



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO MAESTRIA EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA



**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA EN  
FATIGA ULTRASÓNICA DE LA ALEACIÓN  
DE TITANIO, NOMINACIÓN Ti-6Al-4V  
UTILIZADA EN TURBOMAQUINARIA**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**MAESTRA EN CIENCIAS**

PRESENTA:

**ING. ISHVARI FERNANDA ZUÑIGA TELLO**

ASESOR:

**DR. GONZALO M. DOMÍNGUEZ ALMARAZ**

***Sin tu luz... La mía no puede brillar. Para Guadalupe Fernanda***



## **DEDICATORIA**

*A mi hija que hace que todo valga la pena.*

Gracias a Dios, que me ha puesto los medios y me ha marcado el camino poco a poco.

A mi Mamá, porque es la mujer más fuerte que conozco, porque me dio el estudio, me inculcó los valores que me han hecho la mujer que ahora soy y ha hecho de mí siempre su prioridad y de ella cada uno de mis logros.

A mi Papá por darme la vida, y la fortaleza de las acciones.

A mi hermana, porque comparte más que el útero de donde provenimos, porque aunque no le guste admitir, practica conmigo siempre la compasión, porque es mi niñera favorita, y seguramente la de Guadalupe, porque me ha ayudado más que nadie en este trayecto de maestría y porque es mi hermana favorita.

A mis abuelitos porque para mí son la pareja que me ha hecho creer en el amor verdadero desde muy chica, a mi abuelita porque es una mujer maravillosa, que me ha dado su cariño, su comprensión y sus cuidados, porque el cariño también educa. Te amo mamacita. A mi papá Aquiles, que está conmigo en mi corazón y en mis pensamientos, porque me enseñó a compartir y a aferrarme, por siempre haber sido mi papá, porque papá es el que cría y educa.

A mi Tía Lucy, quien con su amor, me regaló desde muy chica unas alas, que coció en mi espalda, para que pudiera volar, llenándolas de sueños, unas alas que me hacen alzar el vuelo cada día más, que me permiten creer en lo imposible y soñar cosas extraordinarias, que me ha enseñado a amarme, respetarme y reinventarme cada día de mi vida.

A mi Tío Jaime, mi Ingeniero favorito, porque con su ejemplo y amor a su profesión, con sus logros y su personalidad, me inspiró en ésta carrera que elegí y de la que estoy profundamente enamorada.

¡A la familia TELLO.... Mi enorme familia!

A mis amigos del alma, Tobias, Diana, Alejandro y Pablo, gracias por ser el escaparate más rápido a la diversión que nunca es suficiente y siempre nos hace falta, por las largas conversaciones y los consejos, por estar siempre conmigo.



## AGRADECIMIENTOS

A mi asesor Dr. Gonzalo M. Domínguez Almaraz, por dirigir mi trabajo de maestría, me inspiró, siempre tiene la puerta de su cubículo abierta y los recursos disponibles para la investigación. Porque siempre está al pendiente de mi trabajo y me ha guiado con su conocimiento, tiene todo mi respeto y admiración. ¡Gracias Doctor!

A mis sinodales, de quienes he recibido siempre apoyo en la investigación, quienes me han compartido su conocimiento y apoyado siempre que he acudido a ellos, gracias por tener siempre la mejor disposición porque han sido mis maestros y mis críticos. ¡Muchas Gracias! Dr. Erasmo Cadenas Calderón, Dr. Juan Felipe Soriano Peña, M. en I. Miguel Villagómez Galindo, M.C Victor López Garza.

A mis compañeros del grupo de trabajo, a quienes siempre he podido acudir cuando tengo alguna duda o he hecho algo mal, y que son los primeros en ayudarme, Gracias. Erasmo Correa, Jorge Ávila, Julio Cabrera, Manuel Guzmán

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por el uso de sus instalaciones, especialmente al taller de automatización por las atenciones y ayuda brindada para el uso de equipos necesarios en éste trabajo.

Al Instituto Tecnológico de Morelia por la apertura en el uso de laboratorios, microscopio electrónico de barrido, especialmente a la M.C Lourdes Mondragón quien ha estado disponible para colaborar en este trabajo.

A CONACYT por la beca otorgada para los estudios de maestría. Gracias.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT.....	XII
NOMENCLATURA.....	XIII
ANTECEDENTES.....	10
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
OBJETIVOS.....	13
OBJETIVO GENERAL.....	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
JUSTIFICACIÓN.....	14
HIPÓTESIS.....	15
METODOLOGÍA.....	16
RECURSOS HUMANOS.....	18
RECURSOS MATERIALES.....	18
I. MATERIAL DE ESTUDIO.....	24
1.1 FATIGA MECÁNICA.....	24
1.1.1 FATIGA ULTRASÓNICA.....	24
1.2 RESONANCIA.....	26
1.3 FALLA POR FATIGA ULTRASÓNICA.....	26
1.4 TITANIO.....	28
1.4.1 ALEACIONES DE TITANIO.....	30
1.4.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ALEACIÓN DE TITANIO Ti-6Al-4V.....	31
1.4.3. PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LA ALEACIÓN DE TITANIO Ti-6Al-4V.....	31
1.5. PERFÍL DE LA PROBETA DE Ti-6Al-4V.....	32
1.6 MEDIDAS NECESARIAS PARA OBTENER ENSAYOS EN FATIGA ULTRASÓNICA DEL MATERIAL.....	32



II. SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA OBTENER EL PERFÍL DE LA PROBETA EN FATIGA ULTRASÓNICA .....	34
2.1 NECESIDAD DEL CÁLCULO DE LOS PERFILES DE PROBETAS.....	34
2.2 SIMULACIONES EN ANSYS®.....	36
2.2.1 TEORÍA ALUSIVA DEL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO.....	36
2.2.2 SECUENCIA DEL PROCESO DE SIMULACIÓN.....	38
III. MAQUINADO Y PRE-CORROSIÓN DE LAS PROBETAS .....	47
3.1 MAQUINADOS.....	47
3.2 PRE-CORROSIÓN DE LAS PROBETAS .....	49
3.2.1 PRIMERA INMERSIÓN A UN pH DE 2.4.....	50
3.2.2 SEGUNDA INMERSIÓN A UN pH DE 1.4 .....	53
IV. ENSAYOS.....	57
4.1 ADAPTACIONES A LA MÁQUINA ULTRASÓNICA .....	57
4.2 ENSAYOS.....	57
4.2.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS TERMOGRÁFICO .....	59
4.2.2 SEGUNDOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS TERMOGRÁFICO .....	62
V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS EN FATIGA ULTRASÓNICA.....	67
5.1 RESULTADOS.....	67
5.2 IMÁGENES DE SUPERFICIES DE FALLO.....	69
5.3 RESULTADOS DE SIMULACIONES DE CONCENTRADORES DE ESFUERZO.....	71
CONCLUSIONES .....	76
REFERENCIAS .....	79
PRESUPUESTO Y FINANCIAMIENTO .....	83
APÉNDICE I .....	84
DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO SOLID185.....	84



## ÍNDICE DE FIGURAS

### METODOLOGÍA

Fig. I.I. Piezoeléctrico y multiplicador de desplazamiento. ....	19
Fig. I.II. Sensor inductivo de proximidad.....	20
Fig. I.III. Circuito y tarjeta para adquisición de datos provenientes del generador de alta frecuencia. ....	21
Fig. I.IV. Aplicación desarrollada para el programa de computo de Lab View .....	21
Fig. I.V. Proceso de Maquinado.....	22
Fig. I.VI. Torno CNC .....	22

### CAPÍTULO I

Fig. 1. 1. Máquina de fatiga ultrasónica.....	27
---	----

### CAPÍTULO II

Fig. 2. 1. Gráficas de esfuerzo y desplazamiento de la probeta .....	35
Fig. 2. 2. Entorno principal de Ansys MultyPhysics .....	39
Fig. 2. 3. Ventana de preferencias. ....	40
Fig. 2. 4. Selección del elemento de mallado.....	41
Fig. 2. 5. Ventana de Propiedades del material .....	41
Fig. 2. 6. Ventana de Propiedades del material .....	42
Fig. 2. 7. Perfil con una longitud de 64 mm. ....	42
Fig. 2. 8. Selección del tipo de análisis. ....	43
Fig. 2. 9. Ventana de selección del método Block Lanczos .....	43
Fig. 2. 10. Resultado de análisis modal que no cumple con la frecuencia requerida .....	44
Fig. 2. 11. Probeta de la aleación de tintanio . ....	45
Fig. 2. 12. Dimensiones de la probeta de la aleación de titanio cumpliendo con la condición de resonancia .....	45



### CAPÍTULO III

Fig.3.1. Materia prima sin maquinar.....	47
Fig.3.2. Primera probeta maquinada con el nuevo mini-torno .....	48
Fig.3.3. Algunas de las probetas maquinadas pertenecientes al segundo lote.....	49
Fig.3.4. Superficie sin ataque de pre-corrosión. ....	49
Fig.3.5. Con 6 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones: $x=1000$ y $x=2000$ .....	50
Fig.3.6. Con 8 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones: $x=1000$ y $x=2000$ . ....	50
Fig.3.7. Con 12 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones: $x=1000$ y $x=2000$ . ....	50
Fig.3.8. Con 16 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones: $x=1000$ y $x=2000$ . ....	51
Fig.3.9. Con 18 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones: $x=1000$ y $x=2000$ . ....	51
Fig.3.10. Con 24 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones: $x=1000$ y $x=2000$ .....	51
Fig.3.11. Pre corrosión de las probetas .....	52
Fig.3.12. Probeta inmersa en ácido para el proceso de pre-corrosión .....	53
Fig.3.13. Con 8 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones: $x=1000$ y $x=2000$ . ....	53
Fig.3.14. Con 12 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones: $x=1000$ y $x=2000$ .....	53
Fig 3.15. Con 15 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones: $x=1000$ y $x=2000$ .....	54
Fig 3.16. Con 24 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones: $x=1000$ y $x=2000$ .....	54
Fig.3.17. Con 30 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones: $x=1000$ y $x=2000$ .....	54

### CAPÍTULO IV

Fig.4.1. Probeta montada en la máquina ultrasónica. ....	59
Fig.4.2. Probetas a 24 minutos de pre-corrosión con $pH=2.4$ .....	60
Fig 4.3. Probetas a 16 minutos de pre-corrosión con $pH=2.4$ .....	60
Fig.4.4. Probetas a 8 minutos de pre-corrosión, con $pH=2.4$ .....	60
Fig.4.5. Probetas sin ataque de pre-corrosión con $pH=2.4$ .....	61
Fig.4. 6.Probetas sin ataque de pre-corrosión .....	62
Fig.4.7. Probetas con $pH=1.4$ .....	63
Fig.4.8. Probetas con $pH=1.4$ .....	63
Fig.4.9. Imágenes termográficas tomadas en el proceso de iniciación de fisura: .....	64
Fig.4.10. Gráfica Esfuerzo-Temperatura .....	65



## CAPÍTULO V

Fig.5.1. Gráfica de Wöhler de resistencia en fatiga ultrasónica: .....	68
Fig.5.2. Probeta 6 ensayada a 745 MPa, con pH=1.4 y con 8 minutos de pre-corrosión .	69
Fig.5.3. Probeta 7 ensayada a 596 MPa, con pH=1.4 y con 16 minutos de pre-corrosión	70
Fig.5.4. Probeta 16 ensayada a 923 MPa, sin pre-corrosión.....	70
Fig.5.5. Esfuerzos de Von Mises en el cuello de la probeta de ensayos .....	72
Fig.5.6. Distribucion de los esfuerzos de Von Mises en la probeta.....	73
Fig. 5.7. Modelo propuesto para la evolucion del concentrador de esfuerzos .....	75



## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO I

Tabla 1. 1. Composición química de la aleación Ti-6Al-4V ..... 31

Tabla 1. 2. Propiedades mecánicas de la aleación de titanio Yi-6Al-4V ..... 31

### CAPÍTULO II

Tabla 2. 1. Propiedades físicas y mecánicas del material. .... 39

Tabla 2. 2. Propiedades de la malla. .... 44

### CAPÍTULO III

Tabla 3. 1. Parámetros típicos para el mecanizado de la aleación de titanio Ti-6Al-4V.... 48

### CAPÍTULO IV

Tabla 4.1. Relación: voltaje-desplazamiento-esfuerzo- esfuerzo/límite elástico..... 58

### CAPÍTULO V

Tabla 5.1. Resultados de fatiga ultrasónica de las 16 probetas en la segunda etapa. .... 67



## RESUMEN

La aleación de Titanio (Ti6Al4V) es ampliamente utilizada en aplicaciones industriales tales como: turbo-maquinaria, medicina, generación de energía, la industria aeroespacial, etc. , donde su relación de alta resistencia y bajo peso combinada con su resistencia a la corrosión hacen de esta aleación de titanio una de las más utilizadas en las industrias modernas. Estas aplicaciones industriales frecuentemente implican una combinación de carga mecánica y ataque corrosivo, cuyos efectos físicos y mecánicos no son completamente comprendidos en el estado del arte actual. Con el fin de evaluar el efecto del ataque de pre-corrosión controlada en esta aleación de titanio, se llevaron a cabo pruebas de fatiga ultrasónica bajo el régimen de carga  $R=-1$ , en muestras pre-corroídas y no corroídas. Especímenes pre-corroídos logran sumergiéndolos en una solución de ácido clorhídrico con dos valores de pH (1.4, 2.4), durante determinados minutos de inmersión; representando un equivalente de la corrosión atmosférica durante un largo período de tiempo. El ataque de la pre-corrosión provoca picaduras en la superficie de la muestra y aumenta la concentración de esfuerzos; estos efectos son perjudiciales y conducen a disminuir la resistencia a la fatiga.

Los resultados muestran que la resistencia a la fatiga ultrasónica disminuye considerablemente con el tiempo de pre-corrosión y con la acidez de pH. Finalmente, los resultados de resistencia de la fatiga junto con la iniciación y propagación de grietas en la superficie de fractura de las muestras son analizados mediante microscopía óptica y electrónica de barrido, para establecer las conclusiones de esta tesis de Maestría

**PALABRAS CLAVE:** Fatiga Ultrasónica, Pre-corrosión, Titanio, Ti-6Al-4V, Picadura



## ABSTRACT

Titanium alloy (Ti6Al4V) Titanium alloy Ti6Al4V is widely used on industrial applications such as: turbo-machinery, medicine, power generation, aerospace,...etc., where its high strength combined with its low weight ratio and outstanding corrosion resistance makes this metallic alloy largely suitable. These industrial applications frequently imply a combination of mechanical loading and corrosion attack, whose physical and mechanical effects are not completely understood. In order to assess the effect of controlled corrosion attack on this titanium alloy, ultrasonic fatigue testing was carried out under load regimen  $R=-1$  on corroded and non-corroded specimens. Corroded specimens were immersed in a solution of hydrochloric acid with  $\text{pH} = 1.4$  and  $\text{pH} = 2.4$ , during determinate minutes of pre-corrosion immersion, representing the atmospheric corrosion influence for a long period of time. Corrosion attack induces pitting holes on the specimen surface and increases the stress concentration factors; these detrimental effects leading to decrease on fatigue endurance. Results show that fatigue strength decreases considerably with time of pre-corrosion and with the pH acidity. Finally, fatigue endurance results together with crack initiation and propagation on the specimen fracture surface are analyzed by SEM (Scanning Electron Microscopy) in order to establish conclusions in this master work.



## NOMENCLATURA.

B, constante = 4,78 para el modelo representativo del factor de concentración de esfuerzos

d, es la separación entre picaduras

E, Módulo de Young.

$\epsilon$ , Deformación.

$K_c$  Factor de concentración de esfuerzos

$\lambda$ , Conductividad térmica.

N, Número de ciclos.

$\nu$ , Relación de Poisson.

$\rho$ , Densidad.

$\sigma$ , Esfuerzo aplicado.

$\sigma_Y$ , Esfuerzo de Cedencia.

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

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



## ANTECEDENTES

Las pruebas ultrasónicas se utilizaron por primera vez por Hopkinson a principios del siglo pasado, y en 1911 funcionaban a una frecuencia de 33 Hz. Los sistemas eran completamente mecánicos. Después de esto, el mismo Hopkinson desarrolló un sistema electromagnético utilizando la resonancia que trabajaba a 116 Hz.

Catorce años después de Hopkinson, llegó Jenkin probando algunos materiales a una frecuencia de 2.5 kHz utilizando la técnica ultrasónica.

Para 1930, Jenkin y Lehmanh desarrollaron un sistema neumático que alcanzaba los 10kHz. [1]

Fue hasta 1950 que Manson desarrolló un sistema piezoeléctrico que alcanzaba los 20kHz. [2]

En 1965 Kikukawa propuso una máquina que alcanzaba la frecuencia de 199 kHz, sin embargo, si se tiene en cuenta que para la puesta en marcha de ensayos en fatiga ultrasónica, la frecuencia de natural de oscilación de la probeta se incrementa con la disminución de la masa, esta propuesta de Kikukawa es muy poco utilizada debido a la talla muy pequeña de las probetas resultantes. [3]

A mediados de los años 80 los investigadores japoneses establecieron que la mayoría de las aleaciones metálicas podrían fallar más allá de  $10^7$  ciclos.

Recientemente, el fenómeno de fallas por fatiga en el rango giga-cíclico de varias aleaciones metálicas han sido establecidas por Bathias y colaboradores [4] [5].

En el instituto Tecnológico de Materiales Avanzados, ITMA del CNAM de París, Francia. La técnica de ensayos de fatiga ultrasónica se utiliza en ensayos de MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA. FIM. UMSNH.



tracción-compresión, torsión, altas y bajas temperaturas, fricción-desgaste, entre otras [6].

En 2011, un trabajo de Cavalieri [7], muestra una nueva metodología, para el estudio del comportamiento de fatiga a elevada temperatura en un acero austenítico, metodología que funciona como un punto de partida, de la que se utilizará en el trabajo con la diferencia que en el trabajo mencionado la probeta se induce a una cierta temperatura, y en este proyecto se utilizará pre-corrosión, que también induce aumento de la temperatura. Como se ha mencionado anteriormente, la aleación de titanio Ti6Al4V es la más utilizada en las investigaciones debido a que, entre otros, formó parte del "Programa Nacional de Fatiga a Alto Número de Ciclos en Motores de Turbina" [8]. Adicionalmente, algunos trabajos muestran el análisis y estudio de la evolución de las grietas en las pruebas de fatiga ultrasónica. [9] [10] [11] [12]

Adicionalmente, algunos trabajos muestran el análisis y estudio de la evolución de las grietas en las pruebas de fatiga [13] [14], mientras que otros en el área de aleaciones de titanio se han enfocado a el efecto de una picadura aislada sobre el material. [15] [16] [17]



## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La aparición de nuevas aleaciones en los últimos años, ha creado un desconocimiento de algunas de sus propiedades mecánicas, dentro de las que se puede mencionar el límite de resistencia a la fatiga, la aleación de titanio nominación Ti6Al4V en un caso de estos, aún no se tiene conocimientos precisos de su límite de resistencia a alto número de ciclos.

Obtener la resistencia en fatiga a alto número de ciclos (arriba de los  $10^7$  ciclos) mediante la tecnología de fatiga ultrasónica de la aleación de titanio, nominación Ti6Al4V.

La comparación de la vida en fatiga ultrasónica entre probetas sin ataque de pre-corrosión y probetas atacadas con dos concentraciones de pH y dos periodos de pre-corrosión.



## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Establecer la resistencia a la fatiga ultrasónica de la aleación de Titanio, nominación Ti6Al4V, que vibra a la frecuencia de 20 KHz, bajo la relación de carga  $R=-1$ , induciendo esfuerzos e inicio y propagación de fisura en la zona estrecha de la probeta.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener el límite de resistencia a la fatiga ultrasónica para la aleación de Titanio nominación Ti6Al4V en condiciones estándar, (entendiendo como estándar probetas que no se han sometido al proceso de pre-corrosión). contra la vida en fatiga ultrasónica del mismo material atacado con ácido a pH de 1.4 durante dos periodos de pre-corrosión: 8 y 16 minutos.
- Determinar los parámetros geométricos de las picaduras que se forman mediante el proceso de pre-corrosión antes de someter las probetas a ensayos de fatiga ultrasónica para la aleación de titanio Ti6Al4V.
- Analizar el estado de las superficies fracturadas mediante ensayos de fatiga de alto número de ciclos, estimado el inicio y la propagación de las fisuras provocadas con el proceso de pre-corrosión.



## JUSTIFICACIÓN

La exigencia de las industrias aeronáutica, aeroespacial, de turbomaquinaria, quirúrgica, entre otras, aunado a su crecimiento tan acelerado de los últimos años, lleva al desarrollo de materiales que cumplan las necesidades propias de cada una de sus áreas. El desarrollo tecnológico en estas industrias se sustenta en la investigación de la resistencia de los materiales en una amplia variedad de condiciones de carga, y en la vida estimada de los elementos mecánicos en condiciones de uso.

