longitud de grieta inicial.

a_c se puede calcular por ecuación:

$$a_c = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma Y \sqrt{\pi}} \right)^2 \quad (1.21)$$

Donde:

- K_{Ic} es la tenacidad de fractura de deformaciones planas (resistencia a la fractura).

Estas fórmulas fueron generadas por Paul C. Paris en 1961 realizando una gráfica logarítmica log-log de la velocidad de crecimiento de grieta, Figura 1.13, contra el factor de intensidad de esfuerzos mostrando una relación lineal en la gráfica en la zona II o zona estable. 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.

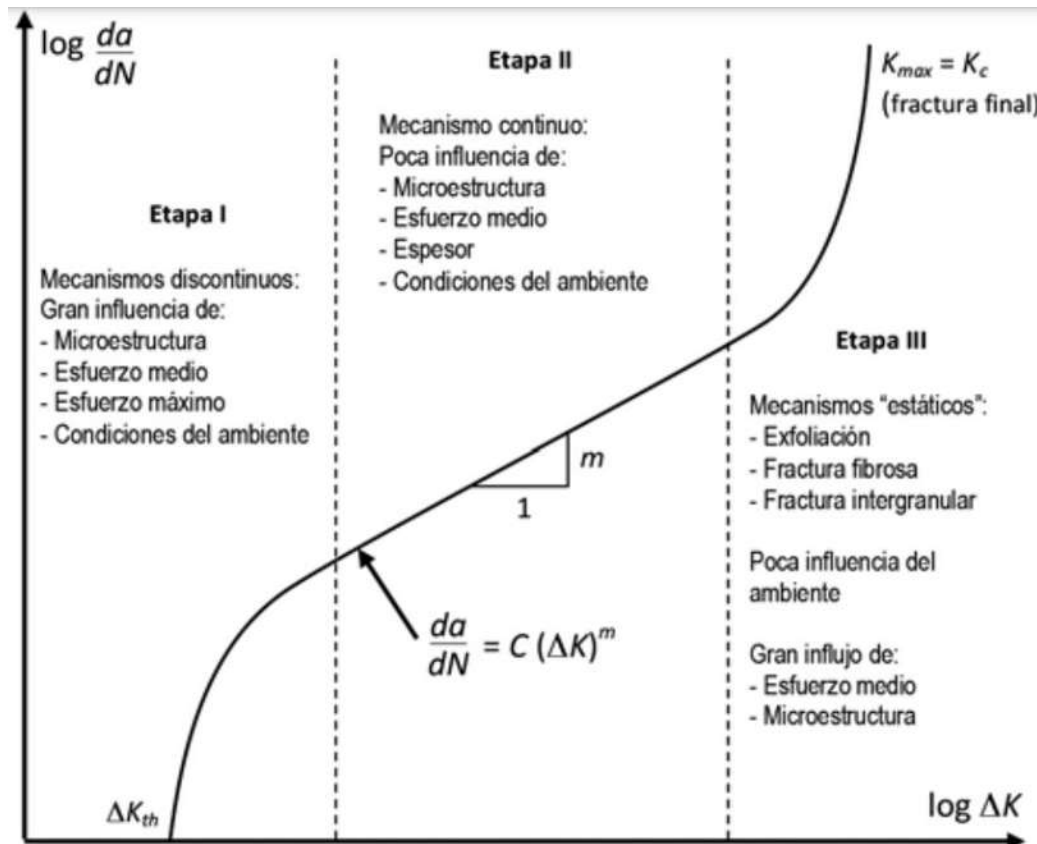


Figura 1.13. La gráfica de crecimiento de grietas o de Paris [8].

1.5. FATIGA CONVENCIONAL.

Existen varios tipos de ensayos para determinar la vida a fatiga de un espécimen. Uno de los más comúnmente empleados 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 la referencia [10]. También existen variantes de dichas máquinas como se mencionan en [11], [12]; estas últimas emplean control por software. Las figuras 1.14, 1.15, 1.16, 1.17 y 1.18. presentan los modelos de máquinas de ensayo de fatiga por flexión rotativa. Otros modelos de máquinas de fatiga como los elaborados por la por la empresa Instron, contemplan la función de fatiga por tensión axial a las máquinas universales de tracción. En la figura 1.15. se muestra la máquina de fatiga convencional en flexión rotativa desarrollada y armada en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, patentada por el Dr. Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz. Esta máquina incluye un motor que genera los giros en la flecha donde va montada la probeta en un chuck (mandril), un cojinete donde

se apoya la probeta y se aplica la fuerza que genera la flexión y al girar ocasiona un par de fuerzas de tensión – compresión en la probeta, como lo muestra el esquema de la figura 1.14. La máquina de la Facultad de Ingeniería Mecánica, esta cuenta con un control por un logo PLC que controla el motor y la rampa de velocidad; la maquina también cuenta con un contador de ciclos electrónico y un cronometro digitales, así como un control de paro automático: paro automático cuando la probeta fractura. El paro automático concierne tanto el motor como el control de ciclos; de esta manera, los ensayos se inician y se pueden dejar sin vigilancia debido aa paro automático cuando se presenta la fractura.

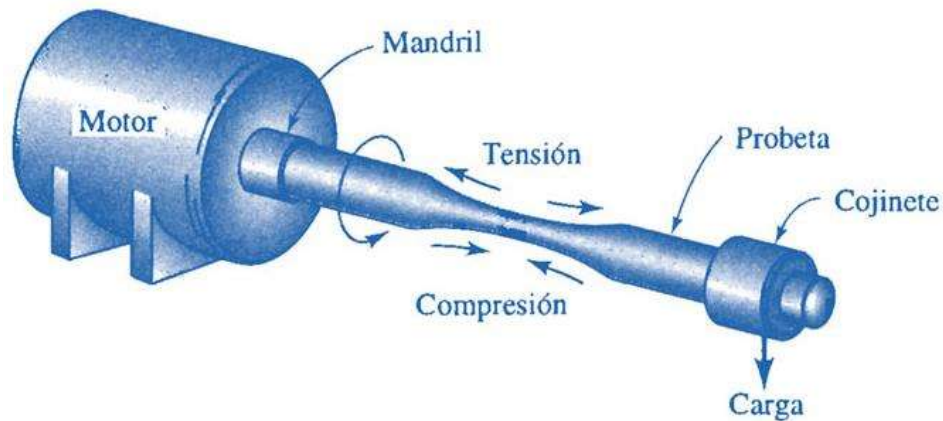


Figura 1.14. Esquema representativo de una máquina de ensayo de fatiga convencional.



Figura 1.15. Máquina de ensayo de fatiga convencional, FIM UMSNH.



Figura 1.16. Máquina de ensayo de fatiga tipo probeta de Moore [9].

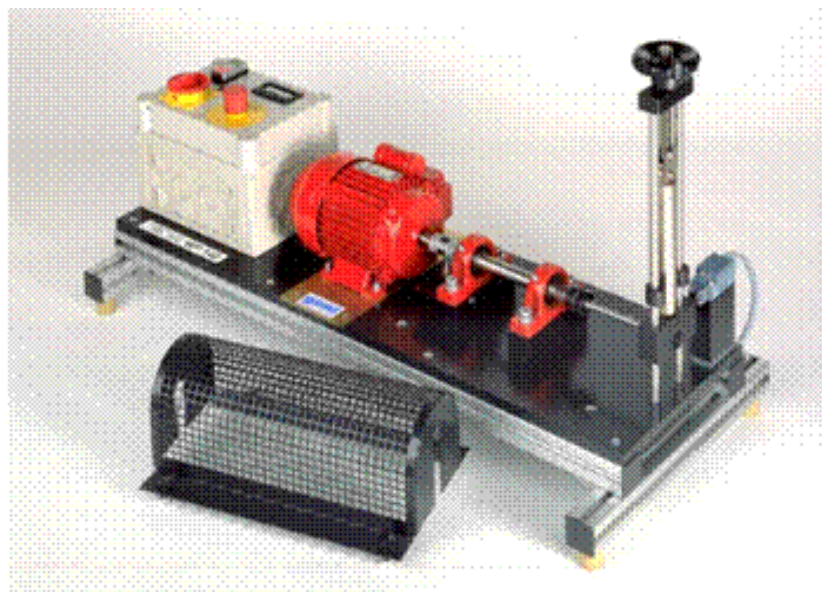


Figura 1.17. Máquina de ensayos de fatiga tipo viga [13].

En las Figura 2.17. 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.

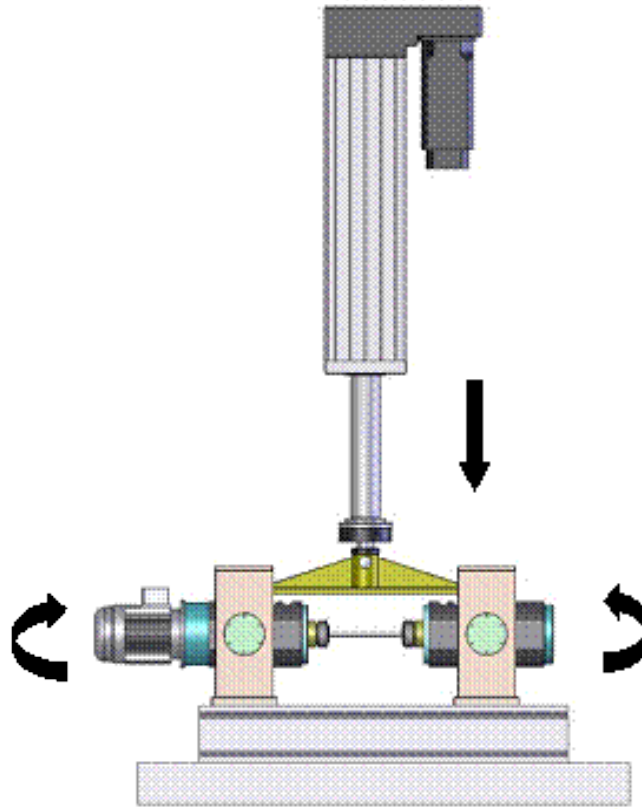


Figura 1.18. Máquina de Brandolisio [14].

1.5.1 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 [15], 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 propagan lentamente, reduciendo el área hasta un punto en que la probeta no pueda resistir la carga aplicada y se rompe.

1.6. 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 los que trabaja una máquina de fatiga ultrasónica es de 15 KHz a 30 KHz, con un valor típico de 20 KHz. 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 a 100 Hz de frecuencia de ensayo, implicaría 116 días aproximadamente para completar la prueba.

El fallo por fatiga ultrasónica ha sido estudiado por autores como Bathias, 2006 [16]; Kong, 1987 [17]; Ni, 1991 [18]; Thanigayarasu, 1988 [19]. En México recientemente también se llevan a cabo estudios sobre fatiga ultrasónica en materiales diversos, de los cuales un caso reciente concierne el llevado a cabo por el Dr. Gonzalo M. Domínguez Almaraz [20].

En 1850, Wöhler, introdujo el límite de fatiga para 10^6 ciclos, porque en ese momento las 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, representando muchos más de 10^6 ciclos propuestos por Wöhler. La curva de la fatiga S-N de los aceros se consideró siempre ser asintótica en el eje horizontal, cuando la vida en fatiga era más de 10^6 ciclos; aunque no se realizaron pruebas más allá de 10^9 ciclos para comprobar el comportamiento después de esta asintota. 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, es posible 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 debe ser previamente calculada para que su frecuencia natural de oscilación coincida con la frecuencia de excitación generada por la máquina [21].

1.7. 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 oscilará a la misma frecuencia que la frecuencia natural del sistema, se produciría una oscilación resultante con una amplitud creciente.

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 se hace 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.

1.8. PROBLEMA DE LÍMITE DE FATIGA.

Existen numerosas razones para que cada componente de una estructura falle bajo repetidas cargas. Algunas de las causas de falla en los materiales pueden 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 durante un periodo de tiempo. Un material sometido a este tipo de cargas puede fracturar a niveles de carga inferiores a los necesarios para causar la falla en condiciones estáticas y de tensión por debajo del límite elástico.

En varios sectores industriales, como: aeronáutico, aeroespacial, transporte ferroviario, generación de electricidad, marinos y terrestres, diferentes elementos estructurales son sometidas a cargas periódicas de alta frecuencia y baja amplitud; frecuentemente a más de 10^7 ciclos durante su vida útil. 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 alcanza 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, otros 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; no obstante, bajo ciertas condiciones, tales como alta temperatura o corrosión, esta asíntota desaparece. Entonces, es 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 lejos de la frecuencia 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 útil. 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.

1.9 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 [22].

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 lograr que la probeta entre en resonancia y realizar las pruebas de fatiga ultrasónica.

Para realizar el cálculo se usó el programa ANSYS 18.0 en el cual se realizaron varios ensayos de prueba y error hasta encontrar el valor más aproximado a 20000 Hz en el modo de vibración en el eje vertical de la probeta.

1.9.1 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 por elemento finito [23] siguiente:

$$[K]\{\varphi_i\} = \lambda_i[M]\{\varphi_i\} \quad (1.22)$$

Que para un sistema discretizado en i elementos representan:

$[K]$ = matriz de rigidez estructural

$\{\varphi_i\}$ = 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:

$$[K]'\{\varphi_i\}' = \lambda_i[M]'\{\varphi_i\}' \quad (1.23)$$

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:

$$[K]'^{-1}\{\varphi_i\}' = \lambda_i[M]'\{\varphi_i\}' \quad (1.24)$$

Descomponiendo por Cholesky la matriz reducida $[M]'$ en $[L] [L]^T$ donde $[L]$ es una matriz triangular inferior. Combinando con la ecuación (1.24) resulta:

$$[L]^T [L]^{-1}[K]'\{\varphi_i\}' = \lambda_i\{\varphi_i\}' \quad (1.25)$$

Ahora es conveniente definir:

$$\{\varphi_i\}' = [L]^T \{\psi\} \quad (1.26)$$

Combinando la ecuación (1.25) con la ecuación anterior (1.26) tenemos:

$$[L]^{-1} [K]' [L]^T \{\psi\} = \lambda_i\{\psi\} \quad (1.27)$$

O bien

$$[A] \{\psi\} = \lambda_i\{\psi\} \quad (1.28)$$

Dónde:

$$[A] = [L]^{-1} [K]' [L]^T \quad (1.29)$$

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.

$$[B] = [T]^T[A][T] \quad (1.30)$$

Donde:

[B] = forma tridiagonalizada de [A]

[T] = matriz construida para tridiagonalizar [A] resuelta por iteración

Finalmente, este problema se reduce a la siguiente expresión:

$$[B] \{ \psi \} = \lambda_i \{ \psi \} \quad (1.31)$$

A partir de esta ecuación (1.31), 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.

1.10 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 [24].

El esfuerzo o tensión de Von Mises (ecuación 1.32) puede calcularse mediante las tensiones principales del tensor de esfuerzo en un punto de un sólido deformable, con la expresión matemática:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (1.32)$$

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

1.10.1. CÁLCULO DEL ESFUERZO VON MISES CON SIMULACIÓN NUMÉRICA EN ANSYS.

El esfuerzo de Von Mises es evaluado en la zona estrecha de 3 mm de diámetro en las probetas de acero maraging 300. Para obtener este esfuerzo en la zona estrecha, se llevó a cabo mediante bloques de programación en ANSYS Workbench Figura 1.19. El software utiliza el método de elemento finito y se decidió usar la malla empleada para el cálculo del análisis modal. Además, se impone un desplazamiento en uno de los extremos de la muestra, que simula el efecto de la máquina ultrasónica sobre la probeta montada en ésta.

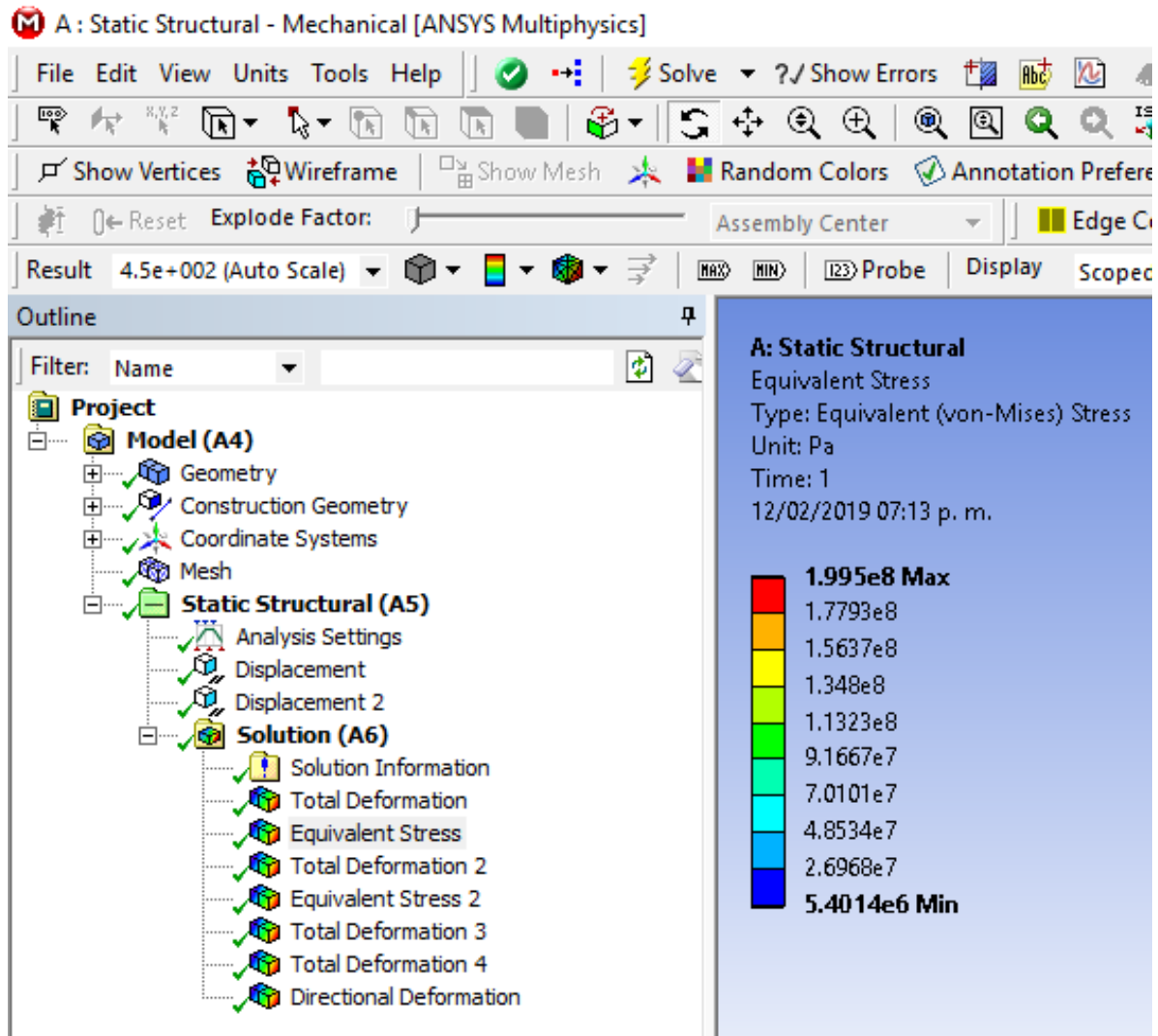


Figura 1.19. Bloques de simulación para obtener los esfuerzos en la probeta de ensayos.

Los resultados que arroja esta simulación son, principalmente, la distribución de esfuerzos de Von Mises. Para estos propósitos, es necesario elegir el apartado de stress Von Mises en la interfaz de ANSYS como lo muestra la Figura 1.20. Así, el programa proporciona los esfuerzos en la probeta mostrando de manera gráfica el perfil de esfuerzos a lo largo de la muestra, Figura 1.21.

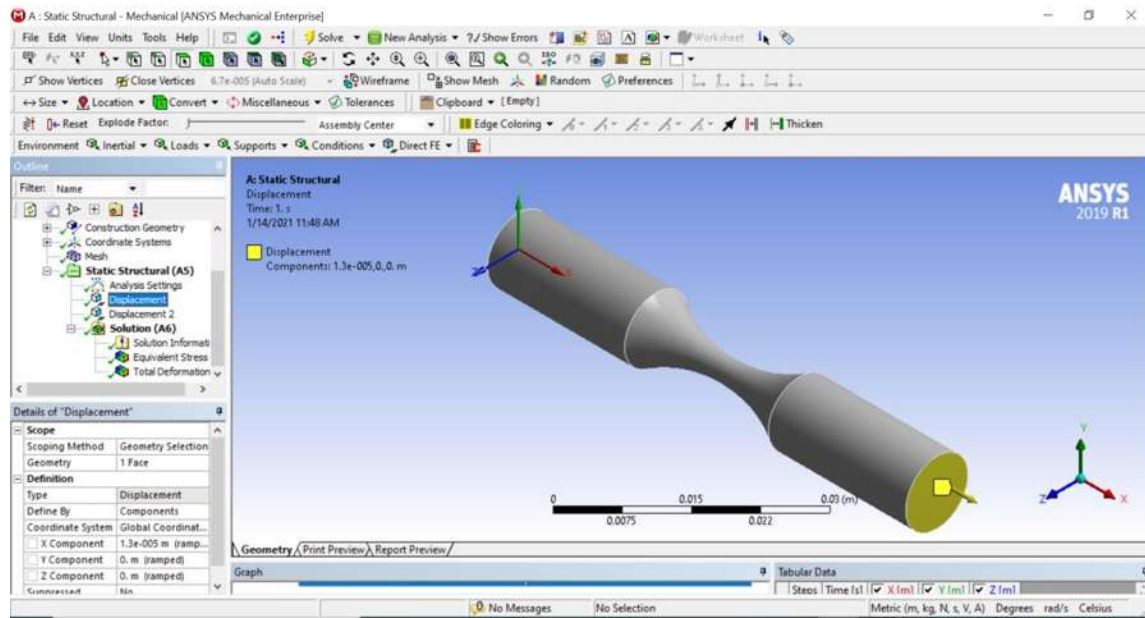


Figura 1.20. Bloques de simulación para obtener los esfuerzos en la probeta de ensayos.

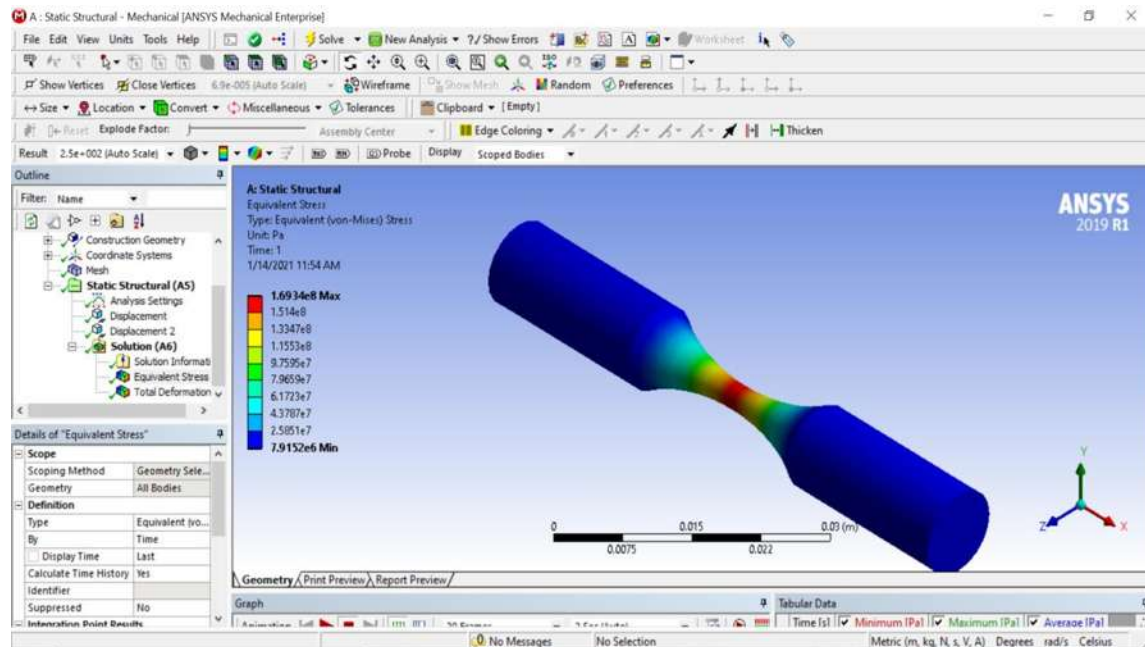


Figura 1.21. Bloques de simulación para obtener los esfuerzos en la probeta de ensayos.

CAPÍTULO II.- MATERIAL DE ENSAYO “ACERO MARAGING”.

2.1. ACERO MARAGING 300.

Los aceros maraging son aleaciones de hierro con refuerzos de precipitados, bajo contenido de carbono y resistencia ultra alta; compuestos principalmente por níquel (15-25%, típicamente 18%), con cantidades variables de cobalto, molibdeno y titanio. También se puede agregar elementos para obtener calidades de acero inoxidable resistentes a la corrosión. La empresa norteamericana “American Elements” [25]. fabrica aceros maraging en los grados 200, 250, 300 y 350, además de composiciones de aleaciones personalizadas en formas tales como polvo, láminas, placas, barras, varillas, láminas, pellets, tubos y objetivos de pulverización catódica. Dimensiones estándar y personalizadas están disponibles.

Fórmula lineal: Fe-Ni-Co-Mo-Ti

Maraging Steel: 17-19% Ni / 8-12% Co / 3-5% Mo / 0.2-1.6% Ti.

2.2. PROPIEDADES DEL ACERO MARAGING.

Tabla 2.1. Propiedades físicas y mecánicas del acero maraging [25].

Apariencia	Sólido metálico en varias formas (placa, barra, lámina, blanco de pulverización, polvo).
Punto de fusión	2575 ° C
Densidad	8,1 g / cm ³
Calor específico	813 J / kg · K (media)
Resistencia a la tracción	1,400–2,400 MPa, 1.6–2.5 GPa (UTS)
Conductividad térmica	25.5 W / m · K
Expansión térmica	11.3×10^{-6} (media)
El módulo de Young	190 GPa

Tabla 2.2. Composición química del acero maraging 300 [26].

<i>Elemento</i>	Contenido (%) en peso
<i>Hierro, FE</i>	63
<i>Níquel, Ni</i>	18
<i>Cobalto, Co</i>	12
<i>Molibdeno, MES</i>	4,8
<i>Titanio, Ti</i>	1,4
<i>Aluminio, Al</i>	0,1

<i>Elemento</i>	Contenido (%) en peso
<i>Manganeso, Manganeso</i>	$\leq 0,10$
<i>Silicio, Si</i>	$\leq 0,10$
<i>Carbón, C</i>	$\leq 0,030$
<i>Azufre, S</i>	$\leq 0,010$
<i>Fosforado, P</i>	$\leq 0,010$
<i>Circonio, Zr</i>	0,01
<i>Boro, B</i>	0,003

2.3. APLICACIONES DEL ACERO MARAGING.

2.3.1. PROPIEDADES DEL ACERO MARAGING

Caracterizada por una alta resistencia en este acero. Dependiendo del grado, este varía desde 1500 MPa (grado 200), a 2400 (grado 350) MPa de esfuerzo de cedencia. Esto es, aproximadamente cinco veces superior a un acero de construcción típico del grado S355 más alto.

La resistencia a la tracción máxima del acero maraging es de aproximadamente 2450 MPa; mientras que la del acero S355 es de solo 470 MPa; lo que significa que puede soportar fuerzas de tracción muy fuertes sin deformarse permanentemente.

El acero maraging se caracteriza por su resistencia, aunque al mismo tiempo es muy dúctil / maleable; estas dos propiedades son muy difíciles de combinar y también muy útiles en sus aplicaciones industriales. Lo anterior significa que el acero maraging se puede formar y enrollar fácilmente sin que se formen grietas y fracturas en su superficie o cuerpo.

Otra propiedad única de los aceros maraging es su muy buena soldabilidad; lo que básicamente significa que se puede unir fácilmente con otros metales para lograr un buen nivel de integración en los puntos de soldadura.

La adición de cromo, cadmio o fosfatado hace que el acero maraging sea excepcionalmente resistente a la corrosión de un amplio espectro de elementos. Incluso cuando no se trata

térmicamente, el acero maraging conserva las propiedades de resistencia a la corrosión gracias a la concentración relativamente alta de níquel.

Los aceros maraging son generalmente estables en sus propiedades físicas y no muestran una expansión térmica significativa o cambio de dimensión después del tratamiento de endurecimiento. Esto permite mecanizar la pieza hasta sus dimensiones finales antes de realizar el procedimiento de tratamiento térmico.

2.3.2. USOS COMUNES DEL ACERO DE MARAGING

Gracias a las propiedades únicas del acero maraging, que combina una alta resistencia a la tracción y ductilidad como en sus aplicaciones en trenes de aterrizaje, Figura 2.1., se usa ampliamente en aplicaciones aeroespaciales como accesorios del fuselage, Figura 2.2., varias herramientas que están hechas para ser duraderas, componentes de sujetadores que se hacen para sostener elementos de manera confiable y piezas de maquinaria que están contruidos para durar. Especialmente en aplicaciones que son críticas para el combustible, como cohetes y misiles, donde la relación peso / potencia / propulsión es una consideración clave, se prefiere el acero maraging, ya que puede enrollarse en láminas delgadas y conservar su resistencia incluso a temperaturas tan altas como 400 grados Celsius.



Figura 2.1. Aplicación del acero maraging en el tren de aterrizaje en la aeronáutica.

La estabilidad de las propiedades físicas hace que el acero maraging sea perfecto para la maquinaria que se intercambia entre frío y calor rápidamente, por lo que se utiliza para cigüeñales de motor, pasadores de disparo de armas, cajas de engranajes y unidades de centrifugado de gas. Debido a la alta resistencia del material a la rotura, el acero maraging

también se usa en deportes de esgrima para evitar accidentes, cabezas de palos de golf y cuadros de bicicletas, Figuras 2.3. y 2.4. Finalmente, debido a que la propagación de grietas es muy lenta, se usa en aplicaciones donde las inspecciones visuales se realizan con frecuencia y las piezas pueden servir en situaciones de emergencia Figura 2.2, lo que permite el tiempo para su reemplazo.



Figura 2.2. Aplicación del acero maraging en alas y fuselaje de los aviones.



Figura 2.3. Aplicación del acero maraging en los deportes, palo de golf.

Actualmente la tendencia en la manufactura de piezas por impresión 3D es una de las aplicaciones que recientemente están teniendo interés de investigación y desarrollo, matrices por impresión en tres dimensiones con maquinaria especial para esta finalidad; para ello utilizan polvos de materiales espécias con el fin de fundirlos con rayos láser de frecuencia focalizada y crear figuras complejas o matrices huecas para aplicaciones estructurales de última generación. Para este fin los aceros maraging no son la excepción pues se utilizan en forma de polvos en la impresión 3D, EOS Maraging Steel MS1 tal como lo muestra la Figura 2.5. Es posible observar una estructura de acero maraging manufacturada por fundición de

polvos en 3D, estas estructuras actualmente son manufacturadas y probadas en el país por diferentes universidades e institutos de investigación.



Figura 2.4. Aplicación del acero maraging en los deportes de esgrima.



Figura 2.5. Aplicación del acero maraging en la impresión 3D, EOS Maraging Steel MS1 [27].

2.4. ADQUISICIÓN DE ACERO MARAGING 300 PARA ENSAYOS.

Se realizó la búsqueda de proveedores nacionales del acero maraging en alguno de sus grados, pero se encontró el inconveniente de que en México la venta de este acero especial aeronáutico no existe: ninguna empresa lo vende o importa para venta al público; por sus aplicaciones especiales es un acero difícil de conseguir. Se emprendió la tarea de buscarlo en el resto del mundo, encontrando que lo producen en Europa, y en California Estados Unidos de América.

Este material fue cotizado en varias empresas de California USA, sin embargo, se logró concretar la compra con una de ellas, denominada: FRY STEEL COMPANY, ubicada en Santa Fe Spring, California. La compra implicó procedimientos adicionales, porque se tuvo que manifestar el uso final de este acero: el uso fue puramente educativo y de investigación y de desarrollo de un proyecto de tesis doctoral, con lo cual fue posible concretar la compra.

El proveedor nos proporcionó el certificado de compra del lote del material, el que se ilustra en la Figura 2.6. donde se confirma la compra del material nominación maraging 300. Algunas páginas de internet anuncian la venta del acero maraging en forma genérica, particularmente de origen asiático; no obstante, no se contó con la certeza de la composición del material en venta, y se decidió comprarlo en una compañía seria y con un registro que respalde la compra.

Order No.: 4389794 Time: 03:40:30	Fry Steel Company Registered ISO 9001/AS 9120 13325 MOLETTE STREET SANTA FE SPRINGS, CA. 90670 (562) 802-2721	Cust. No.: U09858 P.O.: JULIO VILCHEZ
--------------------------------------	---	--

CERTIFICATE OF COMPLIANCE	
UMSNH (UNIVERSIDAD M DE INGENIERIA MECANI EDIFICIO W,AV.FRANCI MUJICA S/C.P. 58030 MX MORELIA	MISS A. PEREZ 322 N CLAREMONT ST APT 4 SAN MATEO CA 94401

8/19/19

QTY	DESCRIPTION	ITEM CODE	HEAT
	CG MARAGING 300 AMS 6514 BROWN/GREEN		
2	BARS 3/8"RD 12"RL	55388	606605-2
	+ UPS		

Figura 2.6. Certificado de la compra del acero maraging 300, Fry Steel Company.

El certificado del material proporciona, entre otras cosas, la composición química del material, Figura 2.7. el módulo de Young, esfuerzo ultimo a la cadencia S_u , esfuerzo a la cadencia S_y , y resistencia a la fractura S_f , Figura 2.8. Estas propiedades son importantes y se toman en consideración para la simulación numérica de la probeta de ensayos.

