



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**“ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN
CONTROLADA SOBRE LA CONCENTRACIÓN
DE ESFUERZOS Y LA RESISTENCIA EN
FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES
METÁLICAS INDUSTRIALES”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

PRESENTA:

M.C. ISHVARI FERNANDA ZUÑIGA TELLO

ASESOR:

DR. GONZALO MARIANO DOMÍNGUEZ ALMARAZ

Morelia, Michoacán; Septiembre 2020

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

RESUMEN

El empleo de aleaciones metálicas de la industria moderna tales como: aluminios, aceros, super-aleaciones, etc., están sometidas frecuentemente a cargas mecánicas oscilantes y ataque del medio ambiente, que conducen a un deterioro de sus propiedades mecánicas y de vida útil. En el marco de este trabajo de tesis doctoral se estudió el efecto de la pre-corrosión controlada sobre algunas de estas aleaciones metálicas y su relación con la concentración de esfuerzos que se derivan de diferentes parámetros geométricos de las picaduras de corrosión: dimensión de las picaduras, proximidad, distribución y forma de las mismas. En efecto, los estudios destinados al análisis de estos parámetros geométricos, generados por el efecto corrosivo sobre la resistencia mecánica de las aleaciones metálicas, es relativamente reducido.

En este trabajo se abordaron los efectos de los diferentes parámetros geométricos de las picaduras de corrosión sobre los concentradores de esfuerzos resultantes y su efecto sobre la resistencia en fatiga bajo estas condiciones. También se realizó el estudio termográfico de las superficies corroídas para establecer las correlaciones entre el incremento de temperatura en las superficies pre-corroídas, el correspondiente aumento en el factor de concentración de esfuerzos y su correlación con la vida en fatiga del material ensayado.

PALABRAS CLAVE: Aluminio, Corrosión, Diseño, Pruebas Mecánicas, Fatiga Mecánica

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

ABSTRACT

Metal alloys used in modern industries such as: aluminum, steels, super-alloys, etc., are sometimes affected by oscillating mechanical loads and environmental attack, which lead to a displacement of their mechanical properties and useful life. Within the framework of this doctoral thesis work, the effect of controlled pre-corrosion on some of these metallic alloys will be studied and their relationship with the concentration of stresses derived from different geometric parameters of corrosion pitting: dimension of pits, proximity, distribution and form thereof. In fact, studies aimed at analyzing these geometric parameters, generated by the corrosive effect on the mechanical strength of metal alloys, are relatively small.

In this doctoral work, the effects of the different geometric parameters of corrosion pitting on the resulting stress concentrators and their effect on fatigue resistance under these conditions will be addressed. It will also be included in the analysis of this doctoral thesis work, the thermographic study of the corroded surfaces to establish the correlations between the temperature increase in the pre-corroded surfaces, the corresponding increase in the stress concentration factor and its correlation with the fatigue life of the material tested.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
NOMENCLATURA.....	xi
OBJETIVOS.....	12
Objetivo General.	12
Objetivos Específicos.	12
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
JUSTIFICACIÓN	15
HIPÓTESIS	16
1. CONCEPTOS GENERALES DE FATIGA	18
1.1. FRACTURA DEBIDA A CARGAS CÍCLICAS.....	20
1.1.1. Regímenes de fatiga.....	22
1.1.2. Influencia del esfuerzo promedio (mean stress) en la vida en fatiga.....	23
1.2. FACTORES DE CONCENTRADOR DE ESFUERZOS EFECTIVOS: CARGAS REPETIDAS	27
1.3. FATIGA ULTRASÓNICA	28
1.4. RESONANCIA.....	30
1.5. FALLA POR FATIGA ULTRASÓNICA	30
1.6. MAQUINAS DE FATIGA ULTRASÓNICA	32
1.7. CONCEPTOS GENERALES DEL FENÓMENO DE CORROSIÓN.....	33
1.7.1. Retos actuales en el tema de la corrosión [39].....	35
1.8. FATIGA Y CORROSIÓN	36
1.9. ALUMINIO.....	38
1.9.1. Propiedades físicas generales de las aleaciones de aluminio.....	39
1.9.2. Clasificación de aleaciones de aluminio forjadas.	39
1.9.3. Clasificación de aleaciones de aluminio para fundición.	41
2. MATERIALES	43
2.1. ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T6.....	43

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

2.2. RECURSOS MATERIALES	44
2.2.1. Equipo para medición de esfuerzos residuales.....	44
2.2.2. Medidores de rugosidad	45
2.2.3. Máquina de fatiga convencional	45
2.2.4. Máquina de fatiga ultrasónica	48
2.2.5. Sensor inductivo de proximidad.	51
2.2.6. Microscopios.	52
3. SIMULACIÓN NUMÉRICA	54
3.1. SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA OBTENER EL PERFÍL DE LA PROBETA DE ALUMINIO 7075-T6	54
3.1.1. Propiedades necesarias de la AA7075-T6	57
3.1.2. Secuencia del proceso de simulación.....	57
3.2. ANÁLISIS POR SIMULACIÓN NUMÉRICA DE PICADURAS. [52]	63
3.3. GEOMETRÍA DE LAS PICADURAS Y CONDICIONES DE LA CARGA.....	66
4. RESULTADOS	69
4.1. RESULTADOS DE SIMULACIÓN NUMERICA	70
4.1.1. Resultados de simulación numérica con carga uniaxial	70
4.1.2. Simulaciones con carga biaxial.	75
4.1.3. Análisis de los resultados	79
4.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES	82
4.2.1. Ensayos de fatiga ultrasónica	82
4.2.2. Resultados de pruebas de fatiga convencional	89
4.3. COMPARACIÓN FATIGA ULTRASÓNICA Y CONVENCIONAL.....	96
4.4. MICROSCOPIA DE SUPERFICIES DE FRACTURA	97
CONCLUSIONES.....	103
REFERENCIAS	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Regímenes de fatiga[1]	21
Figura 1.2 Forma típica de la curva S-N y dominios de fatiga [4]	22
Figura 1.3 Ciclo de carga con esfuerzo promedio (mean stress) diferente de cero[1]	25
Figura 1.4 Efectos del esfuerzo medio [1].....	25
Figura 1.5 Diagrama teórico de Haigh [4].....	27
Figura 1.6 Máquina de fatiga ultrasónica [16]	32
Figura 1.7 Relación esquemática de las disciplinas que intervienen en el estudio de la corrosión.	35
Figura 2.1 Dispositivo Pulstec m-X360 para medir esfuerzos residuales [51]	44
Figura 2.2 Medidores de rugosidad TESA y Mitutoyo respectivamente	45
Figura 2.3 Diseño original de la línea de prueba en SolidWorks	46
Figura 2.4 Mordazas de cuña	47
Figura 2.5 Vista lateral de la maquina Servo-hidráulica de fatiga	48
Figura 2.6 Piezoeléctrico y multiplicador de desplazamiento.	49
Figura 2.7 Circuito y tarjeta para adquisición de datos provenientes del generador de alta frecuencia.....	50
Figura 2.8 Aplicación desarrollada para el programa de cómputo de Lab View	51
Figura 2.9 Sensor inductivo de proximidad	51
Figura 2.10 Microscopio óptico, de la marca Keyence	52
Figura 3.1 a) Probetas B. Picaduras Transversales b) Picaduras C. Picaduras Longitudinales	55
Figura 3.2 Probeta para fatiga ultrasónica con las dimensiones que cumplen con la condición de resonancia.....	55
Figura 3.3 Dimensiones de probeta para fatiga convencional.....	55
Figura 3.4 Entorno principal de ANSYS Workbench	58
Figura 3.5 Ventana de preferencias.	59
Figura 3.6 Selección del elemento de mallado	59

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

Figura 3.7 Vinculando el módulo Static Structural y Modal y exportando la geometría del modelo 3D	60
Figura 3.8 Entorno “Mechanical”. Una vez mallado el modelo.....	60
Figura 3.9 Ventana de selección para extraer los modos de vibración	61
Figura 3.10 Resultado de análisis modal que cumple con la frecuencia requerida.....	62
Figura 3.11 Dimensiones de la probeta de la aleación de aluminio cumpliendo con la condición de resonancia.....	63
Figura 3.12 a) Dimensiones de la Probeta b) Espesores usados en las probetas.....	64
Figura 3.13 Elemento Hexaédrico.....	64
Figura 3.14 Análisis de convergencia de malla para cada espesor de placa	65
Figura 3.15 Convergencia de malla para una probeta de 3 mm de espesor, usando diferentes tipos de elemento, variando la separación de dos picaduras semi esféricas.	65
Figura 3.16 Probeta rectangular y refinamiento de malla alrededor de las picaduras.....	66
Figura 3.17 Perfil de picadura semiesférica Figura 3.18 Perfil de picadura cilíndrica	67
Figura 3.19 Esfuerzo inducido por una picadura con perfil cilíndrico, para diferentes espesores de placa y diferentes profundidades de penetración de picadura.	67
Figura 3.20 Esfuerzo inducido por una picadura con perfil semiesférico para diferentes espesores de placa y diferentes profundidades de penetración de picadura.	67
Figura 3.21 Carga aplicada: a) Uniaxial, b) Biaxial.....	68
Figura 4.1 Proximidad y geometría del arreglo de dos picaduras	70
Figura 4.2 a) Carga transversal aplicada a dos picaduras. b) Carga longitudinal aplicada a dos picaduras.	70
Figura 4.3 Esfuerzo inducido por la proximidad de dos picaduras, con carga transversal (uniaxial).....	71
Figura 4.4 Esfuerzo inducido por la proximidad de dos picaduras con carga longitudinal (uniaxial).....	73
Figura 4.5 Esfuerzo inducido por dos picaduras separadas entre centros 510, 600 y 800 μm con carga transversal atreves del espesor de la placa.	74