El diseño mecánico de componentes en condiciones de fatiga se ha obtenido tradicionalmente mediante el conocimiento del límite de resistencia a la fatiga a bajo número de ciclos (menor a  $10^7$  ciclos); estas estimaciones resultan inadecuadas con la demanda de las industrias modernas: mayor a  $10^8$  ciclos para las industrias automotriz, trenes a gran velocidad cerca de los  $10^9$  ciclos, y mayor a  $10^9$  ciclos en la industria aeronáutica.

En el caso de la industria aeronáutica, las vibraciones de alta frecuencia en pueden generar armónicas de frecuencias superiores, haciendo necesario el estudio de la resistencia a la fatiga de las aleaciones metálicas a alto y muy alto número de ciclos.



## HIPÓTESIS

Es posible obtener el límite de resistencia a la fatiga a muy alto número de ciclos, mediante la tecnología de fatiga ultrasónica y comparar resultados obtenidos en probetas sin ataque corrosivo contra probetas con ataque de pre-corrosión mediante ácido clorhídrico.

Así mismo, es posible establecer las causas de falla por fatiga ultrasónica mediante el estudio de las superficies de fractura.



## METODOLOGÍA

Primera etapa del proyecto:

### 1.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Se revisan los trabajos anteriores relacionados al tema, tanto en fatiga, cómo en fatiga-corrosión de aleaciones de titanio, específicamente la aleación Ti6Al4V.

### 2.- ELABORACIÓN DEL PROTOCOLO.

Una vez revisada la bibliografía, se ha elaborado el protocolo de investigación, que contiene las características bien definidas de los alcances y desarrollo del proyecto.

### 3.-OBTENCIÓN DEL MATERIAL.

El titanio es un material caro y difícil de obtener en México, se ha obtenido mediante un proveedor de origen asiático.

### 4.- OBTENCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LAS PROBETAS.

Las dimensiones de las probetas de ensayos en fatiga ultrasónica se obtienen mediante simulación por elemento finito, particularmente mediante el análisis modal usando el software ANSYS®. Los ensayos en fatiga ultrasónica requieren la condición de resonancia: la frecuencia natural de oscilación de la probeta de ensayos en dirección longitudinal (probeta en forma de reloj de arena), próxima a la frecuencia de excitación de la fuente (20 KHz). Bajo condición de resonancia, se establece una onda elástica estacionaria a lo largo de la probeta de pruebas que induce máximo esfuerzo en el cuello de la probeta y máximos desplazamientos en los extremos de la misma.



## 5.- MAQUINADO DE LA PIEZA DE CALIBRACIÓN.

Se maquinó primeramente una probeta en un torno CNC, con el que cuenta la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH, que se ha verificado su condición de resonancia montándola en la máquina ultrasónica de ensayos.

## 6.- AJUSTE DE LOS pH DE LOS ÁCIDOS.

Se ha llevado a cabo un ajuste del pH de las soluciones de ácido clorhídrico, los cuales serán utilizados para someter las probetas a un ataque de pre-corrosión controlada.

La etapa final del proyecto consta de los siguientes puntos:

## 7.- MAQUINADO Y PRECORROSIÓN DE LAS PROBETAS.

Se maquinan y se sumergen a pre-corrosión controlada el resto del lote de probetas, después de verificar físicamente que la probeta se encuentra en resonancia con la máquina de fatiga ultrasónica

## 8.-EXPERIMENTACIÓN.

Esta etapa comprende los pasos siguientes:

- Determinación del rango de aplicación de la carga en el generador de alta frecuencia,
- Calibración del sensor de desplazamiento, para establecer la relación: voltaje aplicado/desplazamiento en el extremo de la probeta,
- Puesta en marcha de los ensayos experimentales.

## 10.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Se realiza un análisis de los datos arrojados por las pruebas, generando las gráficas y organizando la información de manera simple para su presentación.



## 11.- REDACCIÓN DE TESIS Y PUBLICACIÓN DE RESULTADOS.

Se pretende redactar la tesis durante los últimos meses, simultáneamente con la asistencia a congresos y una publicación en revista internacional.

## RECURSOS HUMANOS

Para la realización de ésta investigación, en la dirección del proyecto se encuentra el Dr. Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz. La puesta en marcha de los ensayos puede ser realizada por una sola persona, ya que el montaje de las probetas es relativamente sencillo, para la calibración del sensor de desplazamiento, maquinado de probetas y la toma de imágenes termo-gráficas se solicitó el apoyo a los miembros del grupo de trabajo (M.C. Erasmo Correa Gómez, M.C. Jorge L. Ávila Ambriz, M.C. Julio C. Verduzco Juárez y M.C. Manuel Guzmán Tapia). En el proceso de maquinado, que comprende dos etapas: la primera se ha solicitado el apoyo a los responsables del laboratorio de automatización (torno de control numérico) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. En la segunda, ha sido utilizado el torno de control numérico con el que cuenta en el grupo de trabajo con el apoyo de los integrantes del mismo.

## RECURSOS MATERIALES

Para la realización del proyecto se cuenta con los siguientes equipos.

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

Para llevar a cabo los ensayos experimentales en fatiga ultrasónica, es necesario un generador de alta frecuencia (20kHz) cuya salida electrónica se

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



**Fig. I. I.** Piezoeléctrico y multiplicador de desplazamiento.

Sistemáticamente, los desplazamientos en el extremo libre de las probetas se calibran mediante un proceso de medición de voltaje registrado en el generador de alta frecuencia. En el rango de comportamiento lineal de la probeta (condición

de fatiga mecánica), los desplazamientos en los extremos de la probeta son funciones lineales del voltaje aplicado en el generador.

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

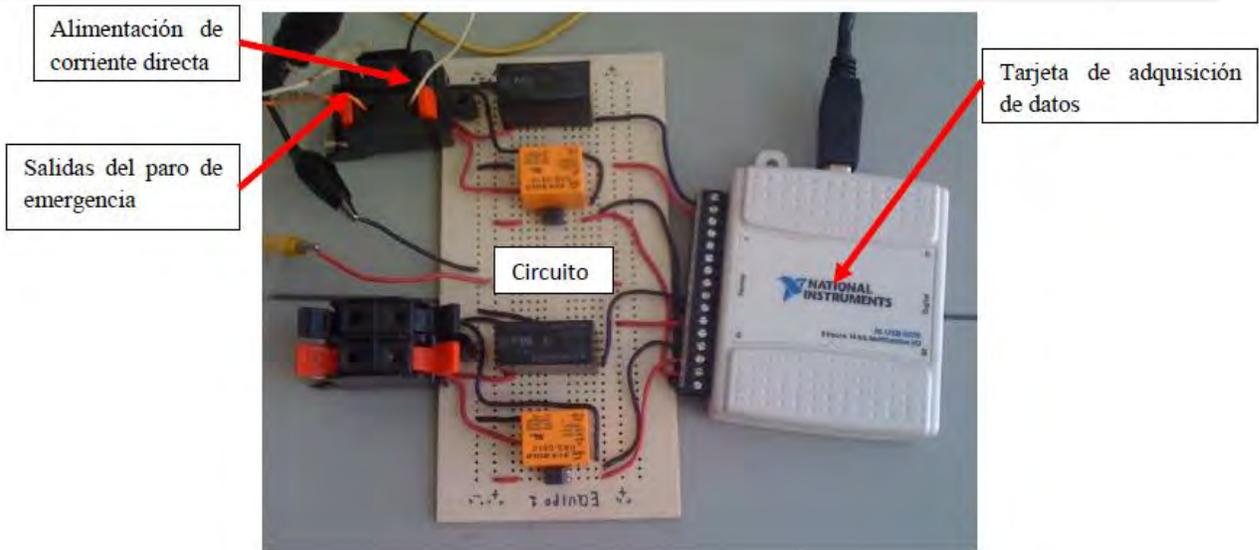
Este dispositivo electrónico permite la calibración entre el voltaje aplicado del generador y los desplazamientos en los extremos de la probeta Fig I.II. El mismo consiste en el sensor inductivo de proximidad acompañado de un programa de cómputo del fabricante que permite visualizar las gráficas del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



**Fig. I. II.** Sensor inductivo de proximidad

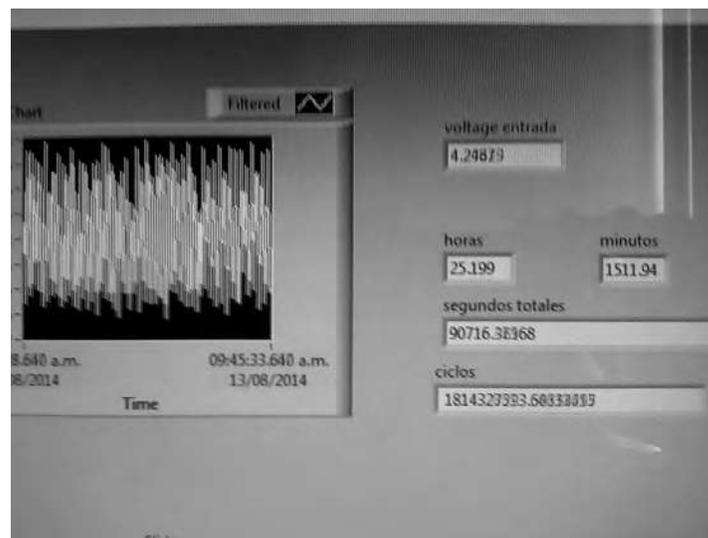
### **Dispositivo electrónico para el control de número de ciclos.**

Se implementó un sistema y programa de control que comprende arranque y conteo de número de ciclos en tiempo real, mediante la computadora y un programa de control LabView. Este sistema tiene como base una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments, la cual es conectada a la computadora y a un circuito que permite la interacción entre el generador, la columna de ensayos y la tarjeta de captura de datos, (Fig.I.III).



**Fig. I. III.** Circuito y tarjeta para adquisición de datos provenientes del generador de alta frecuencia.

El registro de datos se realiza desde una aplicación desarrollada mediante un programa de cómputo en la plataforma LabView. Aplicación desarrollada para fines de tesis de licenciatura en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH. Se muestra dicha aplicación en la Fig. I.IV , la cual permite el conteo en tiempo real del tiempo transcurrido del ensayo, así como el paro automático cuando la probeta falla.



**Fig. I. IV.** Aplicación desarrollada para el programa de computo de Lab View



En el desarrollo de un ensayo experimental cuando ocurre la fractura del espécimen de prueba, el generador envía la señal de paro de emergencia, ocasionando que se detenga el ensayo y en paralelo se registren los datos simultáneamente, mediante la pantalla de control que indica el tiempo de ensayo hasta el paro automático de la máquina.

Torno.

El maquinado de las probetas se lleva a cabo en dos fases utilizando tornos diferentes de control numérico computarizado. En la Fig. I.V se muestra e inicio del maquinado de una de las probetas del segundo lote. Mientras que en la Fig. I.VI observamos el torno de control numérico en el que se maquinaron las segundas 17 probetas.



**Fig. I. V.** Proceso de Maquinado.



**Fig. I. VI.** Torno CNC

# **CAPÍTULO**

## **I**

**MATERIAL DE**

**ESTUDIO**



## I. MATERIAL DE ESTUDIO

### 1.1 FATIGA MECÁNICA.

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

La curva que representa la relación entre la carga aplicada (con un cierto valor para la relación de carga R), y el número de ciclos hasta la falla del material, se le conoce como curva de Wöhler o curva S-N (esfuerzo aplicado contra número de ciclos).

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

#### 1.1.1 FATIGA ULTRASÓNICA

En 1850, Wohler, introdujo el límite de resistencia a la fatiga en  $10^6$  ciclos, porque en esa época diversas aplicaciones industriales tales como máquinas de vapor, vías férreas, etc. tenían una vida más corta en fatiga en comparación con los límites modernos  $10^8$ - $10^{10}$  ciclos, considerablemente superiores al criterio utilizado por A. Wohler en el siglo XIX.



La introducción de la tecnología de la fatiga ultrasónica desde inicio de los 50's, aplicada al estudio de materiales, es posible conocer la vida en fatiga de un gran número de los componentes industriales que alcanzan los  $10^9$ - $10^{10}$  ciclos de vida en servicio.

La función del dispositivo piezoeléctrico en la máquina de fatiga ultrasónica, es la de convertir una señal de alta frecuencia generada por un sistema electrónico, en oscilaciones mecánicas, las cuales se aplican a la pieza de prueba.

La resonancia es un fenómeno que se produce cuando un cuerpo capaz de vibrar es sometido a la acción de una fuerza periódica, cuyo período de vibración coincide con el período de vibración característico de dicho cuerpo.

La aplicación de la fatiga ultrasónica se presenta en varios sectores industriales, principalmente: en aeronáutica, aeroespacial, transporte ferroviario, generación de electricidad, transporte marino y terrestre. Múltiples elementos estructurales se encuentran sometidos a cargas periódicas de alta frecuencia y baja amplitud, con frecuencias mayores a los  $10^7$  ciclos durante su vida útil. [7]

Un ejemplo puede ser la vida del motor de un automóvil, cuyos componentes operan en el rango de  $10^8$  ciclos. Para los grandes motores de buques o trenes de alta velocidad la vida de estos alcanza  $10^9$  ciclos, mientras que en las turbinas de avión, el número de ciclos entre periodos de mantenimiento puede alcanzar los  $10^9$ - $10^{10}$ . Para llevar a cabo ensayos de fatiga a estos altos números de ciclos con una máquina convencional (por ejemplo máquina hidráulica trabajando a 100 Hz), se podrían requerir meses o años de ensayo en continuo.

Trabajos recientes usando sistemas ultrasónicos muestran que varios materiales, incluyendo aceros y aleaciones de titanio, no presentan "límite de fatiga" para los ensayos en el régimen gigacíclico, en contraste con la fatiga convencional. [18]



## 1.2 RESONANCIA

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 coincide con el período de vibración característico de dicho cuerpo. En estas condiciones, una fuerza relativamente pequeña aplicada en forma repetida, hace que la amplitud de un sistema oscilante crezca con el tiempo.

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. Por la misma razón, no se permite el paso por puentes de tropas marcando el paso, ya que pueden entrar en resonancia y derrumbarse.

Una forma de poner de manifiesto este fenómeno consiste en tomar dos diapasones capaces de emitir un sonido de la misma frecuencia y colocados próximos el uno del otro, cuando hacemos vibrar uno, el otro emite, de manera espontánea, el mismo sonido, debido a que las ondas sonoras generadas por el primero presionan a través del aire al segundo. [19]

## 1.3 FALLA POR FATIGA ULTRASÓNICA

El fenómeno de fatiga mecánica es uno de los más complejos en Ingeniería, aparece sin previo aviso y se asocia con la presencia de patrones de carga dinámicas periódicas, con la naturaleza del material, la presencia de imperfecciones tales como inclusiones no metálicas y micro-porosidades, la geometría del material de pruebas y con eventuales esfuerzos residuales, entre otros. [20]. El resultando con frecuencia son fallas que inician con una grieta propagándose a gran velocidad (materiales frágiles y semi-frágiles), hasta que el material termina por romperse. Mediante el estudio de la fatiga mecánica, es posible identificar los niveles críticos de daño microestructural para el inicio y propagación de grietas en los materiales sometidos a prueba.

Un ejemplo de ello, el vuelo 781 de la BOAC despegaba de Ciampino (Roma) con dirección a Londres. Veinte minutos más tarde, se desintegró en vuelo sin causa aparente ni aviso previo, cerca de la isla de Elba. Murieron sus 34 ocupantes. El examen inicial y la reconstrucción de los restos del G-ALYP revelaron varias señales durante el vuelo que provocaron la ruptura:

- Retazos de la alfombra de la cabina se encontraron atrapados en los restos de la sección de cola del avión.
- La imprenta de una moneda se encontró en un panel de fuselaje de la parte trasera de la aeronave.
- Los frotis de puntuación y en la parte trasera del fuselaje fueron probados y se encontró que estaban en concordancia con la pintura aplicada a los asientos de pasajeros de la nave.

Cuando la mayoría de los restos fueron recuperados, los investigadores encontraron que las fracturas se inició con un remache en el techo de la cabina, una ventana salió despedida y se estrelló con los elevadores, la parte trasera del fuselaje a continuación se desprendió, la estructura exterior de las alas cayó, entonces las puntas de las alas exteriores, la cabina del piloto se separó y el combustible de las alas se incendió. [21].

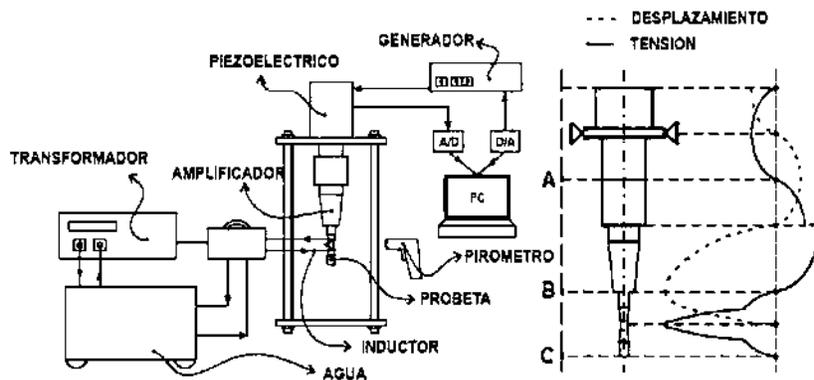


Fig. 1. 1. Máquina de fatiga ultrasónica [7].



Las máquinas de fatiga están compuestas de tres partes principales (Fig. 1.1): Un generador eléctrico que convierte la tensión de red en voltaje de señal senoidal de alta frecuencia. Un transductor piezoeléctrico que transforma la señal eléctrica en una vibración mecánica de la misma frecuencia. Un amplificador mecánico que amplifica la vibración proveniente del transductor para obtener la amplitud de la tensión requerida en la probeta.

El generador se conecta a una computadora y ésta a su vez a una plaqueta de adquisición de datos A/D y D/A para controlar el generador y el piezoeléctrico. El movimiento de la máquina está inducido por el piezoeléctrico. El transductor genera una onda mecánica con una frecuencia natural de 20 kHz y por éste motivo la probeta debe ser diseñada con ésta frecuencia en su primer modo de oscilación para que alcance un desplazamiento máximo equivalente a una tensión nula en los extremos y una tensión máxima equivalente a un desplazamiento nulo, en la sección central. [7] [4]

## 1.4 TITANIO

El titanio recibe el nombre de titanos, del griego antiguo, tierra blanca (su óxido es de los blancos más puros), no de los titanes como popularmente se cree. Fue descubierto en 1791 por el químico inglés William Gregor, al analizar un material que había encontrado. En 1795, el químico alemán Martin Klaproth, descubridor del uranio, le dio el nombre de titanio. [22]

De los 118 elementos químicos, el titanio es actualmente uno de los más comunes, pues se encuentra en abundancia en la corteza terrestre, arena blanca, minerales, rocas, cenizas de animales y plantas. Es un metal de transición (1), de símbolo Ti, número atómico 22 y de color blanco plateado, empleado en numerosas aplicaciones metalmecánicas y tecnológicas y que, a través de aleaciones ligeras y fuertes altera, refina y mejora sus cualidades en general. Este metal no se encuentra en estado puro, sino en forma de óxido en minerales como el rutilo, la ilmenita y la esfena, los cuales contienen además, cantidades mínimas



de impurezas: hidrógeno, hierro, nitrógeno, oxígeno, paladio y níquel molibdeno, razón por la que es necesario adelantar un proceso científico para obtenerlo con un porcentaje del 99,9 por ciento de pureza.

Las principales ventajas del titanio sobre otros metales, radican en la alta calidad de sus propiedades mecánicas, físicas y químicas –ligereza, dureza y resistencia a la corrosión–, la amplia gama de aleaciones que forma y su comprobada utilidad en procesos térmicos y de fabricación de piezas y productos, hechos que lo han posicionado rápidamente en el mercado.

Dentro de las propiedades del Titanio tenemos que es, ligero, duro, resistente a la tracción, incluso a elevadas temperaturas, el titanio es preferido para casos en los que el factor peso es determinante o en los que el ambiente es demasiado corrosivo. Gracias a la fuerte afinidad que tiene con el oxígeno, que le ayuda a formar una capa fina de óxido transparente y estable, este es uno de los metales más resistentes a los ácidos y por tal razón, se le considera materia prima fundamental en procesos metalmecánicos.