CERTIFICATE OF TESTS CERT SERIAL# 001127498		ABNAHMEPRUEFZEUGNIS		CERTIFICAT DE CONTROLE																																					
 CARPENTER Carpenter Technology Corporation 101 West Bern Street, Reading, Pa. 19601 Tel: (610) 208-2000 (800) 338-4592		THE RECORDING OF FALSE, FICTITIOUS OR FRAUDULENT STATEMENTS OR ENTRIES ON THIS DOCUMENT MAY BE PUNISHED AS A FELONY UNDER FEDERAL STATUTES INCLUDING FEDERAL LAW, TITLE 18, CHAPTER 47. THE VALUES AND OTHER TECHNICAL DATA REPRESENT THE RESULTS OF ANALYSES AND TESTS MADE ON SAMPLES COLLECTED FROM THE TOTAL LOT. ORIGINAL DATA RECORDS CAN BE TRACED BY REFERENCE TO THE CARPENTER ORDER NUMBERS. MATERIAL IS MANUFACTURED FREE FROM MERCURY, RADIUM, ALPHA AND GAMMA SOURCE CONTAMINATION. THIS DOCUMENT SHALL NOT BE REPRODUCED, EXCEPT IN FULL, WITHOUT THE WRITTEN CONSENT OF CARPENTER TECHNOLOGY CORPORATION.																																							
09/27/18 CUSTOMER/BESTELLER/CLIENT FRY STEEL COMPANY ATTN: CHIP SANDOVAL 13325 MOLETTE ST SANTA FE SPRING CA 90670		SELLER/VERKÄUFER/VENDEUR PAGE 1 OF 5																																							
RAM																																									
CUSTOMER ORDER NO./BESTELL-NR./N° DE COMMANDE	CARPENTER NO./WERK-NR./N° DE REFERENCE INTERNE	DATE/DAUM/DATE	WEIGHT/GEWICHT/POIDS																																						
49459-10-003	W78942	09/27/18	1499.00																																						
HEAT NUMBER / SCHMELZE-NR. / N° DE COULEE: 606605 PRODUCT DESCRIPTION: MINARK 300 HI TEMP ALLOY SOLUTION ANNEALED GROUND PART NUMBER: S# 55383 SPECIFICATION: AMS 6514 REV J (06/ /17) MIL-S-46850D TYPE III AND IV AND 2 (02/07/02) GE S-400 (06/03/16) GE S-1000 (03/02/18) S-SPEC-1 GE S-400 (06/03/16) AS 9100 REV D (09/ /16) DPARS 1998 EDITION SIZE 0.375000 IN. (9.53 MM) RD BAR INGOT 2 HEAT CHEMISTRY(WT%): (TEST METHOD IS SHOWN IN PARENTHESIS) <table border="0"> <tr> <td>C (COM)</td> <td>MN(XRF)</td> <td>SI(XRF)</td> <td>P (XRF)</td> <td>S (COM)</td> <td>CR(XRF)</td> </tr> <tr> <td>0.005</td> <td>0.03</td> <td>0.03</td> <td>0.003</td> <td>0.001</td> <td>0.21</td> </tr> <tr> <td>NI(XRF)</td> <td>MO(XRF)</td> <td>CU(XRF)</td> <td>CO(XRF)</td> <td>AL(OES)</td> <td>TI(XRF)</td> </tr> <tr> <td>18.25</td> <td>4.78</td> <td>0.12</td> <td>9.20</td> <td>0.12</td> <td>0.69</td> </tr> <tr> <td>SR(XRF)</td> <td>S (OES)</td> <td>CA(OES)</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>LT .005</td> <td>0.002</td> <td>LT .002</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> GEAG SUPPLIER CODE - 21100/CARPENTER GEAG SUPPLIER CODE - T9406/ATHENS THE CHEMICAL ANALYSIS OF THIS HEAT HAS BEEN PERFORMED BY THE CARPENTER SPECIALTY ALLOYS CHEMICAL LABORATORY, (CODE NUMBER PRI 100004), WHICH WAS ACCREDITED TO THE ISO/IEC 17025.						C (COM)	MN(XRF)	SI(XRF)	P (XRF)	S (COM)	CR(XRF)	0.005	0.03	0.03	0.003	0.001	0.21	NI(XRF)	MO(XRF)	CU(XRF)	CO(XRF)	AL(OES)	TI(XRF)	18.25	4.78	0.12	9.20	0.12	0.69	SR(XRF)	S (OES)	CA(OES)				LT .005	0.002	LT .002			
C (COM)	MN(XRF)	SI(XRF)	P (XRF)	S (COM)	CR(XRF)																																				
0.005	0.03	0.03	0.003	0.001	0.21																																				
NI(XRF)	MO(XRF)	CU(XRF)	CO(XRF)	AL(OES)	TI(XRF)																																				
18.25	4.78	0.12	9.20	0.12	0.69																																				
SR(XRF)	S (OES)	CA(OES)																																							
LT .005	0.002	LT .002																																							

Figura 2.7. Composición química del acero maraging 300, Fry Steel Company.

CERTIFICATE OF TESTS CERT SERIAL# 001127498	ABNAHMEPRUEFZEUGNIS	CERTIFICAT DE CONTROLE																																																																																																																																																																																																
CARPENTER Carpenter Technology Corporation 101 West Bern Street, Reading, Pa. 19601 Tel: (610) 208-2000 (800) 338-4592 • THE RECORDING OF FALSE, FICTITIOUS OR FRAUDULENT STATEMENTS OR ENTRIES ON THIS DOCUMENT MAY BE PUNISHED AS A FELONY UNDER FEDERAL STATUTES INCLUDING FEDERAL LSA, TITLE 18, CHAPTER 47. • THE VALUES AND OTHER TECHNICAL DATA REPRESENT THE RESULTS OF ANALYSES AND TESTS MADE ON SAMPLES COLLECTED FROM THE TOTAL LOT. ORIGINAL DATA RECORDS CAN BE FRACED BY REFERENCE TO THE CARPENTER ORDER NUMBER. • MATERIAL IS MANUFACTURED FREE FROM MERCURY, RADIIUM, ALPHA AND GAMMA SOURCE CONTAMINATION. • THIS DOCUMENT SHALL NOT BE REPRODUCED, EXCEPT IN FULL, WITHOUT THE WRITTEN CONSENT OF CARPENTER TECHNOLOGY CORPORATION. 09/27/18 CUSTOMER/RESELLER/CLIENT PRI STEEL COMPANY ATTN: CHIP SANDOVAL 13325 MOLETTE ST SANTA FE SPRING CA 90670																																																																																																																																																																																																		
SELLER/VERKÄUFER/VENDEUR PAGE 2 OF 5																																																																																																																																																																																																		
RAN																																																																																																																																																																																																		
CUSTOMER ORDER NO./BESTELL.-NR./N° DE COMMANDE	CARPENTER NO./MESS.-NR./N° DE REFERENCE INTERNE	DATE/DATUM/DATE																																																																																																																																																																																																
49459-10-003	W78942	09/27/18																																																																																																																																																																																																
WEIGHT/GEWICHT/POIDS 1499.00																																																																																																																																																																																																		
HEAT NUMBER / SCHMELZE-NR. / N° DE COULEE: 606605 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 0.8em;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">ID</th> <th colspan="6">ASTM E45 METHOD D (MODIFIED)</th> <th colspan="4">CARBO-NITRIDE</th> </tr> <tr> <th colspan="2">A</th> <th colspan="2">B</th> <th colspan="2">C</th> <th colspan="2">D</th> <th colspan="2"></th> </tr> <tr> <th></th> <th>THIN</th> <th>HEAVY</th> <th>THIN</th> <th>HEAVY</th> <th>THIN</th> <th>HEAVY</th> <th>THIN</th> <th>HEAVY</th> <th>THIN</th> <th>HEAVY</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2A1 0.5</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>001</td> <td>000</td> <td>00</td> <td>00</td> </tr> <tr> <td>1.0</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>000</td> <td>000</td> <td>00</td> <td>00</td> </tr> <tr> <td>1.5</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>000</td> <td>000</td> <td>00</td> <td>00</td> </tr> <tr> <td>2.0</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>000</td> <td>000</td> <td>00</td> <td>00</td> </tr> <tr> <td>2.5</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>000</td> <td>000</td> <td>00</td> <td>00</td> </tr> <tr> <td>3.0</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>000</td> <td>000</td> <td>00</td> <td>00</td> </tr> <tr> <td>2X1 0.5</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>001</td> <td>000</td> <td>00</td> <td>00</td> </tr> <tr> <td>1.0</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>000</td> <td>000</td> <td>00</td> <td>00</td> </tr> <tr> <td>1.5</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>000</td> <td>000</td> <td>00</td> <td>00</td> </tr> <tr> <td>2.0</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>000</td> <td>000</td> <td>00</td> <td>00</td> </tr> <tr> <td>2.5</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>000</td> <td>000</td> <td>00</td> <td>00</td> </tr> <tr> <td>3.0</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>00</td> <td>000</td> <td>000</td> <td>00</td> <td>00</td> </tr> </tbody> </table> CAPABILITY ----- 900 F (482 C), 05 HR AIR COOL <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 0.8em;"> <thead> <tr> <th>HARDNESS</th> <th>HRC</th> <th>52 / 54 / 53</th> <th>(MIDRADIUS)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(T) TRANSVERSE (L) LONGITUDINAL</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>YIELD STRENGTH, (0.20 %) KSI (MPA)</td> <td></td> <td>292.0 (2013)</td> <td>293.0 (2020) 291.0 (2006)</td> </tr> <tr> <td>TENSILE STRENGTH, KSI (MPA)</td> <td></td> <td>298.0 (2055)</td> <td>298.0 (2055) 297.0 (2048)</td> </tr> <tr> <td>ELONGATION IN 2.00", %</td> <td></td> <td>8.0</td> <td>8.5 7.5</td> </tr> <tr> <td>ELONGATION IN 1.40", %</td> <td></td> <td>11.0</td> <td>11.0 11.0</td> </tr> <tr> <td>REDUCTION OF AREA, %</td> <td></td> <td>54.0</td> <td>55.0 55.0</td> </tr> </tbody> </table>			ID	ASTM E45 METHOD D (MODIFIED)						CARBO-NITRIDE				A		B		C		D					THIN	HEAVY	THIN	HEAVY	THIN	HEAVY	THIN	HEAVY	THIN	HEAVY	2A1 0.5	00	00	00	00	00	00	001	000	00	00	1.0	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00	1.5	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00	2.0	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00	2.5	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00	3.0	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00	2X1 0.5	00	00	00	00	00	00	001	000	00	00	1.0	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00	1.5	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00	2.0	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00	2.5	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00	3.0	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00	HARDNESS	HRC	52 / 54 / 53	(MIDRADIUS)	(T) TRANSVERSE (L) LONGITUDINAL				YIELD STRENGTH, (0.20 %) KSI (MPA)		292.0 (2013)	293.0 (2020) 291.0 (2006)	TENSILE STRENGTH, KSI (MPA)		298.0 (2055)	298.0 (2055) 297.0 (2048)	ELONGATION IN 2.00", %		8.0	8.5 7.5	ELONGATION IN 1.40", %		11.0	11.0 11.0	REDUCTION OF AREA, %		54.0	55.0 55.0
ID	ASTM E45 METHOD D (MODIFIED)						CARBO-NITRIDE																																																																																																																																																																																											
	A		B		C		D																																																																																																																																																																																											
	THIN	HEAVY	THIN	HEAVY	THIN	HEAVY	THIN	HEAVY	THIN	HEAVY																																																																																																																																																																																								
2A1 0.5	00	00	00	00	00	00	001	000	00	00																																																																																																																																																																																								
1.0	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00																																																																																																																																																																																								
1.5	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00																																																																																																																																																																																								
2.0	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00																																																																																																																																																																																								
2.5	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00																																																																																																																																																																																								
3.0	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00																																																																																																																																																																																								
2X1 0.5	00	00	00	00	00	00	001	000	00	00																																																																																																																																																																																								
1.0	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00																																																																																																																																																																																								
1.5	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00																																																																																																																																																																																								
2.0	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00																																																																																																																																																																																								
2.5	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00																																																																																																																																																																																								
3.0	00	00	00	00	00	00	000	000	00	00																																																																																																																																																																																								
HARDNESS	HRC	52 / 54 / 53	(MIDRADIUS)																																																																																																																																																																																															
(T) TRANSVERSE (L) LONGITUDINAL																																																																																																																																																																																																		
YIELD STRENGTH, (0.20 %) KSI (MPA)		292.0 (2013)	293.0 (2020) 291.0 (2006)																																																																																																																																																																																															
TENSILE STRENGTH, KSI (MPA)		298.0 (2055)	298.0 (2055) 297.0 (2048)																																																																																																																																																																																															
ELONGATION IN 2.00", %		8.0	8.5 7.5																																																																																																																																																																																															
ELONGATION IN 1.40", %		11.0	11.0 11.0																																																																																																																																																																																															
REDUCTION OF AREA, %		54.0	55.0 55.0																																																																																																																																																																																															

Figura 2.8. Propiedades Mecánicas del material, acero maraging 300.

En el mismo certificado se puede apreciar la composición detallada de este acero, así como los tratamientos térmicos llevados a cabo (recosido), para su puesta en venta; además de indicar el lote correspondiente. Este material se recuperó directamente en Santa Fe Springs California a pie de planta.

Con objeto de validar las propiedades mecánicas del material adquirido, se llevaron a cabo ensayos de tracción para verificar el correspondiente esfuerzo de cedencia; confirmándose

que el valor obtenido es cercano al declarado en la ficha técnica. Detalles de estos ensayos se describen en una sección posterior.

La composición química (% en peso) y las principales propiedades mecánicas del acero maraging 300 se enumeran en la Tabla 2.3. y la Tabla 2.4., respectivamente.

Tabla 2.3. Composición química por peso de Maraging 300 [28].

Fe	Ni	Co	Mb	Ti	Al
63 Max.	18 Max.	12 Max.	4.8 Max.	1.4 Max.	0.1 Max.

Tabla 2.4. Principales propiedades mecánicas de Maraging 300 [29]

Density	σ_y	σ_u	Poisson ratio	Elasticity Module
[Kg/m ³] 8100	[MPa] 1400-2400	[MPa] 2500	0.3	[GPa] 190

Una vez recibido el material, se decidió conservar el diámetro de las barras que fue de 9.53 mm (3/8 de pulgada), para evitar maquinados adicionales en la modificación del diámetro de las barras. Así, el proceso de maquinado de las probetas de ensayo comprendió: primeramente, el corte de las barras a dimensiones preestablecidas; enseguida se llevó a cabo el refrentado, después el barrenado donde se aloja el perno de sujeción, posteriormente el roscado del barreno, y finalmente, el maquinado de la parte central de la probeta en forma de reloj de arena (perfilado). Las dimensiones de las probetas de ensayo, fueron previamente determinadas mediante simulación numérica, cumpliendo las condiciones de resonancia: la frecuencia natural de excitación de la fuente (20 KHz), cercana a la frecuencia natural de oscilación de la probeta, que debe aproximarse a $20 \text{ KHz} \pm 300 \text{ Hz}$.

Una vez maquinadas las probetas, se llevaron a ensayar en la máquina ultrasónica para verificar que trabajan en resonancia. La condición de resonancia implica una onda elástica estacionaria a lo largo de la probeta con máximos desplazamiento en los extremos y máximo esfuerzo en el cuello de la misma. La Figura 2.9. muestra de manera gráfica la distribución de desplazamientos y esfuerzos a lo largo de la probeta de prueba, bajo las condiciones de resonancia.

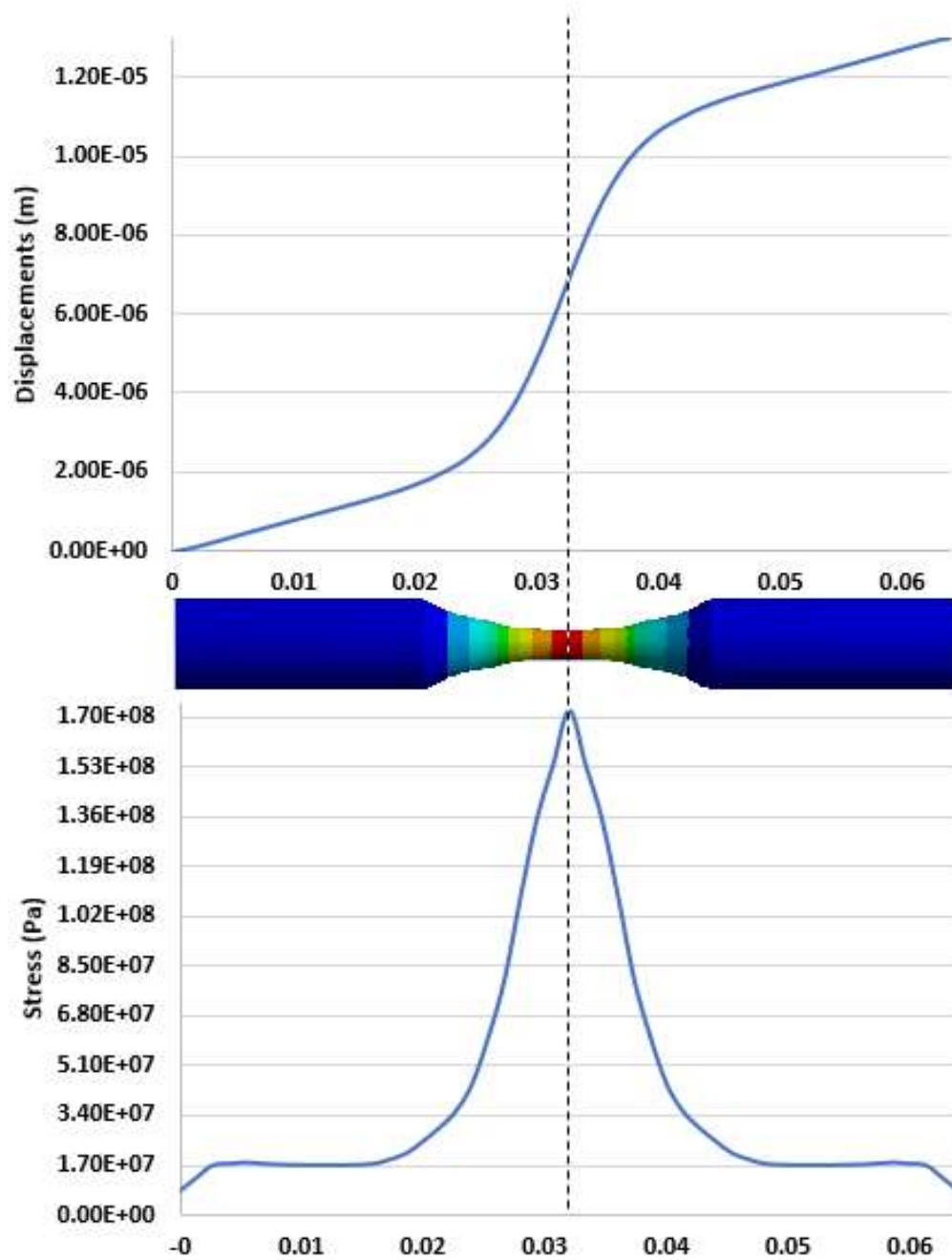


Figura 2.9. Distribución de esfuerzos y desplazamientos a lo largo de la probeta, bajo condición de resonancia.

CAPÍTULO III.- DISEÑO DEL ESPÉCIMEN DE PRUEBA.

Uno de los aspectos prioritarios de la presente investigación fue diseñar una probeta para pruebas de fatiga ultrasónica, que cumpliera las condiciones de resonancia con la máquina de pruebas (máquina de fatiga ultrasónica ubicada en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo) Figura 3.1. Está probeta fue diseñada con la ayuda del software de diseño ANSYS Workbench.



Figura 3.1. Máquina de fatiga ultrasónica, patentada por el Dr. Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz No. Patente: 323948.

En el software de diseño CAD en ANSYS se generó un modelado en tres dimensiones de la probeta, Figura 3.2., con dimensiones aproximadas o propuestas previamente tomando en cuenta las propiedades mecánicas del acero maraging y en comparación con ensayos previos de aceros con propiedades mecánicas aproximadas al material de ensayo; estas propiedades mecánicas importantes son: el módulo de elasticidad E o módulo de Young, densidad del material y su coeficiente de Poisson.

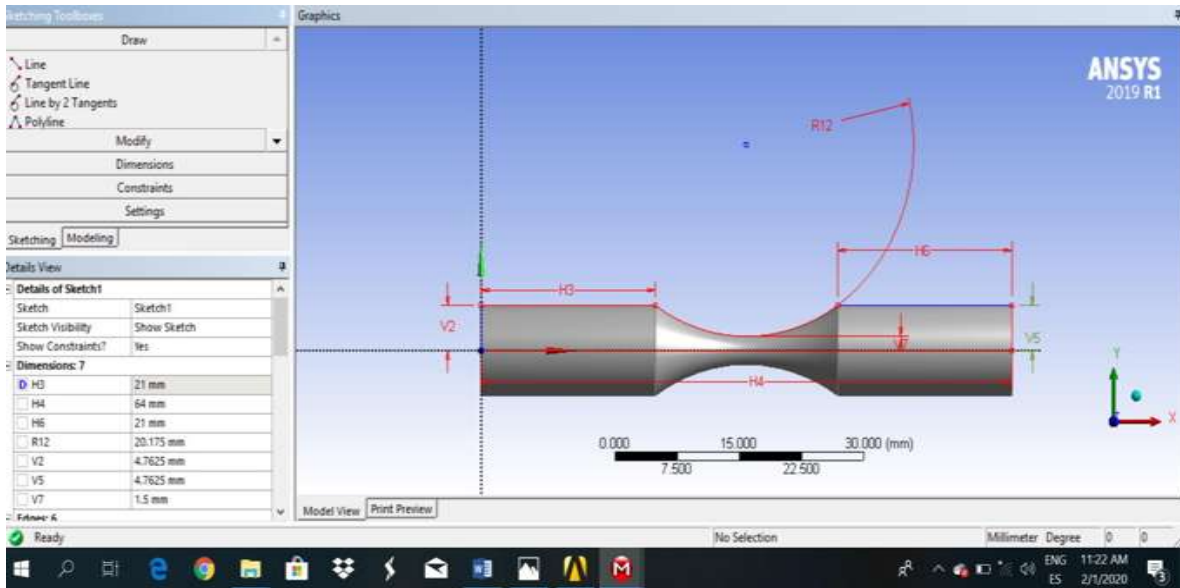


Figura 3.2. Modelado 3D de la probeta de acero maraging 300, en ANSYS workbench.

Para analizar las dimensiones propuestas, se lleva a cabo un análisis modal en el modelo (probeta de ensayos), Figura 3.3. y 3.4. Este análisis modal se describe en detalle a continuación.

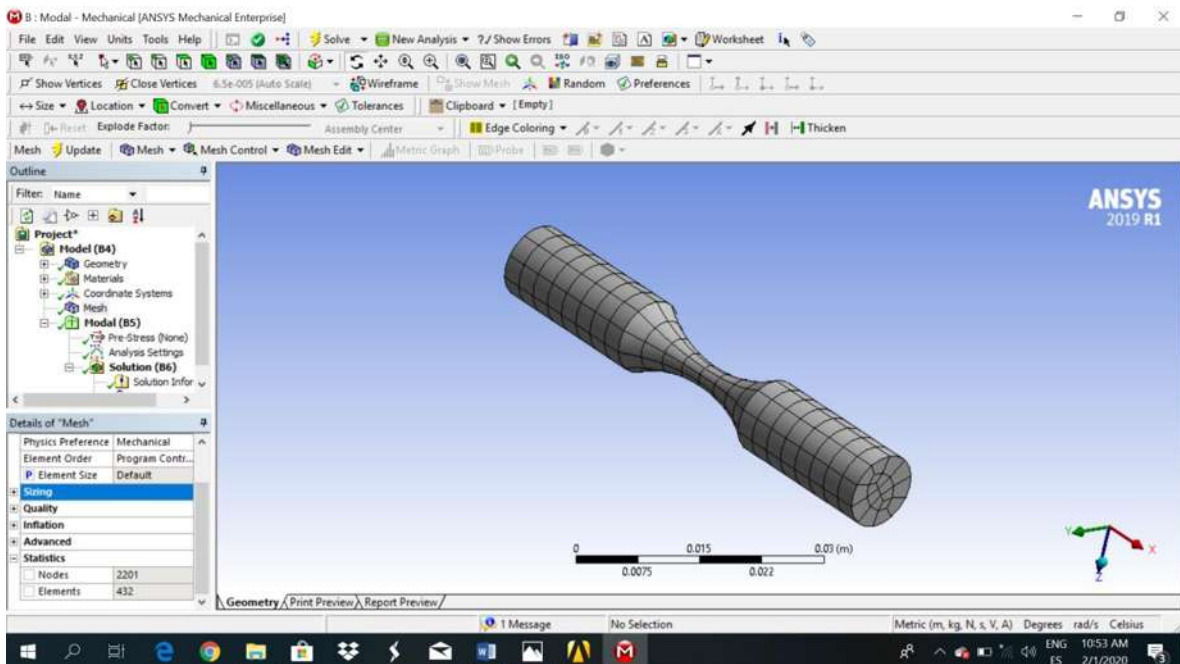


Figura 3.3. Método de mayado por elemento finito, 2201 nodos y 432 elementos en la probeta del acero maraging 300.

Para llevar a cabo el análisis modal en ANSYS es necesario construir una maya en el modelado 3D de la probeta de ensayos, Figura 3.3., con el objeto de iniciar el análisis modal por el método de elemento finito, efectuado por el software mediante su programación interna utilizando la solución modal. El análisis modal es una solución numérica para obtener el modo natural de oscilación del sólido en cuestión con la finalidad de adaptarse a la condición de resonancia con la máquina ultrasónica, vibrando a 20 KHz (± 300 Hz). Una vez obtenido el análisis modal en ANSYS, se revisan los modos de vibración natural del material y se localiza el que se desplaza de manera longitudinal. En caso de no encontrarse dentro del valor de resonancia requerido (20 KHz ± 300 Hz), se procede a rediseñar las dimensiones de la probeta, quitando o agregando masa (dimensiones), según sea el caso, hasta encontrar esas dimensiones adecuadas, para las cuales el modo de vibración natural longitudinal de la probeta sea el mismo o próximo a la frecuencia de excitación de la máquina ultrasónica (20 KHz ± 300 Hz).

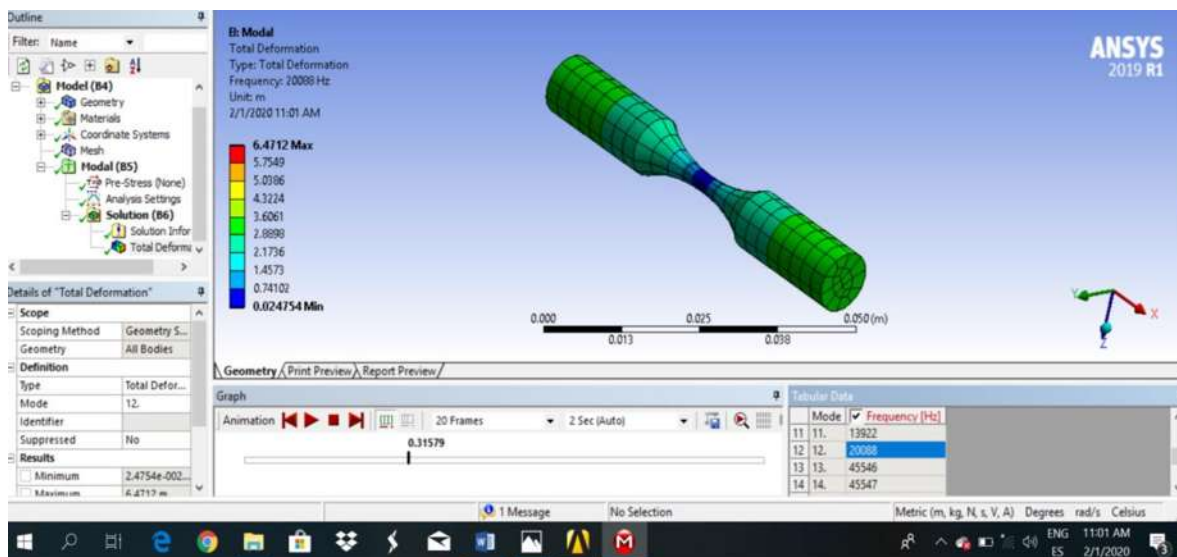


Figura 3.4. Análisis Modal del acero maraging 300 con frecuencia natural de oscilación de 20088 Hz.

Las dimensiones de la probeta correspondientes al modo natural de vibración cercano a la fuente excitadora, se obtuvo para este acero maraging 300 con un largo de 63 mm distribuidos en tres secciones: una parte en el centro en forma de reloj de arena con una longitud de 22 mm y un diámetro estrecho en el centro de 3 mm, dos secciones más de 22 mm y diámetro de 9.53 mm a los extremos del perfil tipo reloj de arena, como se muestra en la Figura 3.5. Estas dimensiones generaron un modo natural de oscilación de 20088 Hz, valor muy próximo a la fuente de excitación (20 KHz ± 300 Hz), en los cuales los 80 Hz entran en el valor de ± 300 Hz. Después de tener estas dimensiones calculadas en ANSYS workbench, es necesario maquinar y probar el primer espécimen para verificar que el diseño es adecuado y que la probeta instalada en la máquina ultrasónica, trabaja en condiciones de resonancia.

Fue necesario maquinar una probeta de ensayos; por este motivo se llevó a cabo el maquinado de la primera probeta denominada probeta cero; este nombre corresponde con la finalidad de probar las condiciones de resonancia en la maquina ultrasónica sin obtener una medida del número de ciclos a la fractura. El maquinado se llevó a cabo en el taller de maquinados CNC ubicado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, en el taller a cargo del Dr. Gonzalo M. Domínguez Almaraz.

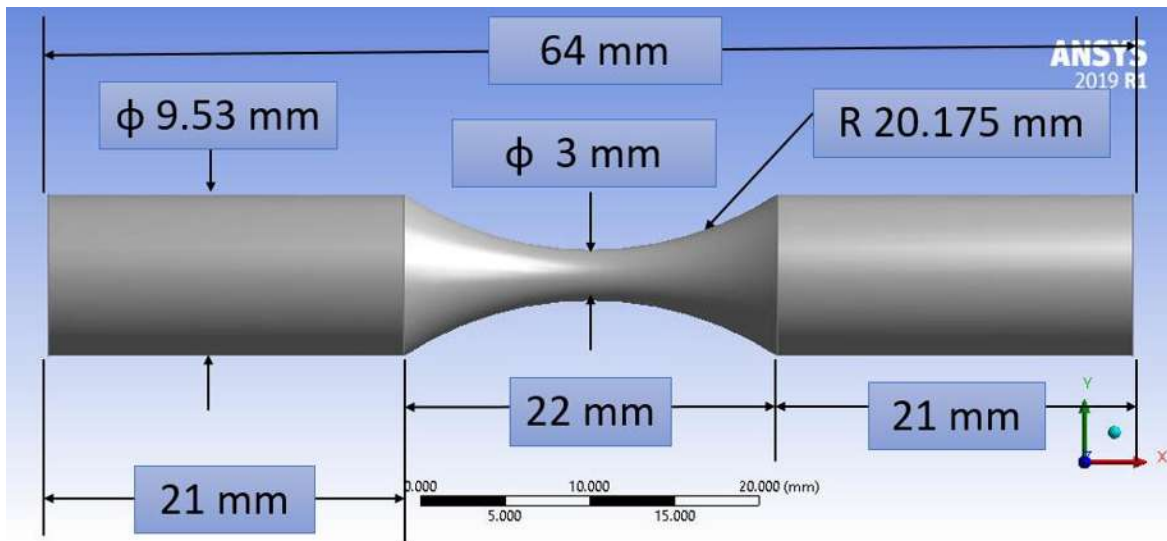


Figura 3.5. Dimensiones de la probeta de acero maraging 300.

Con este análisis modal en ANSYS se obtiene un modelo de probeta propuesto que satisface las condiciones en resonancia a 20 KHz para las pruebas de fatiga ultrasónica, Figura 3.6.



Figura 3.6. Probeta maquinada, acero maraging 300.

Una vez terminado el diseño de la muestra de pruebas, se llevan a cabo pruebas sobre la probeta, con el objeto de comprobar la teoría de fallo en el centro de la muestra.

Uno de los objetivos principales de esta investigación se centró en la determinación del esfuerzo de Von Mises en el espécimen de ensayos. Lo anterior fue resuelto por medio de simulación numérica, como se ilustra en las Figuras 3.7. y 3.8. La probeta se sujeta en uno de sus extremos al sonotrodo de la máquina ultrasónica, quedando el otro extremo libre. El voltaje inicial aplicado fue de 10 volts, que genera un desplazamiento en el extremo libre de la probeta de 13.5 mm, que corresponde a un valor de esfuerzo máximo de Von Mises inducido en el cuello de la muestra de 195 MPa, Figura 3.8.

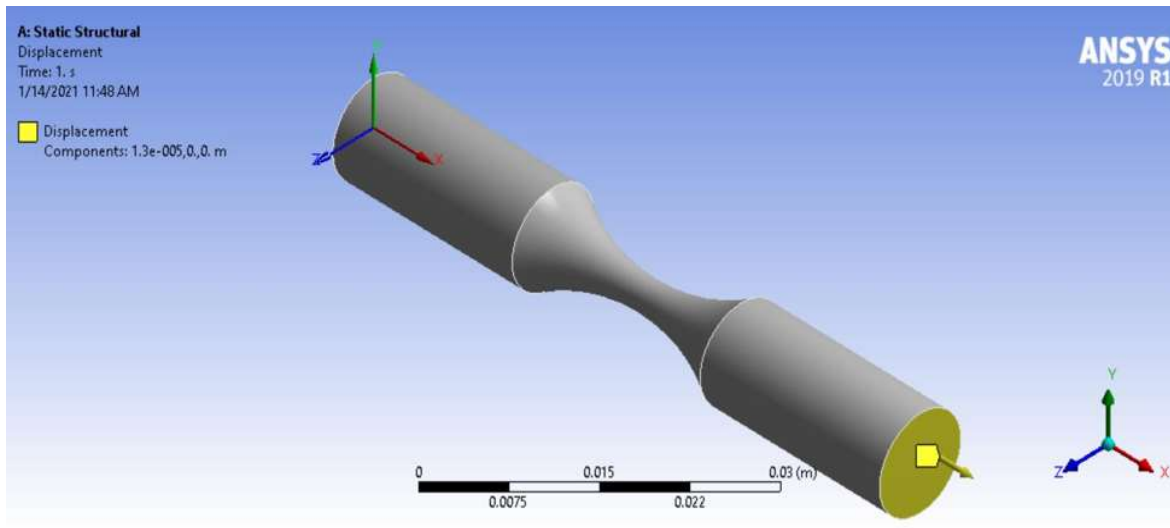


Figura 3.7. Desplazamiento 13.5 micras en la probeta de acero maraging 300 con un voltaje de alimentación a la maquina ultrasónica 10 volts.

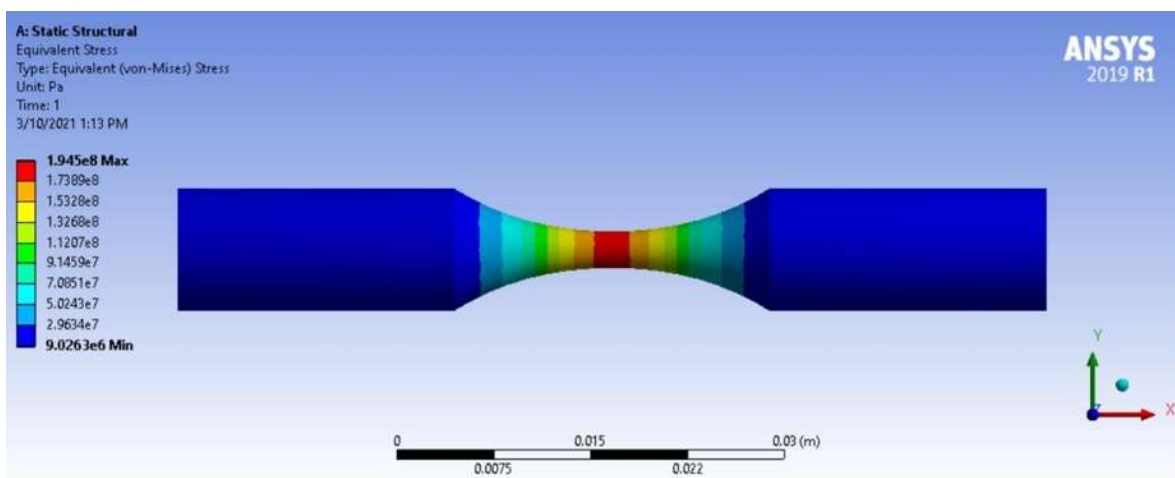


Figura 3.8. Esfuerzo de Von Mises en la parte central de 195 Mpa. Con un desplazamiento de 13.5 micras inducido por un voltaje de 10 volts en la máquina de fatiga ultrasónica.