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

Figura 4.6 Esfuerzo inducido por carga longitudinal variando la profundidad de dos picaduras separadas 510, 600 y 800 μm en tres espesores diferentes de placa.	75
Figura 4.7 Esfuerzo inducido por la proximidad de dos picaduras con carga biaxial para tres diferentes espesores	76
Figura 4.8 Esfuerzo inducido por la proximidad de dos picaduras bajo carga biaxial y uniaxial para espesores de 0.7 y 3 mm	77
Figura 4.9 Esfuerzo inducido por la profundidad de dos picaduras separadas 510 mm de separación entre centros bajo carga uniaxial (transversal) y carga biaxial, para todos los espesores de placa.....	77
Figura 4.10 Esfuerzo inducido por la profundidad de dos picaduras separadas 600mm entre centros bajo carga uniaxial (transversal) y carga biaxial, para todos los espesores de placa.	78
Figura 4.11 Esfuerzo inducido por la profundidad de dos picaduras separadas entre centros 800mm entre centros bajo carga uniaxial (transversal) y carga biaxial, para todos los espesores de placa.....	78
Figura 4.12 Evolución de esfuerzo en dos direcciones, debido a dos picaduras separadas entre centros de 0.510 mm con carga transversal para dos direcciones y dos espesores de placa.....	79
Figura 4.13 Evolución del esfuerzo: Path 1 y 2 bajo carga transversal en placas de 0.7 mm de espesor.	80
Figura 4.14 Evolución del esfuerzo debido a dos picaduras separadas entre centros 0.510 mm bajo carga longitudinal para dos direcciones de path y dos espesores de placa.....	80
Figura 4.15 Evolución del esfuerzo path 3 y 4 bajo carga longitudinal en placa de 0.7 mm de espesor.	81
Figura 4.16 Evolución del esfuerzo debido a dos picaduras separadas entre centros 0.510 mm bajo carga biaxial para dos direcciones del path en dos espesores de placa.	81
Figura 4.17 Evolución del esfuerzo sobre: path 5 y 6 bajo carga biaxial, usando placas de 3mm de espesor	81
Figura 4.18 Material base y probeta muestra	82
Figura 4.19 Contornos de temperatura de la probeta muestra en la máquina ultrasónica...	83

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

Figura 4.20 Gráficas de esfuerzo y desplazamiento de la probeta	85
Figura 4.21 Probeta lista para ser montada en la máquina ultrasónica.	86
Figura 4.22 Imágenes termográficas de ensayos	86
Figura 4.23 Gráfica de Wöhler de resistencia en fatiga ultrasónica: probetas sin pre- corrosión	88
Figura 4.24 Probetas maquinadas para pruebas de fatiga convencional	89
Figura 4.25 Probeta fracturada, montada en la máquina de fatiga convencional	90
Figura 4.26 Probeta durante mediciones de rugosidad y display de valores obtenidos por el instrumento	92
Figura 4.27 Probetas (SERIE B) 1 y 7	94
Figura 4.28 a) Probeta 5 (SERIE A) (Antes y después del Electro pulido) b) Probeta 6 (SERIE A) Material Base	94
Figura 4.29 Probeta 9 (SERIE C) Picaduras Transversales	94
Figura 4.30 Electro pulido en las probetas para medir esfuerzos residuales.....	95
Figura 4.31 Results of ultrasonic fatigue tests	96
. Figura 4.32 Probeta B. Picaduras Transversales Figura 4.33 Probeta C. Picaduras Longitudinales	98
Figura 4.34 Probeta B fracturada, montada sobre la máquina de fatiga convencional	98
Figura 4.35 Imágenes de microscopio óptico probeta C3	99
Figura 4.36 Imagen de microscopio óptico probeta C7	99
Figura 4.37 Imagen de microscopio óptico probeta B7	100
Figura 4.38 Imagen de microscopio óptico probeta A5	100
Figura 4.39 Imagen de microscopio óptico probeta A5	101
Figura 0.1 Espécimen A5 a) Material Base 0 Ciclos b) Material Base después de 10^7 Ciclos	104
Figura 0.2 Espécimen B7- a) Picaduras Transversales 0 Ciclos, b) Picaduras Transversales después de 200000 Ciclos	104
Figura 80 a) Picaduras Longitudinales 0 Ciclos b) Picaduras Longitudinales después de 10^7 Ciclos	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Relación de propiedades físicas, más relevantes del aluminio puro.....	40
Tabla 2.1. Composición química de la aleación 7075-T6	43
Tabla 2.2 Propiedades mecánicas y físicas de la aleación de aluminio 7075-T6 [50]	43
Tabla 3.1. Composición química en peso de la aleación de Aluminio 7075-T6.....	57
Tabla 3.2 Principales propiedades mecánicas para el Aluminio 7075-T6.....	57
Tabla 4.1 Relación: voltaje-desplazamiento-esfuerzo- esfuerzo/límite elástico.	84
Tabla 4.2 Resultados de fatiga ultrasónica de las probetas sin pre-corrosión.	87
Tabla 4.3 Concentrado de las fuerzas y esfuerzos en cada probeta.....	90
Tabla 4.4 Localización de la falla en la probeta y el número de ciclos de prueba	91
Tabla 4.5 Valores de rugosidad antes y después de las pruebas de fatiga convencional	92
Tabla 4.6 Esfuerzos residuales en las probetas AA7075-T6	95

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.

ϵ , Deformación.

Kc Factor de concentración de esfuerzos

λ , Conductividad térmica.

N, Número de ciclos.

ν , Relación de Poisson.

ρ , Densidad.

σ , Esfuerzo aplicado.

σ_Y , Esfuerzo de Cedencia.

σ_{VM} , Esfuerzo de Von Mises.

τ_{max} , Esfuerzo cortante máximo en un punt

OBJETIVOS

Objetivo General.

Estudiar el efecto de los parámetros geométricos de picaduras generados por pre-corrosión controlada sobre los concentradores de esfuerzos resultantes y sobre la resistencia en fatiga convencional y ultrasónica de algunas aleaciones metálicas utilizadas en la industria.

Objetivos Específicos.

- Llevar a cabo un estudio sistemático sobre la pre-corrosión controlada mediante el análisis de variabilidad de los parámetros involucrados: tiempos de pre-corrosión y nivel de acidez medido mediante el valor del pH del agente corrosivo.
- Analizar las propiedades geométricas resultantes por los ataques de pre-corrosión tales como: geometría, dimensión, distribución de las picaduras de pre-corrosión.
- Implementar ensayos de tracción uniaxiales y biaxiales sobre las muestras pre-corroídas, con la finalidad de analizar las correspondientes concentraciones de esfuerzos inducidos sobre las probetas pre-corroídas.
- Llevar a cabo estudios de termografía sobre las superficies pre-corroídas, para establecer las posibles correlaciones entre los puntos de incremento de temperatura y los correspondientes concentradores de esfuerzos asociados.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

- Someter a ensayos de fatiga convencional y ultrasónica a las probetas pre-corroídas con el objeto de investigar su resistencia bajo estas dos modalidades de ensayos destructivos.
- Establecer las comparaciones entre la resistencia a la fatiga convencional y ultrasónica entre probetas sin pre-corrosión y probetas pre-corroídas. Establecer posibles correlaciones entre los parámetros geométricos de las picaduras y sus distribuciones con el incremento en la temperatura, la concentración de esfuerzos y la resistencia en fatiga.
- Llevar a cabo estudios mediante microscopio óptico y electrónico de barrido sobre las superficies de fractura, con la finalidad de establecer posibles causas de falla.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Realizar un estudio sistemático sobre las picaduras generadas por el efecto de pre-corrosión con varias concentraciones de ácido, picaduras que funcionan como concentradores de esfuerzos en el material.

Así como investigar la resistencia en fatiga convencional y ultrasónica de algunas aleaciones metálicas industriales, sometidas al efecto de la pre-corrosión.

JUSTIFICACIÓN

La corrosión de los materiales es un fenómeno que incide en aspectos económicos, de seguridad y de impacto al medio ambiente debido a que los materiales están expuestos al deterioro del medio. Particularmente en las industrias modernas, donde los materiales se exponen a medios corrosivos (medio marino, gases atmosféricos, polvo espacial, transporte de crudo, etc.) generando con esto pérdidas millonarias, riesgos en la integridad de las personas e impacto ambiental por la degradación de los materiales.

Los materiales en las industrias modernas también están sometidos a cargas mecánicas oscilantes, teniendo que soportar cada vez niveles de carga más altos y de mayores frecuencias; luego entonces, la combinación que resulta de ataque corrosivo con aplicación está presentes en la mayoría de las industrias, y resulta de particular importancia su estudio y comprensión mediante un estudio sistemático y controlado.

Estudios recientes se han enfocado a reducir los efectos de la corrosión en los materiales y las fallas mecánicas por separado, sin embargo, ambos fenómenos pueden ocurrir en un mismo material, uno a consecuencia del otro (la corrosión genera falla mecánica después de un tiempo de trabajo). Es por ello que en este trabajo se incluirán ambos fenómenos para estudiarlos.

HIPÓTESIS

Es posible realizar un estudio del efecto de la pre-corrosión controlada sobre algunas de estas aleaciones metálicas y su relación con la concentración de esfuerzos que se derivan de diferentes parámetros geométricos de las picaduras de corrosión: dimensión de las picaduras, proximidad, distribución y forma de las mismas.

Se puede realizar también un análisis termográfico de las superficies corroídas para establecer su relación entre el incremento de temperatura en las superficies pre-corroídas, el correspondiente aumento en el factor de concentración de esfuerzos.

También, es posible establecer correlaciones entre las propiedades geométricas de las picaduras de pre-corrosión con los incrementos de temperatura, los concentradores de esfuerzos asociados y con la disminución de la resistencia en fatiga convencional y ultrasónica de las probetas pre-corroídas

MATERIAL DE ESTUDIO

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

El estudio doctoral presentado a continuación tuvo como objetivo estudiar el efecto de los parámetros geométricos de picaduras generados por pre-corrosión controlada sobre los concentradores de esfuerzos resultantes y sobre la resistencia en fatiga convencional y ultrasónica de algunas aleaciones metálicas utilizadas en la industria.