Dentro de sus características físicas se encuentra que es un metal de transición, su densidad o peso específico es de 4507 kg/m<sup>3</sup>, tiene un punto de fusión de 1675 °C (1941 K), su masa atómica es de 47,867 u, es de color plateado grisáceo, es paramagnético, es decir que presenta ligera susceptibilidad a un campo magnético, forma aleaciones con otros elementos para mejorar las prestaciones mecánicas, es resistente a la corrosión y refractario, presentado poca conductividad térmica y eléctrica: no es buen conductor del calor ni de la electricidad.

En cuanto a características mecánicas presenta un mecanizado por arranque de viruta similar al acero inoxidable, permite fresado químico, es maleable, permite la producción de láminas muy delgadas, dúctil, permite la fabricación de alambre delgado, resulta un material duro, muy resistente a la tracción, de gran tenacidad, es un material soldable.



#### 1.4.1 ALEACIONES DE TITANIO

- Titanio grado 2: tiene la siguiente composición química: Ti-Fe(0,25-0,30). Es conocido como titanio comercial puro. Tiene una resistencia a la tracción de 345 MPa, un límite elástico de 275 MPa. Sus principales aplicaciones son usos donde se requiere resistencia a la corrosión y conformabilidad como las tuberías, intercambiadores de calor, etc.
- Ti6246 Tiene la siguiente composición química: Ti6Al2Sn4Zr6Mo, Presenta una resistencia a la tracción de 1172 MPa, un límite elástico de 1103 Mpa una ductilidad del 10% una dureza de 39 HRB una soldabilidad limitada y una resistividad eléctrica de 2 ( $\mu\Omega\text{m}$ ) Sus aplicaciones se orientan hacia los requerimientos de alta resistencia mecánica obtenida por temple.
- Ti grado 19. Tiene la siguiente composición química Ti3Al8V6Cr4Zr4Mo (Beta-C). Se caracteriza por una resistencia a la tracción de 793 MPa, un límite elástico de 759 MPa una ductilidad de 15% una dureza de 45 HRB. Sus aplicaciones se dirigen hacia los requerimientos de alta resistencia a la corrosión y a la temperatura (Aplicaciones marinas y motores de aviones) [23]
- Ti grado 5. También conocido como Ti-6Al-4V. Sus características como buena maquinabilidad y sus excelentes propiedades mecánicas la convierten en la aleación de titanio más utilizada. Ofreciendo una muy buena relación resistencia/peso en componentes utilizados en las aplicaciones aeroespaciales, automovilísticas y en equipo marítimo. Por otro lado, esta aleación, es utilizada en numerosas aplicaciones biomédicas debido a su excelente biocompatibilidad, especialmente en contacto directo con hueso o con tejidos. Concluyendo así que sus aplicaciones son en componentes y prototipos para carreras y para la industria aeroespacial, en aplicaciones biomédicas, como implantes y prótesis, aplicaciones marítimas, en la industria química y en las turbinas de gas.



## 1.4.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ALEACIÓN DE TITANIO TI-6AL-4V

**Tabla 1. 1.** Composición química de la aleación Ti-6Al-4V

Composición química	
[ %]	
Al	5.5-6.75
V	3.5-4.5
Fe	.08 Max
C	.08 Max
N	.05 Max
H	.015 Max
O	.20 Max
Ti	Balanceado

## 1.4.3. PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LA ALEACIÓN DE TITANIO TI-6AL-4V

**Tabla 1. 2.** Propiedades mecánicas y físicas de la aleación de titanio Yi-6Al-4V

Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	4440
Dureza, Brinell	95
$\sigma_y$ [MPa]	828
$\sigma_u$ [MPa]	895
E [GPa]	116
Modulo de Poisson	0.33



## 1.5. PERFIL DE LA PROBETA DE Ti-6Al-4V

El perfil básico para los ensayos en fatiga ultrasónica es en forma de “reloj de arena”. Dicho perfil se calcula por medio del programa de cómputo ANSYS de elemento finito para cumplir con las condiciones de resonancia de esta modalidad de ensayo en fatiga, como se describe en un capítulo posterior.

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

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

1. Nivel de carga alto. Se han utilizado altos niveles de carga (mayores al 50% de su límite elástico) [8] [18] [24]
2. Propiedades geométricas de la probeta cumpliendo la condición de resonancia y con dimensiones lo más pequeñas posibles, con el objeto de disminuir el gradiente de temperatura en la parte estrecha de la probeta.
3. De geometría simple para el proceso de maquinada. Esta aleación de titanio es sensible a los maquinados pudiendo provocar cambios de fase cristalográfica en la zona estrecha de la probeta e inducir resultados erróneos en las pruebas de fatiga ultrasónica.

# **CAPÍTULO**

## **II**

**SIMULACIÓN NUMÉRICA  
PARA OBTENER EL PERFIL  
DE LA PROBETA EN FATIGA  
ULTRASÓNICA**



## II. SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA OBTENER EL PERFIL DE LA PROBETA EN FATIGA ULTRASÓNICA

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

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

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

La Fig 2.1 presenta las gráficas del esfuerzo y el desplazamiento de modo independiente, obtenidas por simulación numérica para la probeta de TitanioTi-6Al4V Fig. 2.2, con un desplazamiento impuesto en los extremos de 50  $\mu\text{m}$ .

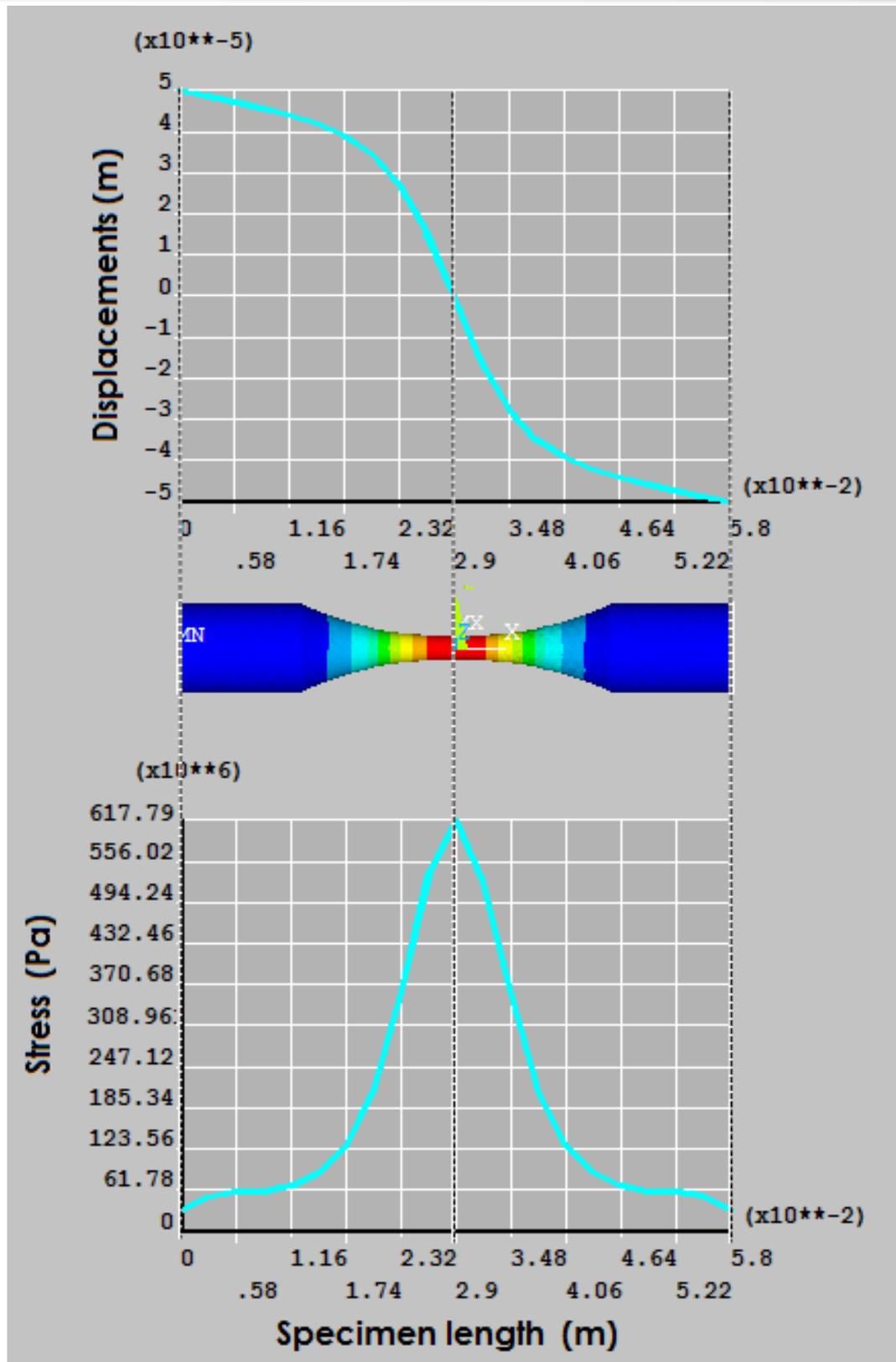


Fig. 2. 1. Gráficas de esfuerzo y desplazamiento de la probeta



## 2.2 SIMULACIONES EN ANSYS®

### 2.2.1 TEORÍA ALUSIVA DEL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

El cálculo mediante elemento finito proporciona una técnica para obtener soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales y en éste caso para obtener de forma rápida las dimensiones de la probeta, encontrando los modos de vibración para cada una de las dimensiones propuestas mediante ensayos de simulación modal, hasta obtener las dimensiones de la probeta que cumplan con la condición de resonancia.

El método de elemento finito es aplicado también en situaciones donde las ecuaciones para solucionar el problema son complicadas o la geometría en la que se aplican son complicadas, el método requiere un proceso de solución, que aún cuando existan softwares que utilizan ésta técnica para solucionar problemas, se deben seguir los seis pasos principales:

1. Establecer las ecuaciones gobernantes y las condiciones de frontera.

Para generar una solución válida aproximada al problema, debe ser determinada la ecuación diferencial que gobierna o gobernará el comportamiento del problema; a su vez determinar las condiciones de frontera para el sistema. Una vez hecho lo anterior, esa formulación será utilizada para generar la solución.

2. Dividir el dominio a solucionar en elementos.

En éste paso la solución entera debe ser subdividida en pequeños elementos, tomando en cuenta que el total de los elementos son incluidos para realizar la solución.

Existen varios tipos de elemento que se pueden elegir dependiendo las necesidades del problema en cuestión y la geometría del mismo, por ejemplo:



El elemento de resorte es en elemento finito el elemento unidimensional que coincidan las coordenadas locales y globales. Cabe señalar que el elemento de resorte tiene dos nodos como se muestra en la figura. La rigidez es representada por  $k$ . mientras que la matriz de rigidez está dada por una matriz de  $2 \times 2$  ya que el elemento de resorte tiene sólo dos grados de libertad, uno en cada nodo-.

La matriz de rigidez global  $K$  se obtiene por montaje de la  $k_i$  ( $i=1,2,3,4,\dots$ ) de matrices de rigidez de elemento utilizando el método de rigidez directo. Una vez se obtiene la matriz de rigidez global  $K$  tenemos la siguiente ecuación del sistema:  
 $\{F\} = [K]\{U\}$ .

En este caso la matriz de rigidez de este elemento está dado por las áreas de interés son tomadas en donde se espera obtener valores críticos como cambios repentinos de geometría, geometrías especiales, muy pequeñas, lugares donde es aplicada la carga, lugares pronunciadas curvaturas, etc.

Así podemos decir que entre mayor sea el número de elementos, la aproximación a la solución va a ser más precisa.

### 3. Determinar la o las ecuación del elemento a utilizar.

Una vez que se forman los elementos, la solución algebraica a resolver debe ser desarrollada individualmente para cada elemento. La forma de las ecuaciones algebraicas para cada elemento debe ser la misma, las diferencias entre un elemento y otro podría cambiar las propiedades del mismo. Aquí es donde encontramos el poder del elemento finito, las ecuaciones pueden ser escritas una sola vez para el elemento en general, teniendo que modificar únicamente para reflejar elementos particulares de la geometría.

### 4. Ensamblar las ecuaciones globales.

Una vez que todas las ecuaciones se hayan generado, habrá que ponerse en un Sistema o ensamble para solucionar todo el dominio complete.



## 5. Resolver las ecuaciones globales.

Este sistema de ecuaciones se soluciona para el valor de la variable dependiente en la ecuación diferencial original en puntos discretos en el dominio de la solución. Dependiendo del tipo de problema puede haber cientos, miles, decenas de miles o incluso cientos de miles de puntos en que se aproxima la solución a la ecuación diferencial.

La exactitud de la solución debe ser verificada antes de que los resultados puedan considerarse válidos. Una manera de hacer esto es refinar la malla (aumento del número de elementos) y vuelva a ejecutar la solución. Si el valor de la variable dependiente en los puntos discretos en la malla no cambia significativamente ya que la malla es refinada, la solución se considera exacta.

### 2.2.2 SECUENCIA DEL PROCESO DE SIMULACIÓN.

Se pueden obtener las dimensiones para la probeta partiendo de dimensiones propuestas inicialmente, llevando a cabo los análisis de simulación numérica modal mediante el software ANSYS.14® con el fin de obtener la frecuencia requerida para la máquina de ensayos de fatiga ultrasónica utilizada (frecuencia de 20KHz). Otra alternativa se lleva a cabo tomando como referencia las dimensiones presentadas en otros trabajos [25] [8] [2], para posteriormente modificar las dimensiones de la probeta hasta que la frecuencia natural de oscilación en dirección longitudinal de la misma sea cercana a los 20 KHz ( $\pm 300\text{Hz}$  de tolerancia para que la máquina funcione correctamente).

La simulación numérica para el análisis modal requiere conocer las propiedades mecánicas del material (Módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y densidad), así como determinar las dimensiones de la probeta para cumplir con la condición de resonancia para este tipo de ensayos en fatiga ultrasónica. La Tabla 2.1 presenta las propiedades utilizadas en el proceso de simulación numérica para el análisis modal.

Tabla 2. 1. Propiedades físicas y mecánicas del material.

Propiedad	Valor para la aleación Ti6Al4V
Módulo de elasticidad	110 GPa
Módulo de Poisson	0.33
Densidad	4440 Kg/m <sup>3</sup>

La secuencia para obtener la frecuencia natural de oscilación en las probetas se resume a continuación. Esta secuencia fue una dentro de aproximadamente 15 simulaciones que se llevaron a cabo para definir las dimensiones de la probeta de ensayos en fatiga ultrasónica.

a) Ingreso al entorno principal para generar el perfil de la probeta. Fig. 2.2

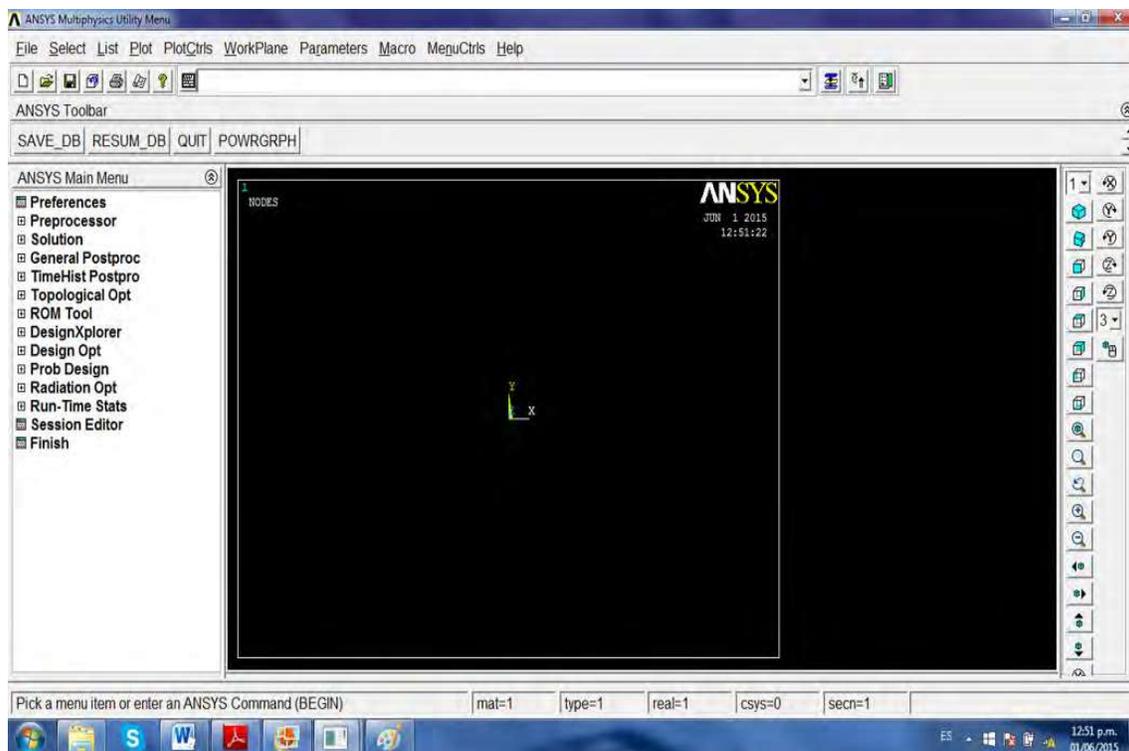
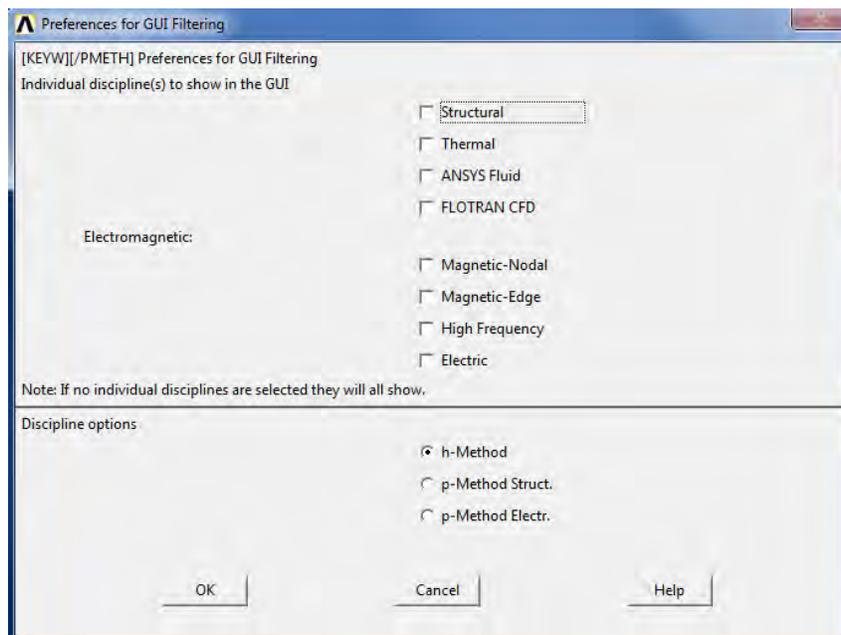


Fig. 2. 2. Entorno principal de Ansys MultyPhysics



b) Se elige, en el apartado de referencias, el tipo de análisis que realizaremos (Fig. 2.2). En éste caso se trata de un análisis estructural debido a la frecuencia y el modo de vibración, se inducen esfuerzos de tensión y compresión en distintos puntos de las probetas de ensayos.



**Fig. 2. 3.** Ventana de preferencias.

c) Se selecciona enseguida el tipo de elemento que se utilizará para la caracterización del material, que para este caso se trata de un elemento sólido denominado “Solid 185” (Ver Apéndice A), Fig. 2.4. El software presenta varios elementos de elección, aunque después de ensayar varios elementos no se observa importante variación en los resultados numérico, por lo que se ha seleccionado el elemento antes mencionado con el apoyo de trabajos previos llevados a cabo [26].