Se pudo corroborar el comportamiento de la probeta con la puesta en marcha del ensayo en la máquina de fatiga ultrasónica, registrando la temperatura de la muestra con una cámara de

visión termográfica, la que muestra la concentración de la temperatura en el centro de la probeta, como consecuencia del esfuerzo central inducido en la misma. Este comportamiento se aprecia con claridad en la distribución de desplazamientos y esfuerzos de la Figura 3.9. Como se muestra en la Figura 3.10 a), b) y c). se comparan tres imágenes de la probeta, la primera del ensayo en la muestra física donde observamos la fractura en el centro de la probeta, la segunda imagen muestra el esfuerzo concentrado en el centro de la probeta de ensayo por simulación numérica, y finalmente la tercera imagen inferior donde se muestra la imagen termográfica que revela la concentración de la temperatura en el centro de la probeta.

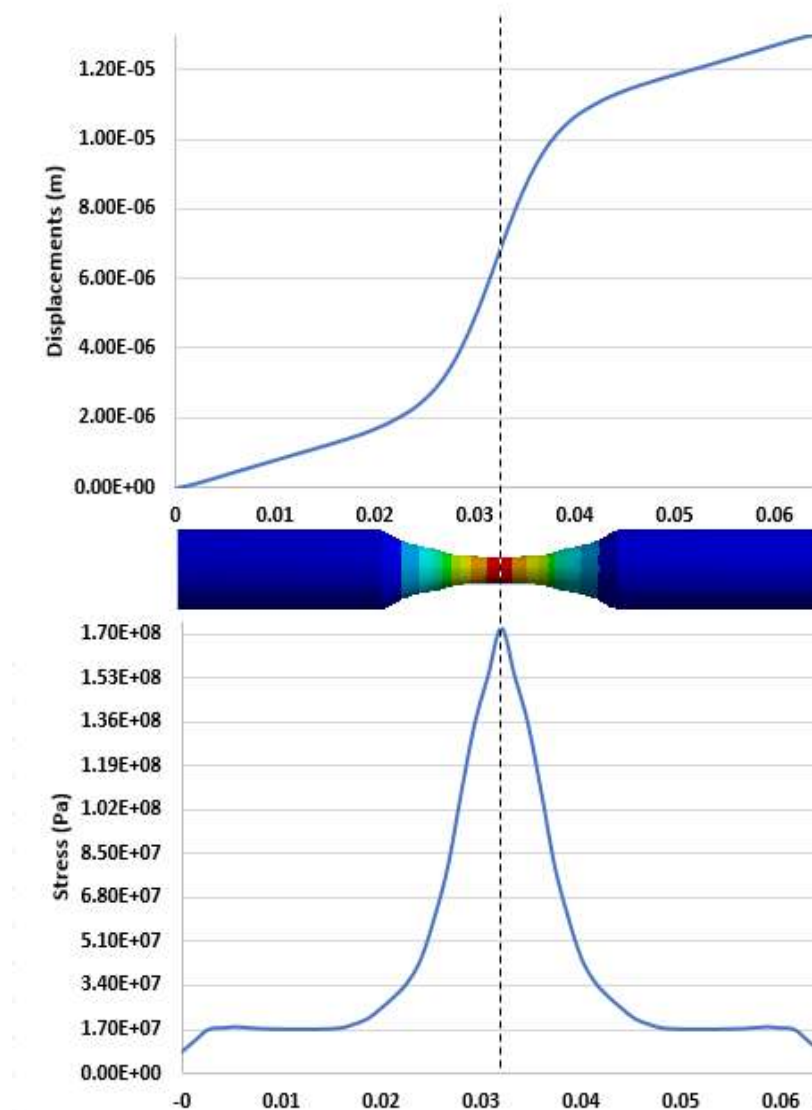


Figura 3.9. Desplazamiento y tensión a lo largo de la muestra de Maraging 300 bajo resonancia, obtenido por simulación numérica en el software de diseño ANSYS.

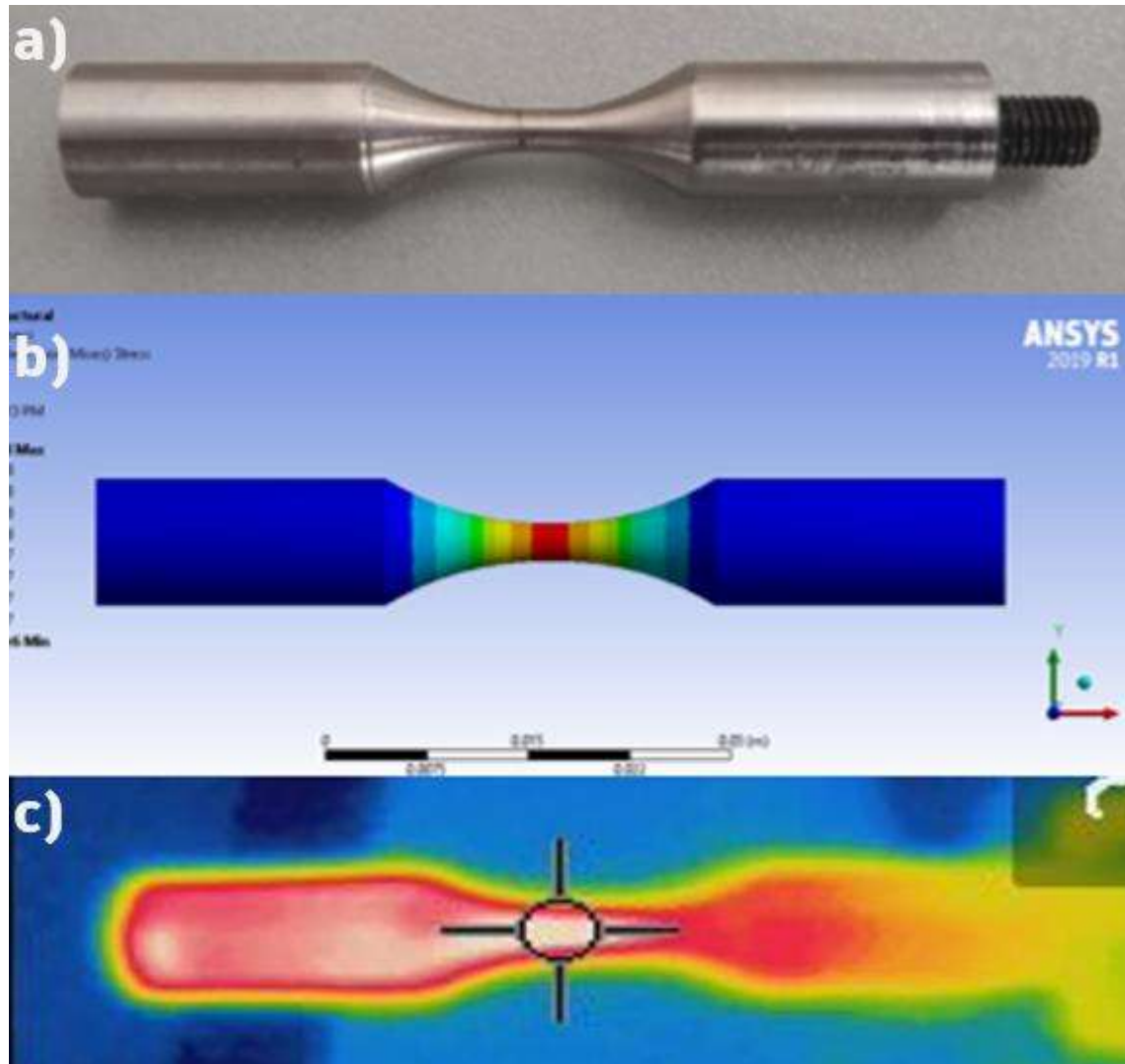


Figura 3.10. Relación de la concentración del esfuerzo en el centro de la muestra en relación a su desplazamiento a) vista en la muestra física, b) la simulación numérica en ANSYS y c) por imagen termográfica del mismo espécimen.

En la Figura 3.10 a) se presenta la imagen de una probeta ensayada y fracturada en el centro donde se presenta el cuello esbelto de 3mm de diámetro que funciona como un concentrador de esfuerzos en la muestra; el esfuerzo se concentró en el centro como se obtuvo mediante la simulación numérica, como se ilustra en la Figura 3.10. b). Confrontando las dos figuras anteriores con la Figura 3.10 c) concerniente a una imagen termográfica, el sitio de máxima temperatura coincide con la sección estrecha de la probeta.

Un primer análisis mediante lupa convencional sobre la fractura de la muestra, Figura 3.11., se puede apreciar con claridad la grieta en la superficie de la probeta ensayada. La fisura

superficial se concentró en el centro, coincidente con los resultados de simulación en ANSYS arrojando máximo esfuerzos concentrados en la parte estrecha de la probeta.



Figura 3.11. *Probeta 0 ensayada con fractura por fatiga ultrasónica en la parte central de la muestra, acero maraging 300.*

Para poder llevar a cabo la prueba física de la muestra de ensayos llamada probeta 0 en la maquina ultrasónica, se procedió al maquinado de esta muestra en un torno de control numérico por sus siglas en CNC. Este torno está ubicado en el laboratorio de maquinados CNC a cargo del Dr. Gonzalo. Ubicado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH, tal maquinado se detallará más adelante en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO IV.- MANUFACTURA DE LAS PROBETAS DE ACERO MARAGING 300.

Para llevar a cabo los ensayos en fatiga ultrasónica, es necesario manufacturar las probetas para la puesta en marcha de los ensayos de fatiga ultrasónica en el acero maraging 300. Se requiere tener probetas con dimensiones bien establecidas previamente calculadas mediante el proceso de diseño, descrito en el Capítulo III, previamente. Estas dimensiones corresponden a la Figura 3.5. Para lograr el perfil deseado, es necesario recurrir a los procesos de manufactura de: torneado, barrenado y cachueleado. Con el torneado se realiza una remoción de material por medio de herramientas de corte (Buriles), que van desprendiendo material hasta obtener las dimensiones y perfiles deseados. Con el barrenado se hace un hueco en la muestra para después hacerle una rosca y poder alojar un opresor roscado (5mm) con el fin de sujetar la muestra a la máquina ultrasónica. En el caso del machueleado, se realiza 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 que se realizaron para esta investigación. Estos procedimientos de manufactura se realizan para obtener probetas de ensayo con calidad necesaria como lo es el acabado superficial de las probetas, cuidar la temperatura durante los ensayos y cuidar el buen y adecuado afilado de las herramientas de corte que se deben realizar para tener las 100 probetas necesarias para los ensayos y la puesta en marcha de las pruebas de fatiga ultrasónica.

4.1 TORNEADO.

El torneado se puede definir como la acción de desprender material con una herramienta de corte llamada buril a un perfil redondo de un material determinado por medio de un eje giratorio que tiene un Chuck (mandril), con mordazas donde se monta el materia para que este gire y con el buril que se encuentra fijo se pueda desprender material a capas finas, cuidando tanto la temperatura del proceso, como el filo de la herramienta de corte, la temperatura de operación, la velocidad en rpm y velocidad de avance en (mm/seg) y la profundidad del corte (mm). Estos parámetros dependen del material y de la calidad del buril y del material del cual están hechos los insertos para el corte. Para esta tesis doctoral se maquinaron barras de acero maraging 300 redondas de 9.53 mm de diámetro.

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 64 mm de longitud repartidas en tres secciones de 2 de 21 mm a los extremos y en el centro y 1 de 22 mm, con un radio de 20.175 mm y un diámetro de la barra de 9.53mm; así como un diámetro en la parte estrecha en el centro de 3 mm ubicado a la mitad de la barra de acero maraging 300.

Para realizar estos trabajos de desbaste de material con herramientas de corte se necesitó un torno de control numérico por computadora CNC (Computer Numerical Control), este

torno está localizado 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 4.1. donde se aprecia que es de dimensiones reducidas, aunque cumple con las características técnicas para maquinar las probetas en las dimensiones que se requieren para los ensayos de fatiga ultrasónica.

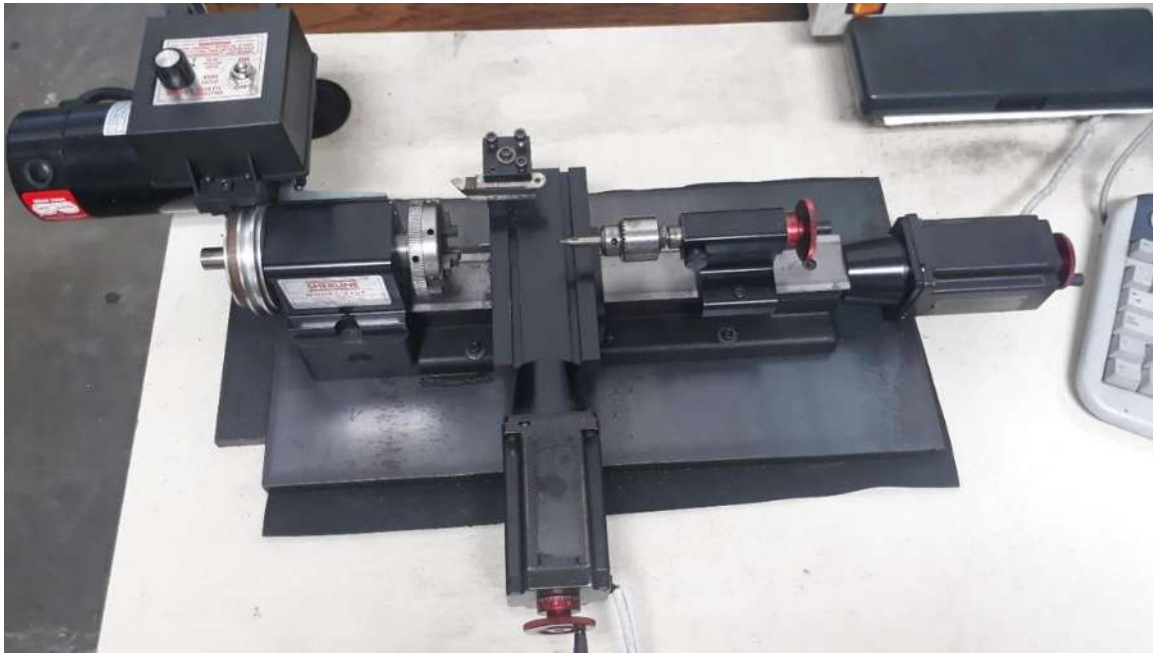


Figura 4.1. Torno CNC para maquinado de probetas, utilizadas en ensayos de fatiga ultrasónica ubicado en la FIM, UMSNH.

4.2. REFRENTADO.

El acero maraging 300 se adquirió del proveedor con un diámetro de 9.53 mm; luego entonces, el proceso de cilindrado no fue necesario en esas condiciones. El proceso de cilindrado es la acción de retirar material en la superficie alrededor del diámetro de la barra con el objetivo de reducir el diámetro de la barra o dar un acabado superficial adecuado a la barra. Al término del cilindrado, normalmente sigue el proceso de refrentado.

El refrentado es una operación de sustracción de material en las caras de los cilindros por medio de una herramienta de corte llamada buril, con la finalidad de obtener caras totalmente planas y para obtener la longitud deseada en las barras cilíndricas que después se perfilarán. El refrentado se ilustra en la Figura 4.2. en donde se muestra el cilindro de 9.53 mm de diámetro que está siendo refrentado con el torno CNC para dejar un largo de 64 mm.



Figura 4.2. Refrentado de probetas de acero maraging 300 para ensayos de fatiga ultrasónica.

En el refrentado se programó en código G, el programa que lee el torno por medio de la interfaz de la computadora, Figura 4.3., controlando las operaciones del torno. Este código se presenta a continuación.



Figura 4.3. Interfaz del programa G de control Mach3 del torno CNC (FIM, UMSNH).

Para esta operación se tomaron las siguientes condiciones de corte: revoluciones del husillo (Chuck o mandril) $N=180$ rpm velocidad de corte $V_C=7.5$ m/min; avance $f_n = 50$ mm/r ó también $a_n= 0.05$ mm/rev (profundidad de corte). Un acercamiento del proceso de refrentado de la muestra de acero maraging 300 se muestra en la Figura 4.4. donde se puede apreciar el buril haciendo los cortes en la cara del cilindro de acero maraging, sujeta al mandril (chuk) giratorio.

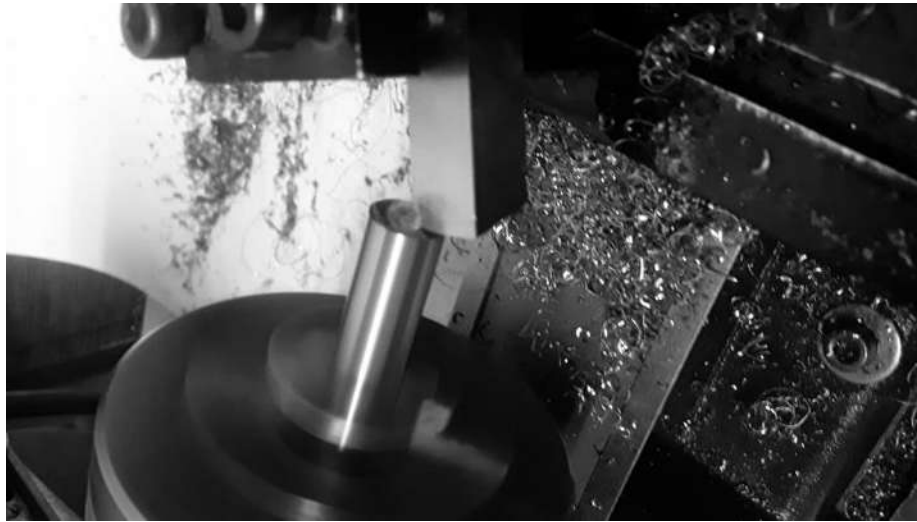


Figura 4.4. Acercamiento del proceso de refrentado de los cilindros de acero maraging 300.

4.2.1. CÓDIGO GM PARA EL REFRENTADO.

El programa se lee de izquierda a derecha.

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

G54;(coordenadas absolutas)	G01 Z-0.05 X6.4;	G01 Z-0.2;
G21;(unidades mm)	G00 Z-0.05;	G01 Z-0.2 X6.4;
M43;	G00 Z-0.05 X0;	G00 Z-0.2;
M03;(prender Chuck)		G00 Z-0.2 X0;
M08;(prender refrigerante)	G01 Z-0.1;	
F50;	G01 Z-0.1 X6.4;	G01 Z-0.25;
	G00 Z-0.1;	G01 Z-0.25 X6.4;
	G00 Z-0.1 X0;	G00 Z-0.25;
		G00 Z-0.25 X0;
%Código para desbaste a 12 mm	G01 Z-0.15;	
G00 X0 Z0;	G01 Z-0.15 X6.4;	G01 Z-0.3;
	G00 Z-0.15;	G01 Z-0.3 X6.4;
	G00 Z-0.15 X0;	G00 Z-0.3;
G01 Z-0.05;		G00 Z-0.3 X0;

G01 Z-0.35; G01 Z-0.35 X6.4; G00 Z-0.35; G00 Z-0.35 X0;	G01 Z-0.8; G01 Z-0.8 X6.4; G00 Z-0.8; G00 Z-0.8 X0;	G01 Z-1.25; G01 Z-1.25 X6.4; G00 Z-1.25; G00 Z-1.25 X0;
G01 Z-0.4; G01 Z-0.4 X6.4; G00 Z-0.4; G00 Z-0.4 X0;	G01 Z-0.85; G01 Z-0.85 X6.4; G00 Z-0.85; G00 Z-0.85 X0;	G01 Z-1.3; G01 Z-1.3 X6.4; G00 Z-1.3; G00 Z-1.3 X0;
G01 Z-0.45; G01 Z-0.45 X6.4; G00 Z-0.45; G00 Z-0.45 X0;	G01 Z-0.9; G01 Z-0.9 X6.4; G00 Z-0.9; G00 Z-0.9 X0;	G01 Z-1.35; G01 Z-1.35 X6.4; G00 Z-1.35; G00 Z-1.35 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-1.4; G01 Z-1.4 X6.4; G00 Z-1.4; G00 Z-1.4 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-1.45; G01 Z-1.45 X6.4; G00 Z-1.45; G00 Z-1.45 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-1.5; G01 Z-1.5 X6.4; G00 Z-1.5; G00 Z-1.5 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-1.55; G01 Z-1.55 X6.4; G00 Z-1.55; G00 Z-1.55 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-1.6; G01 Z-1.6 X6.4; G00 Z-1.6; G00 Z-1.6 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-1.65; G01 Z-1.65 X6.4; G00 Z-1.65; G00 Z-1.65 X0;

G01 Z-1.7;	G00 Z-1.85 X0;	G01 Z-2.05;
G01 Z-1.7 X6.4;	G01 Z-1.9;	G01 Z-2.05 X6.4;
G00 Z-1.7;	G01 Z-1.9 X6.4;	G00 Z-2.05;
G00 Z-1.7 X0;	G00 Z-1.9;	G00 Z-2.05 X0;
G01 Z-1.75;	G00 Z-1.9 X0;	G01 Z-2.1;
G01 Z-1.75 X6.4;	G01 Z-1.95;	G01 Z-2.1 X6.4;
G00 Z-1.75;	G01 Z-1.95 X6.4;	G00 Z-2.1;
G00 Z-1.75 X0;	G00 Z-1.95;	G00 Z-2.1 X0;
G01 Z-1.8;	G00 Z-1.95 X0;	G01 Z-2.15;
G01 Z-1.8 X6.4;	G01 Z-2;	G01 Z-2.15 X6.4;
G00 Z-1.8;	G01 Z-2 X6.4;	G00 Z-2.15;
G00 Z-1.8 X0;		G00 Z-2.15 X0;
G01 Z-1.85;	G00 Z-2;	G01 X-3;
G01 Z-1.85 X6.4;	G00 Z-2 X0;	M02;
G00 Z-1.85;		

En este programa (código GM CNC), se pueden encontrar dos códigos principales: el comando 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 esta 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 64 mm de largo y un diámetro de 9.53 mm en todas las probetas (100 especímenes), se procede al taladrado también llamado barrenado. Se maquinaron un total de 100 cilindros del acero maraging 300.

4.3. TALADRADO (BARRENADO).

En el taladrado se procede a maquinar un barreno (perforación), 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 de giro baja en el husillo, 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 código G. El taladrado se ilustra en la Figura 4.5. donde se aprecian el primer paso que es una perforación pequeña y bien centrada con la broca de centros, para posteriormente poner una segunda broca con la que se obtiene la profundidad del barreno, Figura 4.6.



Figura 4.5. Maquinado con la broca de centros, en las probetas de acero maraging 300.



Figura 4.6. Barrenado de cilindros de maraging 300 con broca de 4.5 mm.

4.4. MACHUELIADO (ROSCA INTERNA).

El machueliado (roscas internas), es el proceso con el cual se hace una rosca interna al orificio o barreno en una pieza sólida, con el objetivo de ajustar un tornillo con rosca externa, ambas roscas deben coincidir en medidas para que sean compatibles y enrosquen bien. Este procedimiento se realiza con una herramienta de corte llamada machuelo, el cual consiste en una broca con rosca externa afilada que al introducir en el barreno y hacer girar el machuelo a la velocidad de giro adecuada, va generando los surcos necesarios para formar la rosca interna.

Con un machuelo, que es una herramienta para hacer roscas internas en un barreno, se realiza la rosca interna de los cilindros de acero maraging 300 como se muestra en la Figura 4.7. donde se ilustra el cilindro barrenado colocado en el husillo siendo penetrado por el machuelo con giros lentos y con lubricación. El machuelo se monta en el porta herramientas y este es el que gira, el procedimiento de machueliado es necesario para hacer una rosca para sujetar la probeta de ensayos ultrasónicos con un opresor roscado, para ello se hacen las roscas en los cilindros, con el objeto de sujetar las probetas en la máquina ultrasónica. 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 (3 pasos) se obtiene la rosca adecuada, destinada al opresor de rosca 5mm.



Figura 4.7. Machueleado en barras de acero maraging 300 para hacer una rosca interna de 5mm.

Con este proceso se obtuvieron 100 cilindros machueliados de acero maraging 300 con las siguientes dimensiones: 64 mm de largo, 9.53 mm de diámetro, un barreno roscado interno de 8 mm de profundidad y con una rosca milimétrica de 5 mm. Se muestran los cilindros machueliados (con rosca interna), en la Figura 4.8. A partir de los cilindros mostrados en la Figura 4.8., se procede a maquinar el arco en el centro de la probeta como se describe en el procedimiento denominado perfilado que a continuación se presenta y describe.



Figura 4.8. Cilindros roscados de acero maraging 300 (manufactura de probetas para ensayos de fatiga ultrasónica).

El proceso de manufactura de las roscas en los cilindros de acero maraging 300, es un trabajo manual, lento por las maniobras que implica el montar cada probeta al “chuck” del torno y montar 3 machuelos diferentes para cada una de las roscas (machuelo semicónico, cónico y plano), además de hacer giros con la precaución de no romper la herramienta dentro del cilindro, puesto que si se rompe, resulta casi imposible sacarlo sin dañar la probeta, con la consecuente pérdida de la probeta. Este proceso implica tiempos considerables y requiere de cuidados para obtener las tolerancias y las roscas bien centradas en el cilindro.

4.5. PERFILADO (TIPO RELOJ DE ARENA).

El perfilado es un procedimiento de manufactura, Figura 4.9., consistente en desprender material de la pieza con una herramienta de corte llamado buril para torno o fresa en el caso de las fresadoras o máquinas llamadas centros de maquinado que combinan las operaciones de torno y fresadora; así como las anteriores descritas en los apartados 4.1 hasta 4.5 de este Capítulo 4. El propósito fundamental de este procedimiento es crear formas curvadas en las piezas, de ahí su nombre de perfilado.

Para el caso de las probetas de acero maraging 300 que se manufacturaron en el taller de manufactura de la FIM anexo del laboratorio de fatiga cargo del director de tesis Dr. Gonzalo, fue necesario realizar un perfil tipo reloj de arena que funciona como concentrador de esfuerzos en la muestra de pruebas para determinar el esfuerzo y los ciclos a los cuales fractura en esta zona esbelta llamada “tipo reloj de arena”, en los procesos de manufactura por desprendimiento de material por una herramienta de corte perfilado. Este proceso consiste en realizar el cuello de la probeta con un centro esbelto de 3 mm de diámetro que

desciende hasta llegar a este con un radio de 20.175 mm; el mismo se lleva a cabo como se describe a continuación.

De manera general, se distinguen varios tipos de perfilados, que se pueden realizar con diferentes máquinas de corte, y con diferentes herramientas de corte, tipos y formas como se ilustra en la Figura 4.9. Esta imagen corresponde a la empresa SANDVIK Coromant proveedora u asesora de todo tipo de maquinados, especialista en herramientas de corte y procesos de manufactura por desprendimiento de material.



Figura 4.9. Tipos de perfilados, imagen de SANDVIK Coromant [30].

Para los cilindros de acero maraging 300 se requiere llevar a cabo un perfilado con los siguientes parámetros: un radio de 20.175 mm y una longitud de 20 mm y un cuello esbelto de 3 mm; estas dimensiones fueron obtenidas por diseño apoyados de un análisis modal en ANSYS 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 4.10. a) y b).

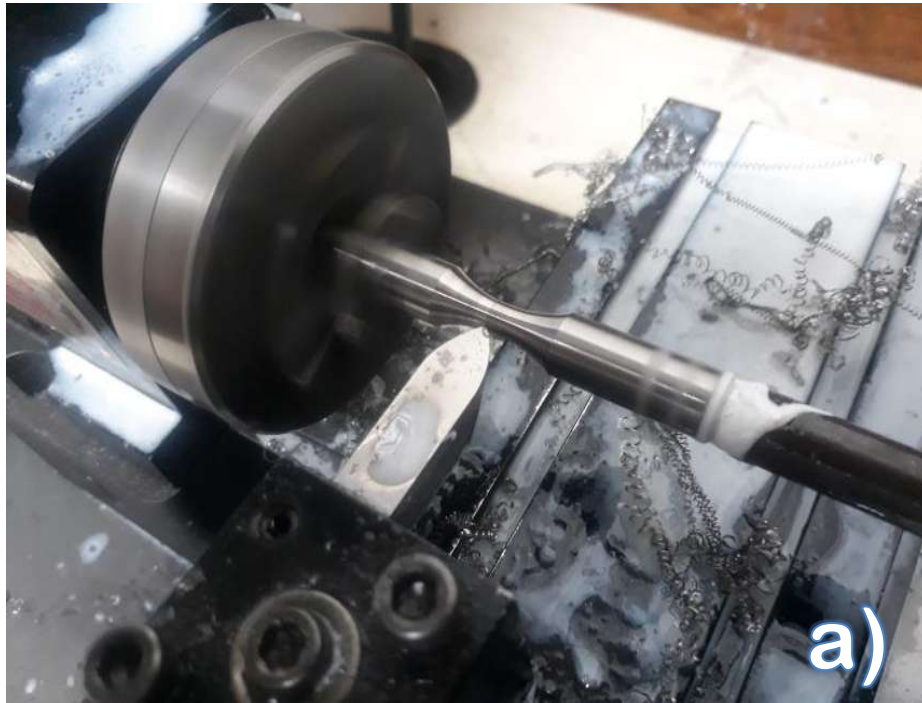


Figura 4.10. a) Perfilado del cuello de las probetas de acero maraging 300 en torno CNC de la FIM, UMSNH.



Figura 4.10. b) Perfilado del cuello de las probetas de acero maraging 300 en torno CNC de la FIM, UMSNH.

En este proceso se utilizó un código GM 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 .

4.5.1. CÓDIGO GM PARA EL PERFILADO (TIPO RELOJ DE ARENA).

Leer programa de izquierda a derecha.

%Probeta1 freq. 19990 (nombre del programa). G54;(coordenadas absolutas) G21;(unidades mm) M43; (Desbloqueo de torreta de herramientas) M03;(prender chuck) M08;(prender refrigerante) F60;	G03 X-2.75 Z22 R- 20.175;	G03 X-1.95 Z22 R- 20.175;
G00 X0 Z0;	G00 X-2.65 Z0; G03 X0.6 Z11 R-20.175; G03 X-2.65 Z22 R- 20.175;	G00 X-1.85 Z0; G03 X1.4 Z11 R-20.175; G03 X-1.85 Z22 R- 20.175;
G00 X-3.25 Z0; G03 X0 Z11 R-20.175; G03 X-3.25 Z22 R- 20.175;	G00 X-2.55 Z0; G03 X0.7 Z11 R-20.175; G03 X-2.55 Z22 R- 20.175;	G00 X-1.75 Z0; G03 X1.5 Z11 R-20.175; G03 X-1.75 Z22 R- 20.175;
G00 X-3.15 Z0; G03 X0.1 Z11 R-20.175; G03 X-3.15 Z22 R- 20.175;	G00 X-2.45 Z0; G03 X0.8 Z11 R-20.175; G03 X-2.45 Z22 R- 20.175;	G00 X-1.65 Z0; G03 X1.6 Z11 R-20.175; G03 X-1.65 Z22 R- 20.175;
G00 X-3.05 Z0; G03 X0.2 Z11 R-20.175; G03 X-3.05 Z22 R- 20.175;	G00 X-2.35 Z0; G03 X0.9 Z11 R-20.175; G03 X-2.35 Z22 R- 20.175;	G00 X-1.55 Z0; G03 X1.7 Z11 R-20.175; G03 X-1.55 Z22 R- 20.175;
G00 X-2.95 Z0; G03 X0.3 Z11 R-20.175; G03 X-2.95 Z22 R- 20.175;	G00 X-2.25 Z0; G03 X1 Z11 R-20.175; G03 X-2.25 Z22 R- 20.175;	G00 X-1.45 Z0; G03 X1.8 Z11 R-20.175; G03 X-1.45 Z22 R- 20.175;
G00 X-2.85 Z0; G03 X0.4 Z11 R-20.175; G03 X-2.85 Z22 R- 20.175;	G00 X-2.15 Z0; G03 X1.1 Z11 R-20.175; G03 X-2.15 Z22 R- 20.175;	G00 X-1.35 Z0; G03 X1.9 Z11 R-20.175; G03 X-1.35 Z22 R- 20.175;
G00 X-2.75 Z0; G03 X0.5 Z11 R-20.175;	G00 X-2.05 Z0; G03 X1.2 Z11 R-20.175; G03 X-2.05 Z22 R- 20.175;	G00 X-1.25 Z0; G03 X2 Z11 R-20.175; G03 X-1.25 Z22 R- 20.175;
	G00 X-1.95 Z0; G03 X1.3 Z11 R-20.175;	G00 X-1.15 Z0; G03 X2.1 Z11 R-20.175;

G03 X-1.15 Z22 R- 20.175;	G03 X-0.65 Z22 R- 20.175;	G03 X-0.15 Z22 R- 20.175;
G00 X-1.05 Z0; G03 X2.2 Z11 R-20.175; G03 X-1.05 Z22 R- 20.175;	G00 X-0.55 Z0; G03 X2.7 Z11 R-20.175; G03 X-0.55 Z22 R- 20.175;	G00 X-0.05 Z0; G03 X3.2 Z11 R-20.175; G03 X-0.05 Z22 R- 20.175;
G00 X-0.95 Z0; G03 X2.3 Z11 R-20.175; G03 X-0.95 Z22 R- 20.175;	G00 X-0.45 Z0; G03 X2.8 Z11 R-20.175; G03 X-0.45 Z22 R- 20.175;	G00 X-0 Z0; G03 X3.3 Z11 R-20.175; G03 X-0 Z22 R-20.175;
G00 X-0.85 Z0; G03 X2.4 Z11 R-20.175; G03 X-0.85 Z22 R- 20.175;	G00 X-0.35 Z0; G03 X2.9 Z11 R-20.175; G03 X-0.35 Z22 R- 20.175;	G00 X-0 Z0; G03 X3.4 Z11 R-20.175; G03 X-0 Z22 R-20.175;
G00 X-0.75 Z0; G03 X2.5 Z11 R-20.175; G03 X-0.75 Z22 R- 20.175;	G00 X-0.25 Z0; G03 X3 Z11 R-20.175; G03 X-0.25 Z22 R- 20.175;	G00 X-0 Z0; G03 X3.5 Z11 R-20.175; G03 X-0 Z22 R-20.175;
G00 X-0.65 Z0; G03 X2.6 Z11 R-20.175;	G00 X-0.15 Z0; G03 X3.1 Z11 R-20.175;	G01 X-3; M02;

La programación de este código GM es 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 22 mm y un R radio de 20.175 mm. Este perfilado se lleva a cabo en dos secuencias: la primera empezando de izquierda a derecha haciendo la mitad del arco 11 mm, iniciando de la orilla del extremo izquierdo, la segunda iniciando a la mitad de la probeta hasta completar la segunda parte del arco los 21 mm, hasta la orilla derecha del otro extremo del arco.