Las relaciones estructura-propiedad en materiales fabricados para formar componentes, con frecuencia están influidas por el entorno al que el material está sujeto durante el uso. Este puede incluir la exposición a altas o bajas temperaturas, esfuerzos cíclicos, impacto súbito, corrosión u oxidación. Estos efectos deben tomarse en cuenta en el diseño para asegurar que los componentes no fallen inesperadamente.

1. CONCEPTOS GENERALES DE FATIGA

La fatiga se ha definido como "el cambio estructural permanente localizado progresivo que ocurre en un material sometido a tensiones repetidas o fluctuantes con tensiones que tienen un valor máximo menor que la resistencia a la tracción del material "(ASM, 1975). Las fallas ocurren en muchos sistemas mecánicos. Se estima que entre 50% y 90% de las fallas en los componentes mecánicos se deben a la fatiga (Fuchs y Stephens, 1980). Las fallas causadas por la fatiga culminan en grietas o fracturas después de un número suficiente de fluctuaciones de carga.[1]

La fractura de un elemento estructural debido a las cargas cíclicas repetidas, se conocen comúnmente como falla por fatiga o fractura por fatiga. El número correspondiente de ciclos de carga o el tiempo durante el cual el elemento está sujeto a estas cargas antes de que ocurra la fractura se denomina vida de fatiga del elemento. La vida de fatiga de un elemento es afectada por muchos factores (ASM, 1975). Por ejemplo, se ve afectado por 1. el tipo de carga (uniaxial, flexión, torsión), 2. la naturaleza de la curva de carga-desplazamiento (lineal, no lineal), 3. la frecuencia de repeticiones de carga o ciclos, 4. el historial de carga [carga cíclica con amplitud constante o variable, carga aleatoria, etc. (Gauthierand Petrequin, 1989; Buxbaum et al., 1991)], 5. el tamaño del elemento, 6. Los defectos del material, 7. el método de fabricación (rugosidad de la superficie, muescas), 8. las temperaturas de funcionamiento

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

(temperatura alta que da lugar a la fluencia, baja temperatura que resulta en fragilidad), y 9. las condiciones ambientales de operación (corrosión, ver Clarke y Gordon, 1973).[1]

En la práctica, es difícil obtener estimaciones precisas de la vida de fatiga, porque para muchos materiales, pequeños cambios en estas condiciones pueden afectar fuertemente la vida de fatiga. El diseñador puede desea confiar en la prueba de elementos a gran escala en condiciones de servicio. Sin embargo, la prueba de escala-completa de los elementos requieren mucho tiempo y dinero. Por lo tanto, los datos de las pruebas de laboratorio de las muestras de material se usan para establecer criterios de falla por fatiga, aunque estos datos no sean suficiente para determinar la vida de fatiga del miembro real. Sin embargo, las pruebas de laboratorio son útiles para determinar el efecto de las variables de carga en la vida de fatiga y para comparar la resistencia a la fatiga de varios materiales y establecer la importancia de los métodos de fabricación, acabado superficial, efectos ambientales, etc., en predicciones de vida de fatiga como son las hechas por Fuchs y Stephens en 1980 o Buch en 1988. [1]

Se puede considerar que el período total de vida de fatiga (vida total) de un elemento consta de tres fases: 1. daño por fatiga inicial que produce el inicio de la grieta, 2. propagación de una grieta o grietas que da como resultado la separación parcial de una sección transversal de un elemento, hasta que la sección transversal no fisurada, no puede soportar la carga aplicada, y 3. la fractura final del elemento. Tradicionalmente, los datos de vida de fatiga se han expresado como el número de ciclos de esfuerzo, necesarios para iniciar una grieta de fatiga que crecerá lo suficiente como para producir fracturas (por ejemplo, romper una probeta en dos) [1]

Así mismo, los datos de fatiga de un elemento también pueden expresarse en términos de tasa de crecimiento de grietas (Fuchs y Stephens, 1980). Los primeros investigadores de vida en fatiga asumieron que la vida en fatiga total de un elemento consistía principalmente del tiempo requerido para iniciar una grieta de fatiga de un minuto y que el tiempo requerido para que la grieta para creciera (propagarse) fue una porción insignificante de la vida total. Sin embargo, con el desarrollo de métodos más precisos de detección y seguimiento de

grietas (Skelton, 1988), se descubrió que las grietas microscópicas se desarrollan muy temprano en la vida de fatiga y crecen a varias tasas hasta que ocurre la fractura. Este hecho ha llevado al uso de la iniciación de grieta y las tasas de crecimiento de grieta para predecir con mayor precisión la fatiga (Knott, 1979; Fuchs y Stephens, 1980).[1]

1.1.FRACTURA DEBIDA A CARGAS CÍCLICAS

Un concepto básico en las predicciones de fractura mediante análisis de mecánica de fractura es la existencia de un tamaño de grieta crítico para una geometría y carga determinadas. En algunas aplicaciones prácticas, el tamaño de la grieta o defecto crítico es tan grande que el efecto de la grieta generalmente se puede detectar y corregir antes de que el elemento se ponga en servicio o durante el mantenimiento del mismo.

Sin embargo, la mayoría de las partes contienen grietas o fallas subcríticas. Estas grietas subcríticas pueden, durante la operación, crecer hasta un tamaño crítico y causar fallas catastróficas. De particular importancia en problemas prácticos son los mecanismos de fatiga y agrietamiento por corrosión bajo tensión. Aquí consideramos brevemente los criterios de fatiga asociados con el crecimiento de grietas subcríticas por el mecanismo de fatiga. Sin embargo, uno debe notar que el crecimiento de grieta por fatiga no puede explicarse completamente a menos que se consideren los efectos del medio ambiente (corrosión).

Las pruebas convencionales de resistencia en fatiga se han ocupado principalmente de las muestras con superficies lisas en condiciones de flexión rotativa o ciclos de tensión-compresión uniaxial.[2,3] Los resultados de estas pruebas se presentan en forma de gráficas de tensión (magnitud de tensión alterna aplicada $\pm\sigma$) contra el número de ciclos de tensión N (generalmente representado como $\log N$) requerido para ocasionar la fractura. Estas gráficas se llaman diagramas σ - N (también llamados diagramas S - N en la literatura) (**Figura 1.2 Forma típica** de la curva S - N y dominios de fatiga [4]). Wohler (anónimo, 1967) descubrió que el acero en los ejes de vagones de ferrocarril que probó presentaba un comportamiento llamado límite de resistencia: un nivel de tensión por debajo del cual un material puede sufrir ciclos de carga indefinidamente u no mostrar evidencia de fractura. Sin embargo, investigadores posteriores encontraron que muchos materiales no presentaban la respuesta

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

del límite de resistencia, sino que continuaban presentando fractura, siempre que la repetición de la carga continuara durante un número suficientemente grande de ciclos (**Figura 1.1** Regímenes de fatiga[1]). Sin embargo, muchos materiales no exhiben un límite de resistencia definido, pero las curvas de la gráfica σ - N continúan hacia abajo a medida que N aumenta. Para estos materiales es habitual definir la tensión para provocar la falla en un número determinado de ciclos (digamos, $N = 10^8$) como límite de resistencia al esfuerzo σ_L **Figura 1.1**.

El límite de resistencia es una propiedad importante del material para los elementos sujetos a carga de fatiga siempre que el número de ciclos de carga se acerque al número asociado con σ_L . Cabe señalar que otras propiedades de fatiga para un material dado, pueden ser obtenidas de la curva σ - N . Muchos elementos están sujetos a menos ciclos que los asociados con el límite de resistencia. Para cada valor de N en la figura 16.1, hay una tensión σ_{am} , donde los subíndices pueden denotar un máximo alternativo; un espécimen sometido a ciclos de tensión completamente revertidos en σ_{am} se fracturará después de N ciclos. Nota que $\sigma_{am} = \sigma_L$, en el límite de resistencia.

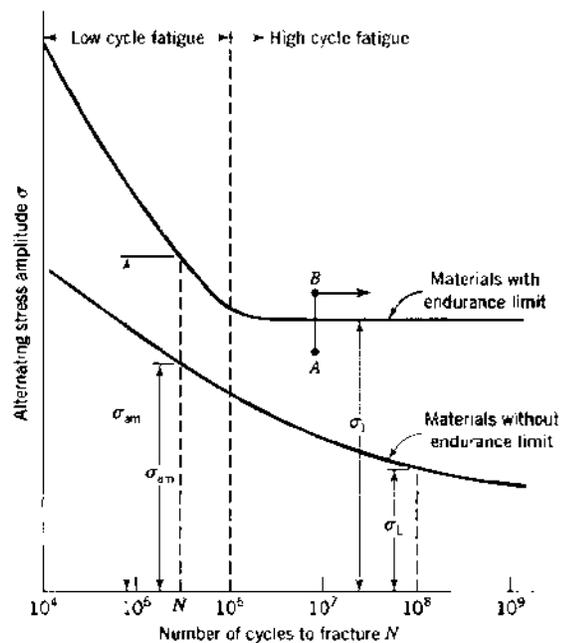


Figura 1.1 Regímenes de fatiga[1]

1.1.1. Regímenes de fatiga

El daño por fatiga corresponde a la iniciación de una grieta por fatiga, originada por ciclos de carga en el material. El número de ciclos de falla puede cambiar de acuerdo con el nivel de esfuerzo y puede variar en varios órdenes de magnitud. Por esta razón, los números de ciclos generalmente se representan en una escala logarítmica como se presenta en la Figura 2. En esta curva se definen convencionalmente tres dominios de fatiga. [4]