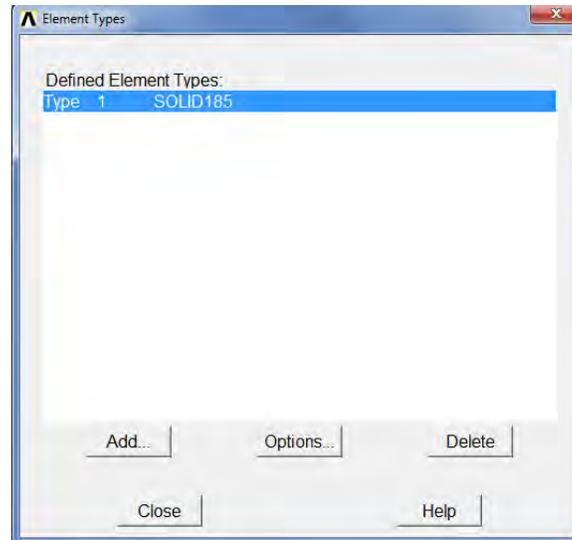


Fig. 2. 4. Selección del elemento de mallado

d) A continuación se introducen las propiedades del material de prueba: densidad del material en  $\text{kg/m}^3$ , Módulo de elasticidad en Pa y módulo de Poisson (Fig. 2.5 y 2.6)

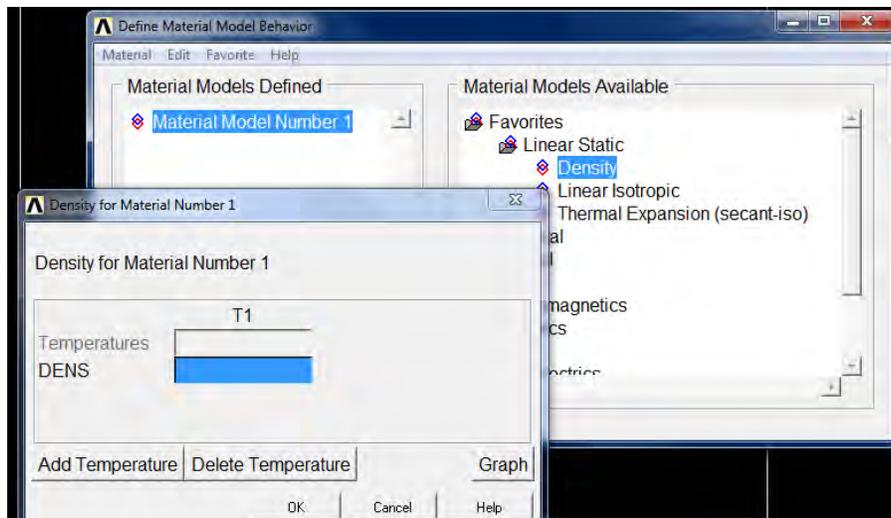
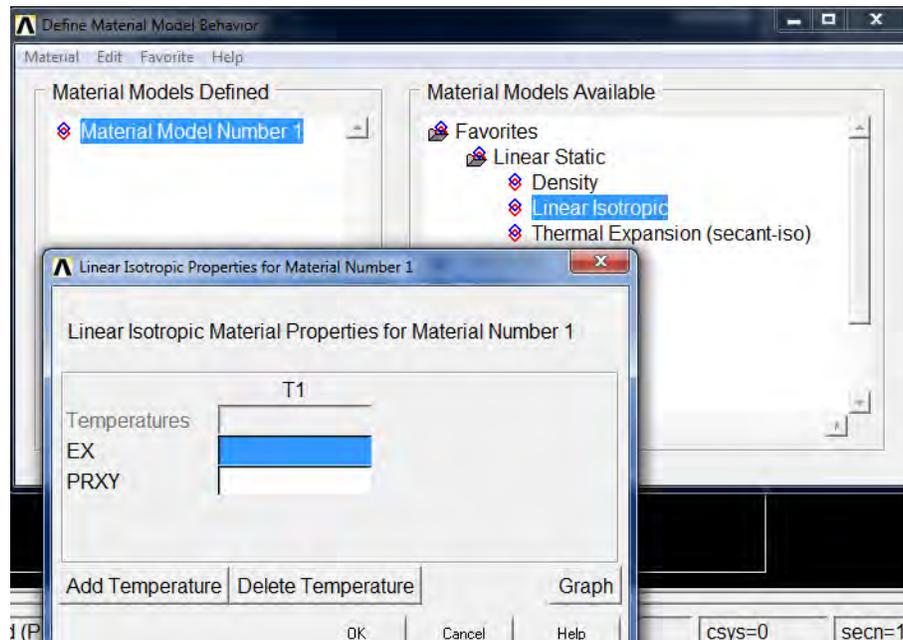
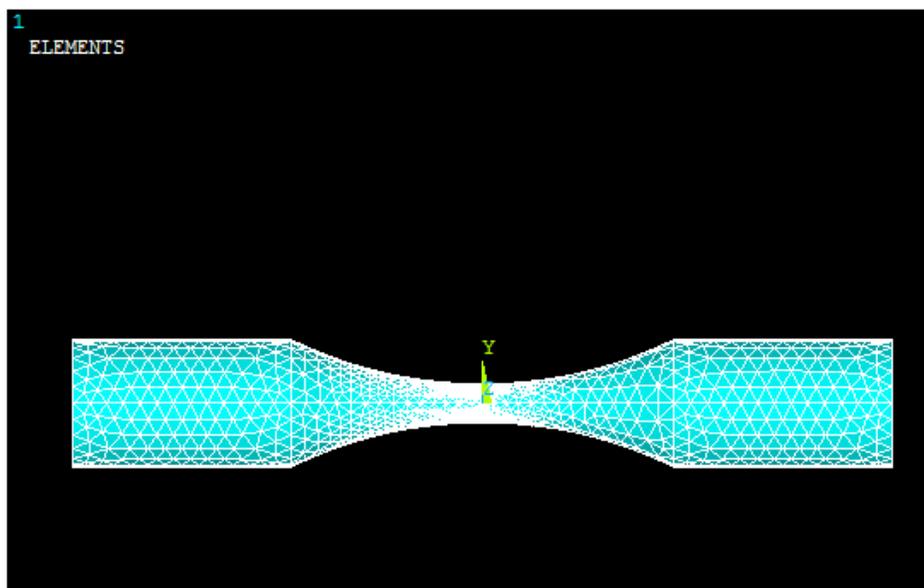


Fig. 2. 5. Ventana de Propiedades del material (Densidad)



**Fig. 2. 6.** Ventana de Propiedades del material (módulo de elasticidad y módulo de poisson)

e) La imagen digitalizada en la plataforma ANSYS. 14® de una probeta de ensayos sin cumplir con la condición de resonancia se presenta en la Fig. 2.7.



**Fig. 2. 7.** Perfil con una longitud de 64 mm.

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

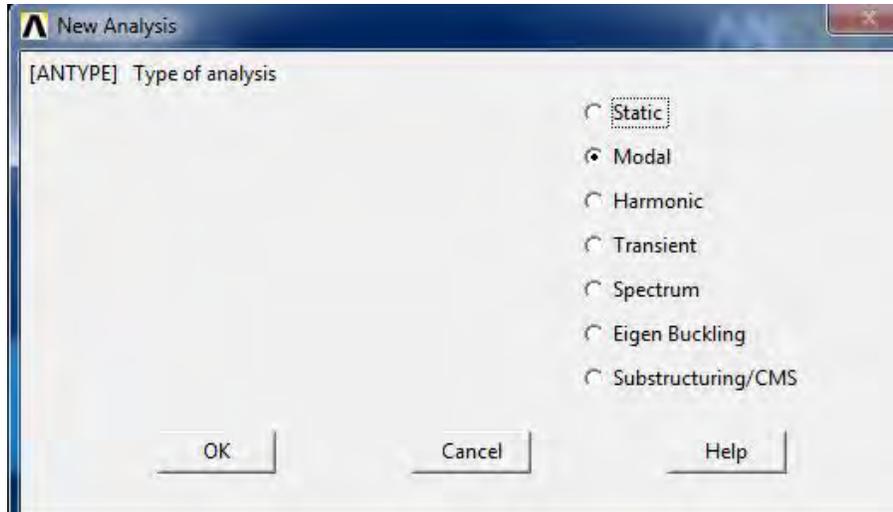


Fig. 2. 8. Selección del tipo de análisis.

Adicionalmente se selecciona el método de extracción de los modos de vibración, que en éste caso es el Block Lanczos y un número posible de soluciones (30 en éste caso). Fig. 2.9

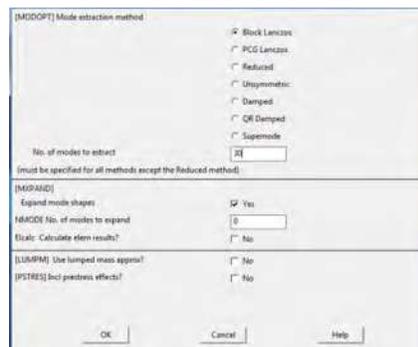


Fig. 2. 9. Ventana de selección del método Block Lanczos para extraer los modos de vibración

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

En este caso la frecuencia no cumple con la deseada (Fig. 2.10), se repite el procedimiento, varias veces. El perfil preliminar obtenido es un avance importante para las posteriores simulaciones puesto que la tarea consiste mayormente en aumentar o disminuir las dimensiones longitudinales para así disminuir o aumentar la frecuencia natural que está relacionada directamente con el aumento o disminución de la masa.

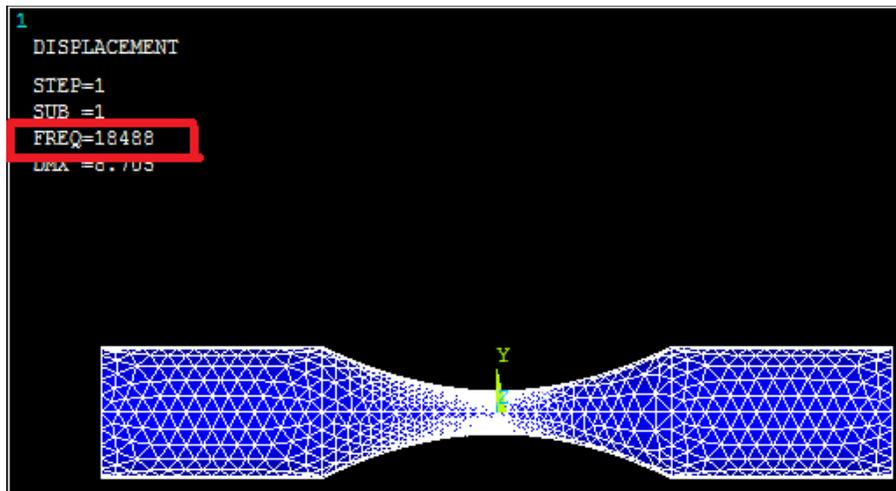
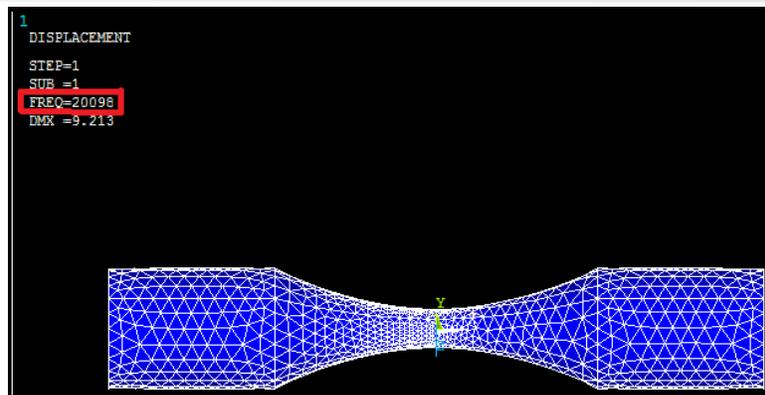


Fig. 2. 10. Resultado de análisis modal que no cumple con la frecuencia requerida

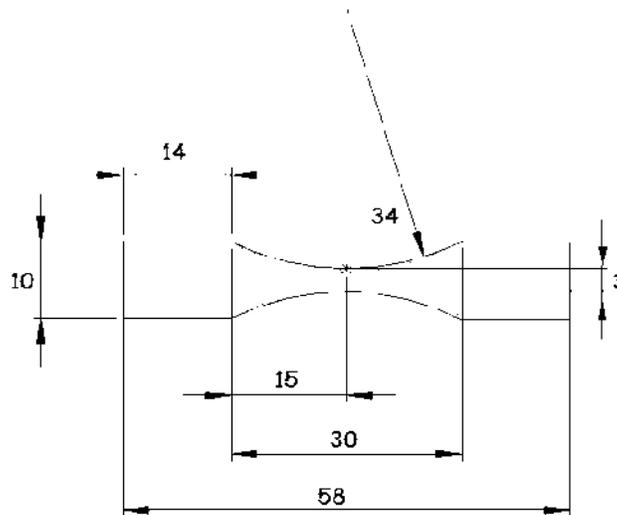
Se llevaron a cabo alrededor de quince simulaciones para ajustar el perfil de la probeta, variando la longitud de los muñones sin modificar la sección estrecha. Es preciso recordar, que la máquina ultrasónica tiene un margen de error posible de  $\pm 300\text{Hz}$  que hace que la probeta pueda trabajar a 19700 o 20300 Hz y entre en resonancia. Después de algunas simulaciones se han obtenido las dimensiones para ésta aleación de titanio que cumplen con la frecuencia de 20098 Hz (Fig. 2.11), que es muy cercana al valor de vibración de la máquina (20KHz), es con este perfil y dimensiones con el que se llevaron a cabo los ensayos de fatiga ultrasónica para esta memoria de tesis de Maestría.

Tabla 2. 2. Propiedades de la malla.

Número de elementos	15317
Número de nodos	3312
Localización del menor elemento	(0,0,0)



**Fig.2.11.** Probeta de la aleación de titanio con frecuencia longitudinal de vibración de 20098 Hz.



**Fig. 2. 12.** Dimensiones de la probeta de la aleación de titanio cumpliendo con la condición de resonancia

Como es posible observar, la frecuencia natural es de 20098 Hz, que es cercana a la frecuencia de la fuente excitadora de 20 KHz. Teniendo un margen de  $\pm 300$  Hz para mantener la máquina ultrasónica en funcionamiento, se han retenido estas dimensiones y perfil para los ensayos en fatiga ultrasónica. (Fig. 2.12)

# **CAPÍTULO**

## **III**

### **MAQUINADO Y PRE-CORROSIÓN DE LAS PROBETAS**

### III. MAQUINADO Y PRE-CORROSIÓN DE LAS PROBETAS

#### 3.1 MAQUINADOS

El maquinado de las probetas es una tarea que involucra un tiempo y trabajo considerable, debido a las dimensiones originales del material y a la naturaleza de las aleaciones de titanio en general en el proceso de maquinado: se caracterizan por ser sensibles al incremento de temperatura durante este proceso, pudiendo provocar cambios de fase y disminución en las propiedades mecánicas de estas aleaciones.

El material fue obtenido en cilindros de 10 mm de diámetro y 100 mm de longitud, (Fig. 3.1), adquiriéndose 30 piezas. Estos cilindros se han cortado primeramente con una segueta para disminuir su longitud a 63 milímetros, posteriormente se han refrentado manualmente.



**Fig.3.1.** Materia prima sin maquinar.

Después del corte longitudinal de las piezas, se llevó a cabo un machueado (rosca interna) de los cilindros (machuelado tipo M5), para sujetar la pieza en la máquina de vibración mediante un perno de las mismas dimensiones.

El maquinado se llevó a cabo en una primera probeta mediante el torno CNC con el que cuenta la UMSNH. Este proceso ha debido efectuarse bajo condiciones controladas, puesto que este material es sensible a las velocidades altas de maquinado como se muestra en la tabla 3.1. [27]

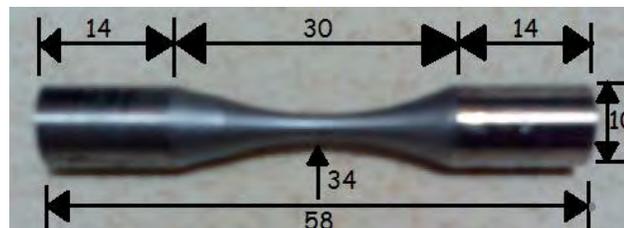
**Tabla 3. 1.** Parámetros típicos para el mecanizado de la aleación de titanio Ti-6Al-4V

Operación	Material herramienta	Velocidad de corte (m/s)	Rata de avance	Profundidad de corte (mm)
Torneado (Desbaste)	C-2	0,064	0,254 mm/rev	0,25
Torneado (Acabado)	C-2	0,085	0,152-0,203 mm/rev	0,254-0,762
Torneado (Acabado)	C-2	0,127	0,152-0,203 mm/rev	3,175 <sup>a</sup>
Fresa plana (3/4-1" dia)	M42 HSS	0,025	0,076 mm/diente	3,81-5,08 <sup>a</sup>
Fresa plana (3/4-1" dia)	C10	0,085	0,127 mm/diente	
Brocha (1/4"-1/2" dia)	M42 HSS	0,013	0,127 mm/rev	
Brocha (1/4"-1/2" dia)	C2	0,017	0,102 mm/rev	
Rima	M42 HSS	0,008	0,254 mm/rev	
Rima	C2	0,015	0,254 mm/rev	
Roscado	M7 HSS	0,006	----	
Brochado	M3 HSS	0,005	0,076 mm/diente	
Forma de ranura	M42 HSS	0,005	7,742 in <sup>4</sup> /carrera	

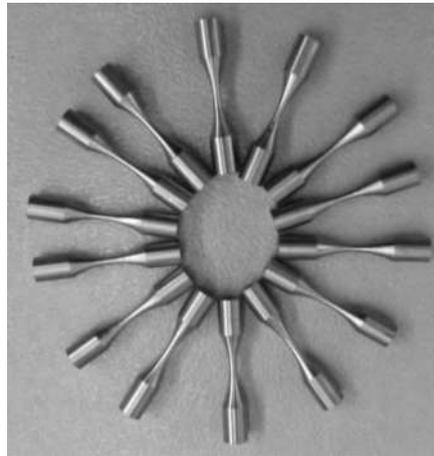
a) Profundidad axial. Profundidad radial es hasta dos tercios del diámetro de la fresa

Un total de 12 probetas se maquinaron en esta primera etapa y se realizaron ensayos preliminares, que serán discutidos posteriormente.

Para el resto de las probetas, que fueron un total de 18, este proceso se llevó a cabo mediante un mini-torno adquirido recientemente por el grupo de trabajo del Dr. Gonzalo M. Domínguez Almaraz, participando para la elaboración de los programas de maquinado en el código CNC, los estudiantes de Doctorado: M.C Erasmo Correa y M.C Julio C. Verduzco Juárez. La Fig. 3.2 muestra el resultado del maquinado de una probeta con este nuevo torno. La Fig. 3.3 muestra un grupo de probetas maquinadas perteneciente al segundo lote.



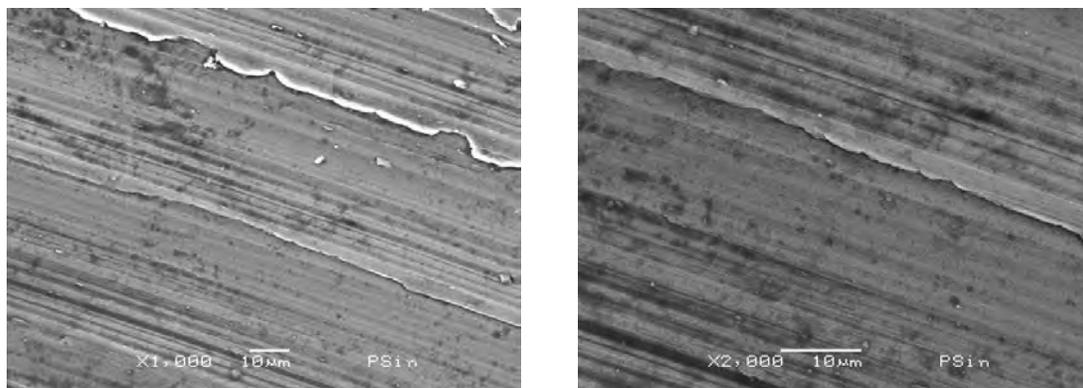
**Fig.3.2.** Primera probeta maquinada con el nuevo mini-torno



**Fig.3.3.** Algunas de las probetas maquinadas pertenecientes al segundo lote.

### 3.2 PRE-CORROSIÓN DE LAS PROBETAS

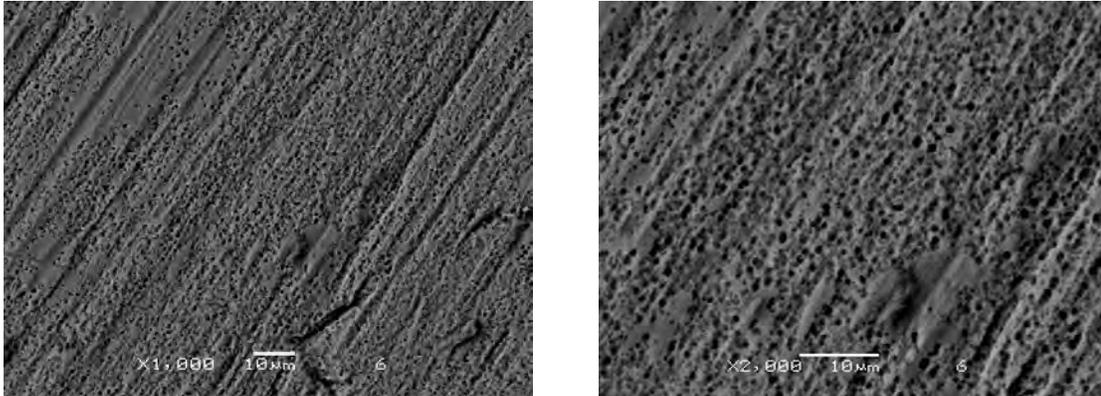
Con el fin de contrastar la resistencia en fatiga ultrasónica en probetas pre-corroídas y probetas sin pre-corrosión, se llevó a cabo un proceso controlado de pre-corrosión. Previo al proceso de pre-corrosión, se sumergieron pequeños trozos de material preparado, con el fin de observar en el microscopio electrónico de barrido el efecto de la pre-corrosión con determinados niveles de pH y determinados tiempos. En la Fig. 3.4 se presentan las imágenes obtenidas en el microscopio electrónico sin ataque de pre-corrosión. En estas imágenes, es posible distinguir las líneas de maquinado, perceptible por las ralladuras apareciendo en dirección inclinada para los dos aumentos:  $x=1000$  y  $x=2000$ .