Con estos procesos de maquinado se obtienen las probetas terminadas, Figura 4.11., que fueron utilizadas en ensayos de fatiga ultrasónica, las que cumplen con las dimensiones solicitadas por el diseño



Figura 4.11. *Probetas maquinadas y terminadas de acero maraging 300.*

Para verificar el dimensionamiento correcto de las muestras manufacturadas, se midieron las dimensiones durante el proceso, para verificar la buena concordancia, Figura 4.12., con ayuda de instrumentos de medición precisa, como el vernier digital, para verificar los valores dimensionales de las probetas, que se aproximen a los valores de diseño mostrados en la Figura 3.5.



Figura 4.12. *Medida de las dimensiones en vernier electrónico de las probetas de acero maraging.*

CAPÍTULO V.- ENSAYOS DE FATIGA ULTRASÓNICA EN EL ACERO MARAGING 300.

Se llevaron a cabo ensayos partiendo de 20 volts en el generador piezoeléctrico, que corresponde un esfuerzo de 389 MPa, 25 volts correspondiente a 486 MPa. y con 30 volts que representa un esfuerzo de 584 MPa. A continuación, se presenta la Tabla 5.1 con los ensayos realizados, los mismos que se someten posteriormente al análisis por microscopia electrónica, con objeto de observar algunos factores de interés para el estudio de fatiga en el acero maraging 300.

Tabla 5.1. Ensayos de fatiga ultrasónica del acero maraging 300 a condiciones ambiente.

			TIEMPO DE ENSAYO A LA FRACTURA				
No.	Voltage (volts)	Esfuerzo (MPa.)	Horas	Minutos	Segundos	Ciclos	Temp. °C
1	20	389	109	6550.11	393006.5	7,860,129,274	
4	20	389	72.037	4321.42	259285.5	5,185,709,806	
5	20	389	1.01	60.6	3639.52	72,790,463.38	
6	20	389	6.136	368.2	22092.54	441,850,912.42	
19	20	389	18.55	1113		1,335,999,810.68	58.7
22	20	389	4.86	291		350,225,279.99	56.9
23	20	389	1.83	110.13		132,155,820.96	76
2	25	486	1.815	108	6535.8	130,717,596.6	
3	25	486	1.364	81.84	4910.55	98,211,117.35	
11	25	486	0.3585	21.51	1291	25,813,979.74	
12	25	486	0.008	0.52	31.49	629,760.617	
13	25	486	0.113	6.769	406.2	8,123,119.57	
14	25	486	0.121	7.26	435.8	8,715,359.45	
17	25	486	0.006	0.36	21.64	432,800	
20	25	486	0.093	5.58		6,701,739.65	58.3
7	30	584	0.0409	2.45	147.3	2,946,779.58	
8	30	584	0.0318	1.912	114.7	2,294,591.24	
9	30	584	0.0871	5.227	313.6	6,272,700	
10	30	584	0.1113	6.68	400.9	8,017,540.07	
18	30	584	0.004	0.25	15	301,619.95	
21	30	584	0.0789	4.73		5,681,140.01	67.3

En la Figura 5.1 se presenta la fractura en la probeta, la misma que ocurre en la parte estrecha de la probeta o cuello. Este resultado es congruente con los resultados de simulación numérica, donde se obtiene un máximo esfuerzo en la parte del cuello y mayores desplazamientos en los extremos de la misma, con un desplazamiento nulo en la parte central.

En estos ensayos en fatiga ultrasónica se observó frecuentemente una iniciación de grieta en la parte central de la muestra, aunque no una separación a partir de la fisura; con objeto de llevar a cabo el análisis por microscopia electrónica de barrido en la superficie de fractura, se procedió a la separación con el mayor cuidado para evitar daños en la superficie de fractura.



Figura 5.1. *Probeta ensayada con fractura por fatiga ultrasónica, acero maraging 300.*

La calibración de la muestra de prueba en el extremo libre fue implementada por un sensor de proximidad inductivo que tiene una resolución de $\pm 1 \mu\text{m}$, trabajando a 1.5 KHz. Todas las pruebas se llevaron a cabo a temperatura ambiente (cercana a 25°C), con una humedad ambiental entre 35 y 45% y una relación de carga completamente invertida $R = -1$.

La secuencia para la prueba de fatiga ultrasónica ha sido la siguiente: inicio de prueba con 10 volts en el generador piezoeléctrico (voltaje mínimo), después incremento de 1 volt cada segundo hasta alcanzar el valor de carga predeterminada.

En condiciones de resonancia se desarrolla una onda elástica estacionaria a lo largo de la muestra de prueba, generando máxima tensión en la sección del cuello y máximos desplazamientos en los dos extremos. La evolución de la tensión y el desplazamiento a lo largo de la muestra de prueba se ha obtenido mediante simulación numérica, como se muestra en la Figura 5.2 Se obtuvo una relación lineal entre el desplazamiento en los extremos de la muestra y la alta tensión de Von Mises inducida en la sección del cuello: 13.5 mm de desplazamiento (correspondientes a 10 volts) inducen 11.5 MPa de tensión. La máxima tensión de Von Mises en el cuello de la probeta fue de 617 MPa, correspondiente a un máximo desplazamiento en los extremos de la misma de $\pm 50 \mu\text{m}$.

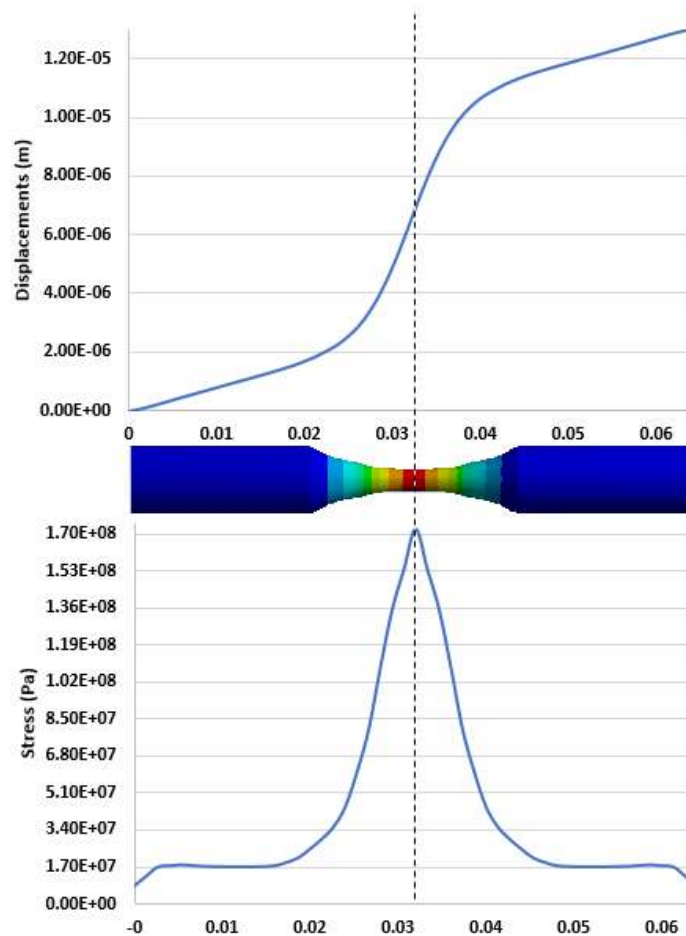


Figura 5.2. Simulación numérica desplazamiento y tensión bajo resonancia, maraging 300.

Se llevó a cabo un análisis modal numérico para determinar la frecuencia natural de vibración en dirección longitudinal para la muestra de prueba. La Figura 5.3. presenta el resultado de este análisis modal: 20088 Hz de frecuencia natural para este acero usando las propiedades mecánicas de la Tabla 5.2. La Figura 5.4. presenta una imagen de la probeta conectada a la máquina de fatiga ultrasónica.

Tabla 5.2. Principales propiedades mecánicas de Maraging 300

Density	σ_y	σ_u	Poisson ratio	Elasticity Module
[Kg/m ³] 8100	[MPa] 1400- 2400	[MPa] 2500	0.3	[GPa] 190

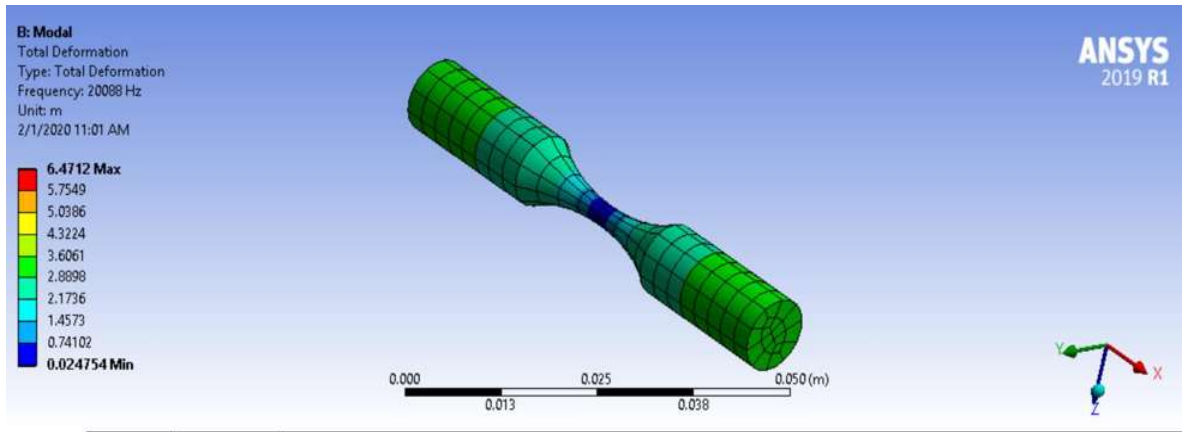
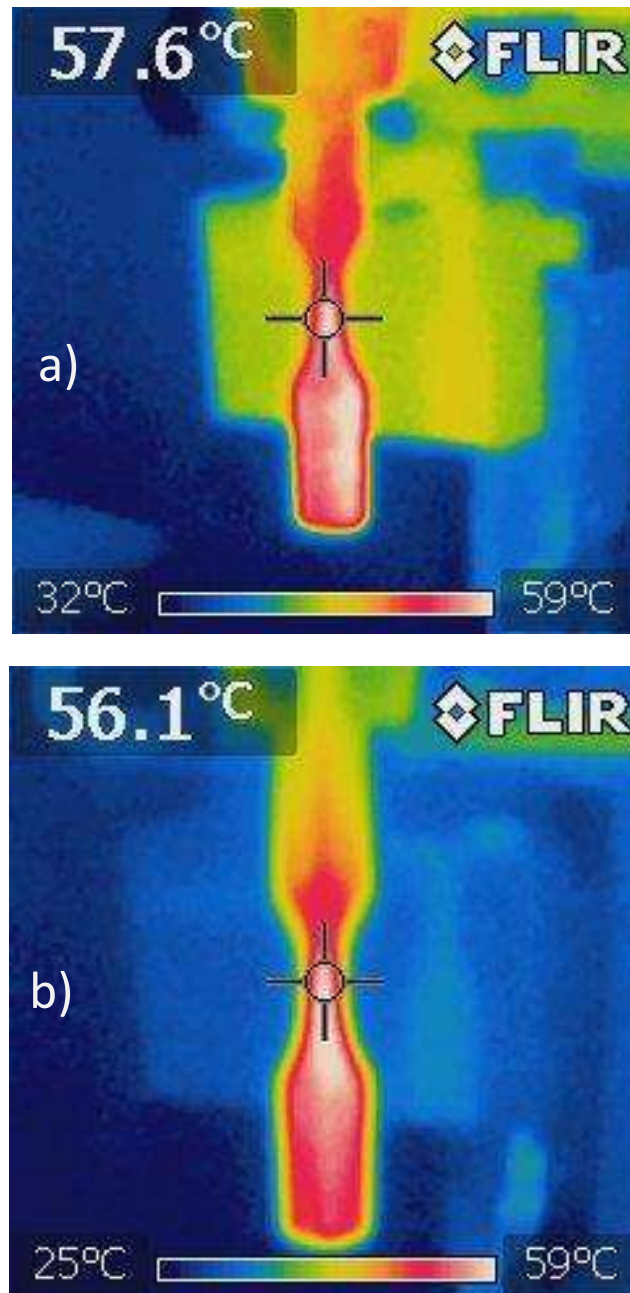


Figura 5.3. Análisis Modal del acero maraging 300 con frecuencia 20088hz.



Figura 5.4. Probeta de acero maraging 300, sujeta a la máquina de ensayos de fatiga ultrasónica.

En las pruebas de fatiga ultrasónica se produce una disipación de energía importante debido a la frecuencia de vibración muy alta que está relacionada con el fenómeno de amortiguación. Una consecuencia directa es el aumento de temperatura causado por la excitación de alta frecuencia, particularmente en la sección del cuello de la muestra. La temperatura en esta zona fue registrada por una cámara termográfica para diferentes niveles de estrés y para los tres tipos de carga 20, 25 y 30 volts, Figura 5.5. Se observa que la máxima temperatura coincide con la máxima tensión localizado en el punto medio a lo largo de la sección de cuello de la muestra [31].



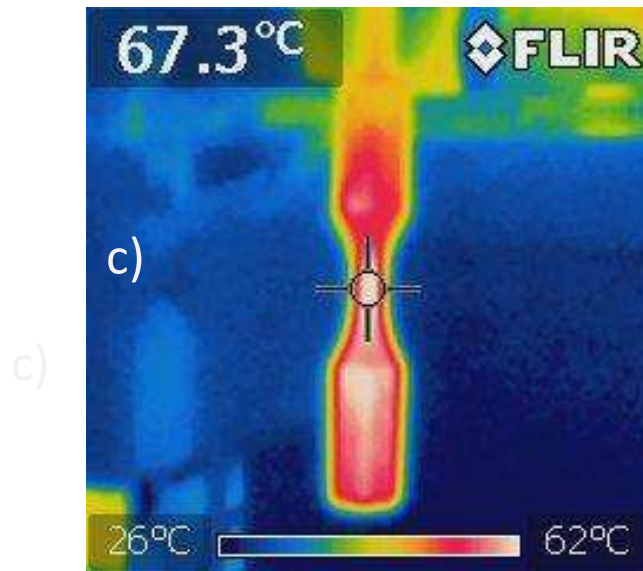


Figura 5.5. Imágenes termográficas sobre material durante la prueba de fatiga ultrasónica (a) 20 V – 389 MPa., (b) 25 V – 486.25 MPa., (c) 30 V – 583.5 MPa.

La temperatura máxima 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 de la muestra a la máquina de fatiga ultrasónica [32, 33]. En los ensayos de fatiga ultrasónica se obtiene el número de ciclos listados en la Tabla 5.1.

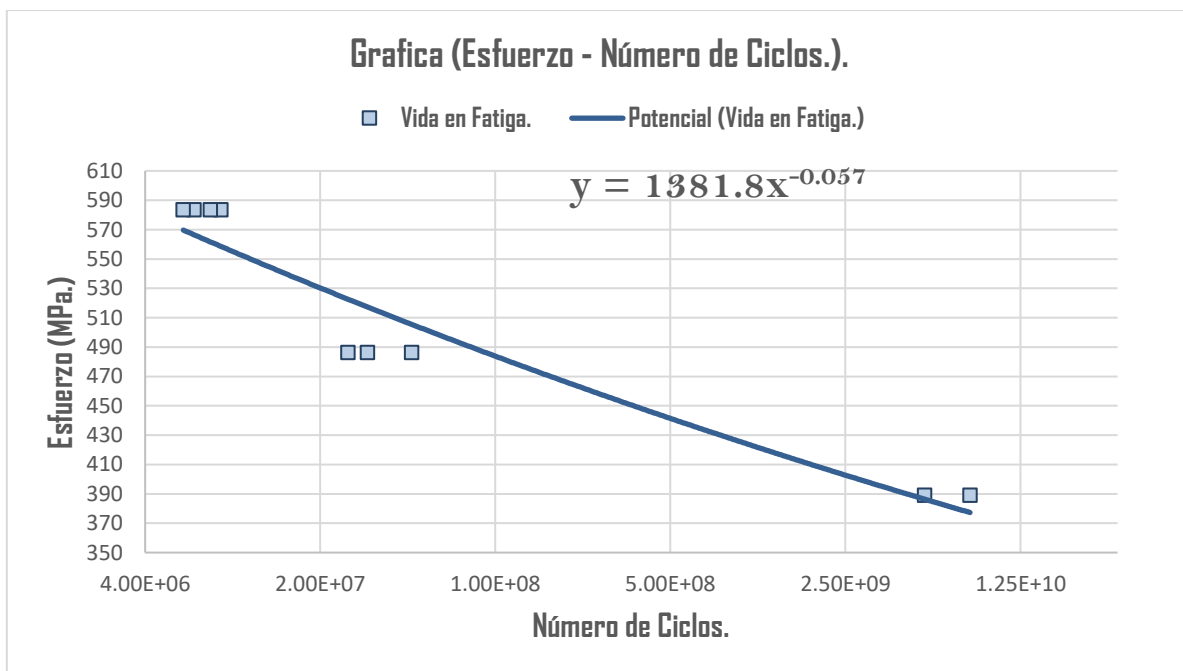


Figura 5.6. Gráfica Esfuerzo – Numero de ciclos del acero maraging 300, como recibido del proveedor.

Un valor de voltaje en el generador piezoeléctrico está relacionado con el desplazamiento inducido en los extremos de la probeta; que a su vez se relacionan con el esfuerzo máximo inducido en el cuello de la misma. Los valores de esfuerzo máximo registrado en el cuello de la probeta contra el número de ciclos de vida a diferentes cargas aplicadas, se grafican en el referencial: esfuerzo contra número de ciclos, como se ilustra en la Figura 5.6., para este tipo de probeta.

5.1. ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X DE ENERGÍA DISPERSIVA (EDS, TAMBIÉN ABREVIADA EDX O XEDS).

La espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS, también abreviada EDX o XEDS), es una técnica analítica que permite la caracterización química/elemental de los materiales. Una muestra excitada por una fuente de energía (como el haz de electrones de un microscopio electrónico) disipa parte de la energía absorbida expulsando un electrón del núcleo. Un electrón de capa exterior de mayor energía continúa ocupando su posición, liberando la diferencia de energía como un rayo X que tiene un espectro característico basado en su átomo de origen. Esto permite el análisis de composición de un volumen de muestra específico excitado por la fuente de energía. La posición de los picos en el espectro identifica el elemento, mientras que la intensidad de la señal corresponde a la concentración del elemento [34].

Se realizó un análisis por EDS a las fracturas por fatiga ultrasónica de las muestras ensayadas del acero maraging 300 con la intención de analizar las posibles inclusiones en el material que pudieron generar la iniciación de la grieta en este acero durante los ensayos. Se analizaron probetas en los tres niveles de carga practicados. Los niveles de carga que se probaron para llevar las probetas hasta la fractura fueron los previamente mencionados: 20 volts correspondiente a un esfuerzo de 389 MPa., 25 volts que corresponde a un esfuerzo de 486 MPa. y por último el nivel más alto de 30 volts, que corresponde un esfuerzo de 584 MPa. Los tres niveles de carga están especificados en la Tabla 5.1, donde se encuentran el número de ensayos por nivel y el número de ciclos hasta la fractura del espécimen, obteniendo con esta la gráfica esfuerzo-número de ciclos de la Figura 5.6.

Con el análisis de imágenes y tablas obtenidas por EDS, se obtiene la composición química del material base y la composición química de las inclusiones, para las muestras de los tres niveles de carga antes mencionados.

El primer caso corresponde al espécimen de prueba ensayado a 20 volts con un esfuerzo de 389 MPa. La Figura 5.7. presenta la superficie de fractura de un espécimen a este nivel de carga: no se observa una inclusión en el centro del “ojo de pescado”, como se le conoce al círculo formado por la fractura, Figura 5.9 a). La Tabla 5.3. contiene la composición química del acero maraging 300, que concuerda con los análisis de EDS: el material ensayado

coincide con la composición química descrita en el certificado de compra del material y enunciado en la Tabla 5.2.

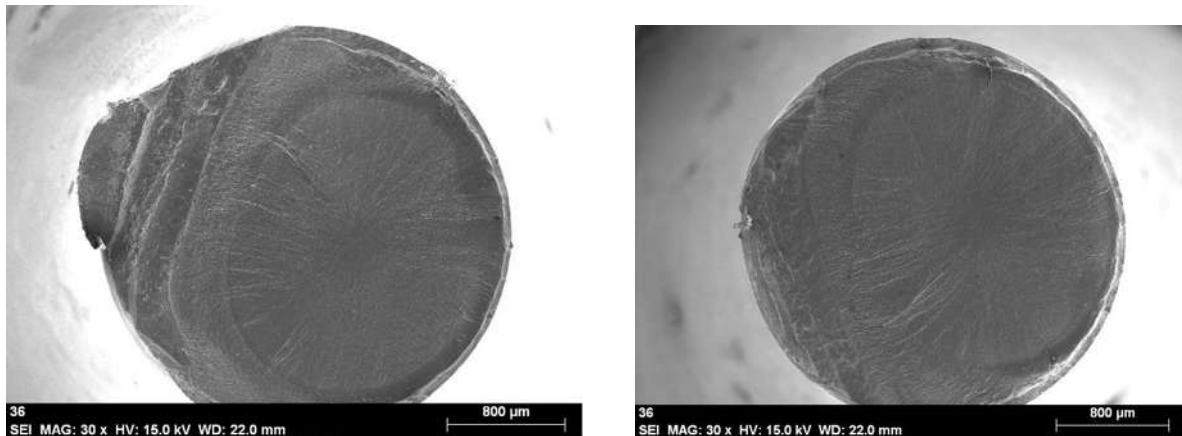


Figura 5.7. Análisis por microscopia electrónica y EDS del espécimen de prueba ensayado a 20 volts correspondiente a un esfuerzo de 389 Mpa.

La composición química obtenida por EDS de este espécimen se presenta en la Figura 5.8; mientras que la lista de componentes se ilustra en la Tabla 5.3.

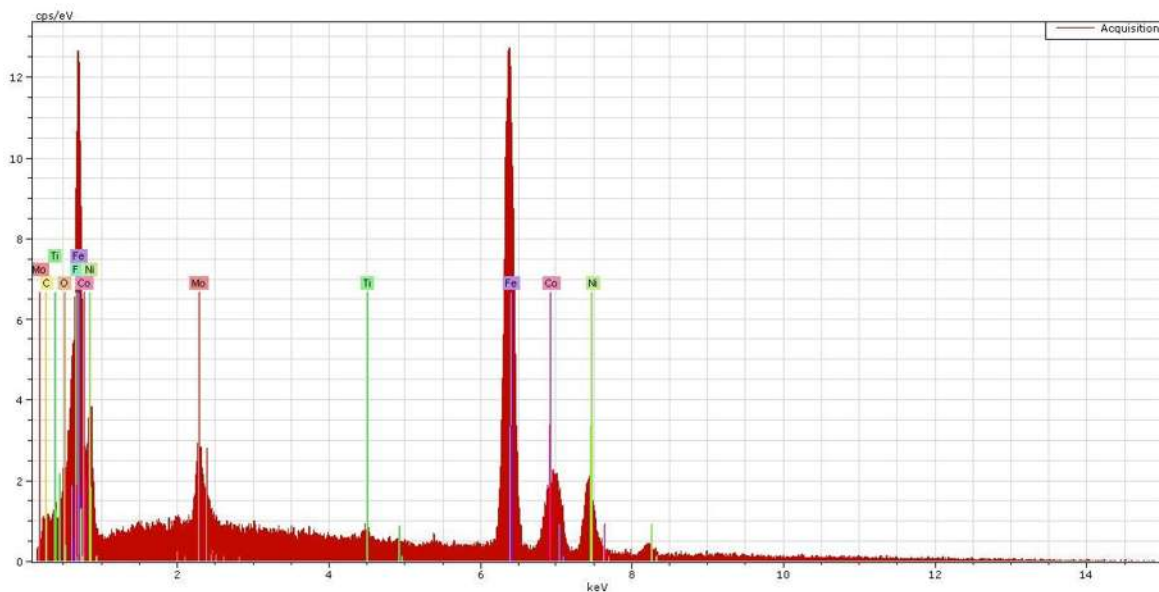


Figura 5.8. Composición química obtenida por análisis EDS del espécimen 36 ensayado a 20 volts del acero maraging 300.

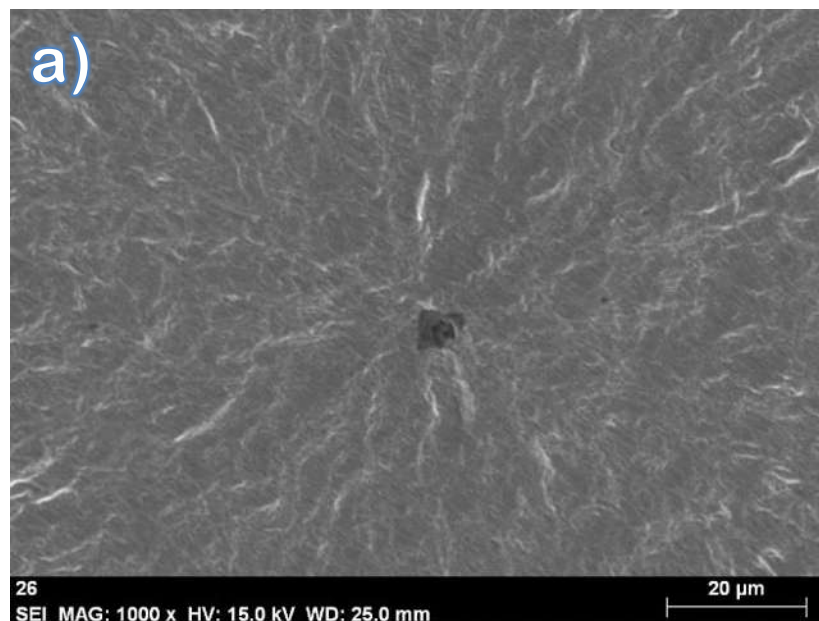
Tabla 5.3. Composición química obtenida por análisis EDS del espécimen de prueba 36 ensayado a 20 volts del acero maraging 300.

Bruker AXS Microanalysis GmbH, Germany

Results Acquisition
Date: 8/24/2021

Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Carbon	K-series	1.333236	1.280885	5.603971	0.27784
Oxygen	K-series	1.933025	1.857123	6.099608	3.172533
Iron	K-series	64.29916	61.77438	58.12643	1.943958
Cobalt	K-series	12.96321	12.45419	11.10505	0.464422
Nickel	K-series	18.50498	17.77836	15.91723	0.655817
Molybdenum	L-series	4.128732	3.966612	2.172627	0.18655
Titanium	K-series	0.924755	0.888443	0.975081	0.066886
Sum:		104.0871	100	100	

Mediante un segundo análisis focalizado sobre la inclusión de inicio de fractura, se distinguen dos zonas: la zona 1 correspondiente a la inclusión, y la zona 2 correspondiente al material de base, Figure 5.9 b). La composición química de la inclusión, obtenida por EDS, se presenta en la Figura 5.10., y la composición química del material base maraging 300 obtenida por EDS, se ilustra en la Figura 5.11. La inclusión que aparece en la Figuras 5.9. corresponde a un compuesto de titanio-nitrógeno con calcio y molibdeno (mayor contenido de titanio).



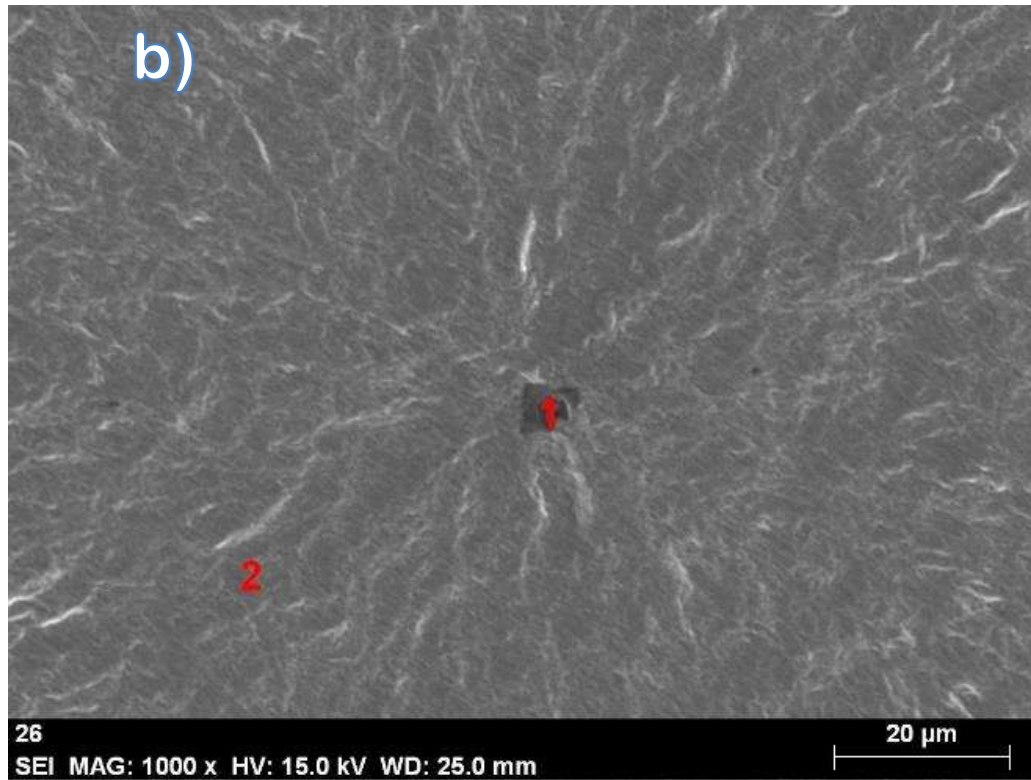


Figura 5.9. Inclusión de Titanio en fractura del acero maraging 300, ensayado en fatiga ultrasónica.

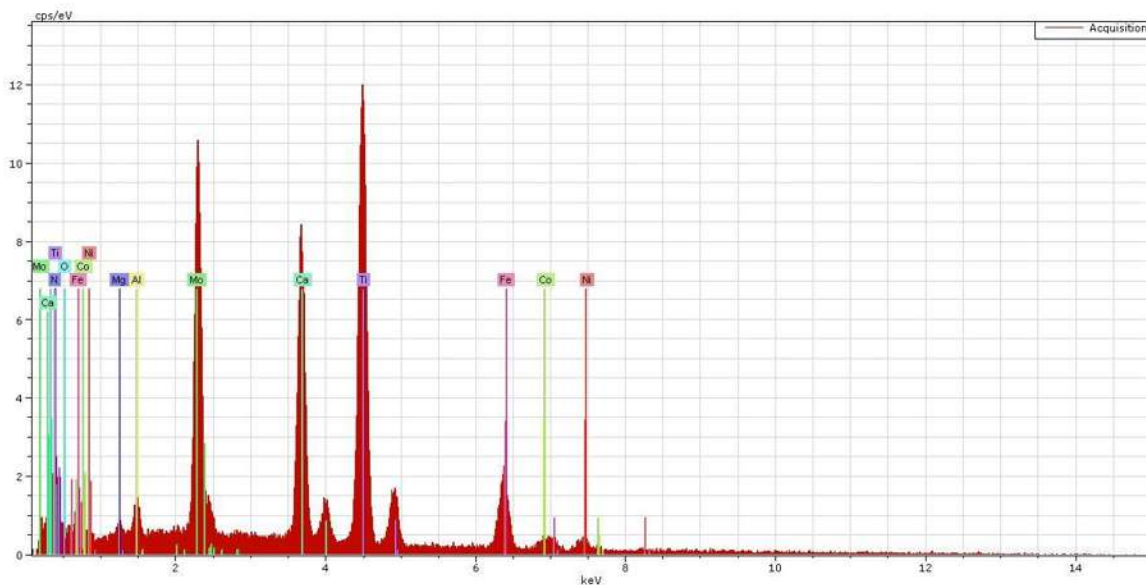


Figure 5.10. Composición química de la inclusión de titanio, en probetas de acero maraging 300 analizadas por EDS en un MEB (Microscopio Electrónico de Barrido).

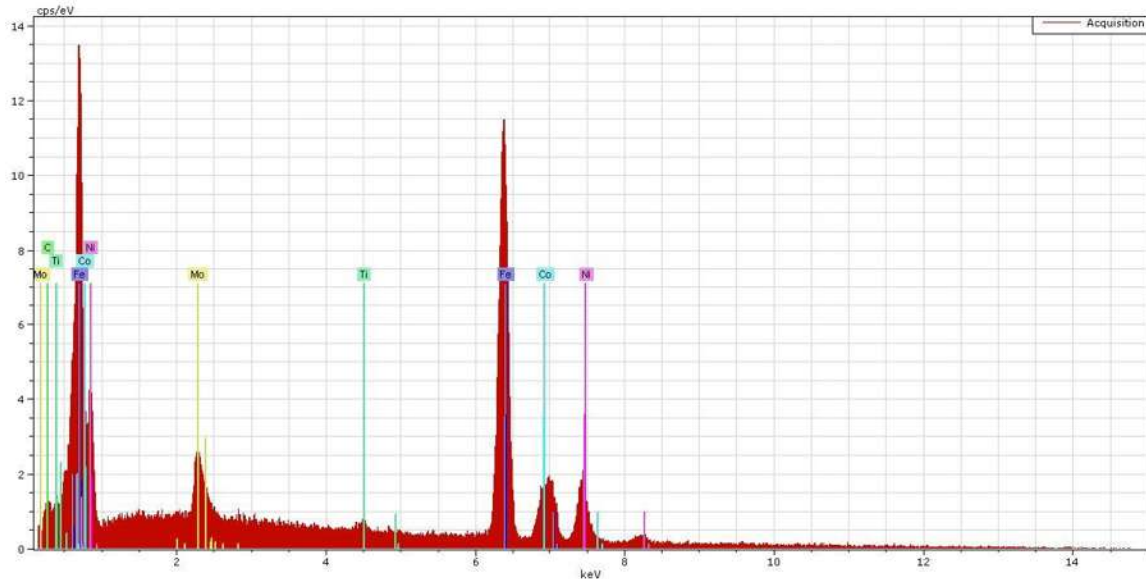


Figura 5.11. Composición química del material de base maraging 300, analizadas por EDS en un MEB (Microscopio Electrónico de Barrido).