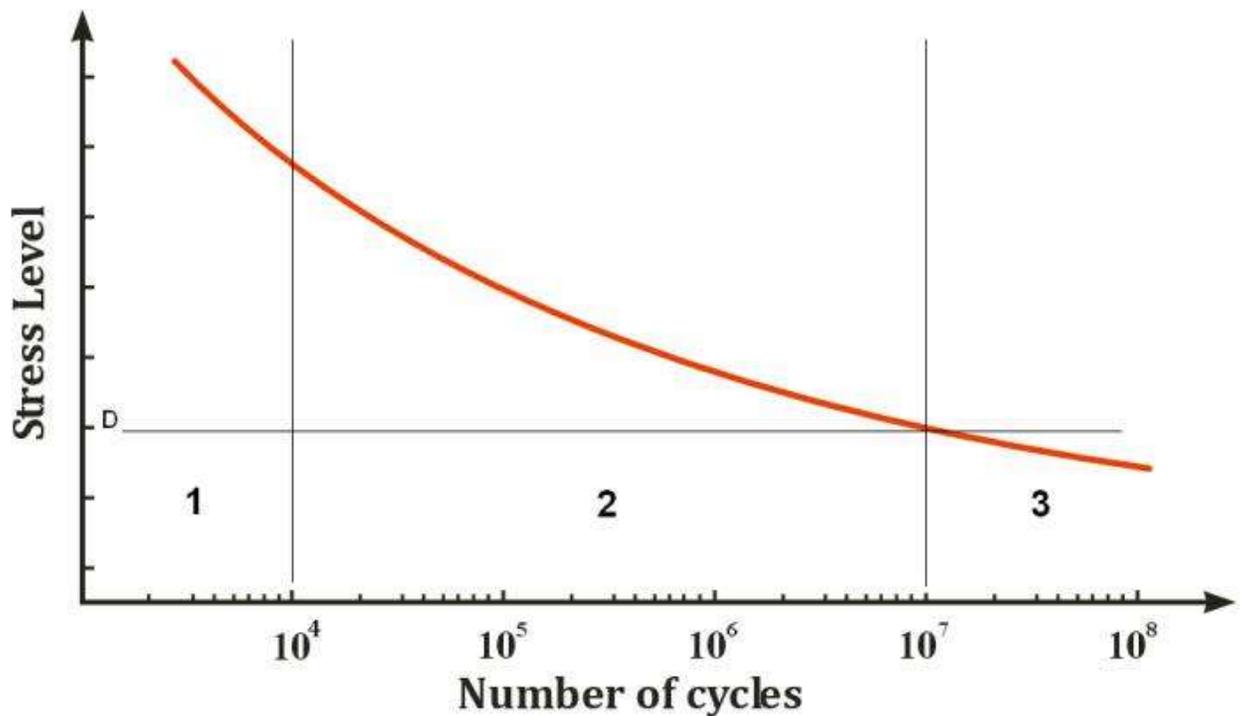


Figura 1.2 Forma típica de la curva S-N y dominios de fatiga [4]

La zona 1 en la **Figura 1.2** corresponde a la llamada "fatiga de ciclo bajo" (LCF). Esta zona de la curva de fatiga se caracteriza por la fractura a un número muy bajo de ciclos, de 1 a 10^4 ciclos. Normalmente en este dominio se aplican altos niveles de tensión en los materiales, observando importantes deformaciones plásticas macroscópicas.

La zona 2 en la **Figura 1.2** corresponde a los llamados "límites de fatiga" o "límites de resistencia". En algunos materiales, en particular los aceros al carbono simples y de baja

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

aleación, parece haber un nivel de esfuerzo distintivo por debajo del cual la falla por fatiga no ocurre bajo ciertas condiciones. En esta ubicación, la curva S-N parece volverse plana y acercarse asintóticamente [2]. En esta zona las deformaciones plásticas son mucho más bajas que el dominio 1 debido a los niveles de tensión más bajos. Se observa a escala macroscópica, alrededor de 10^5 ciclos un comportamiento elástico. En realidad, el término "resistencia a la fatiga" se utiliza para especificar un valor de tensión de una curva S-N en una vida particular.

La zona 3 en la **Figura 1.2** corresponde al régimen de "fatiga de alto número de ciclos" (HCF) caracterizada por vida en fatiga de 10^6 a 10^8 ciclos. Se observa una característica

aproximadamente asintótica de los datos S-N en esta zona, pero no totalmente asintótica, lo que correspondería a un "límite de fatiga". Este límite teórico corresponde a un nivel de esfuerzo que describe un umbral de falla sin fatiga después de un número infinito de ciclos; sin embargo este tema ha sido abordado por varios autores en los últimos años [3–6]

En la zona 3 también se comprende el régimen (VHCF) que se caracteriza por vidas en fatiga que exceden los 10^8 ciclos.

1.1.2. Influencia del esfuerzo promedio (mean stress) en la vida en fatiga

Varios otros factores afectan la resistencia a la fatiga. Por ejemplo, puede verse alterada por factores como la frecuencia de los ciclos, trabajo en frío del material, temperatura, corrosión, tensiones residuales, acabado superficial y esfuerzo promedio.

La curva σ -N proporciona la resistencia a la fatiga σ_{am} , para un determinado número de ciclos N de carga para miembros sometidos a carga completamente invertida (carga bajo la condición de esfuerzo medio igual a cero). Las tensiones medias distintas de cero tienen un efecto marcado en resistencia a la fatiga. Se han propuesto varias relaciones para describir los efectos del esfuerzo medio. Tres de estas relaciones son (para pruebas unidimensionales).

a) Relación de Soderberg

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{am}} + \frac{\sigma_m}{Y} = 1 \quad (1.1)$$

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

b) Relación de Gerber

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{am}} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right)^2 = 1 \quad (1.2)$$

c) Relación de Goodman

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{am}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (1.3)$$

Donde σ_a es la amplitud del esfuerzo, σ_{am} es la resistencia a la fatiga para un N dado con el esfuerzo medio igual a cero, Y es el esfuerzo de fluencia, σ_m es el esfuerzo medio y σ_u es el esfuerzo último. La relación entre σ_a y σ_m para la carga cíclica con tensiones desiguales se indica en la **Figura 1.3**. Para la mayoría de los metales, la relación de Soderberg produce estimaciones conservadoras de amplitud de tensión σ_a , (o rango de tensión $2\sigma_a$). La relación de Goodman da razonablemente buenos resultados para materiales frágiles, mientras que es cuestionable para materiales dúctiles. La relación de Gerber produce estimaciones bastante buenas para σ_a , para materiales dúctiles. La relación de Soderberg, la relación de Gerber y la relación de Goodman se interpretan en la **Figura 1.4**.

La resistencia a la fatiga se supone que se obtiene de muestras lisas (libres de concentraciones de esfuerzo sujetas a una carga completamente reversible bajo un estado de tensión uniaxial (muestras de tensión-compresión o muestras de flexión giratoria). La resistencia a la fatiga para un número específico de ciclos N, donde $N > 10^6$, se especifica por la magnitud de σ_{am} . El efecto del esfuerzo medio σ_m se supone dado por la relación de Soderberg (**Eq. 1.2**), la relación de Gerber (**Ec. 1.2**) o la relación de Goodman (**Ec. 1.3**). Los criterios de falla para elementos sujetos a estad multiaxiales de esfuerzos son los mismos que para fallas normales. Tanto el criterio de esfuerzo cortante máximo como octaédrico se usa ampliamente en el diseño para fatiga de alto número de ciclos.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

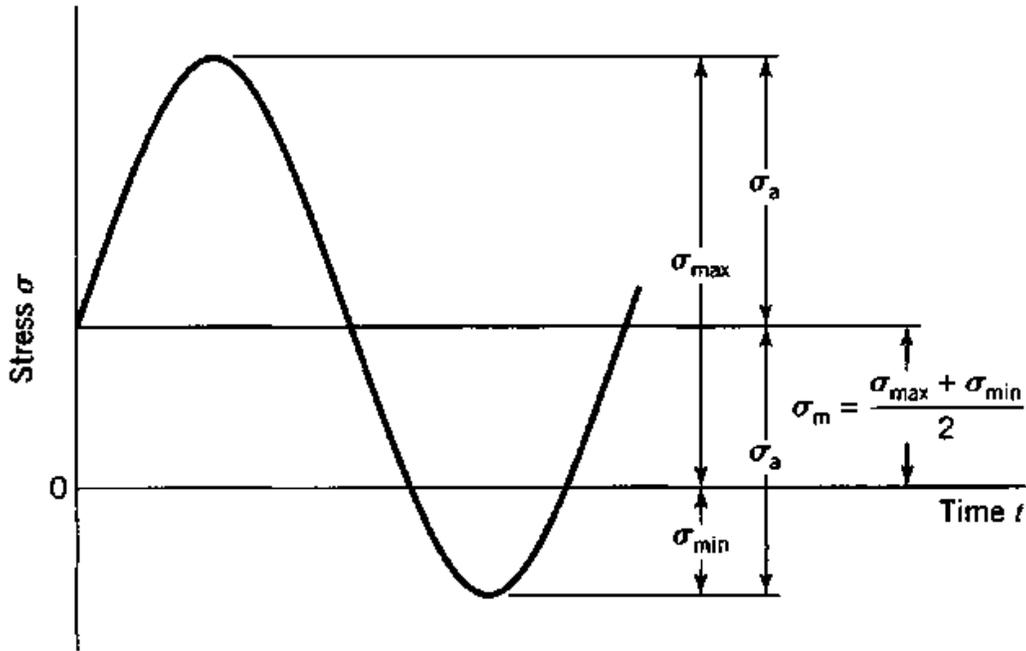


Figura 1.3 Ciclo de carga con esfuerzo promedio (mean stress) diferente de cero[1]

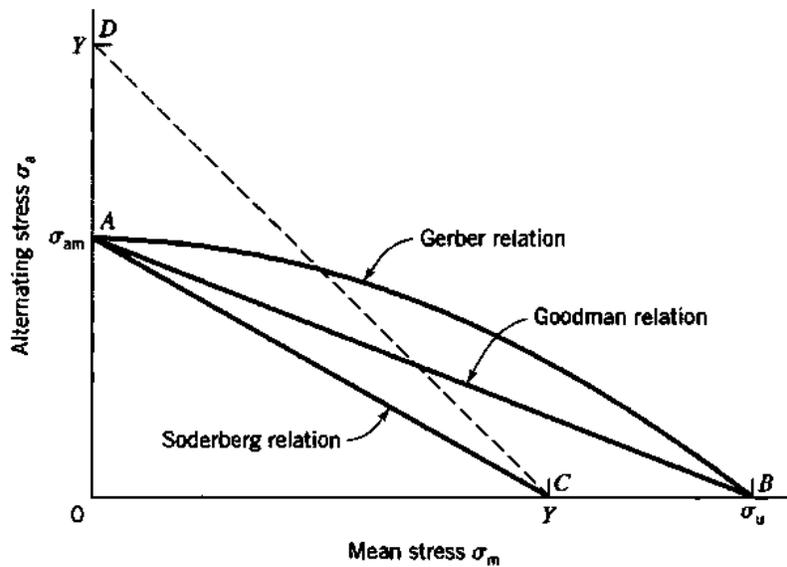


Figura 1.4 Efectos del esfuerzo medio [1]

La mayoría de los datos de pruebas de fatiga disponibles, han sido determinados mediante pruebas de esfuerzos alternados, esto quiere decir que el esfuerzo medio es igual a cero ($\sigma_m=0$) esto se debe a que es más fácil obtener datos en $R = -1$, con las máquinas de

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

pruebas que no permiten la aplicación de un esfuerzo medio que no sea diferente de cero, sin embargo, las curvas S-N que incluyen valores de esfuerzo medio variados se encuentran disponibles para algunos materiales. Un procedimiento usado para desarrollar los efectos del esfuerzo medio es seleccionar diferentes valores de esfuerzo medio, llevar a cabo pruebas con esos diferentes valores y con varias amplitudes de esfuerzo para cada uno. Los resultados pueden ser presentados en diagramas S-N, con curvas específicas para cada esfuerzo medio.