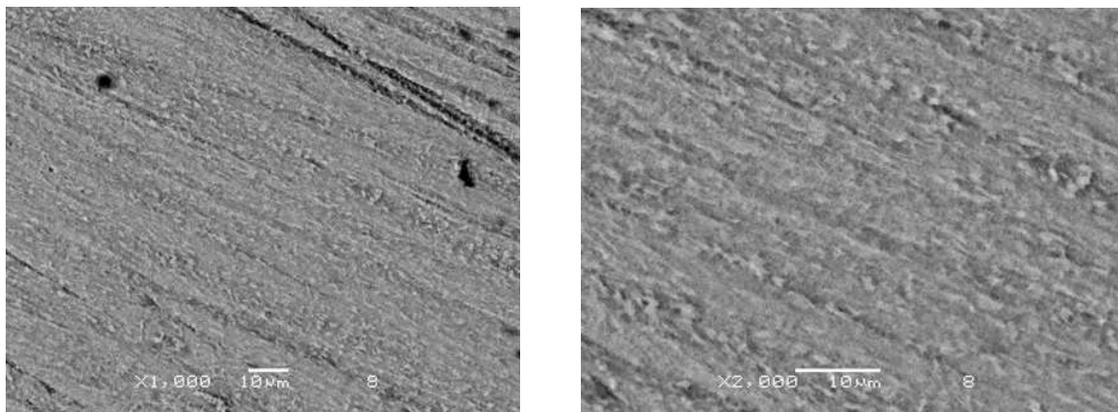
**Fig.3.4.** Superficie sin ataque de pre-corrosión.

### 3.2.1 PRIMERA INMERSIÓN A UN pH DE 2.4

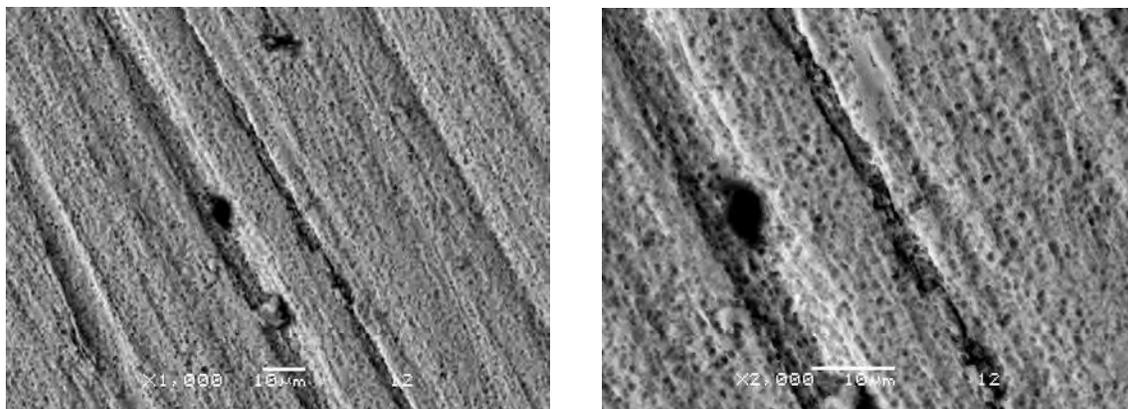
Posteriormente se sumergieron 6 muestras con 6, 8, 12, 16, 18 y 24 minutos de pre-corrosión, correspondientes a las Fig. 3.5 a 3.10.



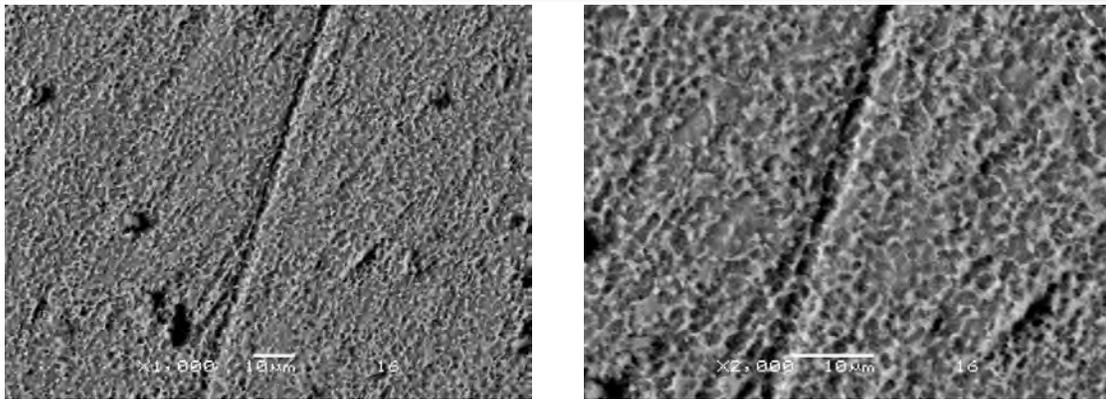
**Fig.3.5.** Con 6 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones:  $x=1000$  y  $x=2000$



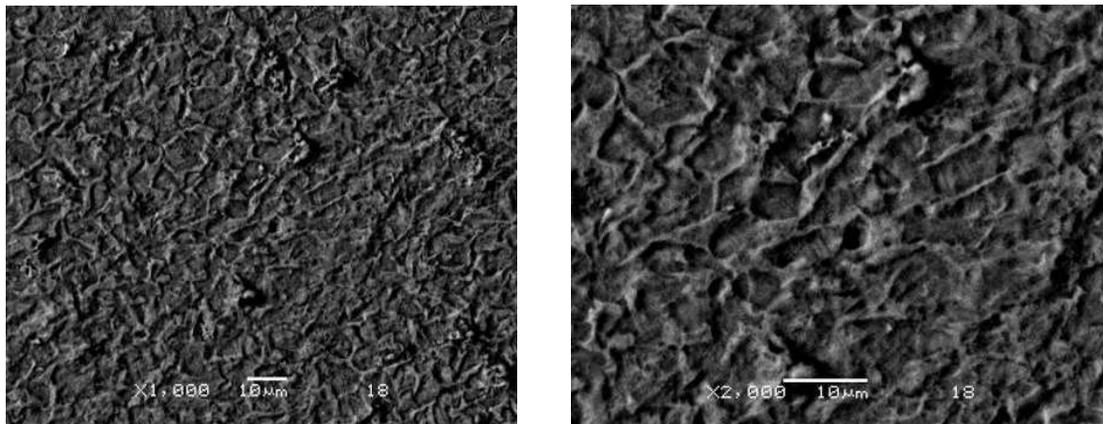
**Fig.3.6.** Con 8 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones:  $x=1000$  y  $x=2000$ .



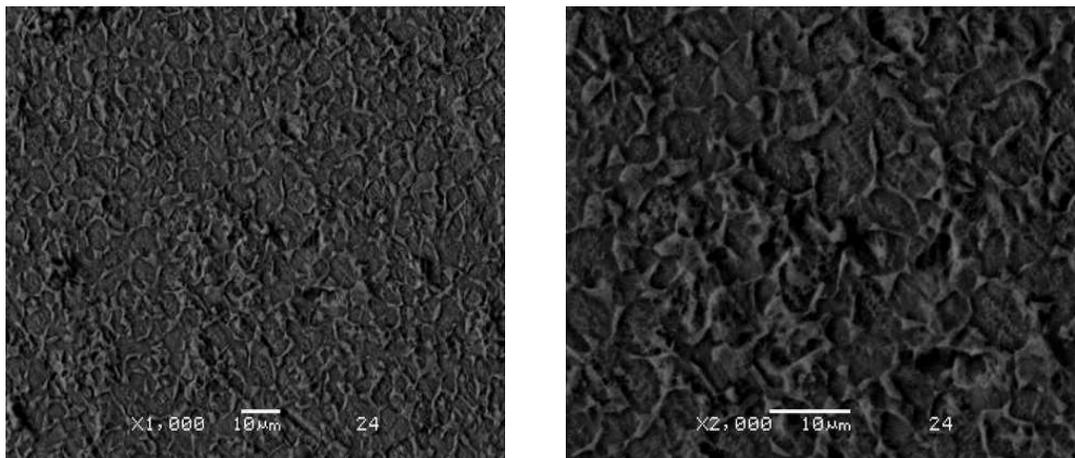
**Fig.3.7.** Con 12 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones:  $x=1000$  y  $x=2000$ .



**Fig.3.8.** Con 16 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones:  $x=1000$  y  $x=2000$ .



**Fig.3.9.** Con 18 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones:  $x=1000$  y  $x=2000$ .



**Fig.3.10.** Con 24 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones:  $x=1000$  y  $x=2000$ .

A partir de un análisis preliminar, es posible observar que la densidad de las picaduras aumenta con el tiempo de pre-corrosión del material; esta talla parece establecerse a partir de los 16 minutos de pre-corrosión (no se aprecia incremento importante en la talla de las mismas después de los 16 minutos de pre-corrosión). Estas figuras presentan una diferencia notable entre las probetas sumergidas durante 6, 8 y 12 minutos, contra las sumergidas durante 16, 18 y 24 minutos. Adicionalmente, las tallas de las picaduras observadas en las Fig. 3.9 y 3.10 parecen corresponder a los límites de grano, que para esta aleación la talla de los granos es de aproximadamente  $4 \mu\text{m}$ . Las zonas de mayor fragilidad para el ataque corrosivo resultan los límites de grano, que parecen corresponder con las tallas de las picaduras mostradas en las Fig. 3.9 y 3.10

El proceso de inmersión en ácido de pequeños trozos tuvo el propósito de investigar el efecto de la pre-corrosión en la superficie del material de prueba, que permitió definir los tiempos de pre-corrosión así como la concentración del ácido que se ha empleado.



**Fig. 3. 11.**  
corrosión de

Pre  
las probetas

El primer lote de doce probetas maquinadas fue dividido en grupos de tres y sometidos a pre-corrosión de 8, 16 y 24 minutos; las tres probetas restantes fueron conservadas sin ataque de pre-corrosión. Para el proceso de pre-corrosión se cubrieron los muñones de las probetas con cinta de aislar para evitar que sean atacados por el ácido, dejando la parte estrecha de la probeta expuesta al ataque de pre-corrosión, como se muestra en la Fig.3.12



Fig.3.12. Probeta inmersa en ácido para el proceso de pre-corrosión

### 3.2.2 SEGUNDA INMERSIÓN A UN pH DE 1.4

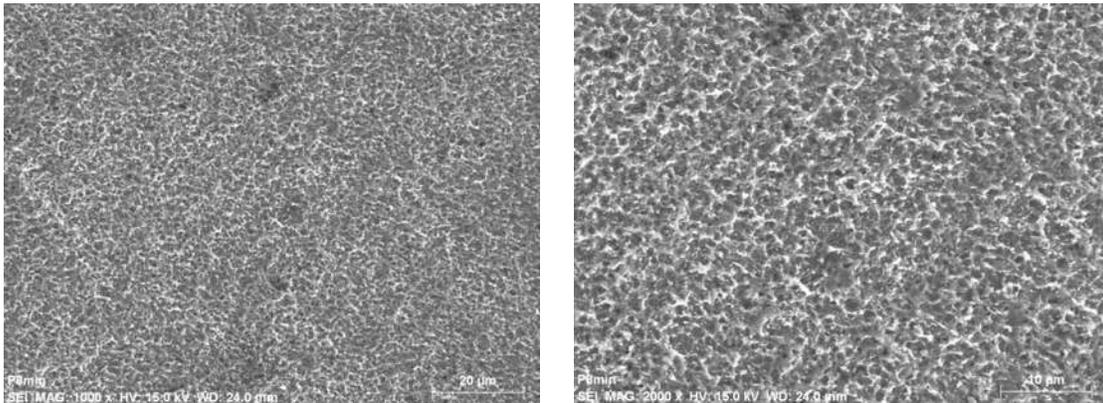


Fig. 3.13. Con 8 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones: x=1000 y x=2000.

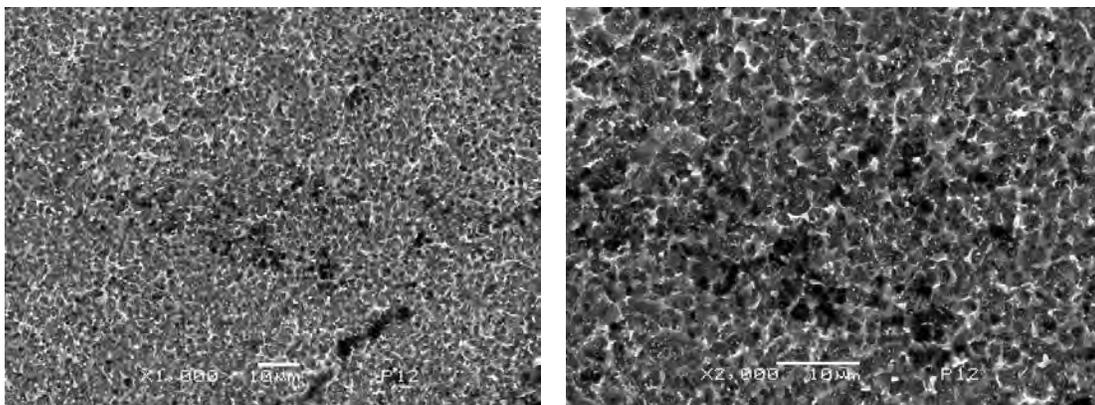
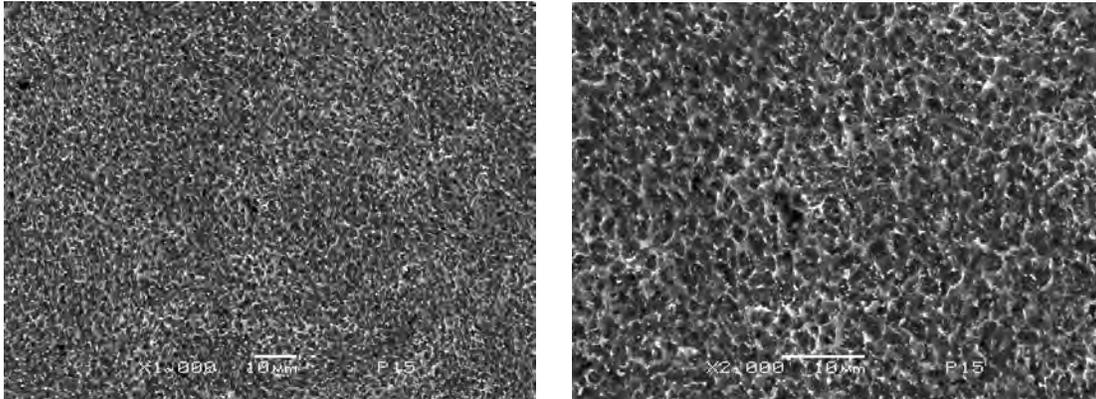
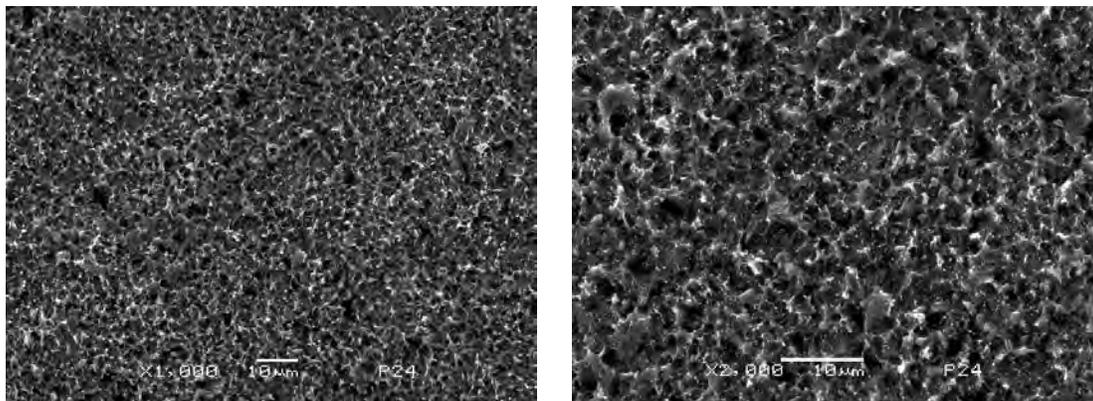


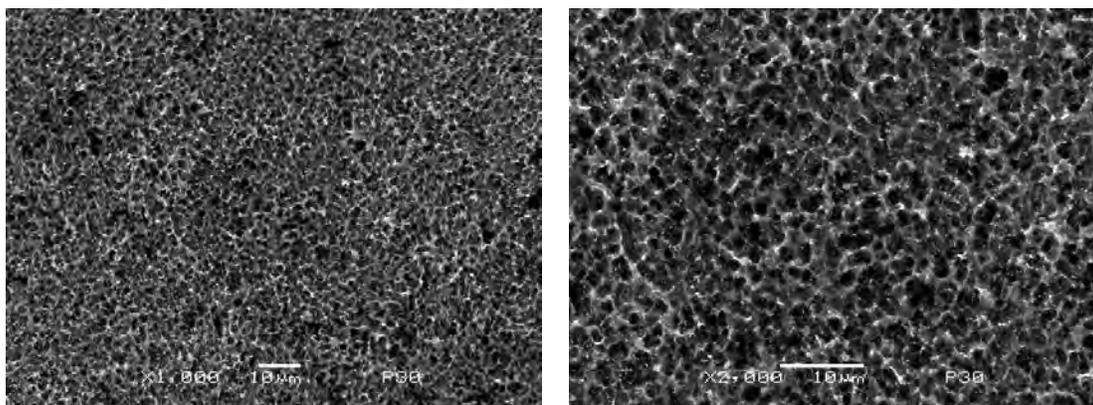
Fig. 3. 14. Con 12 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones: x=1000 y x=2000.



**Fig 3. 15.** Con 15 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones:  $x=1000$  y  $x=2000$ .



**Fig 3.16.** Con 24 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones:  $x=1000$  y  $x=2000$ .



**Fig. 3. 17.** Con 30 minutos de pre-corrosión, dos ampliaciones:  $x=1000$  y  $x=2000$ .



Las figuras de la 3.13 a la 3.17 fueron atacadas con una concentración más ácida; es posible distinguir que a partir de los 12 minutos de pre-corrosión la talla de las picaduras se ha establecido aproximadamente en 3-4  $\mu\text{m}$  y que con tiempos adicionales de pre-corrosión la densidad de las picaduras parece incrementarse. El segundo lote de doce probetas maquinadas fue dividirlo en tres grupos: el primero con probetas sin atacar mientras que los otros dos sometidos a pre-corrosión de 8 y 16 minutos respectivamente. Mismo procedimiento para inducir la pre-corrosión en la parte estrecha de las probetas de prueba, y la misma protección con cinta de aislar para evitar que la sección constante de la probeta fuera atacada.

# **CAPÍTULO**

## **IV**

### **ENSAYOS**



## IV. ENSAYOS

### 4.1 ADAPTACIONES A LA MÁQUINA ULTRASÓNICA

La puesta en marcha de los ensayos experimentales ha requerido la implementación de un sistema de enfriamiento para el sistema de potencia piezoeléctrico, debido a que los ensayos de fatiga ultrasónica en esta aleación de titanio se llevaron a cabo a altos niveles de carga, respecto del límite elástico del material (931 MPa).

El sistema de enfriamiento que se adaptó consistió en aire a presión obtenido mediante un compresor, incluyendo un filtro de aire de una sola etapa para extraer la humedad del aire de enfriamiento.