El análisis EDS listado en la Tabla 5.4., aparece la composición química de la inclusión con un contenido máximo de Titanio y una concentración en peso del 50%; una concentración del 20% de Calcio, del 21.5% en el Molibdeno. Además, la Tabla 5.5. presenta la composición química del material de base acero maraging 300, con objeto de comparación: la composición predominante en el material base es: Hierro, Cobalto y Níquel, principalmente.

Tabla 5.4. Composición química de la inclusión en la probeta fracturada por fatiga ultrasónica del acero maraging 300.

Bruker AXS Microanalysis GmbH, Germany				8/24/2021	
Results	Acquisition				
Date:	8/24/2021				
Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Nitrogen	K-series	8.146086	6.20062	18.99499	13.34269
Oxygen	K-series	3.102249	2.361364	6.332844	5.171838
Aluminium	K-series	0.685915	0.522103	0.830289	0.068729
Calcium	K-series	20.3044	15.45526	16.54665	0.65022
Titanium	K-series	49.05656	37.34077	33.4633	1.471088
Iron	K-series	18.42821	14.02714	10.77728	0.628269
Cobalt	K-series	4.247191	3.232868	2.353789	0.218308
Nickel	K-series	5.682429	4.32534	3.162064	0.279151
Molybdenum	L-series	21.57887	16.42536	7.346065	0.801876
Magnesium	K-series	0.14343	0.109176	0.192739	0.041115
Sum:		131.3753	100	100	

Tabla 5.5. La composición química del acero maraging 300 en la probeta fracturada por fatiga ultrasónica, analizada por espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS).

Bruker AXS Microanalysis GmbH, Germany		8/24/2021
Results	Acquisition	
Date:	8/24/2021	

Element	series	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Iron	K-series	69.03207	63.35435	62.81176	2.085946
Cobalt	K-series	13.97908	12.82934	12.05337	0.499417
Nickel	K-series	19.75332	18.12866	17.10176	0.699755
Molybdenum	L-series	4.028182	3.696874	2.133533	0.184666
Titanium	K-series	1.034134	0.949079	1.097521	0.071542
Carbon	K-series	1.135053	1.041698	4.802052	0.249007
Sum:		108.9619	100	100	

Las inclusiones no-metálicas incorporadas durante la manufactura de los aceros maraging, son la causa principal de falla en estos materiales, cuando se someten a ensayos de fatiga mecánica. Para el caso antes mencionado, una inclusión del tipo titanio – nitrógeno está en el origen de falla de este material bajo ensayos de fatiga ultrasónica.

5.2. MEDIDA DE LA SUPERFICIE DE RUGOSIDAD R_a , EN LAS PROBETAS DE ACERO MARAGING 300.

El parámetro R_a – Rugosidad media aritmética: Conocido también como CLA (Center Line Average, en Inglaterra), AA (Aritmetical Average de U.S.A.) y h_m (término usado por las normas IRAM). Es definido como la media aritmética de los valores absolutos de las coordenadas de los puntos del perfil de rugosidad en relación a la Línea Media dentro de la longitud de medición L_m , Figura 5.12.

Esta medida puede ser definida también como: siendo (a) la altura de un rectángulo cuya área sea igual a la suma absoluta de las áreas delimitadas entre el perfil de rugosidad y la Línea Media, siendo la longitud de medición L_m

$$R_a = \frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} |y| dx \quad (5.1)$$

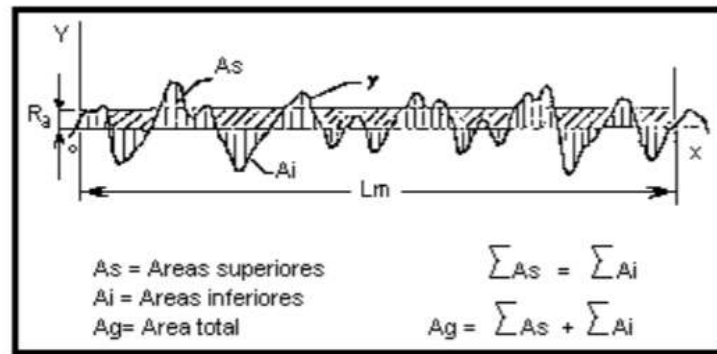


Figura 5.12. Medición del parámetro Ra de rugosidad [35].

Por aproximación se puede determinar el valor de Ra por medio de un cierto número de ordenadas de puntos del perfil.

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y| \quad (5.2)$$

y = ordenada, n = número de ordenadas consideradas

El valor de “ n ” es prefijado de acuerdo con el tipo de aparato. La medida del valor Ra puede ser expresada en μm o en μin (sistema métrico o en pulgadas respectivamente).

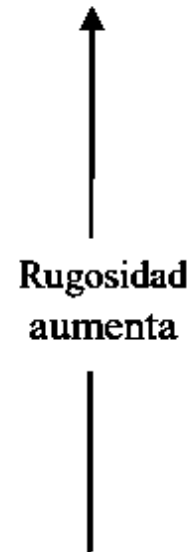
Tabla 5.6. Medidas de del parámetro de rugosidad Ra para algunas aplicaciones típicas [36].

Ra [μm]	Aplicaciones típicas de rugosidad superficial
0,01	Bloques patrón – Reglas de alta precisión – Guías de aparatos de medida de alta precisión
0,02	Aparatos de precisión- Superficies de medida en micrómetros y calibres de precisión
0,03	Calibradores. Elementos de válvulas de alta presión hidráulica
0,04	Agujas de rodamientos. Superacabado de camisas de block de motores
0,05	Pistas de rodamientos. Piezas de aparatos control de alta precisión
0,06	Válvulas giratorias de alta presión. Camisas block de motor.
0,08	Rodamientos de agujas de grandes rodamientos
0,1	Asientos cónicos de válvulas. Ejes montados sobre bronce, teflón, etc. a velocidades medias. Superficies de levas de baja velocidad.
0,15	Rodamientos de dimensiones medias. Protectores de rotores de turbinas y reductores.
0,2	Anillos de sincronizados de cajas de velocidades
0,3	Flancos de engranaje. Guías de mesa de máquinas-herramientas
0,4	Pistas de asientos de agujas en crucetas.
0,6	Válvulas de esfera. Tambores de freno.
1,5	Asientos de rodamiento en ejes c/carga pequeña. Ejes-agujeros de engranajes. Cabezas de pistón
2	Superficies mecanizadas en general, ejes, chavetas, alojamientos, etc.
3	Superficies mecanizadas en general. Superficies de referencia. Superficies de apoyo
4	Superficies desbastadas
5 a 15	Superficies fundidas y estampadas
>15	Piezas fundidas, forjadas y laminadas.

La norma DIN 4769, para una mayor facilidad de especificación y control, divide en grados los diferentes valores de Ra en μm como muestra la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Medidas de del parámetro de rugosidad Ra, según la norma DIN 4769 [37].

Ra [μm]	N° de Grado de Rugosidad
50	N12
25	N11
12,5	N10
6,3	N9
3,2	N8
1,6	N7
0,8	N6
0,4	N5
0,2	N4
0,1	N3
0,05	N2
0,025	N1



La Table 5.8. presenta la relación de equivalencias entre indicaciones a través de triángulos de acabado y valores de Ra y aplicaciones.

Tabla 5.8. Indicaciones de diseño y rugosidad superficial [38].

RELACION ENTRE INDICACIONES EN DISEÑO Y RUGOSIDAD SUPERFICIAL			
Indicación en Diseño	Ra (CLA) [μm]	Exigencias de calidad superficial	Ejemplos de aplicación
	0,1	Fines especiales	Superficies de medición de calibres. Ajustes de presión no desmontables, superficies de presión alta, fatigadas.
	0,10-0,25-0,4	Exigencia máxima	
	0,6-1-1,6	Alta exigencia	Superficies de deslizamiento muy fatigadas, ajustes de presión desmontables
	2,5 – 4 – 6	Exigencia media	Piezas fatigadas por flexión o torsión, ajustes normales de deslizamiento y presión.
	10 – 16 – 20	Poca exigencia	Ajustes fijos sin transmisión de fuerza, ajustes leves, superficies sin mecanizado, prensados con precisión.
	40 – 60 – 100	Sin exigencia particular	Superficies desbastadas, fundidas a presión
	160 – 250 – 400 800 – 1000	Superficies en bruto	Piezas fundidas, estampadas o forjadas.

En el desarrollo de esta tesis, se realizaron medidas de rugosidad Ra por medio de un rugosímetro digital; se midieron la mayoría de muestras del acero maraging 300 que se

utilizaron en pruebas de fatiga ultrasónica. La Figura 5.13. muestra la medición de la rugosidad para el parámetro Ra, con el valor promedio de $Ra=0.45 \mu m$.



Figura 5.13. Medición del parámetro de rugosidad Ra, en la probeta de acero maraging 300, utilizada en pruebas de fatiga ultrasónica.

CAPÍTULO VI. ENSAYO DE TRACCIÓN DEL ACERO AERONÁUTICO MARAGING 300.

Un propósito principal en el desarrollo de esta tesis de Doctorado, es la investigación de las propiedades en el material de ensayo. Con este motivo se llevaron a cabo ensayos de tracción para conocer el valor del esfuerzo a la tracción medido en el material de ensayo, maraging 300. Los ensayos de tracción se llevaron a cabo en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH, mediante una máquina de tracción con desplazamientos constantes controlados.

El ensayo de tracción en un material consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la misma. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Las velocidades de deformación en un ensayo de tensión suelen ser muy pequeñas, comprendidas entre $\varepsilon = 10^{-4}$ a 10^{-2} s^{-1} .

En un ensayo de tracción pueden determinarse diversas características de los materiales elásticos:

- **Módulo de elasticidad** o Módulo de Young, que cuantifica la proporcionalidad anterior. Es el resultado de dividir la tensión por la deformación unitaria, dentro de la región elástica de un diagrama esfuerzo-deformación.
- **Coefficiente de Poisson**, que cuantifica la razón entre el alargamiento longitudinal y el acortamiento de las longitudes transversales a la dirección de la fuerza.
- **Límite de proporcionalidad**: valor de la tensión por debajo de la cual el alargamiento es proporcional a la carga aplicada.
- **Límite de fluencia** o límite elástico aparente: valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la cedencia o fluencia. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada.
- **Límite elástico** (límite elástico convencional o práctico): valor de la tensión a la que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.) en función del extensómetro empleado. Es la máxima tensión aplicable sin que se produzcan deformaciones permanentes en el material.
- Carga de rotura o **resistencia a tracción**: carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta.

- **Alargamiento de rotura:** incremento de longitud que ha sufrido la probeta. Se mide entre dos puntos cuya posición está normalizada y se expresa en tanto por ciento.
- **Longitud calibrada:** es la longitud inicial de la parte de una probeta sobre la que se determina la deformación unitaria o el cambio de longitud y el alargamiento (este último se mide con un extensómetro).
- **Reducción de área y estricción:** La **reducción de área** de la sección transversal es la diferencia entre el valor del área transversal inicial de una probeta de tensión y el área de su sección transversal mínima después de la prueba. En el rango elástico de tensiones y deformaciones en área se reduce en una proporción dada por el módulo de Poisson. Para un sólido lineal e isótropo, en un ensayo de tracción convencional, dicha reducción viene dada por:

$$A = A_o \left(1 - \nu \frac{\sigma}{E}\right)^2 \quad (6.1)$$

Los parámetros en la ecuación 6.1 representan lo siguiente: A : Área reducida.

- A_o : Área Inicial.
- ν : Coeficiente de Poisson.
- σ : Tensión en dirección longitudinal de la pieza.
- E : Modulo de Young.

Una vez superado el límite de fluencia, se llega a un punto caracterizado por la reducción elástica anterior asociada al efecto de Poisson, se produce la llamada estricción, que es un fenómeno de plasticidad.

Normalmente, el límite de proporcionalidad no suele determinarse ya que carece de interés para los cálculos. Tampoco se calcula el Módulo de Young, ya que éste es característico del material; entonces, la mayoría de los aceros tienen un módulo de elasticidad cercano, aunque sus resistencias puedan ser muy diferentes. Los datos obtenidos en el ensayo deben ser suficientes para determinar esas propiedades, y otras que se pueden determinar con base en ellas. Por ejemplo, la ductilidad se puede obtener a partir del alargamiento y de la reducción de área [39], [40].

En la figura 6.1. se muestra el gráfico representativo en un ensayo de tracción, el cual consta de esfuerzo contra la deformación, que muestra el comportamiento de los materiales en tres zonas diferentes, zona elástica, zona elástico – plástica y zona plástica.

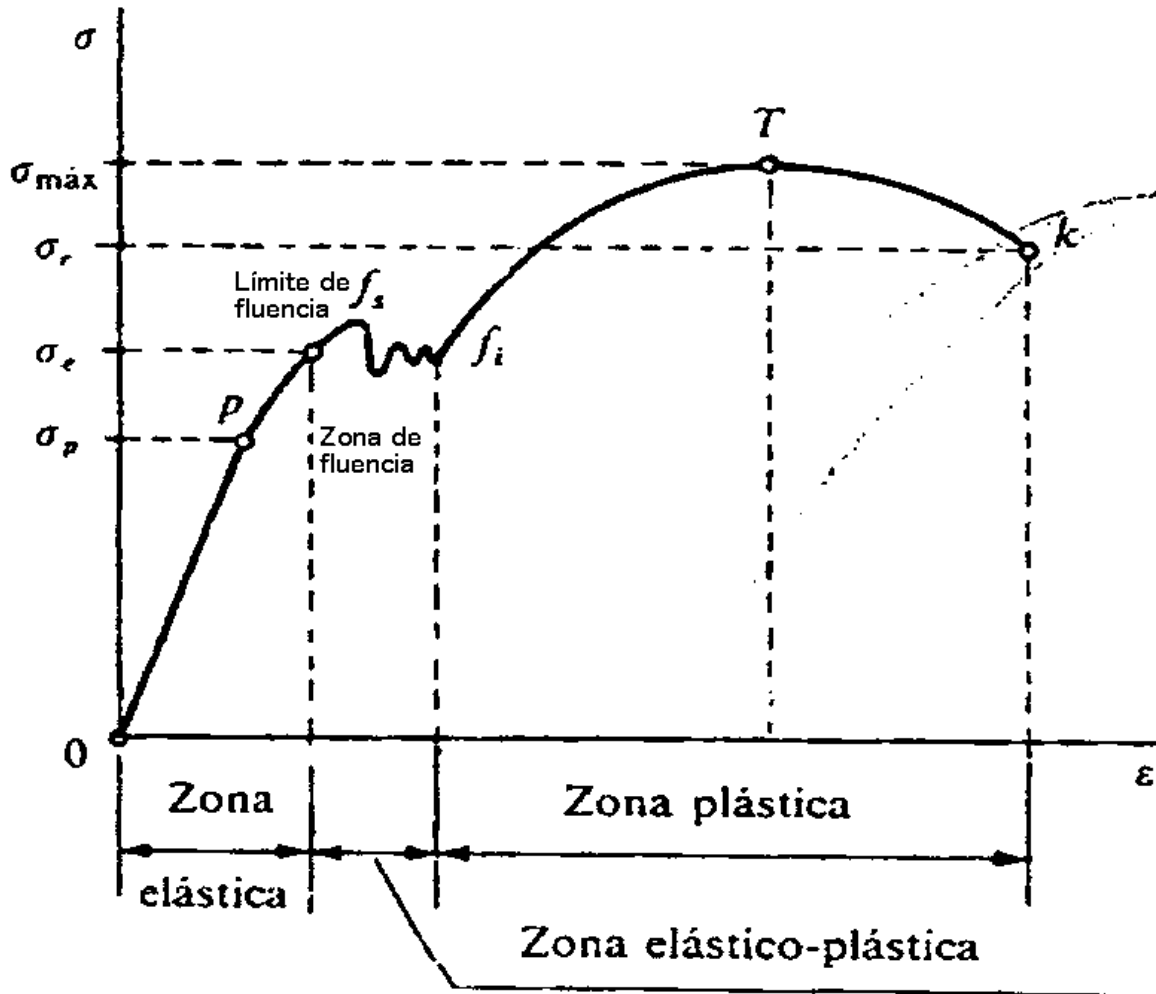


Figura 6.1. Diagrama de la zona de fluencia del acero [41].

6.1. DISEÑO Y MANUFACTURA DE LA PROBETA PARA ENSAYO DE TRACCIÓN DEL ACERO AERONÁUTICO MARAGING 300.

Las dimensiones para las probetas de tracción en el acero maraging 300 se diseñaron mediante el software de ANSYS Workbench, como se muestra en la Figura 6.2. En la misma figura se presentan las dimensiones correspondientes a la probeta destinada a los ensayos de tracción. Las mismas dimensiones se utilizaron para el proceso de maquinado de las probetas.

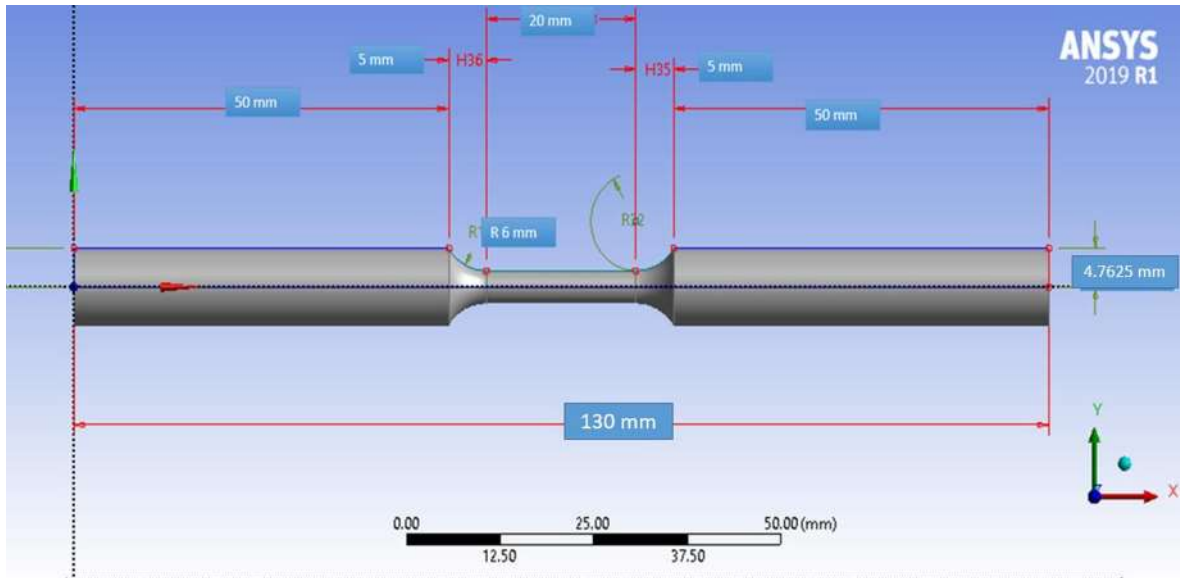


Figura 6.2. Diseño de probeta de acero aeronáutico maraging 300 para ensayos de tracción.

A partir del perfil de la probeta de tracción, se ha generado el código GM para el maquinado en CNC (Control Numérico por Computadora). Parte de este código se muestra continuación, el código se introduce en la computadora del torno para que realice los maquinados correspondientes.

6.2 CÓDIGO G PARA PROBETA DE ENSAYOS DE TRACCIÓN DEL ACERO MARAGING 300

Con el fin de verificar las propiedades mecánicas del acero maraging adquirido, indicadas en la ficha técnica proporcionada por la compañía “Free Steel company” se realizó un ensayo de tracción. El listado en código CNC para el maquinado de las probetas destinadas a los ensayos de tracción, se presenta en la Figura 6.3. Este listado comprende las etapas principales, sin incluir procesos menores. La presentación secuencial del listado es congruente con el proceso de lectura que lleva a cabo la máquina de maquinado, para generar el perfil de la probeta.

%Probeta para ensayos de tracción.	M08	G03 X0 Z5 R-6;
	F50;	G01 X0;
G54;	G00 X0 Z0;	G01 X0 Z25;
G21;		G00 X0 Z25;
M43;	G00 X-2 Z0;	G03 X-2 Z30 R-6;
M03;		

G00 X-1.9 Z0;	G01 X0.4 Z25;	
G03 X0.1 Z5 R-6;	G00 X0.4 Z25;	G00 X-1.2 Z0;
G01 X0.1;	G03 X-1.6 Z30 R-6;	G03 X0.8 Z5 R-6;
G01 X0.1 Z25;		G01 X0.8;
G00 X0.1 Z25;	G00 X-1.5 Z0;	G01 X0.8 Z25;
	G03 X0.5 Z5 R-6;	G00 X0.8 Z25;
G03 X-1.9 Z30 R-6;	G01 X0.5;	G03 X-1.2 Z30 R-6;
G00 X-1.8 Z0;	G01 X0.5 Z25;	
G03 X0.2 Z5 R-6;	G00 X0.5 Z25;	G00 X-1.1 Z0;
G01 X0.2;	G03 X-1.5 Z30 R-6;	G03 X0.9 Z5 R-6;
G01 X0.2 Z25;		G01 X0.9;
G00 X0.2 Z25;	G00 X-1.4 Z0;	G01 X0.9 Z25;
G03 X-1.8 Z30 R-6;	G03 X0.6 Z5 R-6;	G00 X0.9 Z25;
	G01 X0.6;	G03 X-1.1 Z30 R-6;
G00 X-1.7 Z0;	G01 X0.6 Z25;	
G03 X0.3 Z5 R-6;	G00 X0.6 Z25;	G00 X-1 Z0;
G01 X0.3;	G03 X-1.4 Z30 R-6;	G03 X1 Z5 R-6;
G01 X0.3 Z25;		G01 X1;
G00 X0.3 Z25;	G00 X-1.3 Z0;	G01 X1 Z25;
G03 X-1.7 Z30 R-6;	G03 X0.7 Z5 R-6;	G00 X1 Z25;
	G01 X0.7;	G03 X-1 Z30 R-6;
G00 X-1.6 Z0;	G01 X0.7 Z25;	
G03 X0.4 Z5 R-6;	G00 X0.7 Z25;	G00 X-0.9 Z0;
G01 X0.4;	G03 X-1.3 Z30 R-6;	G03 X1.1 Z5 R-6;

G01 X1.1;	G00 X-0.6 Z0;	G01 X1.6 Z25;
G01 X1.1 Z25;	G03 X1.4 Z5 R-6;	G00 X1.6 Z25;
G00 X1.1 Z25;	G01 X1.4;	G03 X-0.4 Z30 R-6;
G03 X-0.9 Z30 R-6;	G01 X1.4 Z25;	
	G00 X1.4 Z25;	G00 X-0.3 Z0;
G00 X-0.8 Z0;	G03 X-0.6 Z30 R-6;	G03 X1.7 Z5 R-6;
G03 X1.2 Z5 R-6;		G01 X1.7;
G01 X1.2;	G00 X-0.5 Z0;	G01 X1.7 Z25;
G01 X1.2 Z25;	G03 X1.5 Z5 R-6;	G00 X1.7 Z25;
G00 X1.2 Z25;	G01 X1.5;	G03 X-0.3 Z30 R-6;
G03 X-0.8 Z30 R-6;	G01 X1.5 Z25;	...
	G00 X1.5 Z25;	G00 X-0 Z0;
G00 X-0.7 Z0;		G03 X2 Z5 R-6;
G03 X1.3 Z5 R-6;		G01 X2;
G01 X1.3;	G03 X-0.5 Z30 R-6;	G01 X2 Z25;
G01 X1.3 Z25;		G00 X2 Z25;
G00 X1.3 Z25;	G00 X-0.4 Z0;	G03 X-0 Z30 R-6;
G03 X-0.7 Z30 R-6;	G03 X1.6 Z5 R-6;	
	G01 X1.6;	

Figura 6.3. Listado en código GM de CNC, para el maquinado de la probeta de tracción, maraging 300.

La interfaz entre el programa de computadora y el torno CNC con el código de maquinado para la probeta de ensayos de tracción, se presenta en la Figura 6.4. Se realizó una prueba de maquinado en una barra de aluminio, Figura 6.5, para verificar el maquinado en una pieza con menor dureza y el perfil resultante. El maquinado resultó satisfactorio en esta pieza de aluminio, sin errores importantes que generen golpeteos entre la herramienta de corte y el material. Con estos maquinados preliminares en un material de menor dureza que el maraging

300, fue posible corroborar el buen desempeño en el proceso de maquinado, evitando eventuales fracturas del buril. Posteriormente se llevaron a cabo los maquinados en el acero maraging 300, teniendo un precedente de respaldo en el maquinado del mismo perfil en una aleación de aluminio. Una razón adicional para este procedimiento es de carácter económico; en efecto, la adquisición y costo de este material de investigación presenta dificultades para su adquisición (no existen proveedores nacionales), y su costo es de consideración, por lo que resulta necesario reducir las pérdidas del material en los procesos de machinado.

Se maquinó el espécimen de muestra del acero maraging 300, obteniendo las probetas correspondientes para los ensayos en tracción. Figura 6.6

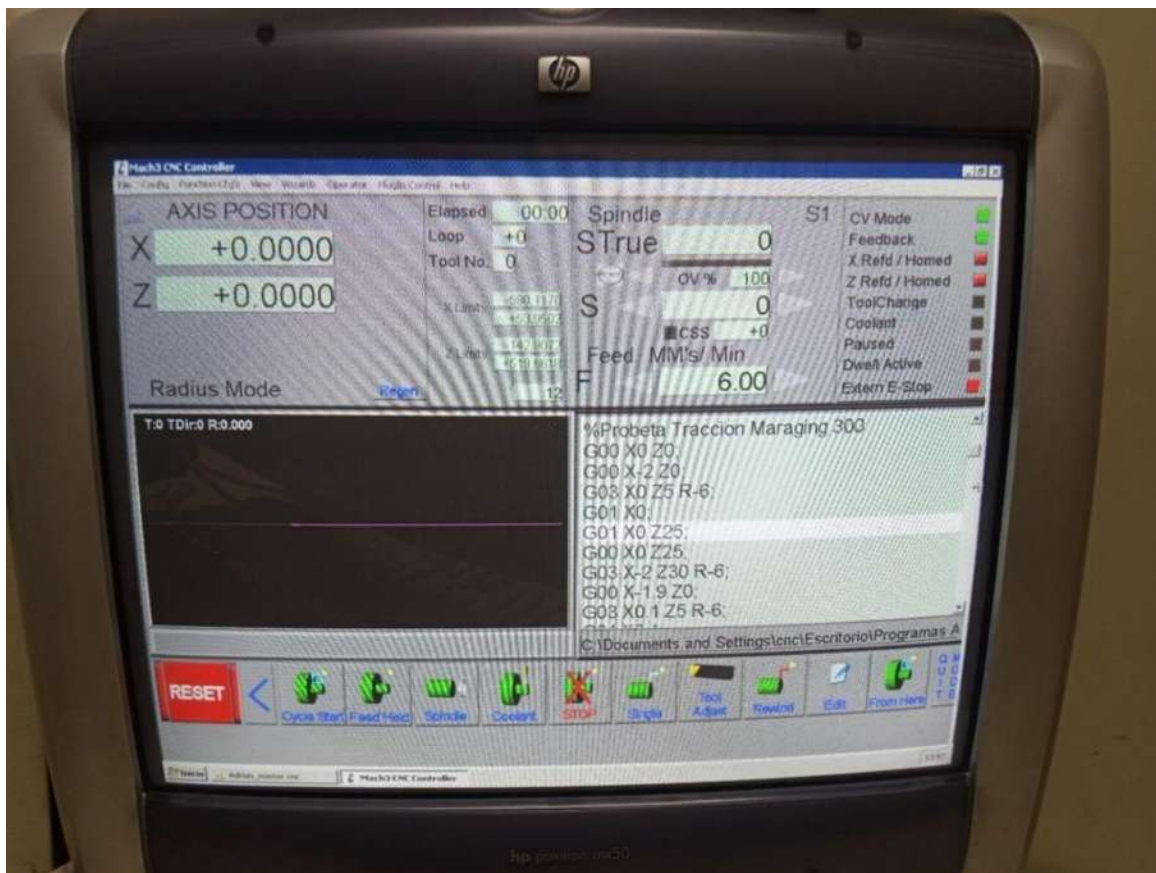


Figura 6.4. Interfaz del programa entre la computadora y el torno CNC con el código para la probeta de ensayos de tracción del acero maraging 300.

Las probetas para ensayos de tracción de acero maraging 300 presentan las siguientes dimensiones: 130 mm de longitud con diámetro en los extremos de 9.525 mm, y con un perfilado en el centro de 30 mm distribuido en tres secciones, una parte central cilíndrica continua de 30 mm de longitud y 3 mm de diámetro, así como dos chaflanes de 5 mm de longitud y 6 mm de radio.



Figura 6.5. Maquinado preliminar en la probeta de aluminio para ensayos en tracción.

Con la finalidad de conocer las propiedades mecánicas obtenidas por ensayos experimentales en el material de investigación, se realizaron pruebas de tracción en 2 probetas de acero maraging 300 maquinadas en el torno del laboratorio de la FIM. Estos ensayos de tracción se realizaron en el Instituto de Investigaciones Metalúrgicas (IIM), de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en la máquina de ensayos presentada en la Figura 6.8. En la misma se monta el espécimen, que es sujetado por dos mordazas en los extremos en la parte cilíndrica continua (9.525 mm de diámetro), con una longitud de 50 mm de cada extremo para garantizar una adecuada superficie de sujeción entre la máquina y la probeta de ensayos. La parte del central de 30 mm es el objeto de prueba donde sufrirá la deformación causada por las fuerzas de tensión, producida por la máquina en los extremos de la muestra. Este perfil central funciona como concentrador de esfuerzos que induce la deformación en esta zona. Esta parte central es medida con un sensor en la máquina que permite medir la deformación durante el ensayo, hasta la fractura, generando también un gráfico de esfuerzo-deformación a lo largo de la prueba.



Figura 6.6. Probeta del acero maraging 300, para ensayos de tracción.



Figura 6.7 Máquina hidráulica IBMU4-2000 para ensayos de tracción.

La Figura 6.7. muestra una maquina comercial IBMU4-2000 que tiene las mismas condiciones de operación que la maquina donde se realizaron los ensayos de tracción presentada en la Figura 6.8.

6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TENSIÓN EN EL ACERO MARAGING 300.

Se realizaron dos ensayos de tracción para comparar los resultados entre ellos; pudiera considerarse que son pocos, aunque de acuerdo con la experiencia del técnico de la máquina de ensayos y a la disponibilidad del material, fueron suficientes este número de ensayos de tracción en el acero maraging 300 para obtener el valor correspondiente al módulo de elasticidad. La Figura 6.8 ilustra el punto de ruptura de una de las probetas sometidas a los ensayos de tracción; la máquina registra tres zonas en el proceso de fractura: 1) la zona elástica donde el material se deforma, pero si se retira la carga, regresaría teóricamente a su estado original sin sufrir deformaciones permanentes; 2) la segunda de estas zonas es la que considera la deformación plástica del material, donde si se retira la carga aplicada, el material no regresaría a su estado inicial, quedando deformaciones permanentes en la zona estrecha o de ensayo; 3) finalmente zona comprendía entre el esfuerzo máximo aplicado y el esfuerzo de ruptura del material donde ya es evidente la fractura del material.

En la Figura 6.8, se puede apreciar el momento previo a la ruptura donde la muestra se encuentra con una deformación en el centro de la misma considerablemente avanzada; segundos después a este momento ocurre la ruptura. Se puede observar también en la Figura 6.8, los sensores que miden el desplazamiento provocado por la carga; estos sensores tienen forma de pinzas y miden la deformación.



Figura 6.8. Ensayo de tensión poco antes de la fractura de la muestra, IIM, UMSNH.

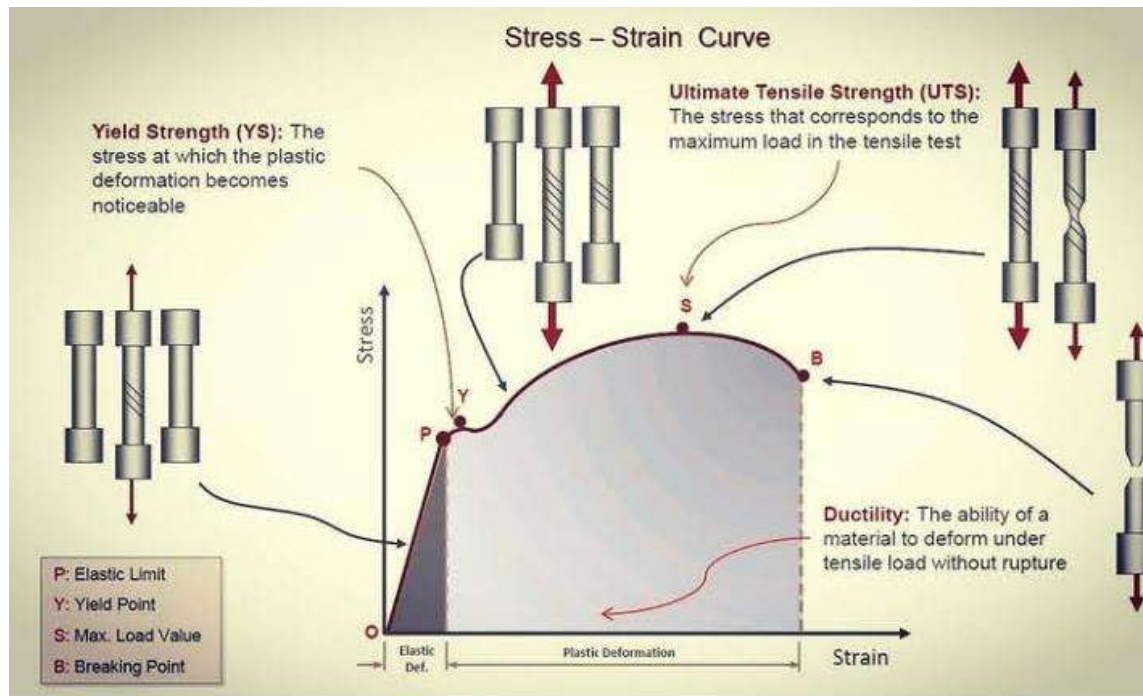


Figura 6.9. Proceso representativo en un ensayo de tracción, esfuerzo-deformación.

Los resultados de los ensayos obtenidos en la máquina de tracción fueron listados en la Tabla 6.1., la cual muestra que el esfuerzo de tracción se encuentra alrededor de los 1100 MPa; mientras que el módulo de elasticidad se encuentra alrededor de 190 GPa, coincidiendo estos resultados con los reportados en el certificado de compra del material maraging 300 en la compañía Free Steel Company. Adicional a la Tabla 6.1, se obtuvieron las Figuras 6.10 y Figura 6.11., correspondientes a los gráficos esfuerzo – deformación de los ensayos 1 y 2. Estos resultados permiten corroborar que el material adquirido con el proveedor norteamericano con sus propiedades descritas en la ficha técnica proporcionada, corresponden con el material ensayado en fatiga ultrasónica.