En situaciones reales, de componentes en servicio, los elementos son sometidos a esfuerzos fluctuantes entre diferentes valores de esfuerzos de tensión y compresión.

Se han propuesto una serie de relaciones empíricas para estimar la fluctuación de la resistencia a la fatiga si la resistencia a la fatiga alterna y la resistencia a la tracción del material se conocen. Alternativa significa presentar el mismo tipo de información en la figura 5, se muestra un diagrama de vida constante. Esto se hace tomando puntos de las curvas S-N a varios valores de la vida en fatiga y luego trazar combinaciones de amplitud de tensión y tensión media que producen cada una de estas vidas. La interpolación entre las líneas en cualquier tipo de diagrama puede usarse para obtener la vida en fatiga para diversas tensiones aplicadas.

Otro procedimiento utilizado a menudo para desarrollar datos sobre el efecto del esfuerzo medio es elegir varios valores de la relación de carga R, llevando a cabo pruebas en varios niveles de esfuerzo para cada una de esas relaciones de carga. Se pueden obtener una familia de curvas S-N, cada una correspondiente a un valor R diferente.

El diagrama de Haigh es otra forma de presentar los datos de vida en fatiga con respecto al efecto del esfuerzo medio. En este diagrama, la amplitud de la tensión se representa en función de la tensión media, como se muestra en la **Figura 1.5**; la línea A-B es para un número constante de ciclos. El punto A corresponde a la carga totalmente inversa, está ubicado en el esfuerzo medio igual a cero. El punto B está asociado con la amplitud de tensión cero, que corresponde a la tensión de fractura en una prueba estática de tracción. La resistencia a la fatiga determinada a partir de las pruebas para cierta vida puede estar ubicada en las líneas

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

rectas correspondientes a la relación R a la que se obtuvieron. Se pueden colocar puntos de diferente relación de carga R en una línea, parábola o cualquier curva que pueda ser ajustado a los datos. La resistencia a la fatiga de otra relación de tensión R no probada puede ser aproximada siguiendo esta última curva.

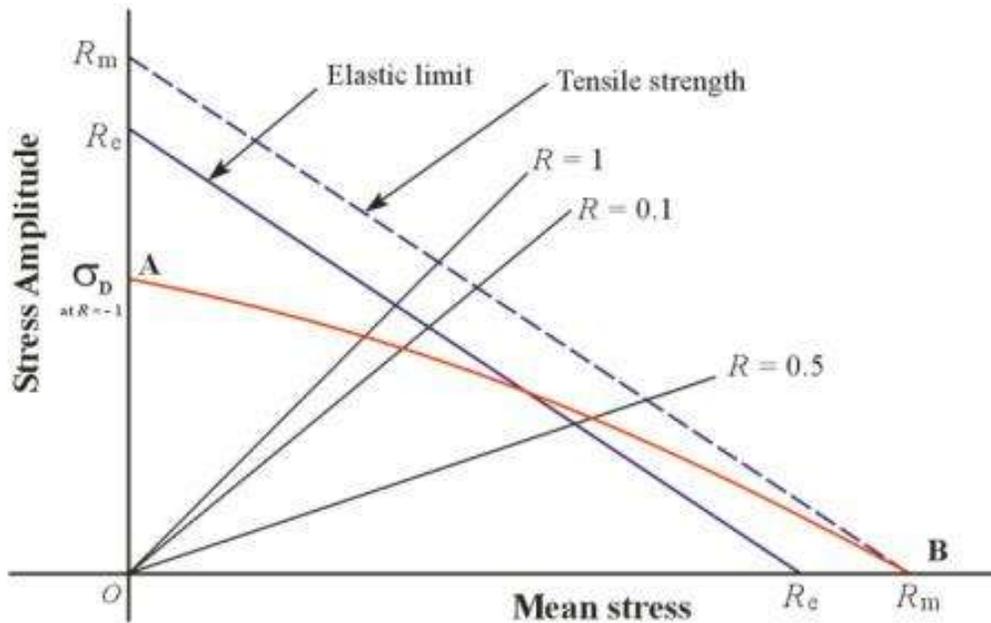


Figura 1.5 Diagrama teórico de Haigh [4]

1.2.FACTORES DE CONCENTRADOR DE ESFUERZOS EFECTIVOS: CARGAS REPETIDAS

El valor del factor de concentración de esfuerzos S_{ce} , para un elemento con muesca, sometido a cargas repetidas variables (fatiga) se obtiene mediante la comparación de los datos tomados de dos conjuntos de muestras de prueba. Un conjunto de muestras (de 5 a 10 muestras) no tiene muescas; el otro conjunto contiene muestras con muescas. El esfuerzo significativo en las muestras sin muescas es la tensión nominal calculada con una fórmula de tensión elemental. Para las muestras con muescas, el esfuerzo nominal se calcula nuevamente con la misma fórmula de esfuerzo elemental que para las muestras sin muescas. Ambos conjuntos

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

de muestras están sujetos al mismo tipo de carga repetida o fatiga (por ejemplo, flexión). Se supone que la falla (fractura) en cada conjunto de muestras para un número específico de ciclos de carga completamente reversible N ocurre cuando el esfuerzo alcanza el mismo valor en cada conjunto, como la muesca causa una concentración de tensión, la carga requerida para causar el esfuerzo de fractura es menor para las muestras con muescas.

1.3.FATIGA ULTRASÓNICA

En 1850, Wohler, [9] 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. [9]

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 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. [1]

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.[10]

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

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.[8, 18–24]

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 [18], llegó Jenkin probando algunos materiales a una frecuencia de 2.5 kHz utilizando la técnica ultrasónica.

Para 1930, Jenkin y Lehman desarrollaron un sistema neumático que alcanzaba los 10kHz [9].

Fue hasta 1950 que Manson desarrolló un sistema piezoeléctrico que alcanzaba los 20kHz [18]

Los estudios sobre régimen giga cíclico muestran que varios materiales, incluyendo aceros y aleaciones de titanio, no presentan “límite de fatiga” para los ensayos en el régimen giga cíclico, en contraste con la fatiga convencional[19] Cabe destacar en este punto que en la mayoría de estos trabajos no se estudia ningún efecto de la corrosión. [11–13], [20]

Dentro de las publicaciones acerca de la iniciación de grietas de fatiga y el crecimiento de las picaduras artificiales, un trabajo interesante es donde se desarrolló un modelo de fractura mecánica tridimensional sencillo. El modelo muestra muy buena relación con los experimentos, incluyendo para las pequeñas grietas al describir la iniciación y crecimiento de una grieta de fatiga que surge de una picadura y en la relación de la misma con la reducción de la resistencia a la fatiga. En ésta misma investigación se estableció una relación empírica entre la profundidad de la picadura de corrosión y la vida de fatiga mediante los datos experimentales [15].

En 2011, un trabajo de Cavalieri [16], muestra una metodología, para el estudio del comportamiento de fatiga a elevada temperatura en un acero austenítico, donde la probeta se induce a una cierta temperatura para generar cambios de fase que afecten la vida en fatiga

1.4.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. [21]

1.5.FALLA POR FATIGA ULTRASÓNICA

Como se menciona al inicio del capítulo, 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 [7–9]. Un ejemplo de falla por fatiga es 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:

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

- 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 iniciaron 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.

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 [5]. Fue hasta 1950 que Manson desarrolló un sistema piezoeléctrico que alcanzaba los 20kHz.[25]

En 1965 Kikukawa propuso una máquina que alcanzaba la frecuencia de 199 kHz, sin embargo, si se tiene en cuenta 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.[26]. 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 [7,18, 26, 27]. 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 tracción-compresión, torsión, altas y bajas temperaturas, fricción-desgaste, entre otras.

Adicionalmente, algunos trabajos muestran el análisis y estudio de la evolución de las grietas en las pruebas de fatiga ultrasónica. [27–35]

1.6.MAQUINAS DE FATIGA ULTRASÓNICA

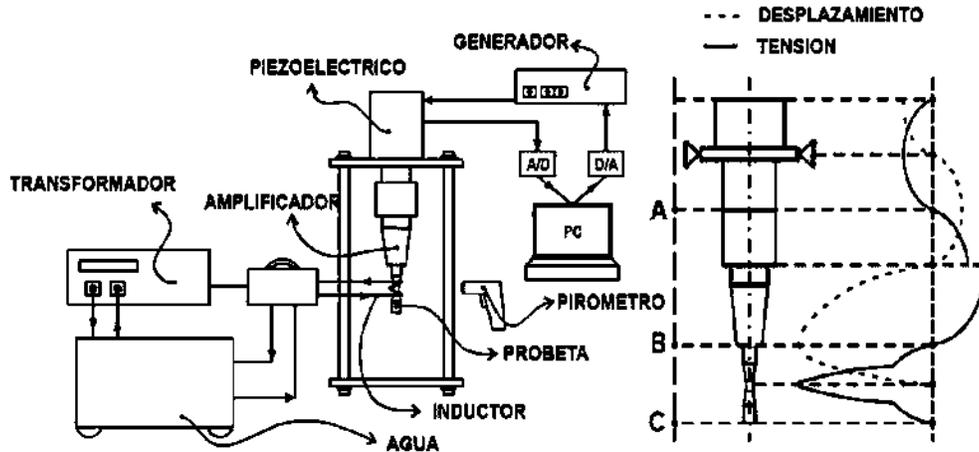


Figura 1.6 Máquina de fatiga ultrasónica [16]

Las máquinas de fatiga están compuestas de tres partes principales **Figura 1.6**: Un generador eléctrico que convierte la tensión de red en voltaje de señal sinusoidal 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 placa 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 [4, 6–9].