### 4.2 ENSAYOS

La máquina de fatiga ultrasónica tiene la capacidad de provocar un desplazamiento en el extremo libre de la probeta de  $1.3 \mu\text{m}$  por cada volt aplicado en el generador. Este desplazamiento genera un esfuerzo máximo en la parte estrecha de la probeta de aproximadamente 14.9 MPa por cada volt aplicado. El esfuerzo inducido en la zona estrecha de la probeta es de 149 MPa con un voltaje aplicado de 10 volts, correspondiente a un 16 % del límite elástico de esta aleación de titanio. Teniendo una relación lineal entre el voltaje, el desplazamiento inducido en los extremos de la probeta y el máximo esfuerzo generado en la parte estrecha de la misma, se construyó una tabla de correspondencia entre el voltaje aplicado en el generador, el desplazamiento inducido en los extremos de la probeta, el máximo esfuerzo generado en el cuello de la misma y relación entre el esfuerzo máximo aplicado y el esfuerzo del límite elástico del material. Estos resultados se muestran en la tabla 4.1

Los títulos en la tabla corresponden a:

- *Voltaje*. Es el valor en volts aplicado en el generador de alta frecuencia.



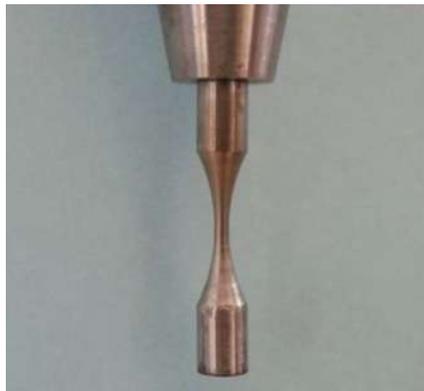
- *Desplazamiento* ( $\mu\text{m}$ ). Es el valor máximo de elongación que alcanza un espécimen de prueba a determinado valor del voltaje del generador.
- *Esfuerzo Inducido* (MPa). Es el esfuerzo máximo inducido en el espécimen de prueba, provocado por la aplicación de un determinado desplazamiento.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

**Tabla 4.1.** Relación: voltaje-desplazamiento-esfuerzo- esfuerzo/límite elástico.

<b>Voltaje</b>	<b>Desplazamiento (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b><math>\sigma/\sigma_y</math> %</b>
10	13	149	16
20	26	298	32
30	39	448	48
40	52	596	64
50	65	745	80
57	74	849	91
58	75	864	93
59	77	879	95
60	78	894	96
62	81	923	99

Conociendo los esfuerzos que se generan en la parte estrecha de la probeta con los voltajes aplicados en el generador, se llevan a cabo los ensayos en fatiga ultrasónica. En estos ensayos se registran tanto la carga aplicada (bajo la relación de carga  $R=-1$ ), mediante el voltaje aplicado en el generador y el correspondiente esfuerzo inducido en la probeta, así como el tiempo de vida del material, que se registra por el número de ciclos de vida del mismo.

Los resultados experimentales fueron registrados en dos grupos: el primero denominado de "calibración" y el segundo donde se obtuvieron los resultados que son reportados en el siguiente capítulo. Los primeros ensayos fueron realizados para la calibración de la máquina y para obtener los resultados preliminares en fatiga ultrasónica. En la Fig. 4.1 se presenta una de las probeta de "Ensayos de calibración", montada sobre el sonotrodo de la máquina de ensayos en fatiga ultrasónica. El montaje de las probetas en el segundo grupo de ensayos es similar al mostrado en la Fig. 4.1.



**Fig.4.1.** Probeta montada en la máquina ultrasónica.

#### **4.2.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS TERMOGRÁFICO**

Se obtuvieron imágenes en el cuello de la probeta durante los ensayos de fatiga mediante una cámara termográfica, con el fin de observar la distribución de temperatura en esta zona. La parte más estrecha de la probeta presentó la temperatura más alta registrada por este medio. El incremento de temperatura estuvo asociado con dos factores principales: a) en la parte estrecha se presenta el mayor concentrador de esfuerzos debido a la carga y geometría de la probeta (asociado con un incremento de la temperatura), b) el concentrador de esfuerzo aumenta (con un correspondiente incremento de la temperatura), aplicando la misma carga, pero para probetas con mayor tiempo de pre-corrosión.

A continuación se presentan algunas imágenes termográficas, que ilustran la variación de temperatura con la carga aplicada y con el tiempo de pre-corrosión.

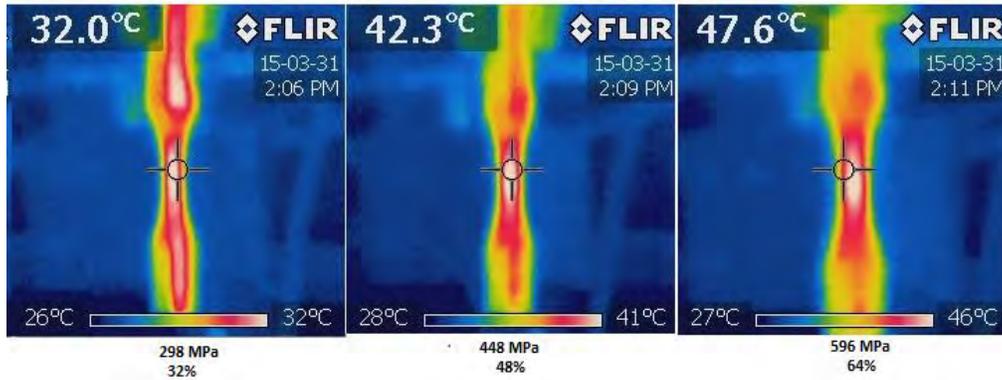


Fig. 4.2. Probetas a 24 minutos de pre-corrosión con pH=2.4

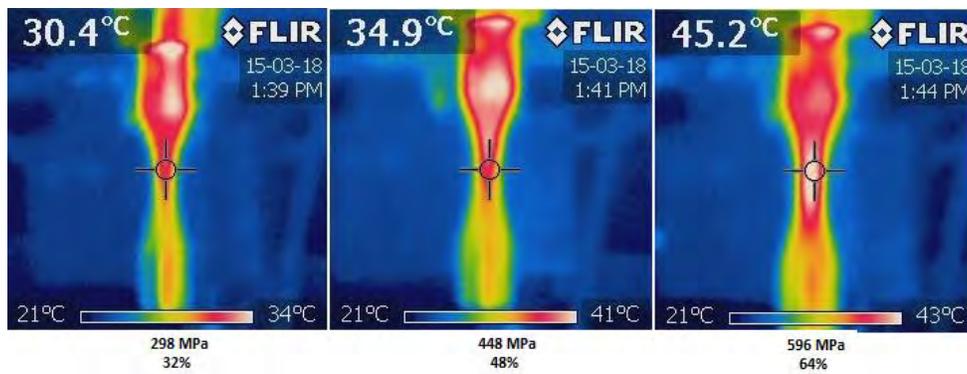


Fig 4.3. Probetas a 16 minutos de pre-corrosión con pH=2.4

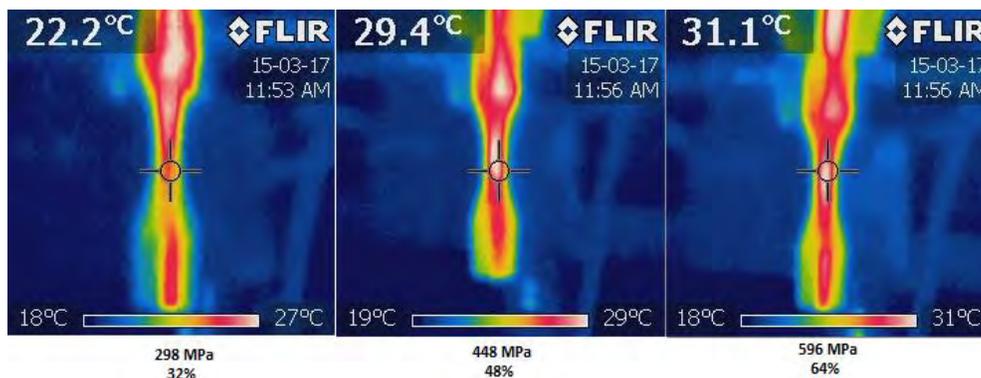
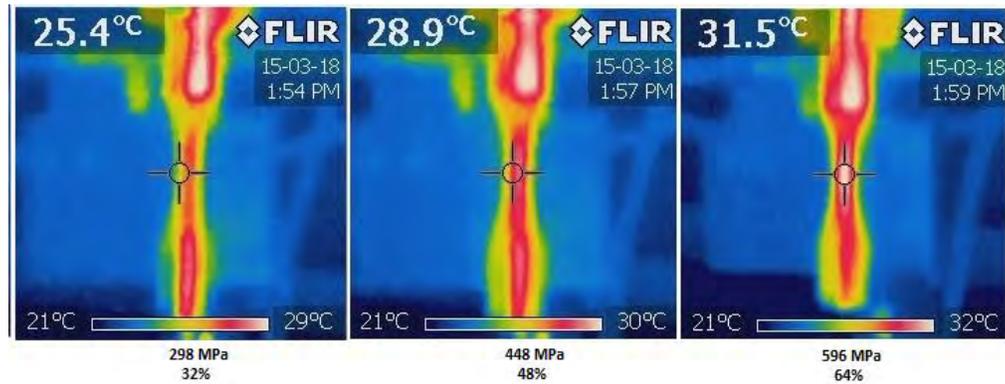


Fig. 4.4. Probetas a 8 minutos de pre-corrosión, con pH=2.4



**Fig. 4.5.** Probetas sin ataque de pre-corrosión con pH=2.4

Los resultados del análisis termográficos que se muestran en las Fig. 4.2 a 4.5, presentan una tendencia constante de aumento de temperatura en la parte estrecha de la probeta con el incremento de carga: desde 298 MPa hasta 596 MPa pasando por 448 MPa. Adicionalmente, la temperatura registrada aumentó manteniendo el mismo nivel de carga, pero con un tiempo mayor de pre-corrosión: la temperatura a 596 MPa de carga es de 31.5°C para probetas sin pre-corrosión; esta temperatura se incrementa a 45.2 a 16 minutos de pre-corrosión (Fig. 4.3) y hasta 47.6°C con 24 minutos de pre-corrosión con la concentración ácida de pH=2.4. Similar comportamiento en la parte baja de carga (298 MPa), temperatura 25.4°C para probetas sin pre-corrosión (Fig. 4.5), y de 30.4°C y 32°C para probetas pre-corroídas 16 y 24 minutos respectivamente.

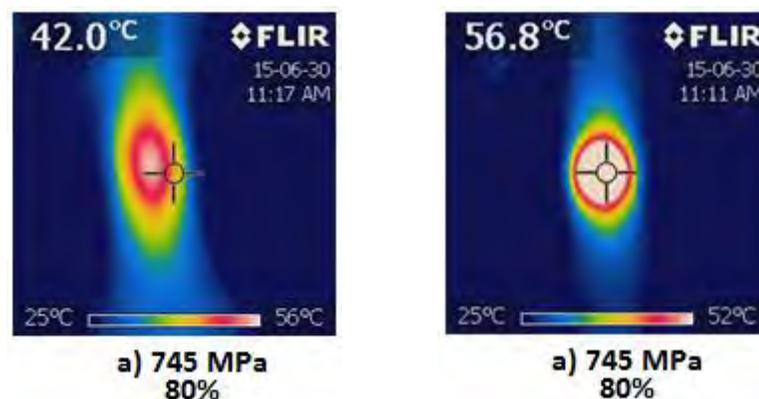
Las imágenes termográficas anteriores de la Fig. 4.2 a la Fig. 4.5 revelan una tendencia de la temperatura registrada en la parte estrecha de la probeta: esta temperatura se incrementa con el incremento de la carga aplicada, como es de esperarse por el aumento de la concentración de esfuerzos en la sección estrecha al aumentar la carga. El incremento de temperatura se observa también cuando se comparan probetas a un mismo nivel de carga aplicada, pero con tiempos de pre-corrosión diferentes: mayor temperatura se observa para probetas con mayor tiempo de pre-corrosión. El resultado anterior parece corresponder a la siguiente relación: mayor tiempo de pre-corrosión – mayor densidad en las picaduras

superficiales – mayor valor para los concentradores de esfuerzos asociados – mayor temperatura registrada por la cámara termográfica para probetas sometidas a la misma carga, pero con mayor tiempo de pre-corrosión.

#### 4.2.2 SEGUNDOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS TERMOGRÁFICO

Para estos segundos resultados se establecieron valores de carga superiores para los ensayos en fatiga ultrasónica. Debido a que esta aleación de titanio es sensible a la variación en los incrementos de la carga aplicada, desde valores bajos hasta el valor nominal de carga, se estableció una secuencia única para el inicio de la aplicación de carga y el incremento paulatino hasta llegar al valor nominal: carga inicial de 149 MPa (correspondientes al valor mínimo en el generador que es de 10 volts), e incrementos de 14.9 MPa por segundo (aumento de un volt por segundo en el generador), hasta alcanzar la carga nominal de trabajo.

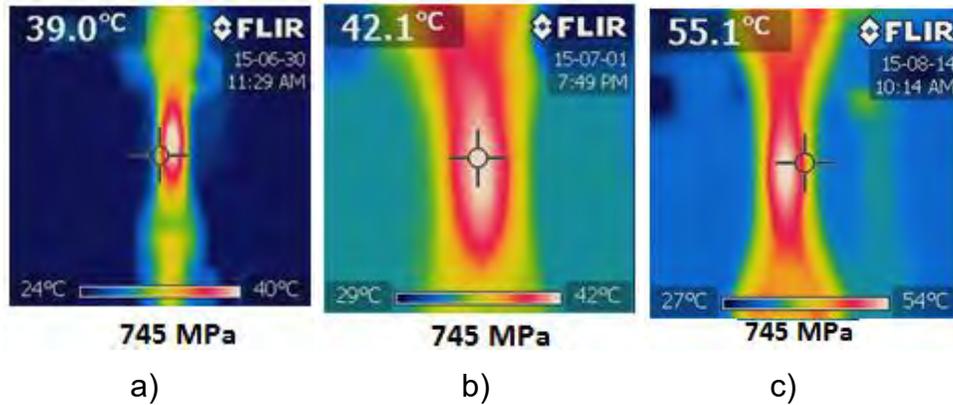
A continuación se presentan algunas imágenes termográficas obtenidas para estos segundos resultados:



**Fig. 4. 6.** Probetas sin ataque de pre-corrosión a) Estabilizada a la carga de prueba b) Al momento de la fractura

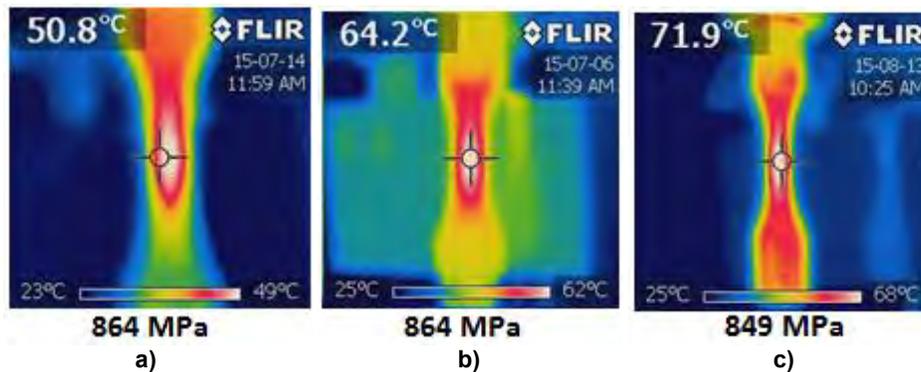
La Fig. 4.6 ilustra el comportamiento térmico en el proceso de agrietamiento de la probeta ultrasónica a través del inicio y propagación de fisura: la zona de alta temperatura se concentra alrededor de la fisura y crece súbitamente en la medida

de la propagación. Esta misma figura presenta una variación de 42 a 56.8 °C en algunos segundos, correspondientes al proceso de propagación de la fisura.



**Fig. 4.7.** Probetas a) sin ataque de pre-corrosión, b) 8 minutos de pre-corrosión, c) 16 minutos de pre-corrosión. Todas las probetas con pH=1.4

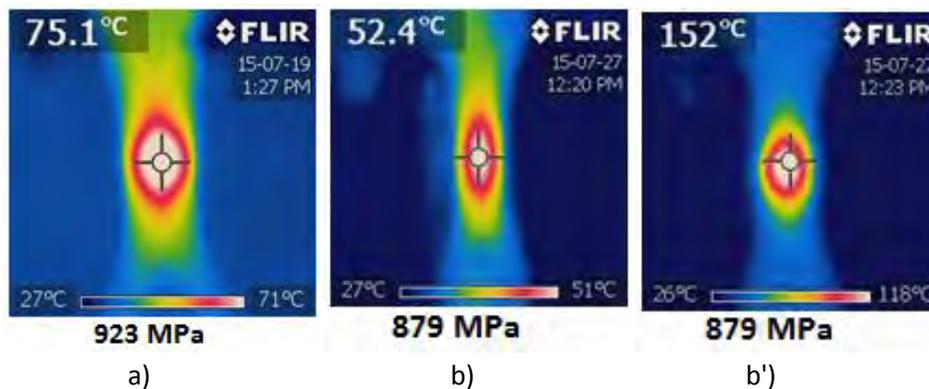
Correspondiente a la Fig. 4.7, es posible apreciar el efecto de la pre-corrosión en el aumento de la temperatura, cuando se aplica una carga constante de 745 MPa: sin pre corrosión se registra una temperatura máxima de 39.0 °C, mientras que con 8 minutos de corrosión ésta se incrementa hasta 42.1°C, llegando hasta los 55.1°C con 16 minutos de pre-corrosión.



**Fig. 4.8.** Probetas a) Sin ataque de pre-corrosión, b) 8 minutos de pre-corrosión, c) 16 minutos de pre-corrosión. Todas las probetas con pH=1.4

Aumentando la carga a niveles cercanos al límite elástico (864 y 849 MPa) una tendencia similar es observada: la temperatura en la parte estrecha de la probeta se incrementa al aumentar la carga y/o al aumentar el tiempo de pre-corrosión (comparación entre las Fig. 4.7 y 4.8).

El análisis por termografía ha permitido visualizar el proceso de inicio y propagación de fisura hasta la falla del material. Este proceso se muestra en la Fig. 4.9, donde aparece un incremento y concentración importante de la temperatura en la parte estrecha de la probeta para dos casos estudiados: alta carga y probeta sin pre-corrosión Fig 4.9 a, alta carga y pre-corrosión de 16 minutos Fig. 4.9 b.



**Fig. 4.9.** Imágenes termográficas tomadas en el proceso de iniciación de propagación de fisura: a) Sin ataque de pre-corrosión, b, b') 16 minutos de pre-corrosión

En la Fig. 4.9 b y b' se aprecian dos etapas en la propagación de la fisura que implican un incremento importante de la temperatura; la Fig. 4.9 b caracteriza la etapa inicial de propagación de fisura, mientras que la Fig. 4.9 b' la etapa final previa a la fractura con una temperatura alcanzando los 152 °C.

Con el fin de completar el análisis de temperatura en el cuello de la probeta, se efectuaron mediciones con la cámara termográfica a diferentes niveles de esfuerzo en la parte estrecha de la misma utilizando tres tipos de probeta: a) sin pre-corrosión, b) 8 minutos de pre-corrosión y c) 16 minutos de pre-corrosión, registrando la temperatura en el cuello. Los resultados se muestran en la Fig.4.10, en cuyo eje horizontal se registra la carga aplicada en MPa y en el eje vertical la correspondiente temperatura en la parte estrecha de la probeta, para los tres tipos mencionados anteriormente.



### "Máxima temperatura registrada en el cuello de la probeta, en función del esfuerzo aplicado"

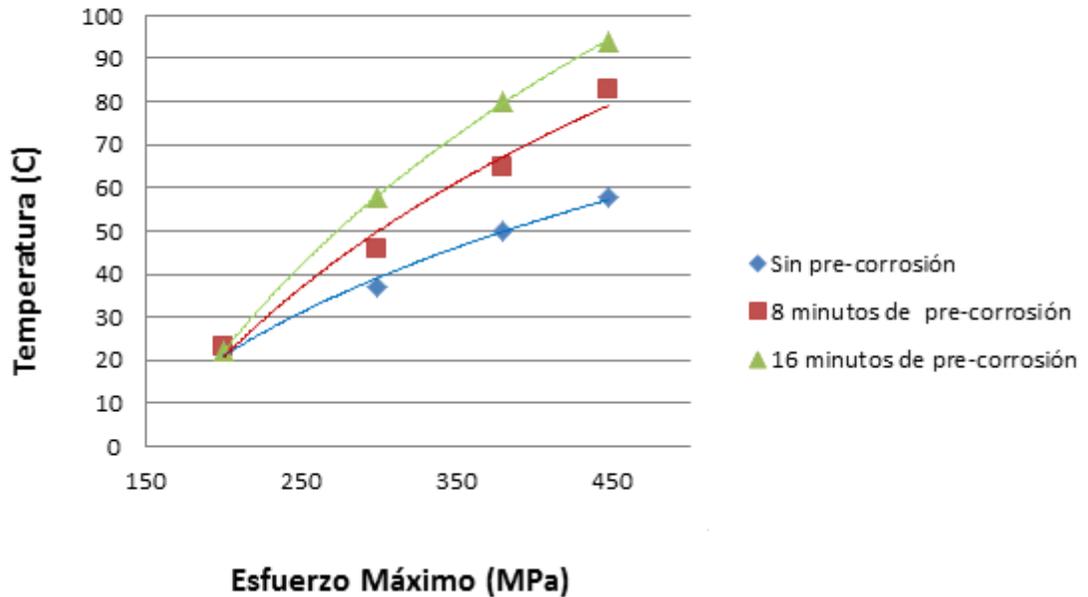


Fig. 4.10. Gráfica Esfuerzo-Temperatura

Como es posible apreciar en la Fig. 4.10, la temperatura se incrementa en forma no-lineal con la carga aplicada, presentando una tendencia asintótica para los tres tipos de probeta.