Tabla 6.1. Resultado de los ensayos de tracción de 2 probetas del material Maraging 300.

	Specimen ID	E_{mod}	F at 0.2% plastic strain.	Upper yield point.	dL at break.	$d1_u$	$d2_u$	z	d_0	S_0
Nr		(Gpa.)	(MPa.)	(MPa.)	(%)	(mm)	(mm)	(%)	(mm)	(mm ²)
1	M-1	190	1105	1200	14	1.73	2.46	73	4	12.57
2	M-2	190	1070	1160	11.6	11.6	1.7	75	3.35	9

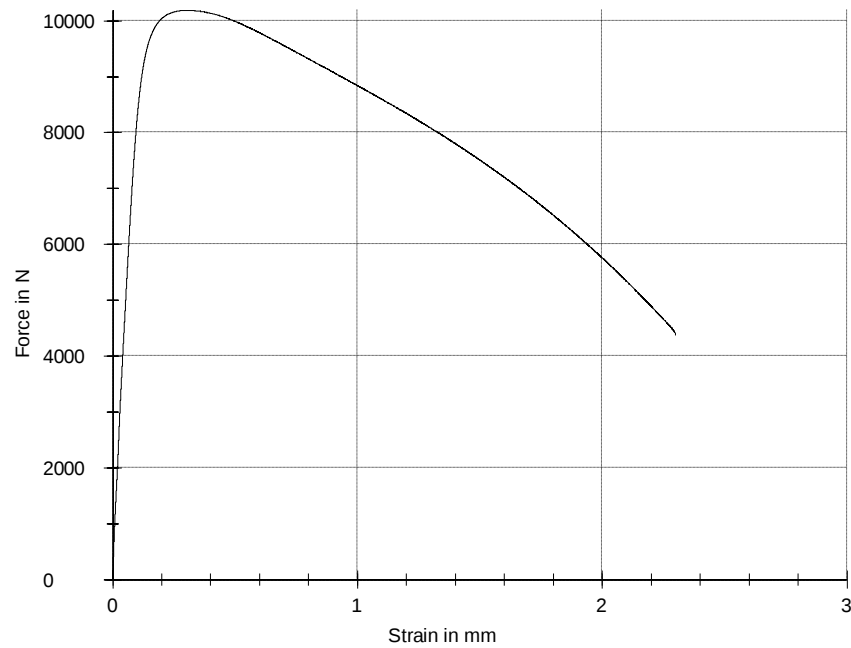


Figura 6.10. Ensayo de tracción en la probeta 1, del acero maraging 300, realizado en la máquina de tracción ubicada en el IIM, de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo UMSNH.

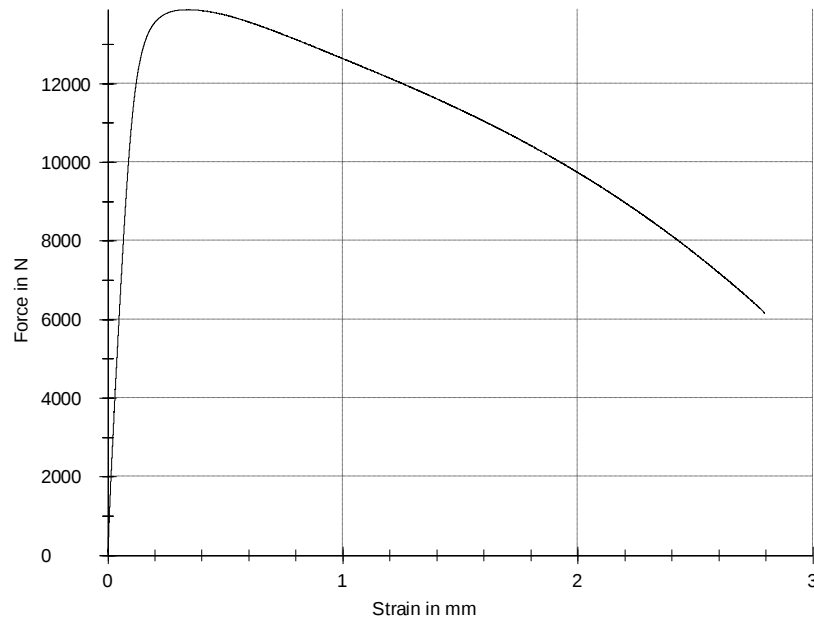


Figura 6.11. Ensayo de tracción en la probeta 1, del acero maraging 300, realizado en la máquina de tracción ubicada en el IIM, de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo UMSNH.

CAPÍTULO VII. ENSAYOS DE FATIGA ULTRASÓNICA EN EL ACERO MARAGING 300 CON TRATAMIENTO TÉRMICO.

Con el propósito de obtener el comportamiento en fatiga del acero maraging 300, se llevaron a cabo tratamiento térmico en este material. La Figura 7.1. presenta un horno convencional donde se aplicó el tratamiento térmico a 12 probetas previamente maquinadas. El tratamiento térmico se llevó a cabo después del maquinado, debido a que después del tratamiento térmico de envejecido, el material adquiere un alto valor de dureza, con la correspondiente dificultad para su maquinado

El proceso de tratamiento térmico de envejecido se llevó a cabo en un horno a 490 grados centígrados durante 6 horas, Figura 7.1. Este tratamiento térmico tiene como objeto mejorar las propiedades mecánicas del acero maraging 300, particularmente su resistencia a la tracción y su dureza. El proceso de envejecido se realizó mediante el siguiente procedimiento: se introdujeron al horno 12 probetas debidamente espaciadas entre sí, Figura 7.2, para evitar el contacto entre ellas y para evitar una eventual fusión de probetas en contacto. Cierre de la puerta del horno, evitando la fuga del calor y arranque del horno progresivamente con una etapa inicial de precalentamiento, que no se considera como tiempo de cosido. Una vez precalentado el horno y alcanzada la temperatura de 490 grados centígrados, previamente determinada, se empieza a contabilizar el tiempo de estancia de las probetas en el horno encendido durante 6 horas a partir de los 490 grados centígrados alcanzados. Al completar las 6 horas el horno, éste se apaga, empezando el proceso de enfriamiento de las probetas dentro del horno, manteniendo la puerta cerrada para evitar choques térmicos que pueden generar fragilización en el material. El enfriamiento en el interior es lento y la puerta se abre hasta que la temperatura en el interior del horno es próxima a la temperatura ambiente, aproximadamente a 28 grados centígrados, que corresponde a la temperatura local. A la apertura del horno, se proceda a la limpieza superficial sencilla mediante una tela, para eliminar residuos superficiales, Figura 7.3. Diferentes tratamientos térmicos son destinados a aceros industriales; tales como: recocido, revenido, templado, etc. El tratamiento térmico de envejecimiento se aplicó sobre el material maraging 300 adquirido, con el objeto de aumentar las propiedades mecánicas del material sin cambiar la estructura cristalográfica del mismo. La temperatura de transformación cristalográfica en este acero de alta resistencia se sitúa alrededor de los 860° C [42]. En conclusión, el tratamiento térmico de envejecimiento se practicó para mejorar las propiedades mecánicas del acero maraging 300, mediante la generación de precipitados de refuerzo, tipo Ni_3Ti y nanopartículas de “Mo-rich”.

Debido al importante incremento en la dureza después del tratamiento térmico de envejecimiento, el maquinado de las probetas se llevan a cabo previo a dicho tratamiento térmico, para evitar las dificultades de maquinado en piezas de alta dureza.



Figura 7.1. Horno de inducción para tratamientos térmicos, ubicado en el Instituto de Física de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.



Figura 7.2. Probetas de acero maraging 300 en el horno, para el tratamiento térmico.



Figura 7.3. *Probetas de acero maraging 300 sometidas a tratamiento térmico de envejecido, confrontadas con probetas sin tratamiento térmico.*

Las probetas sometidas a tratamiento térmico son enseguida probadas en condiciones de fatiga ultrasónica a la frecuencia de 20 KHz, con los cuatro niveles de carga previamente descritos: 389 MPa como nivel inicial más bajo de los ensayos; el segundo nivel de ensayos fue con un esfuerzo máximo en el centro de la muestra de 486 MPa; el tercer nivel de ensayos fue con un nivel de esfuerzo de 584 MPa en la zona estrecha; finalmente, con el nivel más alto de carga de 681 MPa en el cuello de la muestra. Los cuatro esfuerzos mencionados se encuentran por debajo del límite elástico de este acero maraging 300; las deformaciones a lo largo de la probeta son esencialmente elásticas, con un componente plástico prácticamente nulo. Bajo estas condiciones, el estudio de la resistencia a la fatiga ultrasónica de este acero no comprende deformaciones plásticas.

Los resultados obtenidos durante los ensayos se muestran en la Tabla 7.1., donde se enlistan las siguientes columnas: número de probeta ensayada, voltaje aplicado en el generador piezoeléctrico, el esfuerzo generado en la sección del cuello de la probeta correspondiente con dicho voltaje, el tiempo de ensayo en horas, minutos y segundos, el número de ciclos hasta la fractura, y por último la temperatura leída con termografía óptica durante el ensayo. Es posible apreciar que se presentan algunas variaciones de temperatura entre los ensayos a los mismos niveles de carga, es decir, al mismo voltaje. Estas variaciones, se asume, se deben a la lectura que se realiza ocasionalmente más cercana a al momento de la fractura, cuando la liberación de energía por el aumento de la fisura se incrementa, incrementándose simultáneamente la temperatura. No obstante, la temperatura registrada en el cuello de la probeta mediante cámara termográfica, se mantiene aproximadamente constante bajo un mismo nivel de carga aplicado.

La confrontación entre los resultados en fatiga ultrasónica del acero maraging, “tal como recibido”, contra el acero tratado térmicamente por envejecimiento, llevan a las siguientes conclusiones: la resistencia a la fatiga ultrasónica del maraging 300 tratado térmicamente presenta resistencia a la fatiga considerablemente superior con respecto al mismo material probado sin tratamiento térmico o “tal como recibido del proveedor”. Una confrontación de los resultados mostrados en la a Tabla 7.1. con los resultados obtenidos en el material sin tratamiento térmico, como recibidos del proveedor, Tabla 5.1., muestran una neta ventaja de resistencia a la fatiga ultrasónica de los materiales tratados con envejecimiento. Un análisis más a detalle de esta confrontación se desarrollará adelante en esta memoria de tesis, con objeto de argumentar sobre las causas de este resultado de resistencia en fatiga ultrasónica del acero maraging 300, bajo dos condiciones distintas.

Tabla 7.1. Ensayos de acero maraging 300 tratado a 490 grados centígrados por 6 horas.

			TIEMPO DE ENSAYO A LA FRACTURA				
No.	Voltaje (volts)	Esfuerzo (MPa.)	Horas	Minutos	Segundos	CICLOS	Temp. °C
16	20	389	559.06			35,839,829,922	108
2	25	486	37			2,697,232,981	80.5
6	25	486	43			12,332,642,500	108
4	30	584		72.2		86,594,880	119
5	30	584		65.36		78,439,280	118
18	30	584		74.7		89,648,919	134
10	35	681			33.1	662,080	57
11	35	681			89.9	1,798,280	85
13	35	681			37.86	757,179	80

La temperatura en el curso de los ensayos de fatiga ultrasónica fue registrada mediante una cámara termográfica, La Figura 7.4 a), y 7.4 b), presentan la distribución de temperatura registrada mediante una cámara termográfica en el cuello de la muestra y en el exterior de la misma, para una carga aplicada media de 486 Mpa. Estas imágenes termográficas en dos zonas diferentes fueron tomadas en el curso del ensayo de fatiga ultrasónica, observando que la temperatura máxima se mantiene en la parte estrecha de la probeta, donde se presenta la máxima concentración de esfuerzos.

Adicionales imágenes de temperatura en el cuello de la muestra fueron obtenidas para las probetas tratadas, con un nivel de carga de 584 MPa., como se ilustra en la Figura 7.5 a) y 7.5 b).

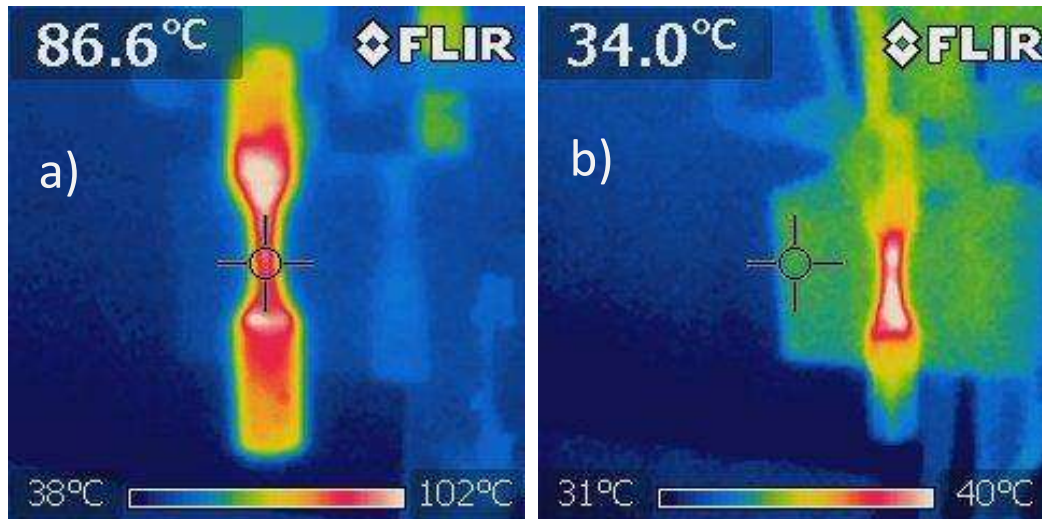


Figura 7.4 a), b). Termografía de las probetas ensayadas a 25 volts (486 MPa.) del acero maraging 300 tratado a 490 °C por 6 horas.

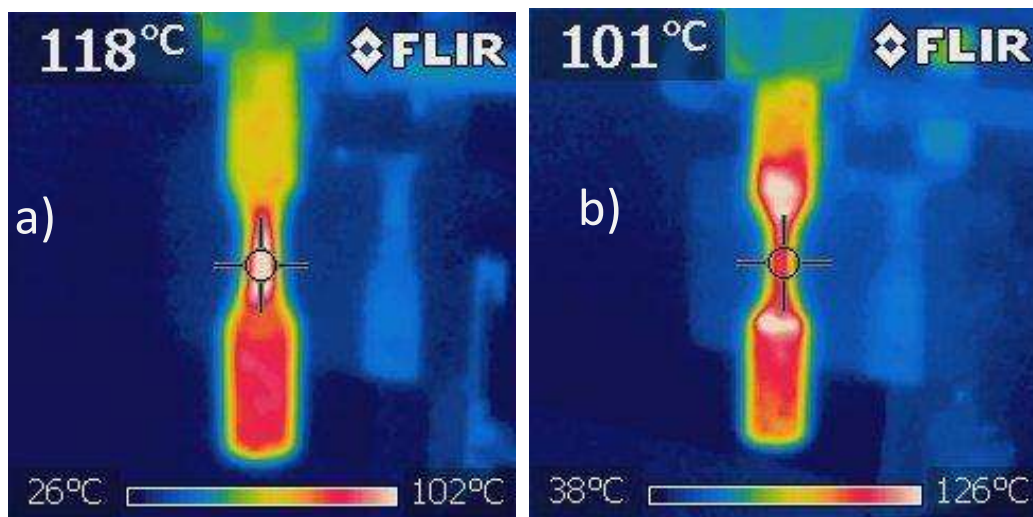


Figura 7.5 a), b). Termografía de las probetas ensayadas a 30 volts (584 MPa.) del acero maraging 300 tratado a 490 °C, por 6 horas.

Por último, las imágenes termográficas para el máximo nivel de carga aplicado de 681 MPa. se presentan en el Figura 7.6 a) y 7.6 b), presentándose nuevamente el mayor valor para la temperatura en la zona estrecha de la probeta.

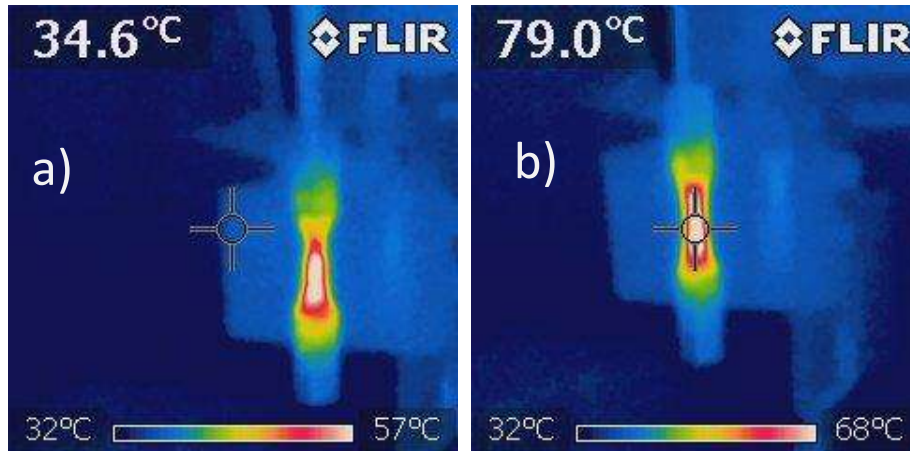


Figura 7.6 a), b). Termografía de las probetas ensayadas a 35 volts (681 MPa.) del acero maraging 300, tratado a 490 °C por 6 horas.

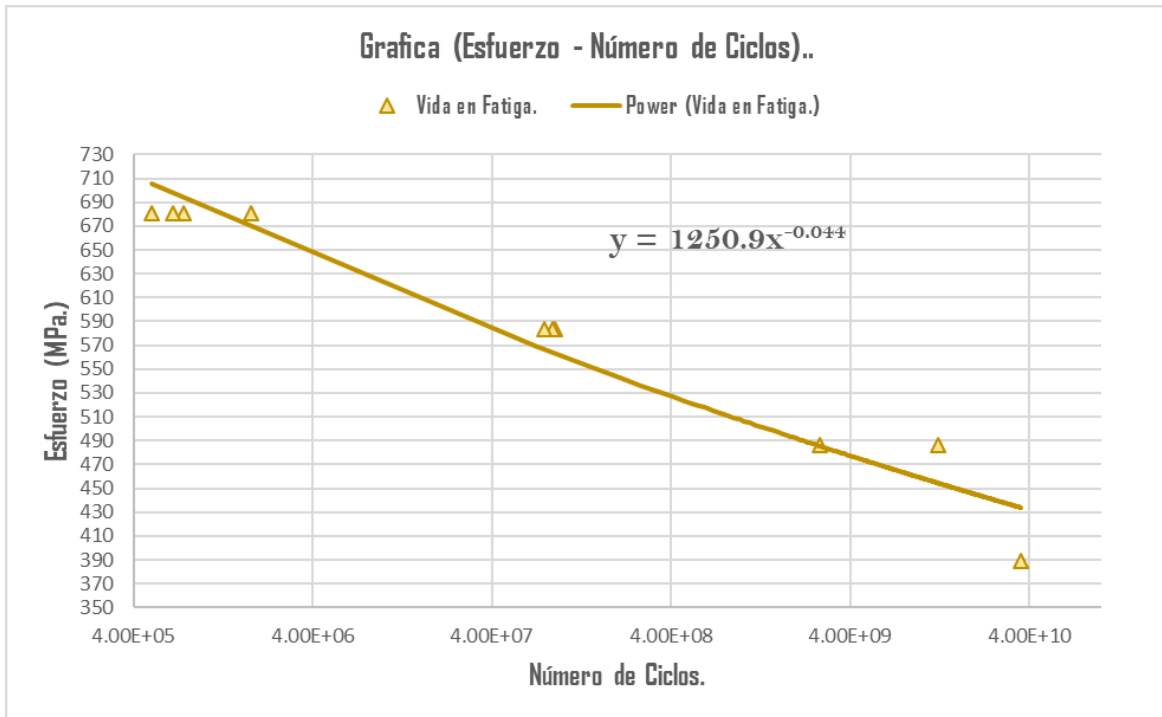


Figura 7.7. Gráfica, Esfuerzo – Número de ciclos para el acero maraging 300, tratado térmicamente.

La Figura 7.7, presenta el gráfico de los resultados de fatiga en la modalidad ultrasónica, para las probetas de maraging 300, tratadas térmicamente por envejecimiento. Un incremento en la resistencia en fatiga es apreciable con la comparación de las Figuras 5.7 y 7.7. Por ejemplo, para el nivel de carga medio de 486 MPa, el acero sin tratamiento térmico presenta una vida en fatiga de aproximadamente 31 millones de ciclos, mientras que con el tratamiento térmico al mismo nivel de carga se incrementa hasta los 87 millones de ciclos.

CAPÍTULO VIII.- ENSAYOS DE FATIGA ULTRASÓNICA EN EL ACERO MARAGING 300, CON INDUCCIÓN TÉRMICA DE 200 °C.

Se llevaron a cabo ensayos mecánicos de fatiga ultrasónica a una frecuencia de 20 KHz en probetas de acero maraging 300 con temperatura inducida en el cuello de las muestras mediante un equipo de inducción electromagnética. En este proceso se monitoreó la temperatura impuesta en el centro de las probetas por medio de un termostato para controlar la temperatura a 200 °C durante el ensayo, hasta la fractura del espécimen de prueba. Esta temperatura fue controlada por un dispositivo de inducción y un sensor de temperatura en la probeta durante los ensayos; los resultados se registraron en la Tabla 8.1., La resistencia en fatiga ultrasónica con esta modalidad de ensayo, se obtuvieron nuevamente con cuatro niveles de la carga aplicada: 389 MPa., 486 MPa., 584 MPa., y 681 MPa. Es de interés investigar la vida en fatiga ultrasónica de este acero con la temperatura impuesta de 200° C, debido a que en condiciones de uso industrial, se pueden presentar incrementos importantes de temperatura en este acero de alta resistencia, en particular para ciertas aplicaciones en la industria aeronáutica y la industria militar.

En la Tabla 8.1. se registraron los resultados para las probetas ensayadas con una temperatura impuesta de 200° C en el cuello de la probeta, mediante un dispositivo de inducción electromagnética, desarrollada en el seno del grupo de trabajo de fatiga ultrasónica de la Facultad de Ing. Mecánica de la UMSNH. La Tabla 8.1. presenta las columnas siguientes: número de ensayo, voltaje aplicado en el piezoeléctrico, esfuerzo registrado en el cuello de la muestra, tiempo de ensayo, número de ciclos y temperatura registrada en el cuello de la muestra.

Tabla 8.1. Ensayos de acero maraging 300 con temperatura inducida de 200 grados centígrados.

No.	Voltaje (volts)	Esfuerzo (MPa.)	TIEMPO DE ENSAYO A LA FRACTURA			Ciclos	Temp. °C
			Horas	Minutos	Segundos		
8	20	389	6.391			459,646,479.88	200
6	25	486		9.85		11,822,760.57	203
7	25	486		9.66		11,599,380.01	201
1	30	584		3.89		4,672,920.04	206
2	30	584		3.95		4,749,639.98	208
9	30	584		3.38		4,061,180.00	201
10	35	681			58.23	1,164,720	210

Imágenes termográficas fueron tomadas nuevamente con esta modalidad de ensayo. La Figura 8.1 a) y 8.1 b), presenta imágenes termográficas en probetas ensayadas con un esfuerzo máximo de 486 MPa., en la sección estrecha de la muestra; mientras que Figura 8.2 a) y 8.2 b) probetas ensayadas a 584 MPa. En las cuatro imágenes tomográficas precedentes, la temperatura máxima registrada en el cuello de la muestra aparece cercana a los 200 grados centígrados, derivado de la temperatura impuesta mediante el dispositivo electromagnético.

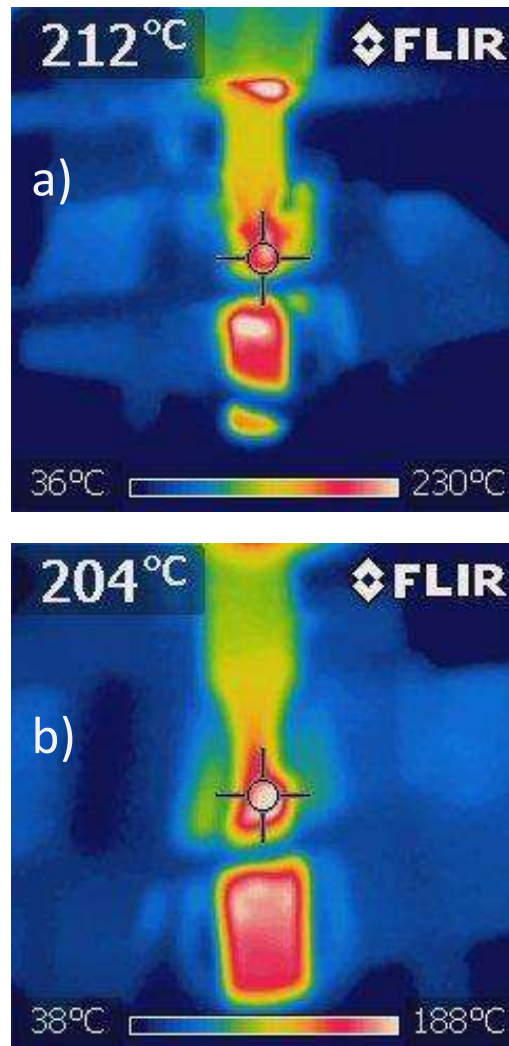


Figura 8.1. Imágenes termográficas a), b) de las probetas ensayadas de acero maraging 300, con inducción de temperatura de 200 °C inducida por inducción electromagnética y nivel de carga de 389 MPa.

La puesta en marcha de los ensayos experimentales de fatiga ultrasónica con inducción de temperatura en el cuello de la muestra fue una tarea con ciertas complejidades de resolver; se realizó el diseño, construcción y montaje de la máquina de inducción, el que se describe a continuación. La máquina de inducción fue sometida a enfriamiento mediante un sistema de

circulación con agua; las bobinas inductoras que inducen el aumento de temperatura en la probeta de prueba se enfrían mediante este sistema, como se muestra en la Figura 8.3. Para esta modalidad de ensayos con temperatura impuesta de 200° C mediante la máquina de inducción electromagnética, también fue necesario un sistema de refrigeración para el “sonotrodo” o amplificador de desplazamiento, usando ventiladores convencionales que hacen incidir aire de refrigeración para mantener la temperatura entre los 35 y 45° C en el sonotrodo, como se muestra en la Figura 8.4. La máquina ultrasónica puede afectarse con aumento de temperatura por la influencia de la máquina de inducción electromagnética. En efecto, la inducción electromagnética puede alcanzar el cuerpo del sonotrodo, que es de una aleación de titanio, induciendo aumento de temperatura en este elemento de la máquina ultrasónica. La conductividad térmica entre la probeta de ensayo y el sonotrodo, también fue reducida utilizando un separador termo-aislante (color amarillo), como se ilustra en la Figura 8.3.

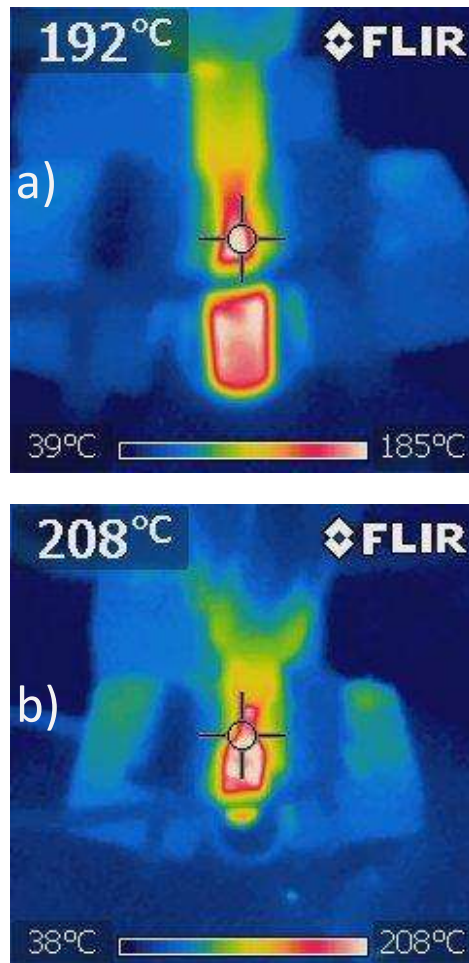


Figura 8.2. Imágenes termográficas a), b) de las probetas ensayadas de acero maraging 300, con inducción de temperatura de 200 °C inducida por inducción electromagnética y nivel de carga de 584 MPa.

La máquina de inducción electromagnética en funcionamiento se muestra en la figura 8.4; los componentes principales consisten en un sistema de generación de onda electromagnética de inducción de alta frecuencia que se comunica a la probeta de ensayos mediante bobinas, un sistema de refrigeración con agua para el enfriamiento de las bobinas, un dispositivo de control de temperatura para el arranque y paro automático cuando la temperatura registrada varía fuera del rango entre 195° y 205°. Las bobinas conductoras del magnetismo en forma de espiral son termo aisladas con un recubrimiento (tela termo aislante de color blanco), como se muestra en la Figura 8.3. Las bobinas tienen dos imanes en los extremos con la finalidad de concentrar el campo magnético y generar una temperatura estable. El sistema de refrigeración de las bobinas consta de un recipiente de agua de enfriamiento con un dispositivo automático de nivel y bomba de succión del refrigerante que circula por las bobinas. El sistema de refrigeración descrito ha sido automatizado, con un paro automático de la circulación del agua de enfriamiento cuando se alcanza la temperatura predeterminada, y se reinicia cuando la temperatura desciende por debajo de un valor también predeterminado. Lo anterior es posible mediante un tablero de control donde se cuenta con el control electrónico del termostato; el mismo que se ubica en la muestra de ensayos de fatiga, para registrar la temperatura y mandar una señal al tablero de control donde se hace el paro o el arranque de los dispositivos de la máquina de inducción.



Figura 8.3. Montaje de la probeta de ensayo de acero maraging 300 en la máquina ultrasónica, rodeada por las bobinas de inducción electromagnéticas.

La máquina de inducción electromagnética se diseñó, construyó y se puso en marcha para los ensayos en fatiga ultrasónica, con la participación del grupo de trabajo de fatiga

ultrasónica que comprenden los integrantes: el Dr. Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz quien proveyó lo necesario para llevar a cabo este dispositivo, así como la supervisión durante el proceso de fabricación y puesta en marcha; el Dr. Carlos Manuel Sánchez, quien aportó su valiosa contribución para la concepción y puesta en marcha de la máquina, y el estudiante de Doctorado M.C. Julio Adrián Ruiz Vílchez, quien contribuyó considerablemente en la puesta en marcha y adaptación de los diversos elementos de medición.

La Figura 8.5. muestra una probeta de maraging 300 fractura, ensayada en fatiga ultrasónica y sometida a temperatura inducida constante de 200° C en el cuello.

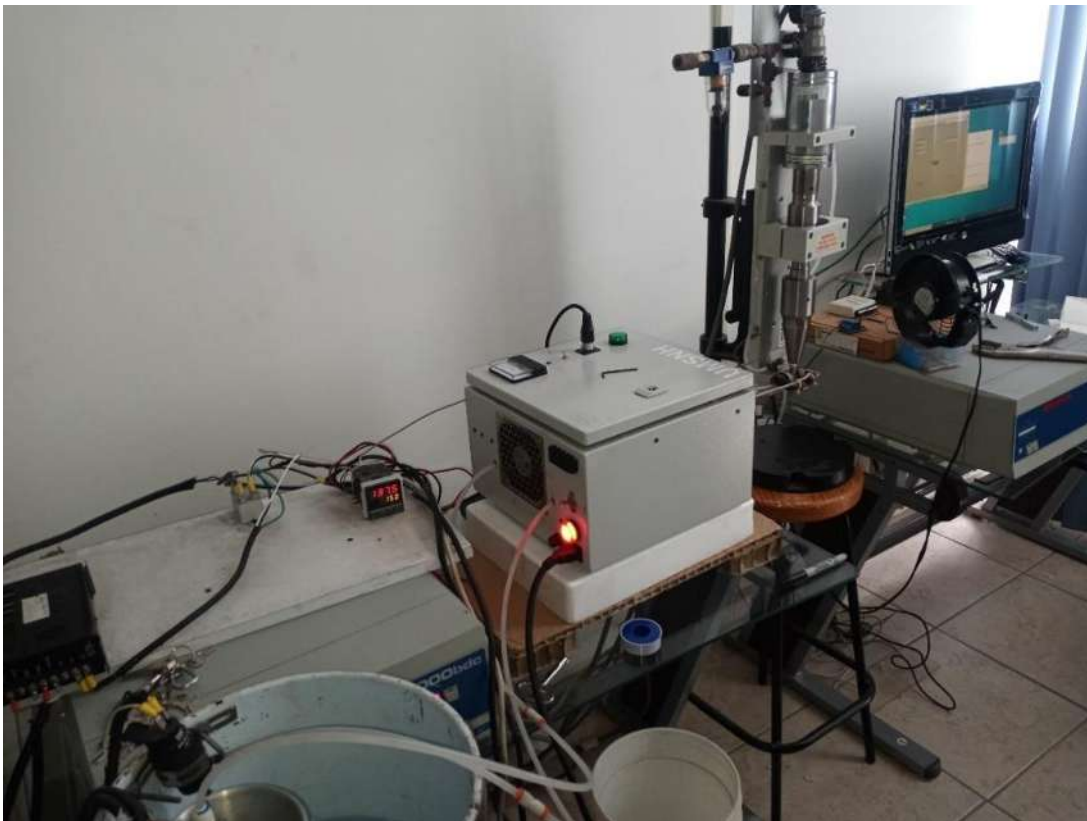


Figura 8.4. Máquina de ensayos de fatiga ultrasónica con el equipo de termo-inducción electromagnética.



Figura 8.5. Probeta de acero maraging 300 fracturada en el cuello durante fatiga ultrasónica, con temperatura inducida de 200 °C en el cuello.

Los resultados en fatiga ultrasónica imponiendo una temperatura constante de 200° C en el cuello de la muestra se presentan en la Figura 8.6.