1.7. CONCEPTOS GENERALES DEL FENÓMENO DE CORROSIÓN

La corrosión se define como el ataque destructivo a un metal por su interacción con el medio ambiente. La definición se refiere principalmente a la disolución anódica de un metal, sin embargo; otros materiales como los plásticos, el concreto, la madera, cerámicos y materiales compuestos pueden sufrir deterioro en ambientes determinados; para estos materiales, se emplea el término “degradación”. [37]

Los metales, pueden sufrir degradación mediante procesos mecánicos y físicos. Los procesos de degradación físico-mecánicos incluyen:

- Fractura: falla de un metal bajo un esfuerzo aplicado.
- Fatiga: falla de un metal bajo un esfuerzo aplicado de forma cíclica repetitiva.
- Desgaste: ocasionado por el frotamiento o deslizamiento de los materiales entre sí.
- Erosión o erosión por cavitación: Daño mecánico causado por el movimiento de un líquido o por el colapso de burbujas de vapor en la superficie metálica.
- Daño por radiación: interacción de partículas elementales (neutrones o iones metálicos) con un metal sólido distorsionando la red metálica.

Existen cuatro razones principales por la que se estudia a la corrosión. Tres están basadas en cuestiones sociales (i) seguridad y vida, (ii) el costo de la corrosión y (iii) la conservación de los materiales. La cuarta razón es que la corrosión es un fenómeno para entender y el estudio en sí mismo constituye un reto para la ciencia.

- (i) Corrosión, seguridad y vida.

A través de la historia, han existido grandes pérdidas humanas ocasionadas por fallas por corrosión en materiales de soporte y estructura, los cuales han provocado la preocupación por la seguridad concerniente a la integridad de la

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

infraestructura empleada en tuberías, tanques de almacenamiento, recipientes a presión y maquinaria aerodinámica.

Otro tipo de seguridad relativa a la corrosión es la acumulación de ciertos iones tóxicos debido a la corrosión. Algunos temas de preocupación actual son la producción de iones de Cr^{6+} a partir de la corrosión del cromo y el uso de cromatos en tratamientos superficiales para prevenir la corrosión. También la contaminación de tuberías de agua por la corrosión de componentes de cadmio está bajo el escrutinio actual.

(ii) Costo de la corrosión

En términos económicos se estima que aproximadamente el 3 al 5% del PIB de un país industrializado se gasta directa, e indirectamente en prevenir y corregir problemas relacionados con la corrosión metálica. [38]

Los gastos por corrosión se pueden clasificar en evitables e inevitables. Los gastos evitables son los que se pueden reducir mediante prácticas adecuadas en control de corrosión. Los costos inevitables son en los que se requieren nuevos materiales y tecnología en el control de la corrosión. Adicionalmente, los costos en corrosión pueden dividirse en costos directos e indirectos.

Algunos de los costos directos se enlistan a continuación:

- a. Costos de capital – costos de refacciones y reemplazos, por ejemplo: silenciadores automotrices, líneas de agua, calentadores de agua, etc.
- b. Costos de control – mantenimiento, reparación, pintura.
- c. Costos de diseño – costos extra relacionados al uso de materiales resistentes a la corrosión, recubrimientos e inhibidores de corrosión.

Ejemplos de pérdidas indirectas:

- a. Paros – de plantas de suministro y manufactura.
- b. Pérdida de producto ocasionada por fugas – fugas en tuberías corroídas.
- c. Contaminación de producto – contaminación de agua por óxido proveniente de tuberías de agua corroídas, deterioro de alimentos ocasionado por corrosión en los contenedores.

(iii) Corrosión y la conservación de los materiales

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

La corrosión destruye metales convirtiéndolos en óxidos u otros productos derivados de la corrosión. Además, la corrosión afecta el suministro global de los metales consumiendo una porción significativa de los recursos materiales de los metales para su uso en refacciones y reemplazos. Con la finalidad de desarrollar una autosuficiencia nacional en los principales metales empleados en la industria, existe un interés continuo y creciente en el desarrollo de nuevos materiales resistentes a la corrosión y a la oxidación, lo cual es un objetivo que atañe a la búsqueda continua en ciencia de los materiales. El estudio de los procesos de corrosión implica el estudio de varias disciplinas tal y como se ejemplifica en la **Figura 1.7**.

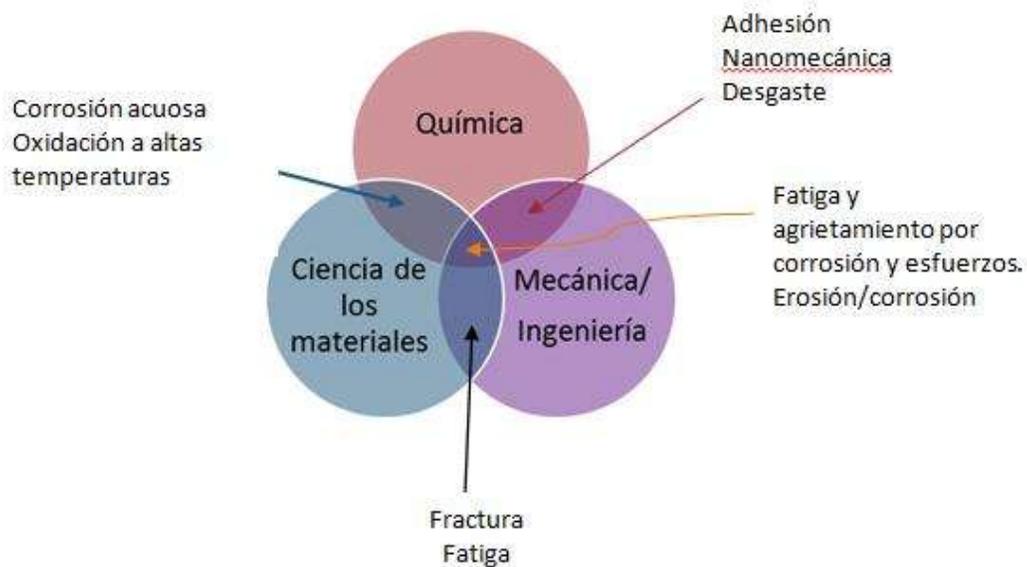


Figura 1.7 Relación esquemática de las disciplinas que intervienen en el estudio de la corrosión.

1.7.1. Retos actuales en el tema de la corrosión [39]

Algunos de los retos y objetivos significativos referentes al tema de la corrosión son los siguientes:

1. Desarrollar nuevos tratamientos de superficies que protejan e inhiban la corrosión y que reemplacen a los cromatos inorgánicos, los cuales afectan al medio ambiente.
2. Desarrollar superficies resistentes a la corrosión con el objetivo de mejorar la conservación de los materiales.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

3. Formular una nueva generación de aceros inoxidables con materiales que sustituyan el cromo y otros metales críticos.
4. Ahondar en la comprensión de la pasividad para permitir el desarrollo de aleaciones metálicas que posean una mejor resistencia a la corrosión.
5. Comprender el mecanismo de descomposición de películas de óxidos pasivos por iones cloro y las picaduras que conlleva el metal subyacente.
6. Desarrollar recubrimientos orgánicos “inteligentes”, que sean capaces de detectar la ruptura en el recubrimiento y dispensar automáticamente una molécula orgánica al lugar requerido e inhibir la corrosión.
7. Comprender y desarrollar la habilidad de predecir el tiempo de vida de los metales y sus componentes de datos experimentales de corto tiempo.

1.8.FATIGA Y CORROSIÓN

El término "fatiga por corrosión" se ha definido como el fenómeno de fractura de un material metálico sometidos a cargas cíclicas (fatiga) en un ambiente agresivo (corrosión) [3]. Este fenómeno ocurre en varias aleaciones ingenieriles en presencia de diferentes entornos, y es la causa del fallo de varias estructuras de ingeniería, como las que se utilizan en plantas químicas, barcos o plataformas marítimas. La fatiga por corrosión también está presente en las calderas, componentes de turbinas y bombas y tuberías que transportan líquidos corrosivos [6].

Los ambientes químicos hostiles pueden acelerar el inicio y el crecimiento de las grietas por fatiga. Uno de los mecanismos es el desarrollo de picaduras de corrosión, que luego actúan como concentradores de esfuerzo. En otros casos, el entorno hace que las grietas crezcan más rápido por reacciones químicas y disolución de material, incluso la humedad y los gases en el aire pueden actuar como un ambiente corrosivo [4]

La iniciación de grietas de fatiga y el crecimiento de las picaduras artificiales de diferentes profundidades se ha estudiado recientemente: para analizar los resultados experimentales se ha desarrollado un modelo de fractura mecánica tridimensional sencillo. El modelo muestra muy buena relación con los experimentos, incluyendo para las pequeñas grietas al describir

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

la iniciación y crecimiento de una grieta de fatiga que surge de una picadura y en la relación de la misma con la reducción de la resistencia a la fatiga. Se ha establecido una relación empírica entre la profundidad de la picadura de corrosión y la vida de fatiga mediante los datos experimentales [15].