# **CAPÍTULO**

## **V**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS EN FATIGA ULTRASÓNICA**



## V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS EN FATIGA ULTRASÓNICA

### 5.1 RESULTADOS

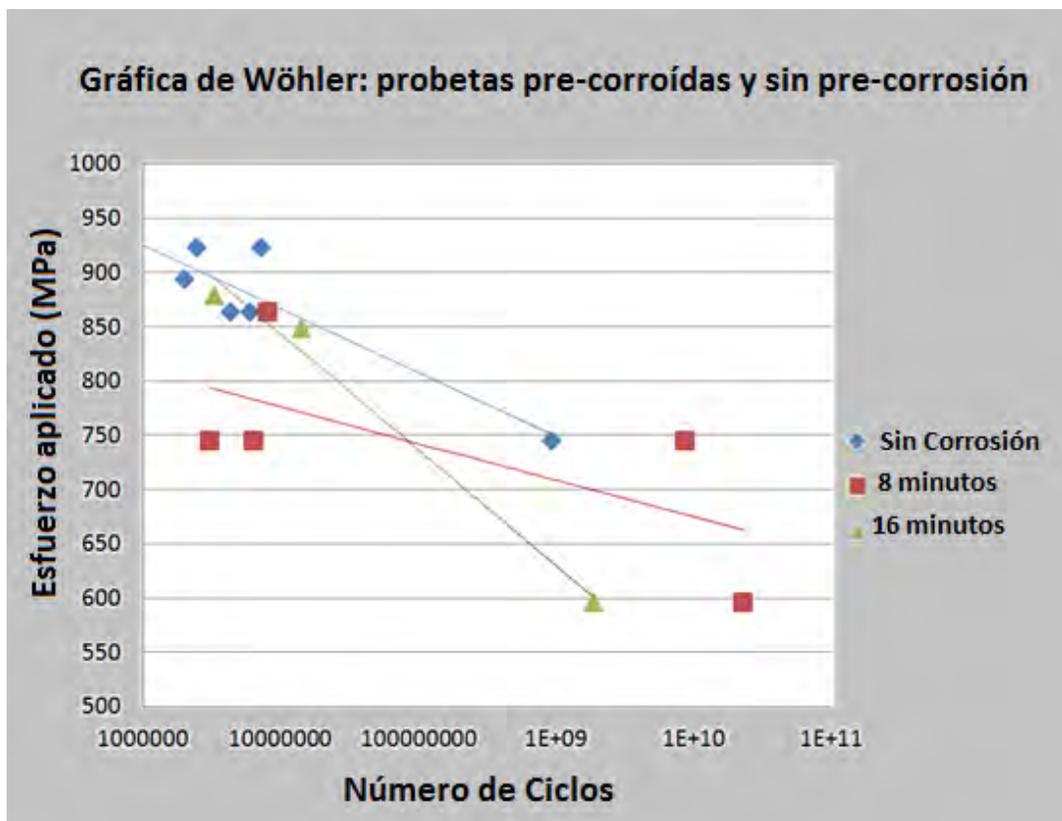
Los resultados en fatiga ultrasónica son registrados para una relación de carga R (para este trabajo fue sistemáticamente  $R = -1$ ), con la amplitud de carga aplicada  $\Delta\sigma$  y el correspondiente número de ciclos hasta la fractura del material, o hasta que se genere una grieta interna o externa que provoque la discontinuidad del material. La aparición de una micro-grieta provoca que no se cumpla la condición de resonancia (discontinuidad del material), y genera el paro automático de la máquina ultrasónica.

**Tabla 5.1.** Resultados de fatiga ultrasónica de las 16 probetas en la segunda etapa.

Probeta	Tiempo de ataque (s)	No. Ciclos (Hz)	Temperatura °C	Voltaje	$\sigma/\sigma_n$ %
1	Sin corrosión	355	-----	62	99
2	Sin corrosión	45335.16	42	50	80
3	8 minutos	426920.4	42	50	80
4	8 minutos	170Hrs	65	40	64
5	Sin ataque	98.59	54	60	96
6	8 minutos	151.61	62.7	50	80
7	16 minutos	198.305	49.5	40	64
8	16 minutos	139	56	50	80
9	Sin corrosión	296.232	50.8	58	93
10	Sin corrosión	213.462	45	58	93
11	Sin corrosión	121.2	50.6	62	99
12	16 minutos	700.2	51.3	57	91
13	16 minutos	162	50.8	59	95
14	8 minutos	313.2	62.8	50	80
15	8 minutos	397.96	82	58	93
16	Sin corrosión	38.856	55.2	62	99

Una vez conocidos los esfuerzos que se generan a determinados valores de voltaje en el generador, se llevan a cabo los ensayos en fatiga ultrasónica: simultáneamente registrando la carga aplicada para un ensayo (voltaje en el generador y el correspondiente esfuerzo inducido en la probeta), así como el tiempo de vida del material, reflejado en número de ciclos. La Tabla 5.1 presenta los resultados obtenidos sobre las 16 probetas de la segunda etapa.

A partir de los ensayos experimentales, se construyó la gráfica característica S-N (gráfica de Wöhler), para este material bajo ensayos de fatiga ultrasónica, Fig. 5.1.



**Fig.5.1.** Gráfica de Wöhler de resistencia en fatiga ultrasónica: probetas pre-corroídas y sin pre-corrosión

## 5.2 IMÁGENES DE SUPERFICIES DE FALLO

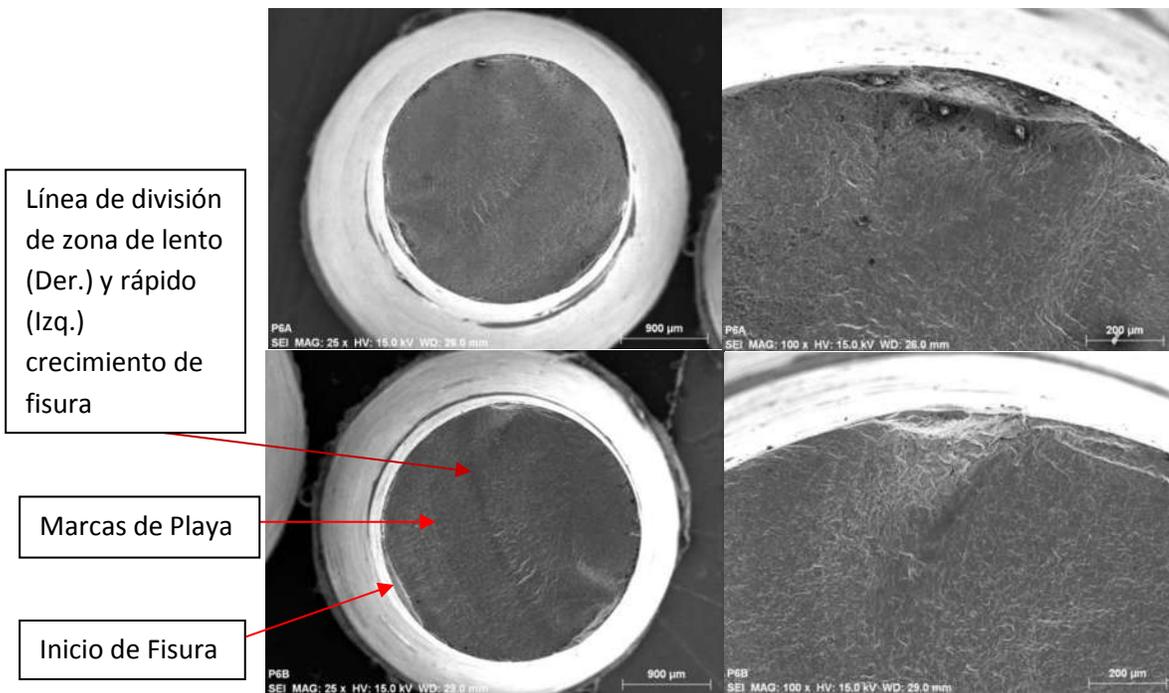


Fig. 5.2. Probeta 6 ensayada a 745 MPa, con pH=1.4 y con 8 minutos de pre-corrosión

Las superficies de fallo mostradas en la Fig. 5.2 corresponde a un alto nivel de carga (80% del límite elástico) para esta aleación de titanio. El inicio de fisura se acompaña con una apreciable deformación plástica localizada en la superficie de la parte estrecha de la probeta. También es posible apreciar dos zonas características en esta superficie de fractura: a) La primera que caracteriza el lento crecimiento de fisura y que ocupa prácticamente la mitad de la superficie mostrada en la Fig. 5.2, b) la de rápido crecimiento de fisura mostrada en la misma figura que se caracteriza por una zona de baja o nula deformación plástica. Estas dos zonas están delimitadas por una línea visible, como se aprecia en la Fig. 5.2.

Con la aplicación de un nivel de carga inferior (596 MPa), la zona de rápido crecimiento de fisura se extiende hasta 3/4 aproximadamente de la superficie de fractura, como se muestra en la Fig. 5.3. El inicio de fisura se sitúa nuevamente en la periferia de la superficie en la parte estrecha de la probeta, asociado probablemente a una inclusión no metálica presente muy cerca de la superficie.

Asociada esta inclusión no metálica se encuentran picaduras de pre-corrosión generadas con 16 minutos de pre-corrosión, que promueven el inicio y propagación de fisuras sobre la superficie de esta aleación de titanio.

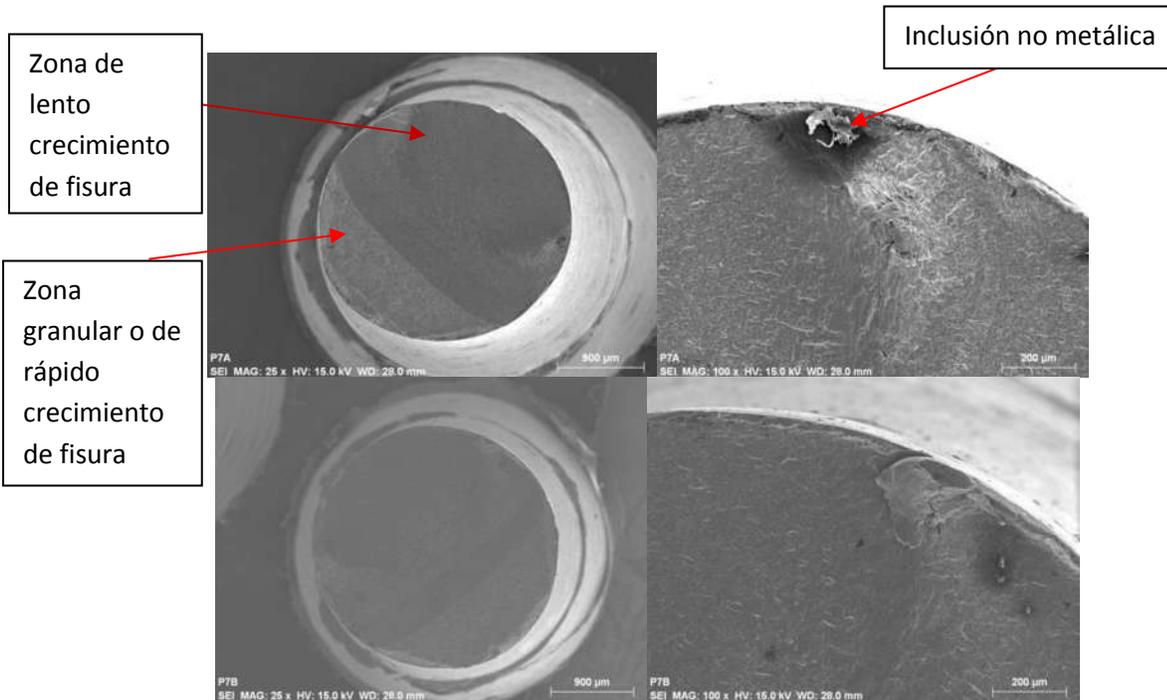


Fig. 5.3. Probeta 7 ensayada a 596 MPa, con pH=1.4 y con 16 minutos de pre-corrosión

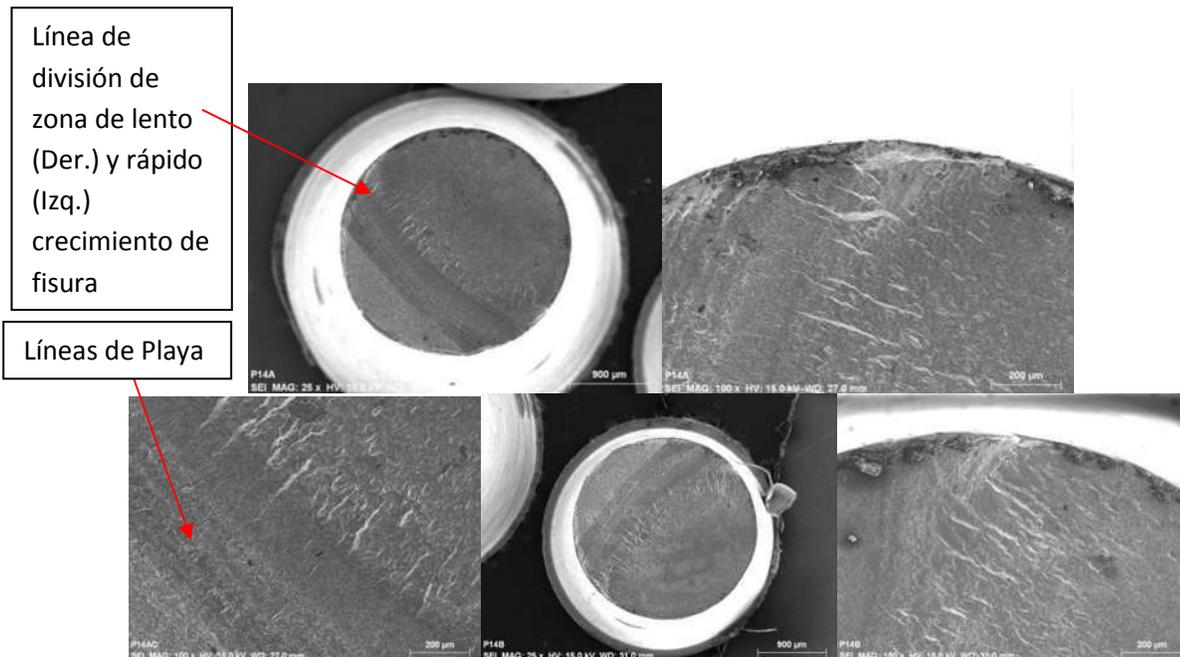


Fig. 5.4. Probeta 16 ensayada a 923 MPa, sin pre-corrosión



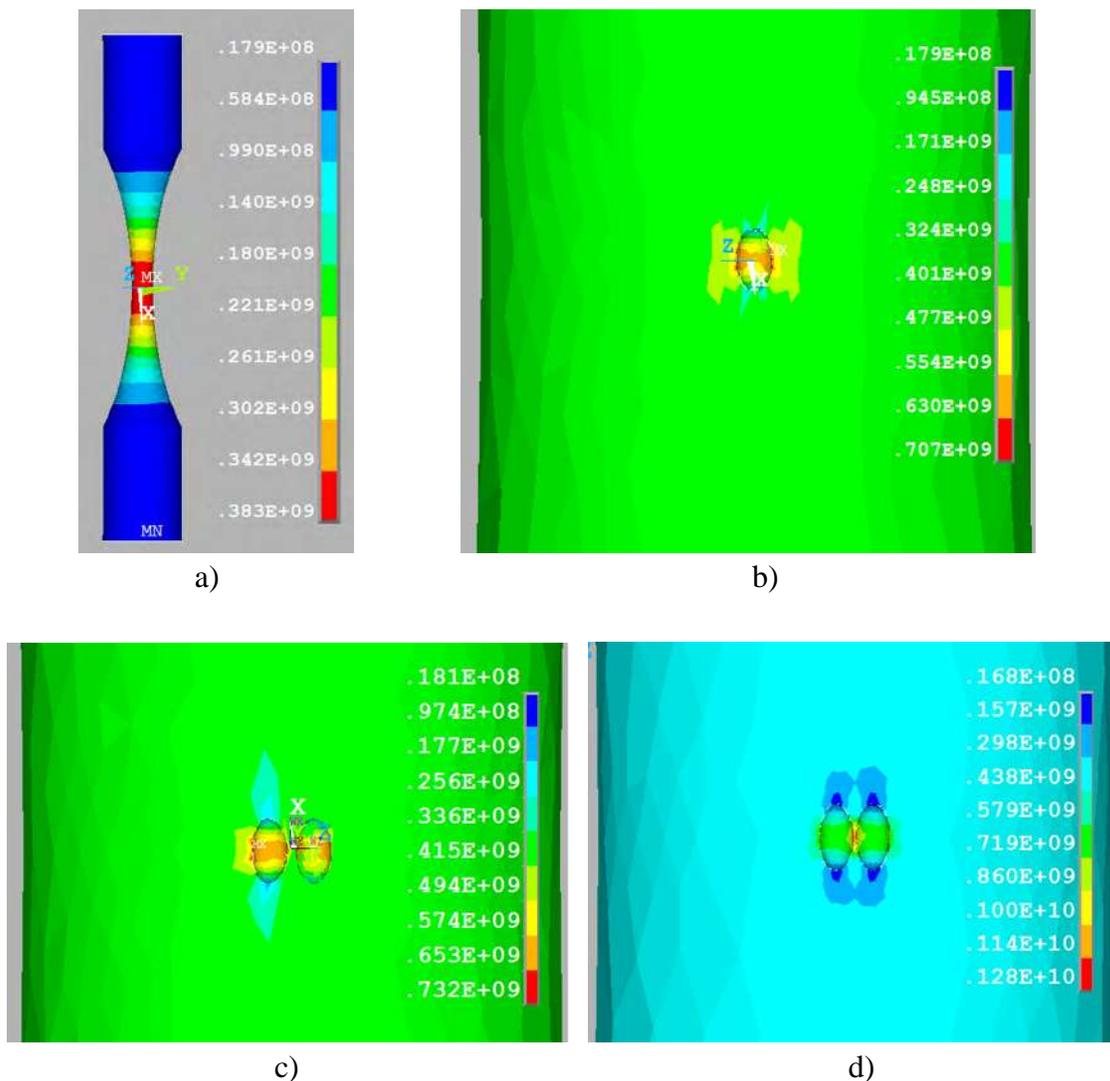
La figura 5.4 presenta la superficie de fractura para una probeta probada a un muy alto nivel de carga (923 MPa), sin pre-corrosión. Son perceptibles las "líneas de playa" en la zona de lento crecimiento de fisura, representando la deformación plástica en esta zona y la resistencia que ofrece el material a este crecimiento. Nuevamente, es visible la línea de separación entre las dos zonas mencionadas anteriormente: lento y rápido crecimiento de fisura.

### 5.3 RESULTADOS DE SIMULACIONES DE CONCENTRADORES DE ESFUERZO.

Las picaduras y los concentradores de esfuerzos son factores que han sido objeto de estudio en los últimos años; la mayoría de ellos han sido orientados a determinar la relación entre la geometría de una sola picadura, analizando si es elíptica semi-elíptica o hemisférica, y el factor de concentrador de esfuerzo. [28] [29] [30]. Un trabajo reciente ha sido orientado a investigar el concentrador de esfuerzos alrededor de las perforaciones producidas por corrosión en tanques de acero destinados al almacenamiento de productos petrolíferos. En este trabajo se menciona que los perfiles irregulares de las picaduras se pueden aproximar a formas elípticas con dos parámetros principales: el número "n" de ondas en los límites de la perforación ("cosine boundary and a star-like boundary"), y la desviación "d" del coseno o del perfil en forma de estrella. Se concluyó que el factor de concentración de esfuerzo tiende a valores elevados cuando el número de ondas "n" se incrementa, para la condición de carga uniaxial y de esfuerzo cortante. Aun cuando es mencionada la interacción entre ondas dentro de la misma perforación cuando el número de ondas "n" se incrementa; no se llevó a cabo ningún análisis numérico para el caso donde dos o más perforaciones están cerca e interactuando.