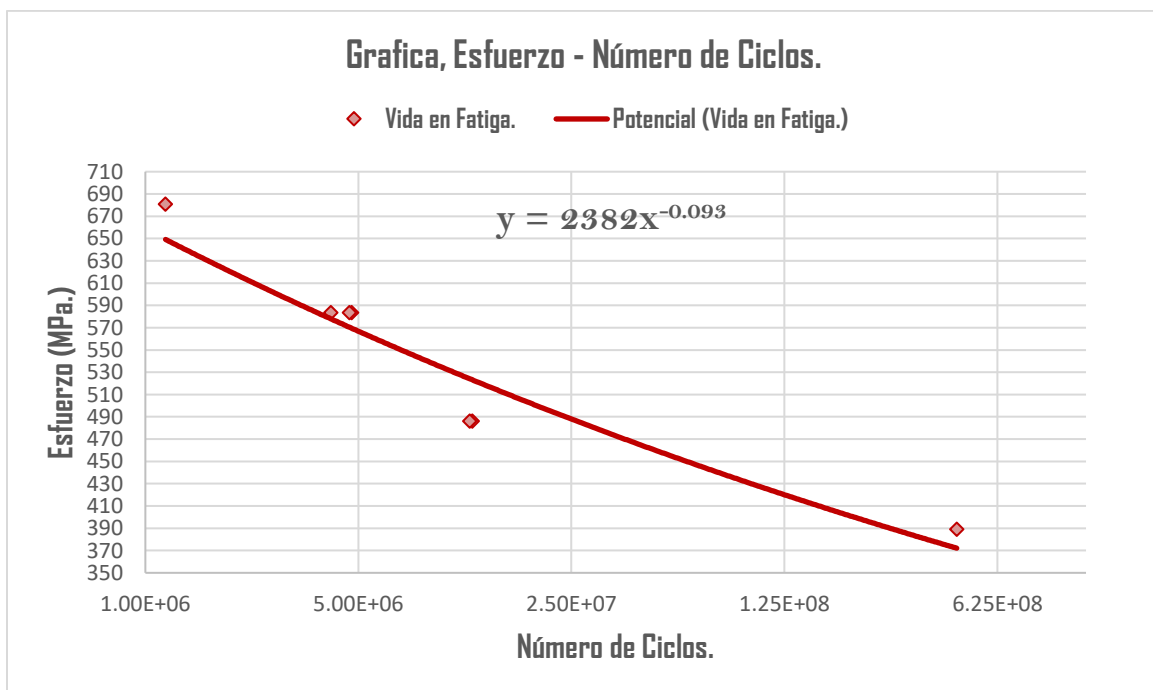


Figura 8.6. Gráfica esfuerzo – número de ciclos del acero maraging 300 con 200 °C en el cuello de la muestra, impuesta por inducción magnética.

La Figura 8.6. presenta la gráfica de los puntos experimentales y la línea de tendencia, con su correspondiente curva ajustada, para el material ensayado, maraging 300, bajo una temperatura impuesta en el cuello de la muestra de 200° C durante el ensayo. Cuatro niveles de carga fueron aplicados en estos ensayos experimentales, con un comportamiento promedio de: 460 millones de ciclos para la carga baja de 389 MPa; alrededor de 11 millones de ciclos para la carga de 486.2 MPa; entre 4 y 4.5 millones de ciclos para la carga correspondiente a 584 MPa; finalmente, la vida en fatiga de aproximadamente 1.2 millones de ciclos, para la máxima carga de 681 MPa. La tendencia en la gráfica de la Figura 8.6, muestra bien una tendencia típica de comportamiento en fatiga mecánica: aumento en la vida bajo cargas de fatiga (ultrasónica en este caso), con la disminución de la carga aplicada. Para esta gráfica se ha obtenido la curva de tendencia, con la correspondiente ecuación de ajuste de los puntos experimentales.

La comparación entre las tres modalidades de ensayos en fatiga ultrasónica del acero maraging 300, descritas anteriormente, arrojan las siguientes conclusiones preliminares: para los niveles más bajos de carga de 389 MPa, la duración de vida es de 7,860 millones de ciclos para las probetas “como recibidas”, 35,800 millones de ciclos para las probetas envejecidas y 460 millones de ciclos para las probetas con temperatura impuesta de 200° C. En el alto nivel de carga de 584 MPa., la vida en fatiga fue de 5-8 millones de ciclos para el material “como recibido”; 78-89 millones de ciclos para el material envejecido, y de 4-5 millones de ciclos para las probetas sometidas a temperatura constante de 200° C, en el cuello. De lo anterior se desprende que el tratamiento de envejecimiento mejora considerablemente la vida en fatiga ultrasónica, y que la imposición de temperatura de 200° C, resulta en detrimento de la resistencia en fatiga ultrasónica, para los bajos niveles de carga.

CAPÍTULO IX.- ENSAYOS DE FATIGA ULTRASÓNICA EN EL ACERO MARAGING 300, CON PRE-CORROSIÓN.

Uno de los factores que afecta al desempeño de los materiales y directamente a las estructuras, es la corrosión; un proceso de deterioración superficial en los materiales que incluye al acero maraging 300. Este acero presenta buenas propiedades anticorrosivas debido a sus contenidos en magnesio, níquel, aluminio y titanio; no obstante, también es afectado en ambientes corrosivos. Por estas razones, en el marco de este estudio Doctoral se decidió estudiar el comportamiento del acero maraging 300 en fatiga ultrasónica, habiendo sido sometido previamente a un proceso de pre corrosión. El proceso de manufactura de las probetas destinadas a pre corrosión fue similar a las probetas anteriores: la Figura 9.1. muestra las probetas maquinadas, destinadas enseguida al proceso de pre corrosión, que se ilustra en la misma figura con las imágenes de dos probetas encapsuladas en un recipiente cilíndrico, conteniendo el agente corrosivo: salmuera (cloruro de sodio disuelto en agua), por una estancia de 30 días. Al concluir el tiempo de pre corrosión, se retiran las probetas, para lavarlas, secarlas y retirar el concentrado de NaCl (cloruro de sodio).



Figura 9.1. *Probetas de acero maraging 300 y proceso de pre-corrosión.*

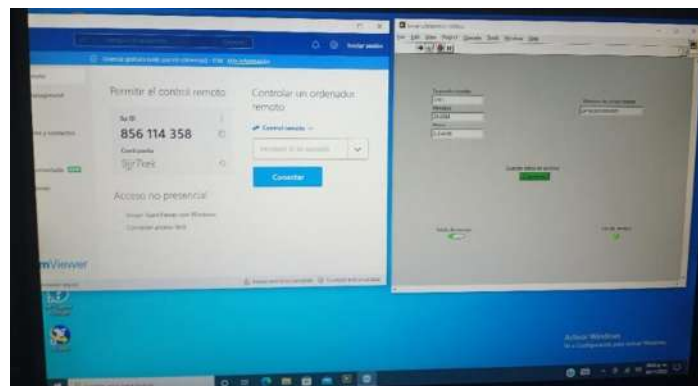
Las probetas pre corroídas son llevadas al laboratorio de fatiga ultrasónica para ser ensayadas bajo los niveles de carga de: 20 volts (389 MPa.), 25 volts (486 MPa.) y 30 volts (584 MPa.). Los resultados en fatiga ultrasónica de probetas pre corroídas se enlistan en la Tabla 9.1.

Tabla 9.1. Ensayos de acero maraging 300 con pre corrosión en las probetas.

No.	VOLTAJE Volts	ESFUERZO Mpa.	TIEMPO DE ENSAYO.			CICLOS	TEMP. (°C)
			HORAS	MINUTOS	SEGUNDOS		
8	20	389	6.391			459,646,479.88	200
6	25	486.25		9.85		11,822,760.57	194
7	25	486.25		9.66		11,599,380.01	195
2	30	583.5		3.95		4,749,639.98	208
9	30	583.5		3.38		4,061,180.00	201
1	30	583.5		3.89		4,672,920.04	206
10	35	680.75			58.23	1,164,720.00	210

En esta tabla se enlistan nuevamente: número de ensayo, voltaje, esfuerzo, tiempo de ensayo, numérico de ciclos, y temperatura registrada con el medidor termográfico. El proceso de puesta en marcha en fatiga ultrasónica es similar: sujeción de la probeta en el sonotrodo mediante un perno roscado, arranque del generador piezoeléctrico y alcance de la carga predeterminada, con el incremento de un volt por segundo. El paro del ensayo se produce de manera automática, con el paro de la máquina ultrasónica cuando la probeta fractura y la condición de resonancia se pierde.

El registro del número de ciclos se incluye en un módulo del programa de control LabWiew, mediante un contador de tiempo y el acumulado del número de ciclos. Con la fractura de la probeta y el paro de la máquina ultrasónica, se desactiva el contador de tiempo y del número de ciclos, quedando almacenados para su explotación. Para el control de la máquina de ensayos en fatiga ultrasónica, también se incluyó un software de control a distancia, mediante el cual fue posible la visualización de los ensayos a distancia en tiempo real, como se muestra en la Figura 9.2.

**Figura 9.2.** Control del equipo ultrasónico por medio de la interfaz en la computadora, con enlace remoto.

9.1. ATAQUE CORROSIVO EN PROBETAS DE ACERO MARAGING 300.

Con el propósito de llevar a cabo pruebas de fatiga ultrasónica en probetas con pre corrosión, se prepararon las muestras del acero maraging 300, Figura 9.3. El proceso de ataque corrosivo se realizó bajo la norma de la ESA (European Space Agency por sus siglas en inglés), referenciada en [43]. Se preparó la mezcla con 3.5 % NaCl en peso (3.5 gramos), como se ilustra en la Figura 9.4, disolviendo la sal en un litro de agua destilada, Figura 9.3. Las probetas fueron sumergidas individualmente en un cilindro conteniendo el agente corrosivo, como se aprecia en las Figuras 9.5 al inicio del proceso y Figura 9.6. después de 30 días sometidas a corrosión, aislando con una cinta la parte de la probeta de sección constante, y dejando expuesta la parte central de la probeta, donde se requiere el ataque corrosivo. El aislamiento en la sección constante se llevó a cabo con el propósito de evitar la pérdida de masa en esta zona. La salmuera que se utilizó para el ataque corrosivo presentó un valor de pH próximo a 5.3, con características ácidas, próximo de un ambiente corrosivo con una atmosfera marina, donde el material de acero maraging es expuesto en la industria aeronáutica. Las probetas sometidas a pre corrosión, muestran un neto efecto en la parte central de la probeta al término del ataque corrosivo, sin efecto de pre corrosión en la sección constante, como se muestra en la Figura 9.7. La medición de acidez en la salmuera se obtuvo mediante un medidor de pH, Figura 9.3, utilizando una muestra con un pH conocido, y efectuando 5 mediciones sobre la salmuera con un resultado promedio de 5 mediciones.



Figura 9.3. Preparación de las muestras de acero maraging 300 para someterlas a pre corrosión.



Figura 9.4. Medida de la masa del NaCl (3.5 gramos) para la preparación del agente corrosivo al 35% con agua destilada.



Figura 9.5. Probetas de acero maraging 300, sumergidas en solución corrosiva, mezcla de 3.5 % NaCl.

La Figura 9.6 presenta las probetas sometidas a pre corrosión después de transcurrido 30 días; se puede observar que el aspecto de la solución salina es turbio, consecuencia de las partículas de óxido de hierro suspendidas en la solución, responsables de esta coloración. Se analizó

este desprendimiento de material ocasionado por la pre corrosión, mediante el microscopio electrónico de barrido ubicado en el laboratorio SEM (Scanning Electron Microscope), de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, a cargo del Dr. Gonzalo M. Dominguez Almaraz. Este análisis por microscopia electrónica se discutirá más adelante en el presente proyecto de tesis.



Figura 9.6. Probetas de acero maraging 300 después de una estancia de 30 días bajo ataque corrosivo en NaCl al 3.5 %.



Tabla 9.7. Probetas pre corroídas en la sección estrecha, disponibles para los ensayos de fatiga ultrasónica del acero maraging 300.

9.2.- ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE LAS PROBETAS DE ACERO MARAGING 300, CORROÍDAS AL 3.5% CON NaCl.

Se utilizó la microscopia electrónica de barrido (SEM), para analizar los efectos superficiales de la pre corrosión; el equipo utilizado fue un microscopio Marca Jeol, modelo JCM-6000 PLUS, mostrado en las Figuras 9.8. y 9.9. El efecto de la pre corrosión sobre las probetas se puede apreciar en las Figuras 9.10 a 9.12 (incisos a) y b) en cada imagen. Las marcas generadas son predominantemente canalizaciones a lo largo del eje longitudinal de la probeta, sin presentar picaduras apreciables, características en los materiales ferrosos. El resultado anterior se atribuye a la composición química del material, con altos contenidos de níquel, cobalto y molibdeno. Un estudio futuro de interés sería la investigación de la profundidad en los surcos provocados por pre corrosión en las superficies del acero maraging 300. Dos factores impiden abordar esta temática en el desarrollo de la presente tesis: a) no se cuenta con el equipo necesario para llevar a cabo este análisis, b) los tiempos dedicados al desarrollo de esta tesis se han prácticamente agotado, dedicando los remanentes al estudio del comportamiento en fatiga ultrasónica del maraging 300, en condiciones de pre corrosión.



Figura 9.8. Microscopio Electrónico de Barrido, marca JOEL, modelo JCM-6000 PLUS, en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH.

El esquema representativo del funcionamiento interno de este microscopio es mostrado en la Figura 9.9., ilustrando los componentes internos principales de la técnica de microscopía electrónica de barrido.

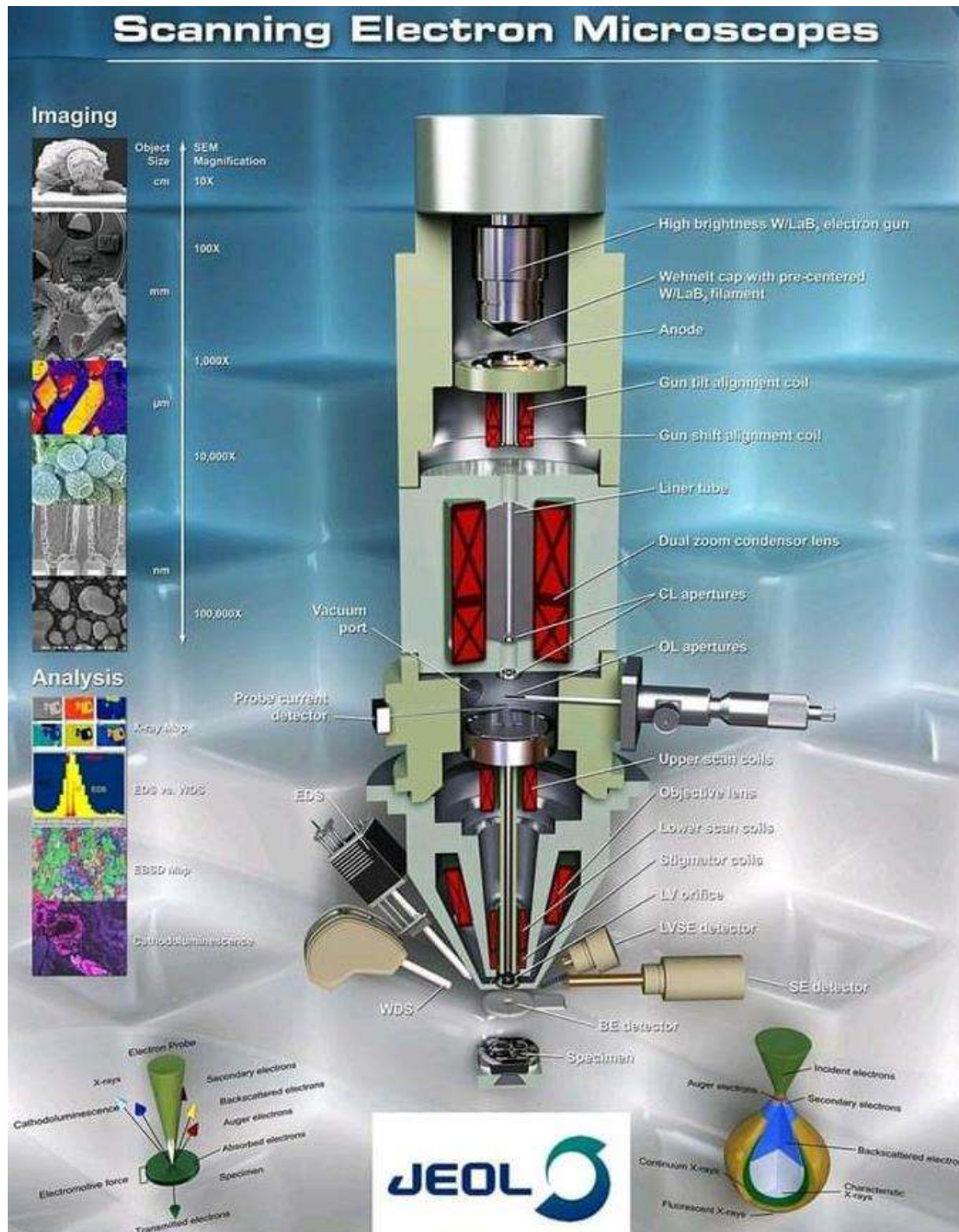


Figura 9.9. Esquema de los componentes internos de un microscopio electrónico de barrido marca JOEL.

El análisis por microscopía electrónica de barrido permitió obtener las Figuras 9.10. a 9.12. correspondientes a probetas pre corroídas de maraging 300, probadas a los niveles de carga: 389 MPa., 486 MPa., y 584 MPa., respectivamente. La aparición de hendiduras en dirección

paralela al eje principal de las probetas por efecto de la pre corrosión, son responsables de la aparición de concentraciones de esfuerzos, que disminuyen considerablemente la resistencia en fatiga ultrasónica en este material. Los resultados bajo esta modalidad de carga se enlistan en la Tabla 9.1; donde se observa una marcada disminución de esta propiedad mecánica, cuando las probetas se someten a pre corrosión.

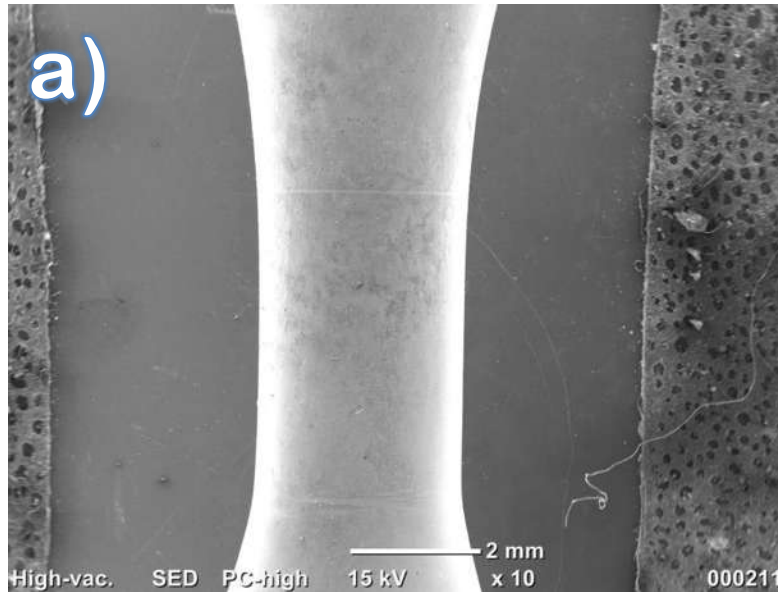


Figura 9.10. a) Probeta 3, maraging 300 con ataque de pre corrosión, ensayada a 20 volts (389 MPa).

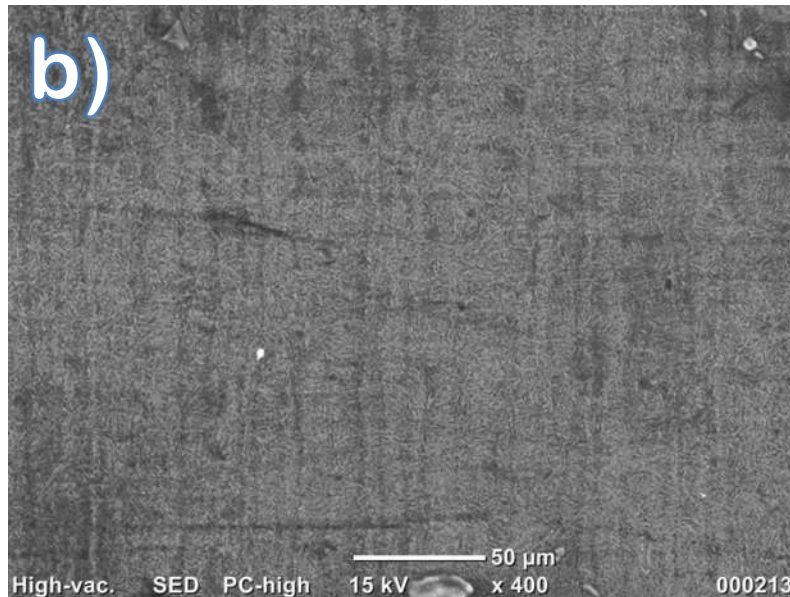


Figura 9.10. b) Probeta 3, maraging 300 con ataque de pre corrosión, ensayada a 20 volts (389 MPa).

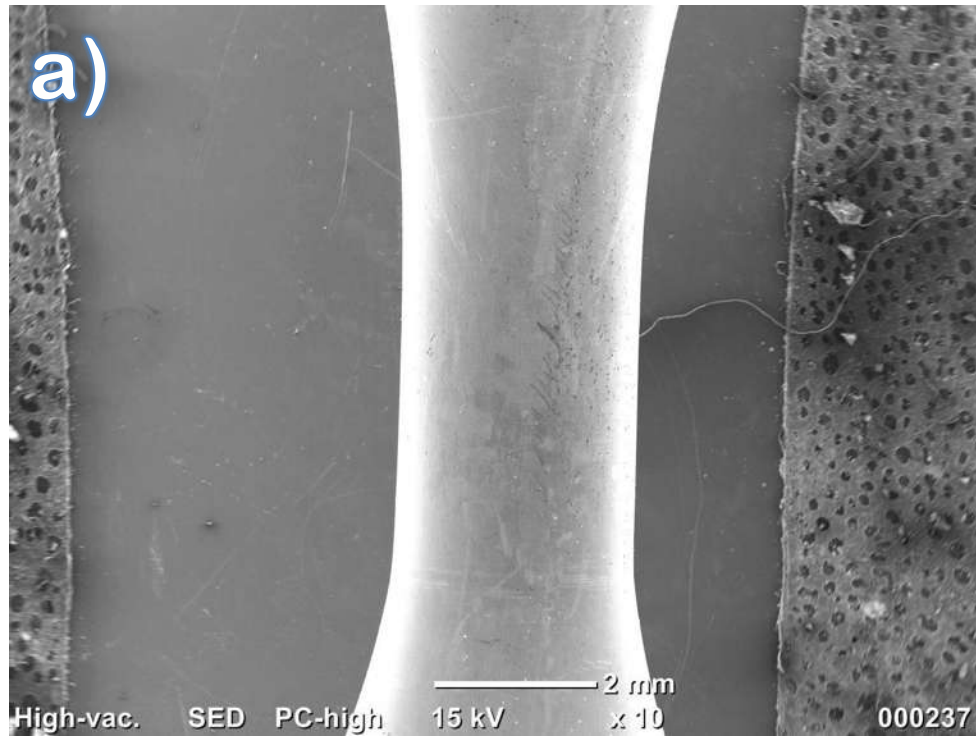


Figura 9.11. a) Probeta 6, maraging 300 con ataque de pre corrosión, ensayada a 25 volts (486 MPa).

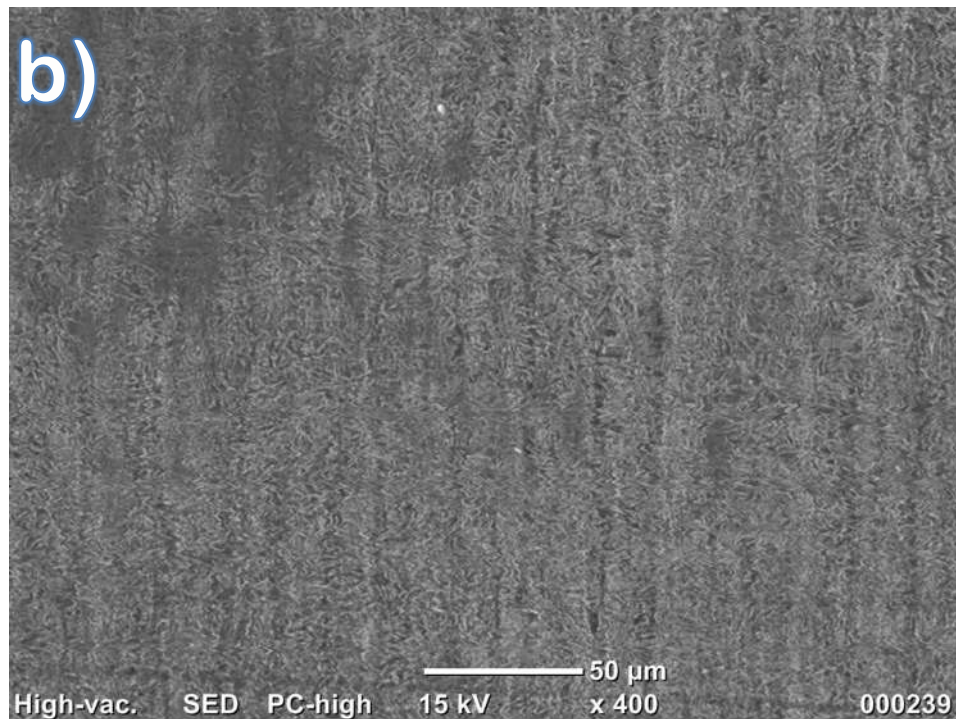


Figura 9.11. b) Probeta 6, maraging 300 con ataque de pre corrosión, ensayada a 25 volts (486 MPa).

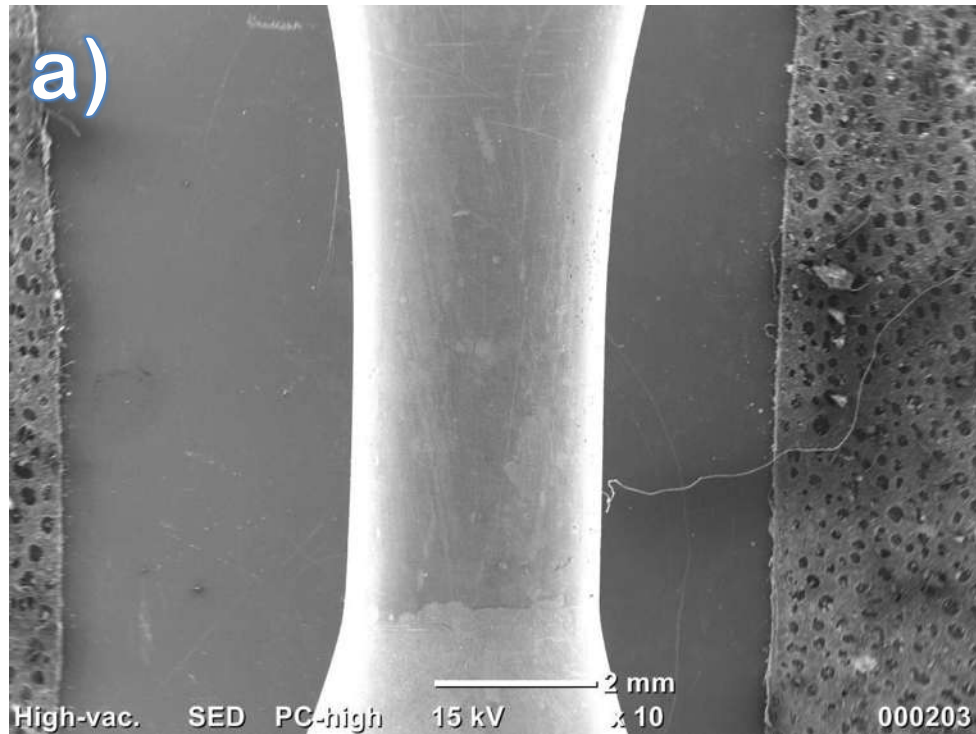


Figura 9.12. a) Probeta 4, maraging 300 con ataque de pre corrosión, ensayada a 30 volts (584 MPa).

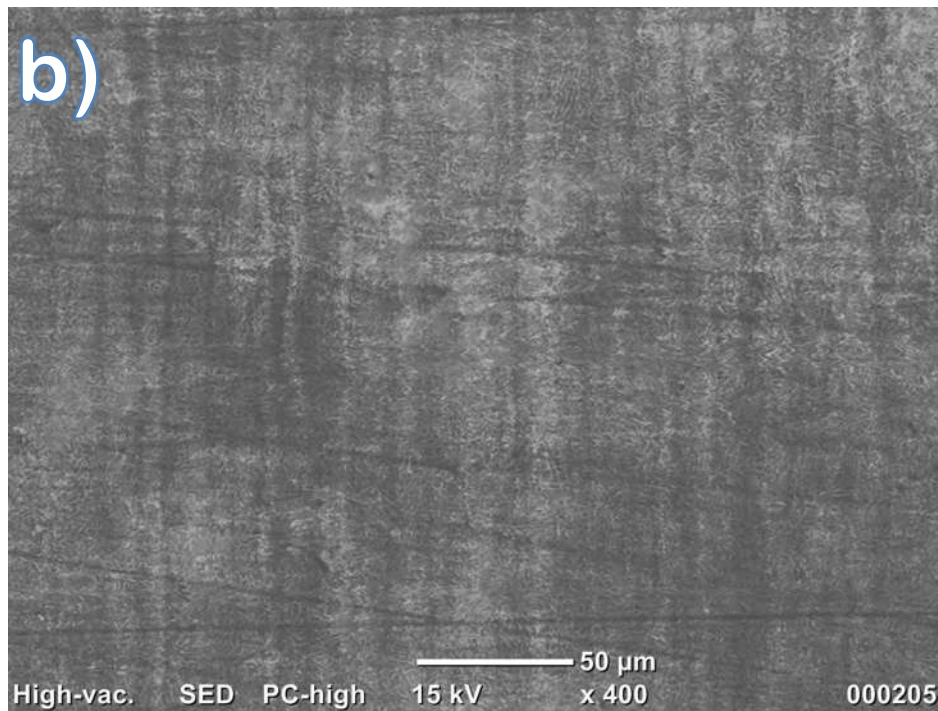


Figura 9.12. b) Probeta 4, maraging 300 con ataque de pre corrosión, ensayada a 30 volts (584 MPa).

9.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE FATIGA ULTRASÓNICA EN PROBETAS DE ACERO MARAGING 300 PRE CORROÍDAS.

La vida en fatiga bajo fatiga ultrasónica en probetas maraging 300 pre corroídas se obtuvo; los resultados se enlistan en la Tabla 9.1.

En la misma tabla se describen las siguientes columnas: primeramente, el número de ensayo asignado, seguido del voltaje aplicado en el generador piezoeléctrico, después el tiempo de ensayo en horas – minutos – segundos, posteriormente el número de ciclos y finalmente la temperatura registrada (en algunos ensayos). La máquina ultrasónica se controla mediante una interface de computadora, en la cual se ha instalado un programa de LabView que permite controlar el arranque del ensayo, el registro del número de ciclos en tiempo real, así como el paro automático cuando la probeta se fractura. El voltaje mínimo que es posible aplicar en el convertidor piezoeléctrico es 10 volts, con este voltaje aplicado se genera un desplazamiento de 13.5 micras en el extremo libre de la muestra, correspondiendo a un esfuerzo de Von Mises mínimo inducido en el cuello de la muestra maraging 300, de 195 MPa. Para ciertos de ensayos en fatiga ultrasónica del acero maraging 300, se registró la temperatura en el cuello de la muestra a lo largo del ensayo, mediante una cámara termográfica.

Tabla 9.1. Ensayos de acero maraging 300 con pre corrosión en las probetas.

No.	VOLTAJE Volts	ESFUERZO Mpa.	TIEMPO DE ENSAYO.			CICLOS	TEMP. (°C)
			HORAS	MINUTOS	SEGUNDOS		
8	20	389	6.391			459,646,479.88	200
6	25	486.25		9.85		11,822,760.57	194
7	25	486.25		9.66		11,599,380.01	195
2	30	583.5		3.95		4,749,639.98	208
9	30	583.5		3.38		4,061,180.00	201
1	30	583.5		3.89		4,672,920.04	206
10	35	680.75			58.23	1,164,720.00	210

En la Figura 9.13. se grafican los resultados en fatiga ultrasónica del acero maraging 300, bajo la condición de pre corrosión. Los resultados en fatiga muestran una marcada disminución de la resistencia en fatiga ultrasónica, cuando este material es sometido a pre corrosión. En efecto, en este proceso se generan hendiduras o “rayaduras” en dirección longitudinal de las probetas, que se constituyen en concentradores de esfuerzos provocando la prematura iniciación y propagación de fisuras, con la consecuente reducción de vida en fatiga.

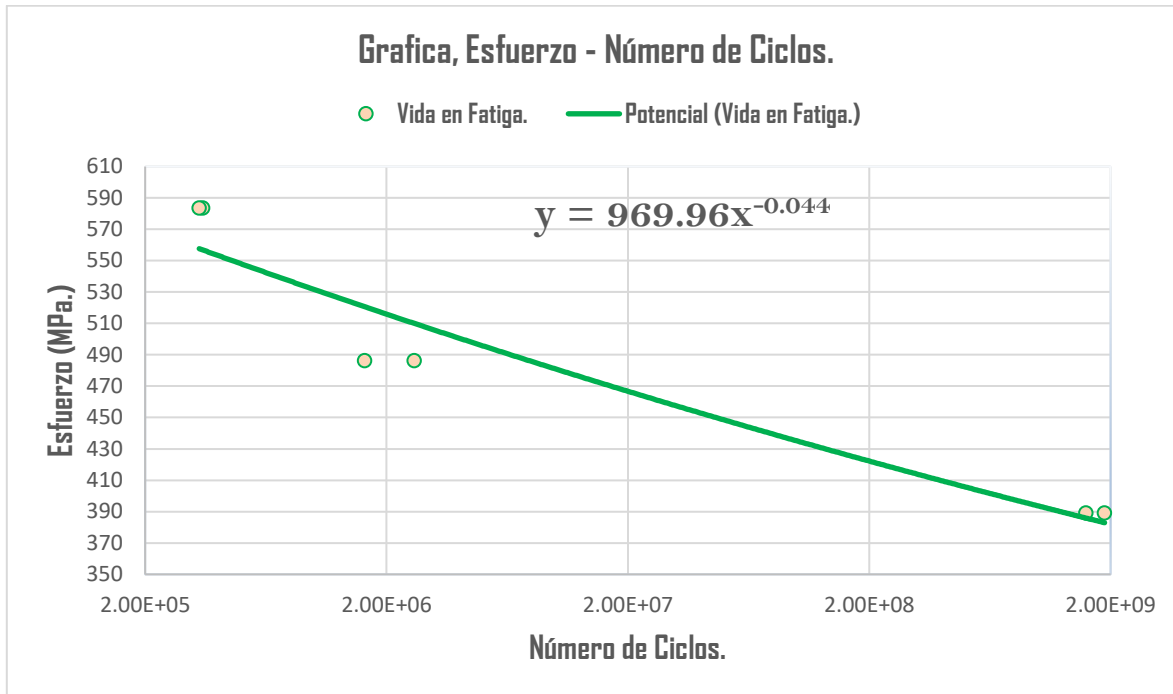


Figura 9.13. Gráfica: Esfuerzo – Número de ciclos del acero maraging 300 con probetas de ensayo pre corroídas.