Chen y colaboradores mencionan que la nucleación [17] de grietas de fatiga mediante picaduras provocadas por corrosión fue investigado por medio de experimentos de fatiga en muestras con picaduras atravesando el espesor de un aluminio 2024-T3 atacado con una solución 0,5 M NaCl a temperatura ambiente y diferentes frecuencias de carga de 0,1 a 20Hz. Las tensiones máximas aplicadas van desde 144 hasta 288 MPa y la proporción de carga, R, fue de 0,1. Las grietas asociadas a uno o dos de los hoyos más grandes de picaduras, y el tamaño de la picadura es una función del nivel de carga y de la frecuencia de carga. Las picaduras predominan en la etapa temprana de la corrosión proceso de fatiga, y se sustituye por crecimiento de la grieta de fatiga[17].

En un trabajo desarrollado en el marco de la compañía Boeing se investigaron los efectos de la corrosión por picaduras en la vida en fatiga de la aleación de aluminio 7075-T6. La corrosión por picaduras disminuyó la vida de fatiga por un factor de aproximadamente 6 a 8. Las vidas en fatiga también se calcularon asumiendo un defecto inicial equivalente, correspondiente a picaduras de dimensiones porcentuales. Las vidas en fatiga medidas por lo general coincidieron con las predicciones previas, donde se usaba el rango promedio del tamaño de picadura, más representativo que el máximo para el tamaño inicial que tenía la grieta. Este resultado podría explicarse por las distribuciones de tamaño de picadura ofreciendo una población significativamente mayor de picaduras cerca el tamaño medio.[40]

En 2011, un trabajo de Cavalieri [16], muestra una nueva metodología, para el estudio del comportamiento de fatiga a elevada temperatura en un acero austenítico, en el trabajo de Cavalieri la probeta se induce a una cierta temperatura. Algunos otros trabajos muestran el análisis y estudio de la evolución de las grietas en las pruebas de fatiga. [7–9]

De los estudios más recientes realizados a cerca del efecto de la picadura sobre la vida en fatiga de un material, se encuentra uno de A. Shekhter quien realiza un estudio sobre la

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

corrosión por picadura en aeronaves de la fuerza aérea australiana donde presentan la aplicación de un método basado en el tamaño equivalente de la grieta para demostrar los efectos de la corrosión por picadura en la resistencia a la fatiga de 7075-T6 sometido a carga de amplitud variable [43].

Adicionalmente, se han realizado estudios acerca del efecto de una sola picadura, presentando los resultados numéricos de los factores de concentración de esfuerzos para placas perforadas por la corrosión. A partir de 25 placas con perforación por corrosión muestran que las formas típicas pueden caracterizarse como una desviación de una elipse o de un círculo. Con el fin de modelar perforaciones típicas creadas por este tipo de corrosión, agujeros con límites no circulares se han considerado en la forma de forma de coseno y en forma de estrella. Dos casos de carga se investigan: esfuerzos uniaxiales y de corte elástico en un problema de tensión plana. La influencia de la amplitud de la desviación, con respecto a una elipse o un círculo y la curvatura local del límite interno del agujero han sido estudiadas. Un modelo simplificado de una elipse equivalente propuesto originalmente por Nishida se muestra para proporcionar buenas estimaciones de factores de concentración de esfuerzos para una gama de formas inducidos por la corrosión. [44]

1.9.ALUMINIO

El aluminio es el segundo metal que más se produce a nivel mundial después del acero, constituye el 7.5% de la corteza terrestre. Cada 1/12 de trozo de la tierra es alúmina. Descubierta en 1886 por Charles Hall quien desarrolló el proceso de reducción de óxido de aluminio para la obtención del aluminio por electrólisis [45].

Hablamos de un metal suave, de peso ligero. Cuando se combina con materiales como hierro, silicio, zinc, cobre, magnesio, estaño, titanio, litio, cromo, tungsteno, magnesio, níquel, circonio y boro es posible producir aleaciones con propiedades específicas para diferentes propósitos.[45]

El aluminio puede ser muy fuerte, ligero, dúctil y maleable. Es un excelente conductor de calor y la electricidad, cuando está pulido tiene la más alta reflectividad que cualquier material, inclusive que la de un espejo de vidrio. Este puede ser fundido, laminado o extruído

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

en una variedad infinita de formas. Tiene propiedades únicas de barrera como material de empaque, resiste la corrosión y puede ser reciclado una y otra vez sin pérdidas en la calidad o en propiedades.[45]

Las tendencias presentes en la industria del aluminio en el mundo consisten en aplicar este metal en transporte, industria de la construcción, empaques, transporte de energía eléctrica, entre otros, y esta tendencia se incrementa en mayor grado que otros metales.

Cuando es obtenido por electrólisis en baño de criolita posee normalmente una pureza entre un 99.5% y un 99.7%, siendo el hierro y el silicio las impurezas más usuales del aluminio extraído. Para la obtención del metal con pureza superior al 99.9% se somete el metal procedente del baño de criolita a procesos de refinado.

Una de las características más llamativas del aluminio es su versatilidad. La gama de propiedades físicas, químicas y mecánicas que se pueden desarrollar es notable.

1.9.1. Propiedades físicas generales de las aleaciones de aluminio.

Las propiedades físicas más destacables del aluminio puro son su elevada conductividad térmica y eléctrica, y su baja relación peso-volumen. Su densidad es de 2.7 g/cm^3 , aproximadamente, un tercio respecto del acero (7.83 g/cm^3), facilita la construcción de elementos estructurales más ligeros al disminuir la masa total.

Existen dos grupos en que se clasifican las aleaciones de aluminio esta división es: aleaciones de aluminio para forja, que son más del 85%, y las aleaciones de aluminio para fundición. Ambos grupos están registrados por la “Aluminum Association” dentro del estándar de aluminio y su tratamiento en Estados Unidos.

1.9.2. Clasificación de aleaciones de aluminio forjadas.

La ANSI asigna cada aleación trabajada en un número de cuatro dígitos. El primero de ellos se refiere al principal elemento de aleación. Basados en esto existen los siguientes grupos de

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

aleaciones: serie 1xxx aluminio sin alear (con un 99% mínimo de pureza), serie 2xxx con cobre como elemento principal de aleación, serie 3xxx con magnesio, serie 4xxx con silicio, serie 5xxx con magnesio, serie 6xxx con magnesio y silicio, serie 7xxx con zinc y en algunos casos magnesio, serie 8xxx para otros elementos y serie 9xxx para aleaciones inusuales.

El tercer y cuarto dígito son significativos en la serie 1xxx, pero no en otras aleaciones. En las aleaciones 1xxx, la pureza mínima del aluminio se muestra por esos dígitos, por ejemplo, la 1150 significa una pureza del aluminio del 99.50%. En las series del 2xxx al 8xxx, el tercer y cuarto representan el número consecutivo de la aleación, por ejemplo, las aleaciones 6060 y 6061 son diferentes entre sí. El segundo dígito en la designación indica la modificación en la aleación, si es cero significa que es una aleación original, si es entre el 1 y el 9 indica modificaciones menores a la primera

Tabla 1.1. Relación de propiedades físicas, más relevantes del aluminio puro.

PROPIEDAD CARACTERÍSTICA	VALOR
Color Blanco	
Estructura Cristalográfica	FCC
Parámetro Reticular (20 °C)	0.40414 nm
Densidad (20 °C)	2,699 g/cm ³
Cambio Volumétrico durante la Solidificación	6.70%
Punto de Fusión	660.2 °C
Punto de Ebullición	2057 - 2480 °C
Calor Específico	930J
Coefficiente Lineal de Expansión Térmico	(106) 23 °C (20 - 100 °C)
Conductividad Eléctrica (Valor máx.)	34 -38 m/(Ω.mm ²)
Conductividad Térmica	80 - 230 W/ (m .K)

1.9.3. Clasificación de aleaciones de aluminio para fundición.

La ANSI emplea cuatro números para las aleaciones vaciadas, pero incorpora un punto decimal antes del último para marcar la diferencia del vaciado ya sea directo o en lingote. El primer dígito indica el grupo de la aleación. Para las series del 2xx.x al 9xx.x, el grupo de aleación es determinado por el elemento de aleación presente en mayor porcentaje.

El grupo 1xx.x pertenece al aluminio sin alear, en la serie 2xx.x el cobre es el elemento de mayor aleación, en la serie 3xx.x es el silicio con cobre o magnesio, en la 4xx.x es el silicio, en la 5xx.x es el magnesio, la 6xx.x no se usa, en la serie 7xx.x es el zinc, en la 8xx.x el titanio y la 9xx.x otros elementos.

El segundo y tercer dígito indica en la serie 1xx.x el porcentaje mínimo de pureza que excede al 99%, en las series de la 2xx.x a la 9xx.x no tienen especial significado sirviendo únicamente para identificar diferentes aleaciones en el grupo. El último dígito que está a la derecha del punto decimal se refiere a la forma del producto, xxx.O indica que fue directamente vaciada en el molde y ía xxx.1 que lo fue en lingote. Si la aleación fue modificada o tiene ciertas impurezas se indica con un serial de letras procediendo a la designación de la aleación.

La designación de las letras se hace en secuencia alfabética omitiendo las letras I, O, Q y X. La letra X se reserva para aleaciones experimentales.

MATERIALES

Y

EQUIPOS

2. MATERIALES

2.1. ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T6

La aleación de aluminio 7075 T6, que es objeto de estudio en este trabajo de doctorado, fue elegida por ser una de las aleaciones utilizadas para aplicaciones industriales, aeronáuticas y aeroespaciales.[6,13–16] tiene una alta resistencia a la corrosión y tiene una relación de bajo peso alta resistencia a la tracción, en comparación con otros aluminios.

La muestran la composición química y principales propiedades mecánicas del aluminio, respectivamente

Tabla 2.1. Composición química de la aleación 7075-T6

Composición química	[%]
Mg	2.77
Cu	1.87
Zn	6.91
Al	85.66
Cr	0.2
Fe	0.40

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas y físicas de la aleación de aluminio 7075-T6 [50]

PROPIEDAD	
Densidad [Kg/m ³]	2800
Dureza, Brinell	87
σ_y [MPa]	503
σ_u [MPa]	570

2.2. RECURSOS MATERIALES

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

2.2.1. Equipo para medición de esfuerzos residuales

Las tensiones residuales después del mecanizado se midieron utilizando el equipo Pulstec μ -X360 **Figura 2.1** en dirección longitudinal con estructura cristalográfica de aluminio 311, las tensiones residuales se midieron en dirección longitudinal y transversal antes y después del electro pulido, solo una muestra se electro pulió, los valores obtenidos se tomaron para todo el resto de las muestras suponiendo que los valores son los mismos en todas las muestras.