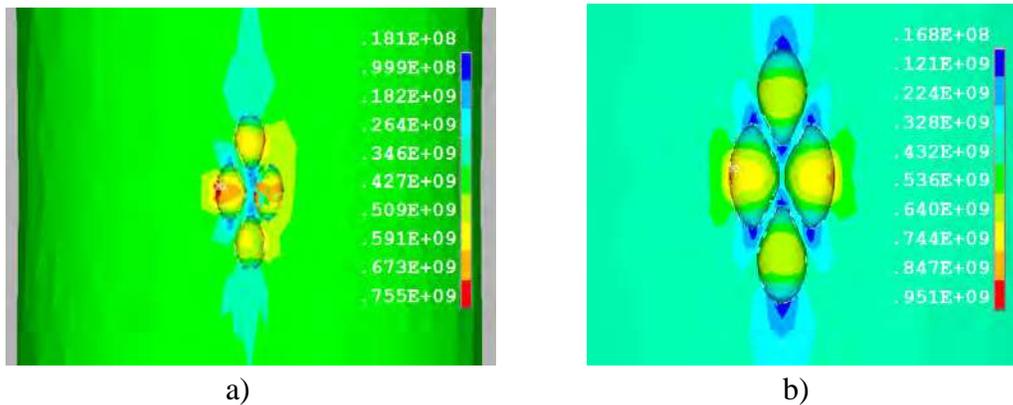
La Fig. 5.5a muestra la distribución de esfuerzo para la probeta de titanio sin picadura y con la aplicación de 30  $\mu\text{m}$  de tensión en cada extremo de la misma; mientras que la Fig. 5.5b presenta la distribución de los esfuerzos de Von Mises obtenidos por simulación numérica con la misma tensión en los extremos de la probeta y una sola picadura hemisférica de 200  $\mu\text{m}$  de diámetro en el cuello de la

misma. En la Fig. 5.5c aparece la distribución de esfuerzos con el mismo nivel de tensión en los extremos de la probeta, para dos picaduras hemisféricas transversales de la misma talla que la anterior, separadas de  $50\ \mu\text{m}$ ; mientras que la Fig. 5.5d muestra la distribución de esfuerzos en las mismas condiciones de carga para dos picaduras transversales de mismas dimensiones que las anteriores, pero esta vez separadas únicamente de  $20\ \mu\text{m}$ .



**Fig. 5. 5.** Esfuerzos de Von Mises en el cuello de la probeta de ensayos aplicando una tensión de  $30\ \mu\text{m}$  en los extremos de la misma: sin pre-corrosion a), una sola picadura hemisférica en el cuello b), dos picaduras hemisféricas transversales separadas de  $50\ \mu\text{m}$  c), y dos picaduras hemisféricas transversales separadas de  $20\ \mu\text{m}$  d).

Simulaciones numéricas adicionales se llevaron a cabo concernientes a cuatro picaduras hemisféricas localizadas en el cuello de la probeta: dos en dirección transversal respecto al eje principal de la probeta y dos longitudinales respecto al mismo eje, para dos separaciones entre las cuatro picaduras: 50 y 20  $\mu\text{m}$ , como se muestra en la Fig. 5.6a y b, respectivamente.



**Fig. 5. 6.** Distribucion de los esfuerzos de Von Mises en la probeta para cuatro picaduras en el cuello y 30  $\mu\text{m}$  de tension en los extremos de la misma: separacion entre picaduras de 50  $\mu\text{m}$  a), separacion entre picaduras de 20  $\mu\text{m}$  b).

La interaccion de dos o más picaduras de corrosion es un factor importante para la concentracion de esfuerzos, adicionalmente a las dimensiones y forma de una sola picaduras [31]. Bajo carga uniaxial, que es el caso de este estudio, las picaduras transversales y su proximidad parece ser el factor principal para incrementar el factor de concentración de esfuerzos. El máximo esfuerzo de Von Mises para una probeta sin pre-corrosion y tensionada 30  $\mu\text{m}$  en sus extremos es de 383 MPa (Fig. 5.5); este valor se incrementa 707 MPa para el caso de una sola picadura hemisférica con las mismas condiciones de carga (Fig. 5.5b), y alcanza los 732 MPa para dos picaduras hemisféricas transversales separadas de 50  $\mu\text{m}$  (Fig. 5.5c), finalmente sube hasta los 1280 MPa para la misma condición anterior pero con una separacion de solo 20  $\mu\text{m}$  (Fig. 5.5d).

Picaduras adicionales en la dirección longitudinal parecen inducir bajas modificaciones en el máximo esfuerzo localizado en el cuello de la probeta: La Fig.

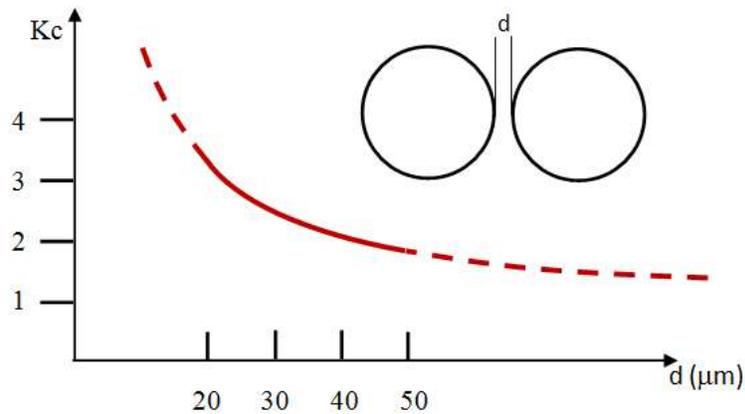


5.6a muestra un pequeño incremento concerniente 4 picaduras separadas 50  $\mu\text{m}$  respecto de la Fig. 5.5c; mientras que la Fig. 5.6b presenta un decremento del máximo esfuerzo respecto de la Fig. 5.5d, para picaduras separadas 20  $\mu\text{m}$ .

A partir de estos resultados numéricos, es posible concluir que los concentradores de esfuerzos se incrementan considerablemente reduciendo la separación de dos picaduras transversales localizadas en el cuello de la probeta, bajo condición de carga uniaxial que perpendicular a la dirección transversal. Bajo condición de carga uniaxial, la adición de picaduras en dirección longitudinal al eje principal de la probeta provoca baja variación en el esfuerzo máximo; mas aún, se observa una reducción del mismo (Fig. 5.6b), atribuido a una relajación de los esfuerzos debido a la adición de picaduras en dirección longitudinal.

Estos resultados numéricos han sido obtenidos bajo condición de carga uniaxial, es posible que importantes modificaciones se presenten para casos de carga biaxial o triaxial, puesto que podrán presentarse interacciones de las picaduras en diferentes ángulos y proximidades. Este será el sujeto de un estudio futuro.

Concerniente a la carga uniaxial, un modelo simple es propuesto para representar el factor de concentración de esfuerzos debido a la cercanía de dos picaduras hemisféricas transversales, localizadas en el cuello de la aleación de titanio. En la Figura 5.7 se muestra el factor de concentración de tensión  $K_c$  en el eje vertical y la separación  $d$  entre los dos orificios picaduras semiesféricas (200  $\mu\text{m}$  de diámetro), en el eje horizontal.



**Fig. 5. 7.** Modelo propuesto para la evolución del concentrador de esfuerzos con la cercanía de dos picaduras transversales colocadas en la parte estrecha de la probeta.

Se ha obtenido un modelo para representar el factor de concentración de esfuerzos  $K_c$ , relacionada con la separación de dos agujeros de picaduras semiesféricas en dirección transversal, en la sección de cuello de la muestra:

$$K_c = 1 + B \cdot e^{-d/30} \quad (1)$$

Dónde:

$B$ = es una constante = 4,78, y

$d$ = es la separación (en  $\mu\text{m}$ ) entre los dos agujeros de picaduras semiesféricas.



## CONCLUSIONES

Se han obtenido resultados sobre el comportamiento de la aleación de titanio nominación Ti-6Al-4V, sometido a ensayos en fatiga ultrasónica (20 KHz). Un resultado principal obtenido consiste en el efecto del aumento de temperatura en el material, debido al incremento en la carga. Este factor induce incremento de temperatura en la zona estrecha de la probeta y, consecuentemente, una disminución de la resistencia en fatiga bajo esta modalidad de ensayos. Un segundo resultado principal consiste en la puesta en evidencia que el tiempo de pre-corrosión también influye en el incremento de la temperatura en la zona mencionada de la probeta, y consecuentemente, en la disminución de la resistencia en fatiga de esta aleación de titanio. Es importante remarcar que el proceso de puesta en marcha de ensayos en fatiga ultrasónica en este trabajo se llevó de manera controlada, debido a la sensibilidad de este material en cuanto a la tasa en la aplicación de la carga: estabilización a una carga mínima de 149 MPa por 10 segundos, seguido de un incremento de 14.9 MPa por segundo hasta la carga nominal. Después de una búsqueda exhaustiva bibliográfica, no se encontró ninguna referencia concerniente al proceso de aplicación de carga en aleaciones de titanio sometidas a ensayos de fatiga ultrasónica. Es importante resaltar que la sensibilidad de este material a la tasa de aplicación de carga puede provocar variaciones en la respuesta mecánica del mismo.

Un aporte adicional de este trabajo es la puesta en evidencia a través de análisis de simulación numérica, del efecto de la proximidad de dos o más picaduras de pre-corrosión en la concentración de esfuerzos y la correspondiente disminución en la resistencia a la fatiga. A este respecto un análisis numérico ha permitido identificar a las picaduras en dirección transversal respecto de la carga aplicada como las más influyentes en el incremento de la concentración de esfuerzos. Un modelo desarrollado en el marco de este trabajo se presenta que



relaciona la cercanía entre dos picaduras transversales, respecto del eje principal de la probeta de ensayos, con el concentrador de esfuerzos correspondiente.

Referente a las superficies de fallo o rotura, un hecho interesante es que ninguna de las probetas sometidas a prueba, sin ataque corrosivo, presentó una separación total entre ellas, sino que solo se registró la aparición de una grieta a lo largo del perímetro de la zona estrecha, justo en la parte central de la probeta. Este resultado puede estar asociado a la fragilización interna del material que provoca una iniciación de fisura interna y un paro automático del sistema ultrasónico, sin llegar a la separación de las dos porciones de probeta.

Concerniente a las probetas pre-atacadas con ácido, se observó la separación con la falla de la probeta. Este comportamiento puede ser relacionado con un inicio y propagación de fisura localizada en la superficie de la probeta y promovidos por el efecto de las picaduras generadas en el proceso de pre-corrosión.

Serán necesario estudios posteriores para evaluar el efecto a detalle de la pre-corrosión que genera picaduras, particularmente, sometiendo probetas en condiciones de carga biaxial y tri-axial, donde la interacción entre las picaduras y sus propiedades geométricas pueden arrojar valores de concentradores de esfuerzos diferentes.

A continuación se presenta un listado de las principales conclusiones:

- a) La fatiga ultrasónica es un método muy útil para investigar el límite de resistencia a la fatiga de aleaciones metálicas en el régimen a muy alto número de ciclos (hasta  $10^{10}$  ciclos). Este método de ensayos experimentales permite reducir considerablemente el tiempo de ensayo para alcanzar el régimen gigacíclico o de muy alto número de ciclos.
- b) La aleación de titanio Ti-6Al-4V sometida al efecto de pre-corrosión presenta un significativo decremento de la resistencia en fatiga, comparado con especímenes no pre-corroídos.



- c) Ha sido puesto en evidencia en este trabajo la relación: picaduras de pre-corrosión-incremento de concentradores de esfuerzos-incremento de temperatura-reducción de la resistencia en fatiga ultrasónica.
- d) De acuerdo a los resultados experimentales (Fig. 5.1) la resistencia en fatiga ultrasónica se diferencia poco para los altos niveles de carga. Este efecto traduce el hecho que a altos niveles de carga el efecto de la pre-corrosión tiende a disminuir.
- e) De acuerdo a los resultados de simulación numérica, además de las dimensiones y geometría de las picaduras, el factor de proximidad entre dos picaduras transversales induce un incremento importante en la concentración de esfuerzos.
- f) La iniciación de grietas de fatiga en muestras pre-corroídas se asocia frecuentemente con los agujeros de pre-picaduras de pre-corrosión en la superficie de la muestra.
- g) El inicio de fisuras en probetas sin pre-corrosión se localizó frecuentemente en la parte interna de la misma.
- h) Las picaduras de pre-corrosión son concentradores de esfuerzos que se ve reflejado en un aumento de la temperatura.



## REFERENCIAS

- [1] R. Frederick, «Ultrasonic Engineering».
- [2] W. Q.Y, «Etude de la fatigue gigacyclique des alliages ferreux,» de Thesis Ecole centrale de Paris, 1998.
- [3] B. J. D. A. B. G. R. S. B. C. Wang Q.Y, «Gigacycle fatigue of ferrous alloys,» Fatigue Fracture Engineering Materials Structure, pp. 667-672, 1999.
- [4] C. Bathias, «Piezoelectric fatigue testing machine and devices,» International Journal of Fatigue , vol. 11, nº 28, pp. 1438-1445, 2006.
- [5] J. Ni, Mechanical behavior of alloys in ultrasonic fatigue, CNAM, 1991.
- [6] Z. Sun, C. Bathias y G. Baudry, «Fretting fatigue of 42CrMo4 steel at ultrasonic frequency,» International Journal of Fatigue, vol. 5, nº 23, pp. 449-453, 2001.
- [7] L. C. C. A. Cavalieri F, «“Análisis de fatiga en muy alto número de ciclos”.,» Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, pp. Vol. 15, N°1, 2001..
- [8] T. N. Rayan J. Morrissey, «Fatigue strength of Ti-6Al-4V at very long lives,» International Journal of Fatigue, vol. 27, pp. 1608-1611, 2005.
- [9] R. J. Morrissey, «Ultrasonic Fatigue Testing of Ti-6Al-4V,» Journal of ASTM International, vol. 2, nº 5, 2005.
- [10] J. P. B. T.-S. Jun, F. Hofmann, B. Abbey y A. M. Korsunsky, «Evaluation of the overload effect on fatigue crack growth with the help of synchrotron XRD strain mapping,» Engineering Fracture Mechanics, vol. 77, pp. 3216-3226, 2010.
- [11] W. Zhuang, S. Barter y L. Molent, «Flight-by-flight fatigue crack growth life assessment,» International Journal of Fatigue, vol. 29, pp. 1647-1657, 2007.
- [12] R. Jones, «Fatigue crack growth retardation after single cycle peak overload in Ti-6Al-4V titanium alloy,» Engineering Fracture Mechanics , vol. 5, nº 3, pp. 585-588, 1973.



- [13] X.-L. G. L.-J. Z. J.-X. Z. Jing Lui, «A study of fatigue damage evolution on pulsed Nd: YAG Ti6Al4V laser welded joints,» Engineering Fracture Mechanics, 2014.
- [14] C. L. S. S. J. S. J. T. B. Lin, «Fatigue crack growth in laser-shock-peened Ti-6Al-4V aerofoil specimens due to foreign object damage,» International Journal of Fatigue, vol. 59, pp. 23-33, 2013.
- [15] G.-S. S. y L.-f. R., «H2O2/HCL and heat-treated Ti-6Al-4V simulates pre-osteoblast proliferation and differentiation,» OOOOE, vol. 375, nº 108, p. 368, 2009.
- [16] M. Atapour, M. Fathi y M. Shamanian, «Corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy weldment in hydrochloric acid,» Materials and Corrosion, vol. 63, nº 2, pp. 134-139, 2012.
- [17] E. Codaro, R. Nakazato, A. Horovistiz, L. Ribeiro, R. Ribeiro y L. Hein, «An image nalysis study of pit formation on Ti-6Al-4V,» Materials Science & Engineering A, vol. 314, pp. 202-210, 2002.
- [18] S. Heinz, F. Balle, G. Wagner y D. Eifler, «Analysis of fatigue properties and failure mechanisms of Ti6Al4V in the very high cycle fatigue regime using ultrasonic technology and 3D laser scanning vibrometry,» Ultrasonics, vol. 53, pp. 1433-1440, 3013.
- [19] V. H. Q. Zepeda, Estudio de la resistencia a la fatiga ultrasónica de la aleación de aluminio nominación AISI-SAE 6061-T6, Morelia, 2010.
- [20] D. D. B. B. J. C. O. R. O Ritchie, «High-Cycle Fatigue of Ti-6Al-4V,» Fatigue Fracture Engine Materials Structural, pp. 621-631, 1999.
- [21] «Wikipedia,» [En línea]. Available:  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Vuelo\\_781\\_de\\_BOAC](http://es.wikipedia.org/wiki/Vuelo_781_de_BOAC). [Último acceso: 20 de Mayo 11:30 2013].
- [22] R. Boyer, «An overview on the use of titanium in the aerospace industry,» Materials Science & Engineering, vol. 213, pp. 103-114, 1996.
- [23] A. I. M. Park, Material Properties Handbook Titanium Alloys, OH, 1994.



- [24] M.Papakyriacou, H. Mayer, C. Pypen, H. Plenk y S. Stanzl-Tschegg, «Influence of Leading Frequency on High Cycle Fatigue Properties of B.C.C and H.C.P. Metals,» *Materials Science and Engineering A*, vol. 308, pp. 143-152, 2001.
- [25] E. T. Yoshiyuki Furuya, «Gigacycle fatigue properties of Ti-6Al-4V alloy under tensile,» *Materials Science & Engineering A*, nº 598, pp. 135-140, 2014.
- [26] E. C. Gómez, *Análisis de la Resistencia a la Fatiga Ultrasónica del Plástico Industrial ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)*, Morelia, 2013.
- [27] J. G. B. Beltrán, *Tesis de Máster en Ingeniería Mecánica: Calidad geométrica en el mecanizado de superficies curvas en titanio para aplicaciones médicas*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [28] G. K. E. S. Cerit M., «Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit,» *Eng. Fail. Analysis*, vol. 16, pp. 2467-2472, 2009.
- [29] Z. Mu, Z. Z. D.H. Chen y B. Ye, «The stress concentration factor of different corrosion pits Shape,» *Advanced Materials Research*, Vols. %1 de %2152-153, pp. 1115-1119, 2010.
- [30] W. Zhao, Y. Huang, X. Ye, B. Hu, J. Liu y L. Chen, «Correlation between the geometric parameters of corrosion pit and stress concentration factor,» *Applied Mechanics and Materials*, vol. 327, pp. 156-160, 2013.
- [31] D. A. A. C. G. E. Dominguez Almaraz G.M., «Ultrasonic Fatigue Endurance Of Aluminum Alloy AISI 6061-T6, On Pre-Corroded And Non Corrodes Specimens,» *Metallurgical And Material Transactions A.*, pp. 280-286, 2014.
- [32] E. T. Yoshiyuki Furuya, «Gigacycle Fatigue Properties of Ti-6Al-4V Alloy Under Tensile Mean Stress,» *Materials Science & Engineering A*, pp. 135-140, 2014.
- [33] M. R. G. P.J., «Ultrasonic fatigue testing of Ti-6Al-4V,» *Fatigue and Fracture Mechanics*, 2002.
- [35] «Wikipedia,» [En línea]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Titanio>.



[36] C. Federico, C. Luengo y A. Cardona, «Análisis de fatiga en muy alto número de ciclos,» Resivsta Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, vol. 15, nº 1º, pp. 03-12, 2011.

[37] D. G. M. D. Almaraz, «Maquina de Fatiga Ultrasónica». México Patente MX/a/2012/000313, Julio 2014.



## **PRESUPUESTO Y FINANCIAMIENTO**

Para la realización del proyecto, se contó con el apoyo beca otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y el apoyo recibido por el Asesor Dr. Gonzalo M. Domínguez Almaraz en la adquisición de materiales y equipo.



## APÉNDICE I

### DESCRIPCIÓN DEL ELEMENTO SOLID185

El elemento SOLID 185 se utiliza para modelado 3D de estructuras sólidas. Se define por ocho nodos con tres grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones nodales  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . El elemento tiene plasticidad, hiperelasticidad, tensión rigidez, fluencia, gran desviación y capacidades de gran tensión. También mezclado obtiene la capacidad de formular simulaciones de deformaciones en materiales elastoplásticos casi incompresible y materiales hiperelásticos totalmente incompresible.

El elemento SOLID185 está disponible en dos formas:

- Homogeneous Structural Solid (KEYOPT(3) = 0, the default)
- Layered Structural Solid (KEYOPT(3) = 1)

Una versión superior del elemento SOLID185 es SOLID186.