Los valores de resistencia en fatiga ultrasónica bajo esta modalidad de carga con pre corrosión, resultan los más bajos respecto a las tres modalidades precedentes: material “como recibido del proveedor”, maraging 300 sometido a envejecimiento y probetas sometidas a 200° C durante el ensayo. Los valores de vida en fatiga en la Figura 9.13 son menores a medio millón de ciclos para la carga más alta de 584 MPa, de 1.5 – 2 millones de ciclos para la carga media de 486 MPa., y de 1500 a 1900 millones de ciclos para la carga más baja de 389 MPa.

Como se puede apreciar en las Figuras 5.7, 7.7, 8.6 y 9.13, a medida que se incrementa la carga aplicada (584 MPa.), el efecto de la pre corrosión es menor, debido a que a mayor carga los concentradores de esfuerzos se incrementan y se aproximan a las hendiduras generadas por pre corrosión. A bajas niveles de carga (389 MPa.), los concentradores de esfuerzos debidos a la pre corrosión son predominantes, de donde la vida en fatiga disminuye considerablemente para las probetas pre corroídas. Además, para bajos niveles de carga (389 MPa.), la temperatura impuesta de 200° C en el cuello de la muestra tiene un efecto considerable en la vida en fatiga, para esta modalidad con este nivel de carga es la menor vida en fatiga. En la Figura 9.13 no se graficaron los resultados de vida en fatiga ultrasónica para el nivel de carga de 35 volts (681 MPa.), puesto que el material no soportó esta carga, presentado una ruptura instantánea al iniciar el ensayo.

CAPÍTULO X.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Se han obtenido ensayos de fatiga ultrasónica en el acero maraging 300, bajo cuatro modalidades de ensayos: a) probetas de maraging 300 maquinadas y ensayadas “como recibidas del proveedor”, b) probetas de maraging 300 sometidas a un proceso térmico de envejecimiento, antes de las pruebas de fatiga, c) probetas sometidas a una temperatura de 200° C en el cuello durante el ensayo, mediante un sistema inductivo electromagnético, y d) probetas sometidas a un proceso de pre corrosión. Todos los ensayos se llevaron a cabo con un esfuerzo medio nulo, o relación de carga de $R = -1$, y sin control de la humedad ambiental. En la Figura 10.1. se concentran los resultados en fatiga ultrasónica en el acero maraging 300, para cuatro modalidades de ensayo: tipo A “como recibido del proveedor”, tipo B con envejecimiento, tipo C con temperatura impuesta de 200° C, y tipo D a bajo nivel de carga de 293 MPa. (vida infinita en fatiga).

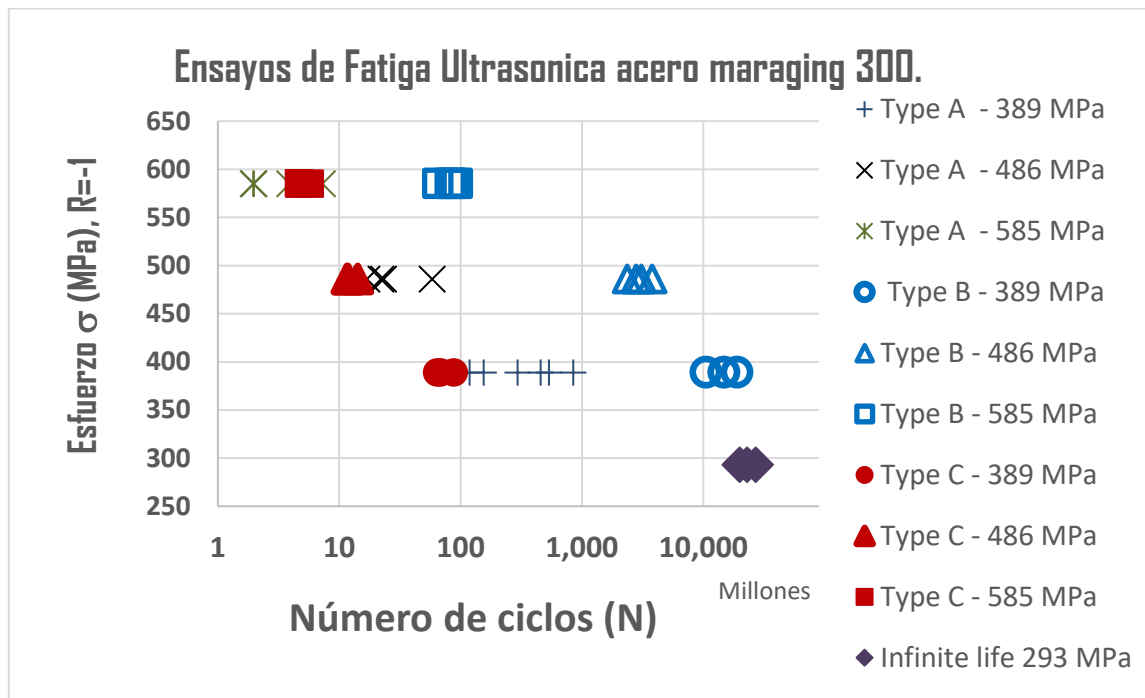


Figura 10.1. Resultados de fatiga ultrasónica para cuatro modalidades de ensayos en el acero maraging 300.

Con respecto a la iniciación y propagación de grietas en este material bajo la carga aplicada en fatiga, el origen de la falla en este acero está asociado con inclusiones, tales como: Ti (N, C) o Al_2O_3 , [44] Wang et al. (2010), donde el tamaño de inclusión está relacionado con el efecto perjudicial sobre la vida útil a la fatiga. Algunos autores sugieren, [45] Abe et al. (2004), que el refuerzo controlado con inclusiones en el material base de acero de alta resistencia, conduce a la mejora de su resistencia a la fatiga. Los conceptos de área óptica oscura (ODA), o área granular fina (FGA), relacionados a la resistencia a la fatiga de los

aceros de alta resistencia, han sido estudiados por algunos autores, [46] Sun et al. (2013), [47] Sander et al. (2014), [48] Li y col. (2012); en el que las propiedades geométricas y el tamaño de la inclusión de iniciación de grietas, [49] Domínguez (2008), con el régimen de carga aplicado, determinan el comportamiento a la fatiga de los aceros de alta resistencia. Sin embargo, otras investigaciones sugieren que factores adicionales, como la interacción físico-química entre la inclusión de iniciación de grietas y matriz, puede inducir modificaciones en la resistencia a la fatiga de aceros de alta resistencia, [50] Spriestersbach et al. (2014).

En la Figura 10.2. se concentran los resultados de fatiga ultrasónica del acero maraging 300 para las cuatro modalidades estudiadas. Para el nivel de carga de 486 MPa el acero maraging 300 tratado por envejecimiento presentó una vida en fatiga de 1500 millones de ciclos; mientras que para el acero maraging 300 “como recibido del proveedor” presenta una vida en fatiga de alrededor de 60 millones de ciclos.

Por otro lado, es notable que el efecto de temperatura impuesta de 200° C, parece no afectar el comportamiento en fatiga ultrasónica de este acero, para los altos niveles de carga (584 – 681 MPa). En efecto, a altos niveles de carga, el efecto de la temperatura impuesta de 200° C, se disminuye considerablemente debido a que el fenómeno de resistencia en fatiga es puramente mecánico y de muy corta duración. Se observa también, una neta tendencia al incremento de la vida en fatiga ultrasónica, para las probetas tratadas por envejecimiento que son reforzadas mediante precipitados (níquel, molibdeno, titanio..). También se puede apreciar que el efecto de la pre-corrosión es extremadamente dañino para la resistencia en fatiga ultrasónica; no obstante, a medida que la carga disminuye el efecto de la temperatura inducida de 200° C, puede provocar una disminución mas pronunciada sobre la vida en fatiga que la pre corrosión misma. Finalmente, el efecto de la pre corrosión y la temperatura inducida de 200° C, disminuyen la resistencia en fatiga ultrasónica de este acero, en comparación de las probetas ensayadas como recibidas del proveedor, a partir de la carga de 584 MPa. También es posible observar de la Figura 10.2 que en el nivel de carga de 435 MPa aproximadamente, se cruzan las curvas de fatiga ultrasónica para las modalidades de ensayo: con temperatura impuesta de 200° C y con pre corrosión. El número de ciclos máximo observados en estos ensayos corresponde a las probetas ensayadas después del tratamiento térmico de envejecido, con un valor cercano a 4000 millones de ciclos a una carga de 389 MPa.

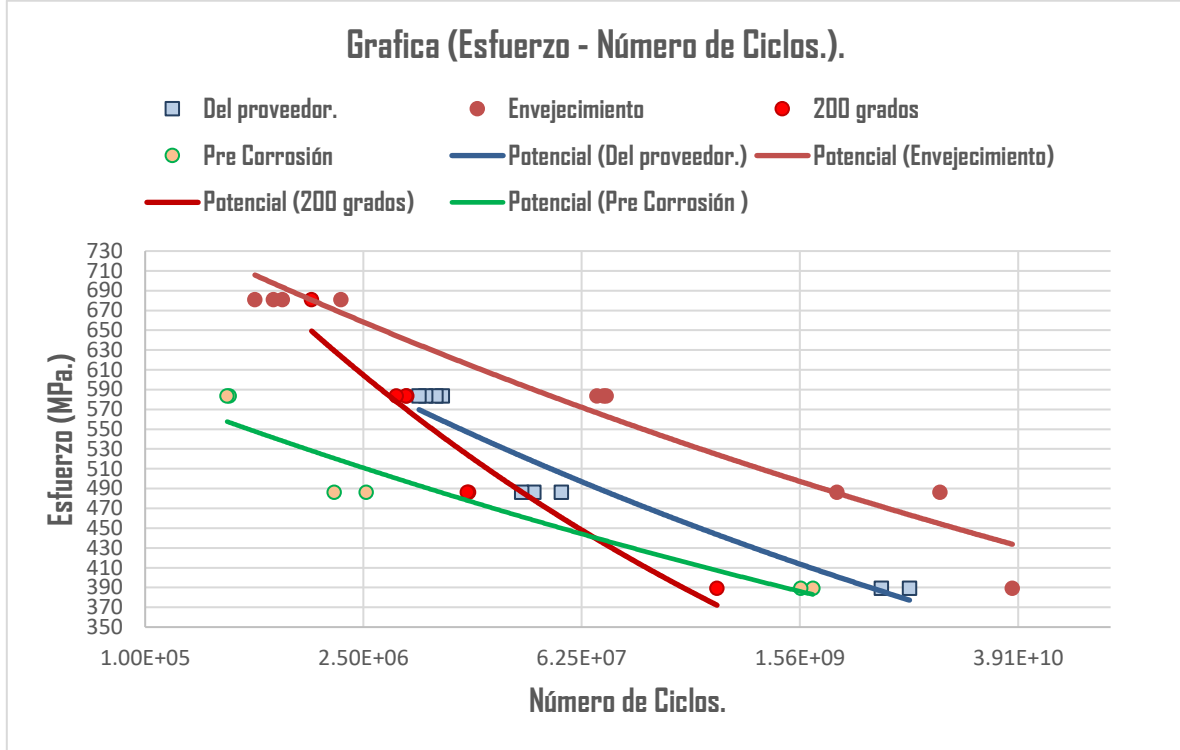


Figura 10.2. Compendio de ensayos de fatiga ultrasónica de maraging 300, bajo las modalidades: a) recibido del proveedor, b) envejecimiento, c) 200° C, impuestos, d) pre corrosión.

10.1. EVALUACION DEL NUMERO DE CICLOS EN LA ZONA ESTABLE DE CRECIMIENTO DE FISURA, PARA LAS PROBETAS SOMETIDAS A TEMPERATURA CONSTANTE DE 200° C EN EL CUELLO.

Para evaluar el número de ciclos en la zona de propagación de grietas estables, se tomaron los siguientes supuestos: el tamaño de iniciación de la grieta fue notablemente menor en comparación con las dimensiones de la muestra; entonces, el rango del factor de intensidad de tensión en modo I para especímenes con temperatura inducida de 200° C, y grieta superficial semielíptica (perpendicular al eje longitudinal de la muestra), es [51]:

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \sqrt{\pi a / Q} F \quad (10.1)$$

Donde: $\Delta \sigma$ es el rango de tensión, a es el tamaño de la grieta, Q es el factor de forma para una elipse ($Q = 1 + 1.464 (a/c) 1.65$, para $a/c \leq 1$, c es la longitud de medio arco de la grieta superficial), y F el factor de corrección del límite de intensidad de tensión. Bajo la tasa de carga $R = -1$, se supone que el período de compresión no contribuye al aumento de la grieta; luego, el K_I se evalúa con $\Delta \sigma / 2$. Las pruebas de fatiga ultrasónica en acero maraging 300 no han revelado propagación de grietas para $\Delta \sigma / 2 = 293$ MPa, con un tamaño de grieta de 150 μm (bajo temperatura impuesta de 200° C). Entonces, la ecuación (10,1) proporciona el rango

del factor de intensidad de tensión en el umbral: $(K_{TH} = 5.02 \text{ MPa (m)}^{0.5})$. El último resultado se obtuvo con los siguientes parámetros: $a/c = 0,8$ (forma semi elíptica más probable), $Q = 2,013$ y $F = 1,12$ (factor de corrección de límite en el punto de profundidad máxima en la grieta superficial). El parámetro F se tomó de un gráfico [51], para la tasa: $a/D = 0,005$, con D el diámetro de la muestra de ensayo en la sección del cuello: $a/D = 150 \text{ } \mu\text{m} / 3000 \text{ } \mu\text{m} = 0,005$. El crecimiento de la grieta puede estimarse en la zona estable de propagación de grietas, utilizando la Ley de París-Gómez-Anderson (expresión diferencial e integral):

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n, \quad N_2 = \int_{a_0}^{a_{end}} \frac{da}{C(\Delta K)^n} \quad (10.2)$$

Con: N_2 el número de ciclos en la zona 2 o la zona de propagación de grietas estables, y las constantes C y n que son propiedades de los materiales. Suponiendo para el umbral: $\Delta K_0 = \Delta K_{TH} = 5.02 \text{ MPa (m)}^{0.5}$, y $\Delta K \approx \Delta K_0 (a/a_0)^{1/2}$, con : $a_0 = 150 \text{ } \mu\text{m}$, y $a_{end} = 3000 \text{ } \mu\text{m}$, la ecuación integral (10.2) se convierte en:

$$N_2 = \frac{a_0^{\frac{n}{2}}}{C(\Delta K_0)^n(-\frac{n}{2}+1)} \left[a_{end}^{-\frac{n}{2}+1} - a_0^{-\frac{n}{2}+1} \right] \quad (10.3)$$

Con: $C = 2.0 \times 10^{-13} \text{ m/ciclo}$, y $n = 3.52$ [52], el número de ciclos en la zona estable de propagación de grietas fue de 3 025 160 (389 MPa), para la probeta con temperatura impuesta de 200° C ; lo que representa tan bajo como 3.18% de la vida total de fatiga para esta probeta (95 millones en ciclos). El último resultado muestra que para aceros de alta resistencia sometidos a pruebas de fatiga ultrasónicas, el número de ciclos en la zona estable de propagación de grietas es inferior al 4% de la vida total de fatiga [53].

CONCLUSIONES.

Se pueden extraer las siguientes conclusiones del presente estudio:

1. Se ha obtenido resistencia a la fatiga ultrasónica en acero maraging 300, a temperatura ambiente, sin control de humedad ambiental y con tensión media cero ($R = -1$), para cuatro condiciones de ensayo: a) probetas como “recibidas del proveedor”, b) Probetas tratadas por envejecimiento, c) probetas sin tratar y sometidas a una temperatura constante de 200° C en el cuello, y d) probetas con pre corrosión.
2. La resistencia a la fatiga de este acero bajo carga ultrasónica está estrechamente relacionada con la inclusión de inicio de fisura: tamaño, naturaleza, forma; y los fenómenos físico-químicos en torno a la inclusión del inicio de la fisura.
3. En el nivel de carga media (486 MPa) las probetas tratadas por envejecimiento presentaron una vida en fatiga de 1500 millones de ciclos aproximadamente; mientras que las probetas “como recibido del proveedor” presentaron una vida en fatiga de alrededor 60 millones de ciclos, un factor de 25, aproximadamente.
4. La temperatura impuesta de 200° C, parece no afectar el comportamiento en fatiga ultrasónica de este acero, para los altos niveles de carga. A altos niveles de carga, el efecto de la temperatura impuesta de 200° C, se disminuye considerablemente debido a que el fenómeno de resistencia en fatiga es predominantemente mecánico y de muy corta duración,
5. El efecto de la pre corrosión es considerablemente dañino para la vida en fatiga ultrasónica; no obstante, a partir de 435 MPa, el efecto de temperatura impuesta de 200°, resulta comparativamente, más dañino.
6. La vida en fatiga ultrasonica del acero maraging se incrementa considerablemente, con el tratamiento térmico de envejecimiento, promotor de precipitados de refuerzo, tipo níquel, molibdeno, titanio.
7. La vida de fatiga en la “Zona Estable” de propagación de grietas se ha evaluado con la Ley de París-Gómez-Anderson para probetas con temperatura impuesta de 200° C; el número de ciclos en esta zona representa solo el $\approx 3.18\%$ de la vida de fatiga total de este maraging con temperatura impuesta de 200° C, [48] Son y Li (2012).
8. El inicio y propagación de grietas se asoció con frecuencia a inclusiones del tipo TiN, que generan la aparición de grietas.
9. A altos niveles de carga (681 MPa) este acero presenta una vida en fatiga de 2 millones de ciclos para las probetas tratadas por envejecimiento; este valor es cercano a las probetas sometidas a 200° C al mismo nivel de carga. Para los bajos niveles de carga (389 MPa), la vida en fatiga del acero envejecido es de 40000 millones de ciclos (máximo valor obtenido en este estudio), el acero como recibido del proveedor de 5000 millones de ciclos, el acero pre corroído de 1500 millones y el acero sometido a 200° C de 200 millones de ciclos.

10. Un número importante de factores deben abordarse para la mayor comprensión del comportamiento de los aceros maraging, bajo sollicitaciones de fatiga ultrasónica; entre otros: las condiciones de adherencia entre la inclusión de inicio de fractura y la matriz, la interacción entre dos o mas inclusiones de inicio de fisura, la forma, tamaño y orientación de esta(s) inclusión(es), las condiciones de carga (la relación de carga, carga uniaxial, multiaxial), la condiciones del medio ambiente en términos de temperatura o atmosferas corrosivas, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Suresh, S. “Fatigue of Materials”, Cambridge University Press, 2nd Edition, 2004.
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Aloha_Airlines.
- [3] 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).
- [4] Desconocido, DISEÑO MECÁNICO INGENIERÍA EJECUCIÓN MECÁNICA, TEORÍAS DE FALLA POR FATIGA, Ude Santiago de Chile. (Gráfica de Wöhler).
- [5] Shigley, J.E. y Mitchell, L.D. Diseño en ingeniería mecánica. 3 ed. Col. Granjas Esmeralda: McGraw-Hill, 1985. p. 291.
- [6] Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley. 8ª ed. Mc Graw Hill.
- [7] Apuntes asignatura Mecánica de la fatiga y la fractura avanzada e Introducción a la mecánica de la fractura y la fatiga. Master diseño avanzado en ingeniería mecánica. Universidad de Sevilla.
- [8] P. Paris y F. Erdogan, “A critical analysis of crack propagation laws,” J. Fluids Eng., vol. 85 (4), 1963, pp. 528-533.
- [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. 3 Madrid, 2009).
- [13] <https://redisyt.org/portal/index.php/viga>.
- [14] D. Brandolisio, G.P., G. De Corte, J. Symynck, M. Juwet, F. De Bal. Rotating bending machine for high cycle fatigue testing. p. 72009).
- [15] Norton L., R. Diseño de Máquinas. México, 1999).
- [16] Bathias, “Piezoelectric fatigue testing machine and device”. International Journal of Fatigue, 28(11), 1439 – 1445 (2006)
- [17] Kong, “Theoretical and numerical study on vibratory fatigue” , These to doctorat, University of Compiegne (1987).
- [18] Ni, J., “Mechanical Behavior of Alloys in Ultrasonic Fatigue”, These to doctorat, CNAM (1991)
- [19] Thanigaiyarasu, G., “Contribution to the study of fatigue life and crack growth in vibration fatigue”, These to doctorat, University of Thechnology of Compiegne (1991)

- [20] Gonzalo M. Domínguez Almaraz, “Ultrasonic Fatigue Endurance of Thin Carbon Fiber Sheets”, Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 47, pp 1654 – 1660 (2016).
- [21] 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.
- [22] Modal Analysis Theory and Testing, w.Heylen, S.Lammens, P.Sas – KU Leuven, Belgica. Exploring Ideas Test, version 9, MTS.
- [23] Mary Kathryn Thompson PhD, (2017), “ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis”, Science Direct, pp 1-199.
- [24] Paul Doru Barsanescu, “Von Mises Hypothesis revised” Acta Mechanica, February 2017, vol. 228.
- [25] <https://www.ssa-corp.com/es/maraging-300-AMS-6514.php>.
- [26] <https://wldstainless.com/es/whats-18ni-maraging-steel/>
- [27] <https://www.think3d.in/eos-maraging-steel-ms1/>
- [28] <https://www.acerosbohler.com/es/products/v300vmr/>
- [29] https://www.acerosbohler.com/app/uploads/sites/92/2023/03/productdb/api/w722-vmr_es.pdf
- [30] <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/parting-and-grooving/profiling>.
- [31] 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.
- [32] P. Bajons, W. Kromp: Ultrasonics, 1978, vol. 16(5), pp. 213-17.
- [33] A. Puškár: Ultrasonics, 1993, vol. 31(1), pp. 61-7.
- [34] <https://www.thermofisher.com/mx/es/home/materials-science/eds-technology.html>
- [35] Mitutoyo, “Rugosidad Superficial”
- [36] Mitutoyo, Catalog Number E70.
- [37] Norma DIN 4769.
- [38] Taylor Hobson, Manual del Rugosímetro Surtronic 3 Plus.

- [39] Ortiz Berrocal, Luis (2007). McGraw-Hill, ed. Resistencia de materiales. Madrid. ISBN 9788448156336.
- [40] Tecnología industrial II. España: Everest Sociedad Anónima. 2014. p. 440. ISBN 9788424190538.
- [41] (Hans Topo1993 - Trabajo propio fluencia diagrama tracción acero).
- [42] <https://www.americanelements.com/maraging-steel#section-properties>.
- [43] Aerospace Material Specification 5662M, Nickel Alloy, Corrosion and Heat-Resistant, Bars, Forgings and Rings, SAE International, (2004).
- [44] Wang, W., Yan, W., Duan, Q., Shan, Y., Zhang, Z., Yang, K., 2010. Study on fatigue property of a new 2.8 GPa grade maraging steel. Materials Science and Engineering A 527(13-14), 3057-3063.
- [45] Abe, T., Furuya, Y., Matsuoka, S., 2004. Gigacycle fatigue properties of 1800 MPa class spring steels. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 27(2), 159-167-
- [46] Sun, Ch., Lei Z., Xie, J., Hong, Y., 2013. Effects of inclusion size and stress ratio on fatigue strength for high-strength steels with fish-eye mode failure. International Journal of Fatigue 48, 18-27.
- [47] Sander, M., Müller, T., Lebahn, J., 2014. Influence of mean stress and variable amplitude loading on the fatigue behaviour of a high-strength steel in VHCF regime. International Journal of Fatigue 62, 10-20.
- [48] Son, W.J., Li, W., 2012. Subsurface crack initiation and propagation mechanisms in very high cycle regime, Advances Materials Research (482– 484), 1524–1529.
- [49] Dominguez, G.M., 2008. Prediction of very high cycle fatigue failure for high strength steels, based on the inclusion geometrical properties. Mechanics of Materials 40(8), 636-640.
- [50] Spriestersbach, D., Grad, P., Kerscher, E, 2014. Influence of different non-metallic inclusion types on the crack initiation in high-strength steels in the VHCF regime. International Journal of Fatigue 64, 114-120.
- [51] Raju, I.S., Newman, J.C. Jr., “Stress-intensity factors for circumferential surface cracks in pipes and rods under tension and bending loads”, NASA reports: NASA-TM-87594, 2013.
- [52] Xu, Z.K., Wang, B., Zhang, P., Zhang, Z.F., “Short fatigue crack growth behavior in 18Ni maraging steel”, Mat. Sci. and Eng., Vol. 807, No. 11, 2021, pp. 140844.

- [53] Guzman Tapia, M., Dominguez Almaraz, G.M., Bermudez Reyes, B., Zuniga Tello, I. F., Ruiz Vilchez, J.A., “Failure analysis on pre-corroded specimens of Inconel alloy 718, under ultrasonic fatigue tests at room temperature”, *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 120, 2021, pp. 105064.

ANEXO I.- TRABAJOS BIBLIOGRÁFICOS DE DIFUSIÓN.

Con referencia al presente trabajo se pudieron obtener algunos trabajos de difusión en revistas de ciencia y tecnología, así como la presentación en congresos internacionales en forma oral y tipo posters. Con se lograron la publicación de un artículo científico y las constancias de participación que a continuación se describen.

También se encuentran en esta sección los artículos de trabajos relacionados con la fatiga ultrasónica donde se tuvo la oportunidad de colaborar y generar conocimiento científico.

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS.

Presento el siguiente artículo publicado sobre el presente trabajo de investigación referente al acero maraging 300. El cual lleva por título (Ultrasonic **Fatigue Endurance of the Maraging 300 Steel**), en la revista Science Direct resultado del procedía en la conferencia IGF26 - 26th International Conference on Fracture and Structural Integrity. En este artículo científico figuro como el primer autor.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321621001682>



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Procedia Structural Integrity 33 (2021) 658–664

Structural Integrity

Procedia

www.elsevier.com/locate/procedia

IGF26 - 26th International Conference on Fracture and Structural Integrity

Ultrasonic Fatigue Endurance of the Maraging 300 Steel

Julio A. Ruiz Vilchez^a, Gonzalo M. Domínguez Almaraz^{b,*}, Mario A. Sánchez Miranda^c

^ajaruiz@umich.mx, ^bdalmaraz@umich.mx, ^cele_sami@hotmail.com

^{a,b,c}Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Santiago Tapia No. 403, Col. Centro, Morelia, Michoacán, 58000, México

Abstract

Ultrasonic fatigue tests were carried out at room temperature and under zero mean stress ($R=-1$), on the aeronautical steel maraging 300. Hourglass shape testing specimen dimensions were obtained by modal numerical simulation, using the mechanical properties of this steel: density, Young Modulus and Poisson ratio. Ultrasonic fatigue results were achieved under three loading stress: 585, 486 and 389 MPa, corresponding to high, middle and low applied stress, respectively. Fracture surfaces were analyzed with scanning electronic microscope, in order to investigate the origin and causes of crack initiation and propagation under this testing conditions. Finally, general conclusions were addressed concerning the ultrasonic fatigue endurance of this aeronautical steel, together with the crack initiation and propagation behavior.

© 2021 The Authors. Published by Elsevier B.V.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>)

Peer-review under responsibility of the scientific committee of the IGF ExCo

Keywords: Maraging steel 300; Ultrasonic fatigue; Fracture surfaces; Crack initiation;

Presento los logros en colaboración con mi asesor y otros compañeros en trabajos de difusión científica referentes a ensayos de fatiga en otra aleación, en la cual colabore muy de cerca.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321622002980>



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Procedia Structural Integrity 39 (2022) 161–172

Structural Integrity

Procedia

www.elsevier.com/locate/procedia

7th International Conference on Crack Paths

Dissimilar joining of ABS and PP using friction stir welding (FSW) and mechanical properties evaluation

M.A. Sánchez Miranda¹, G.M. Domínguez Almaraz^{1, *}, J.J. Villalón López¹, J.A. Ruiz Vilchez¹

¹University of Michoacan (UMSNH), Faculty of Mechanical Engineering, Santiago Tapia 403, Col. Centro, Morelia, 58000, Mexico

Abstract

This work presents the results of the Friction Stir Welding (FSW) joining of two polymeric materials: Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS), and Polypropylene PP. The first results showed poor behavior of mechanical properties; nevertheless, in modifying the process parameters, particularly rotation speed, advance speed and approximation speed, an adequate compromise of resulting mechanical properties were obtained. Tensile tests on joining dissimilar specimens ABS-PP, show as high as 90% of strength compared to the parent materials; in the best knowledge of the authors, no previous investigations have been reported for the joining of these two thermoplastic materials, using FSW joining technique. Furthermore, analysis of hardness near the welding zone and visualization with optical and scanning electronic microscope (SEM), were carried out in order to deduce the generalities of effect-cause in the improvement of tension strength.

© 2021 The Authors. Published by Elsevier B.V.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>)

Peer-review under responsibility of CP 2021 – Guest Editors

Keywords: Dissimilar joining; Thermoplastics ABS-PP; Joining efficiency; Hardness; Material flow

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630720315880>



Engineering Failure Analysis

Volume 120, February 2021, 105064



Failure analysis on pre-corroded specimens of Inconel alloy 718, under ultrasonic fatigue tests at room temperature

Manuel Guzmán-Tapia ^a✉, Gonzalo Mariano Dominguez Almaraz ^a✉, Bárbara Bermudez Reyes ^b✉, Ishvari Fernanda Zuñiga Tello ^a✉, Julio Adrián Ruiz Vilchez ^a✉

Show more ▼

+ Add to Mendeley Share Cite

ARTICLE IN PRESS

Engineering Failure Analysis xxx (xxxx) xxx



Contents lists available at ScienceDirect

Engineering Failure Analysis

journal homepage: www.elsevier.com/locate/engfailanal



Failure analysis on pre-corroded specimens of Inconel alloy 718, under ultrasonic fatigue tests at room temperature

Manuel Guzmán-Tapia ^a, Gonzalo Mariano Dominguez Almaraz ^{a,*},
Bárbara Bermudez Reyes ^b, Ishvari Fernanda Zuñiga Tello ^a,
Julio Adrián Ruiz Vilchez ^a

^a Posgrado en Ciencias en Ingeniería Mecánica U. M. S. N. H., Av. Francisco J. Múgica S/N C. P. 58140 Morelia, Michoacán, Mexico

^b Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, Carretera a Salinas Victoria, Km 2.3, C. P. 66600 Apodaca, NL, Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:

Inconel 718
Ultrasonic fatigue
Pre-corrosion
Numerical simulation
Crack growth

ABSTRACT

This work deals with the pre-corrosion effects on the ultrasonic fatigue endurance failure of Inconel alloy 718 (I-718), and on crack initiation and propagation at room temperature. Pre-corrosion was induced using the international standard ESA ECSS-Q-ST-70-37C of the European Space Agency. The base and pre-corroded specimens were tested under the ultrasonic fatigue technique at frequency of 20 kHz, room temperature, without control of environmental humidity and with the load ratio $R = -1$. The results of ultrasonic fatigue endurance show that at higher levels of stresses, up to 746 MPa, the pre-corroded specimens show a lower fatigue endurance with a factor of 10 approximately, compared with the base material. In addition, the principal trends of pitting at the specimen neck section were reproduced by numerical models in order to investigate the stress concentration factors and its impact in fatigue endurance. Finally, the stress intensity factor in mode I was evaluated numerically at the specimen neck section from crack initiation to fracture and the stress intensity factor range threshold ΔK_{TH} was obtained for the two type of tested specimens, together with the number of cycles in the "Stable Zone of Crack Growth", for both types of specimens.

Se obtuvo una publicación en la revista *Procedia Structural Integrity* 18 (2019) 594–599 presentado en la 25th International Conference on Fracture and Structural Integrity con el título **Ultrasonic fatigue on the automotive steels: AISI/SAE 4140T and 1045**. Como autores del trabajo de investigación G.M. Dominguez Almaraz^{1,*}, J.A. Ruiz Vilchez¹, Alexiane Dominguez² ¹Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo(UMSNH), Santiago Tapia No. 403, Col. Centro, Morelia, Michoacán, 58000, México ²Université Paris-Sud 11, URF Sciences et Techniques, BCST: Biologie Chimie Sciences de la Terre, 15 Rue Georges Clemenceau, 91400 Orsay, France .

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321619304147>



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Procedia Structural Integrity 18 (2019) 594–599

Structural Integrity
Procedia
www.elsevier.com/locate/procedia

25th International Conference on Fracture and Structural Integrity

Ultrasonic fatigue on the automotive steels: AISI/SAE 4140T and 1045

G.M. Dominguez Almaraz^{1,*}, J.A. Ruiz Vilchez¹, Alexiane Dominguez²

¹Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo(UMSNH), Santiago Tapia No. 403, Col. Centro, Morelia, Michoacán, 58000, México

²Université Paris-Sud 11, URF Sciences et Techniques, BCST: Biologie Chimie Sciences de la Terre, 15 Rue Georges Clemenceau, 91400 Orsay, France

Abstract

Ultrasonic fatigue tests were carried out on two automotive steels: AISI/SAE 4140T and 1045, to investigate the fatigue endurance of these materials and the mechanisms of crack initiation and propagation under this modality of loading. Tests were obtained at room temperature and without control of environmental humidity; the last parameter was maintained between 50 and 65%. Ultrasonic fatigue results show that the effect of non-metallic inclusions plays an important role in the decay of fatigue endurance for the 4140T steel, together with the effect of previous heat treatments. Concerning 1045 steel, non-metallic inclusions play an important role too, but this time the temperature and variation of ductility with temperature induce an effect on the ultrasonic fatigue endurance. Finally, the fracture surfaces were analyzed in order to obtain the principal trends of crack initiation and propagation on these steels, under the ultrasonic loading modality.

© 2019 The Authors. Published by Elsevier B.V.

Peer-review under responsibility of the Gruppo Italiano Frattura (IGF) ExCo.

Keywords: Ultrasonic fatigue; Car steels; Non-metallic inclusions; Crack initiation and propagation; Fracture surfaces.

1. Introduction

The AISI SAE car steels 4140T and 1045, are two of the most popular steels in the car industry used in a variety of components. The 4140T is used in shafts, crankshafts, bolts/nuts, gears, milling spindles, collars, jigs, steel conveyor

PRESENTACIÓN EN CONGRESOS INTERNACIONALES.

A continuación, se presenta participación en el congreso internacional XXIX International Materials Research Congress referente al diseño de las probetas de acero maraging 300 resultado de la presente investigación y con el siguiente título **SPECIMEN DESIGN OF MARAGING 300, FOR ULTRASONIC FATIGUE TESTS.**



Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.

August 2021

TO WHOM IT MAY CONCERN

P r e s e n t

This is to certify that *Julio Adrian Ruiz Vilchez, Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, Mario Alberto Sanchez Miranda, Ishvari Fernanda Zuñiga Tello, Manuel Guzmán Tapia* presented the contribution: **SPECIMEN DESIGN OF MARAGING 300, FOR ULTRASONIC FATIGUE TESTS.** as **Poster** modality, in the *A1. Aeronautical and Aerospace Processes, Materials and Industrial Applications* Symposium at the **XXIX International Materials Research Congress** held in Cancun, Mexico from August 15th to 20th, 2021.

Sincerely,

Patricia del Carmen Zambrano Robledo
President