Figura 2.1 Dispositivo Pulstec μ -X360 para medir esfuerzos residuales [51]

2.2.2. Medidores de rugosidad

La rugosidad también se midió en todas las muestras, las mediciones se obtuvieron en dirección longitudinal y transversal con dos equipos con un TESA Rugosurf 10 G, en el caso de estas mediciones, el promedio de los valores es muy similares entre sí, equipo utilizado en la Universidad de Maribor. Y un equipo Mitutoyo SJ-210 en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. **Figura 2.2**



Figura 2.2 Medidores de rugosidad TESA y Mitutoyo respectivamente

2.2.3. Máquina de fatiga convencional

Las prueba de fatiga de ciclo bajo se realizaron bajo carga controlada, en una máquina de prueba servo-hidráulica, a temperatura ambiente, en donde se puede controlar la frecuencia de 0.5 a 20 Hz, el sistema completo de la máquina se desarrolló en nuestro laboratorio en la Universidad de Maribor, Facultad de Ingeniería Mecánica desde la fabricación de las partes hasta que todo el sistema de control **Figura 2.3** y **Figura 2.5**, para la prueba, la máquina se configuró para trabajar a 20 Hz, la decisión de trabajar a esa frecuencia se debió a la cantidad de ciclos que se quería alcanzar y también a reducir el tiempo de prueba.

Generalidades de la máquina servohidráulica de fatiga

La línea de prueba fue fabricada con materiales de alta calidad y adaptada para el sistema de cilindro hidráulicos y mesa que fueron fabricados previamente. El diseño original de línea de prueba se hizo en SolidWorks (2018), se presenta en la **Figura 2.3**. La máquina fue adaptada para experimentos de pruebas dinámicas donde se controla la fuerza, la amplitud y frecuencia de la fuerza son controlados. La línea de prueba fue dimensionada con respecto a las fuerzas de tensión. La máquina puede realizar pruebas uniaxiales de tensión estáticas y dinámicas. Si la máquina fuera probada en compresión, las superficies de contacto pueden dañarse o partes individuales pueden romperse. La fuerza máxima de tracción de la máquina es de 40 kN.

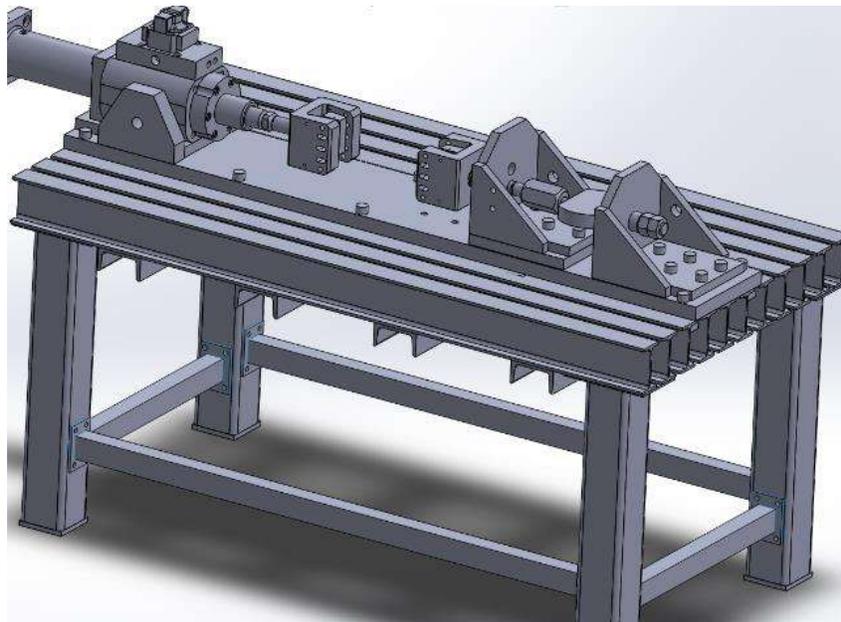


Figura 2.3 Diseño original de la línea de prueba en SolidWorks

Sobre la mesa hay una placa de acero unida a los perfiles I. En la placa de acero se encuentra atornillada la línea de prueba. En un lado de la línea de prueba hay un cilindro hidráulico, con agarre de cuña (**Figura 2.4**) adjunto a ella. En el otro lado de la línea de prueba hay otro agarre de cuña, uno de los soportes soldados. La distancia entre los agarres de cuña se puede ajustar mediante el posicionamiento del cilindro hidráulico o atornillando soportes soldados en otra posición de la placa de acero. El sistema de agarre de cuña es autoajutable.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

La mordaza de cuña tiene cuerpo móvil y mordazas estacionarias. La superficie de la cara de la mandíbula que sostiene la muestra es acanalada. Los orificios a través del cuerpo de agarre de cuña y las mordazas se hicieron para centrar la muestra con pernos, al tiempo que evita la apertura de las mandíbulas y aumenta la rigidez. La apertura de las mandíbulas también se evita colocando un resorte en el costado de las mandíbulas. y la parte interna del cuerpo de agarre de cuña, lo que permite que el ancho de la mandíbula aumente cuando dimensionamiento La muestra es fácil de configurar para la prueba. Cuando la muestra se coloca en el agarre de cuña, mientras aumenta la fuerza de prueba, también aumenta la fuerza de agarre. El cuerpo y las mandíbulas de la empuñadura de cuña está hecha de herramienta 1 15CrV3 (DIN). El cuerpo de la rotura del borde es templado en 850 ± 20 MPa. Las mordazas de la empuñadura de cuña se enfrían en 52 ± 2 HRC.

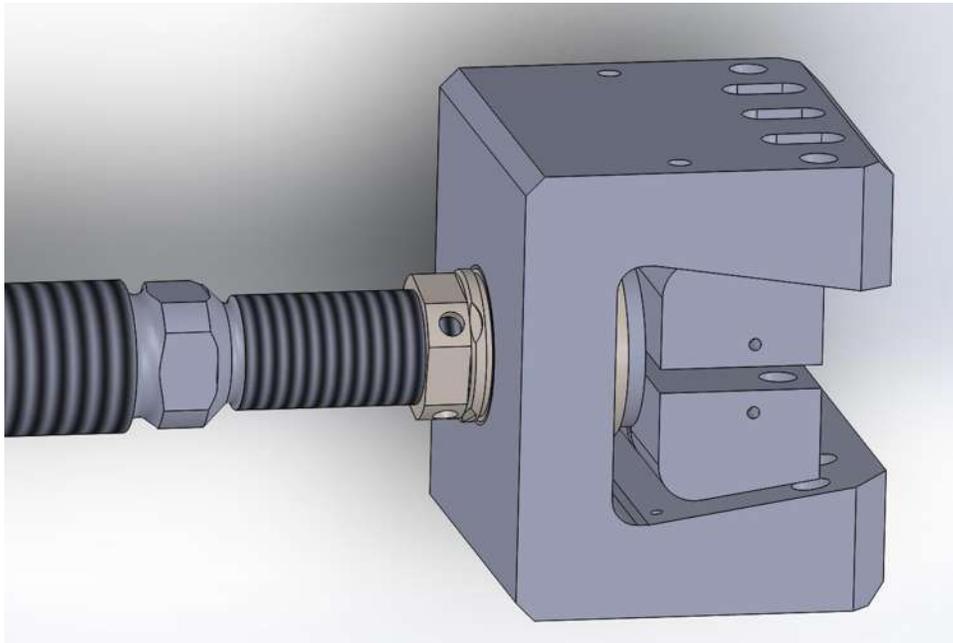


Figura 2.4 Mordazas de cuña

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES



Figura 2.5 Vista lateral de la máquina Servo-hidráulica de fatiga

El sistema de control se basa en el PLC blando de cuatro núcleos Beckhoff CX5140 que ejecuta el programa PLC desarrollado a ciclos de 0.1 ms. El CX5140 también ejecuta la aplicación HMI desarrollado en Windows C # en paralelo. El control se ejecuta en Windows 7 Embedded y se usa para configurar la prueba y hacer las grabaciones durante la prueba.

El panel de control permite al usuario configurar las principales propiedades de la prueba, tales como: frecuencia de prueba (Hz), fuerza (N), amplitud de fuerza (N) y número de ciclos. El usuario también puede configurar los parámetros del controlador de circuito cerrado PID y parámetros de grabación automática periódica. **Figura 2.5**

2.2.4. Máquina de fatiga ultrasónica

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 μ 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, **Figura 2.6**.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

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.

Todas las pruebas de fatiga ultrasónica se llevaron a cabo con una máquina patentada, desarrollada en nuestro laboratorio (número de patente: 323948, Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, 2014), que está totalmente controlada por un programa LabVIEW desarrollado, que permite el inicio de la prueba, el registro de número de ciclos en tiempo real y la parada automática cuando la muestra falla [49] **Figura 2.6.**



Figura 2.6 Piezoeléctrico y multiplicador de desplazamiento.

La calibración de la muestra de prueba en el extremo libre fue implementada por un sensor de proximidad inductivo que tiene una resolución de $\pm 2 \mu\text{m}$, trabajando a 1.5KHz. Todas las pruebas se llevaron a cabo a temperatura ambiente (cerca de 25°C), con humedad ambiental entre 35 y 45% y relación de carga inversa completa $R = -1$.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

La secuencia para la prueba de fatiga ultrasónica ha sido la siguiente: estabilización del sistema durante 30 segundos con una carga aplicada de 44 MPa (correspondiente al voltaje más bajo del generador ultrasónico: 10 voltios); luego, aumentando 4.4 MPa cada segundo para alcanzar la carga nominal aplicada.

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, **Figura 2.7**.

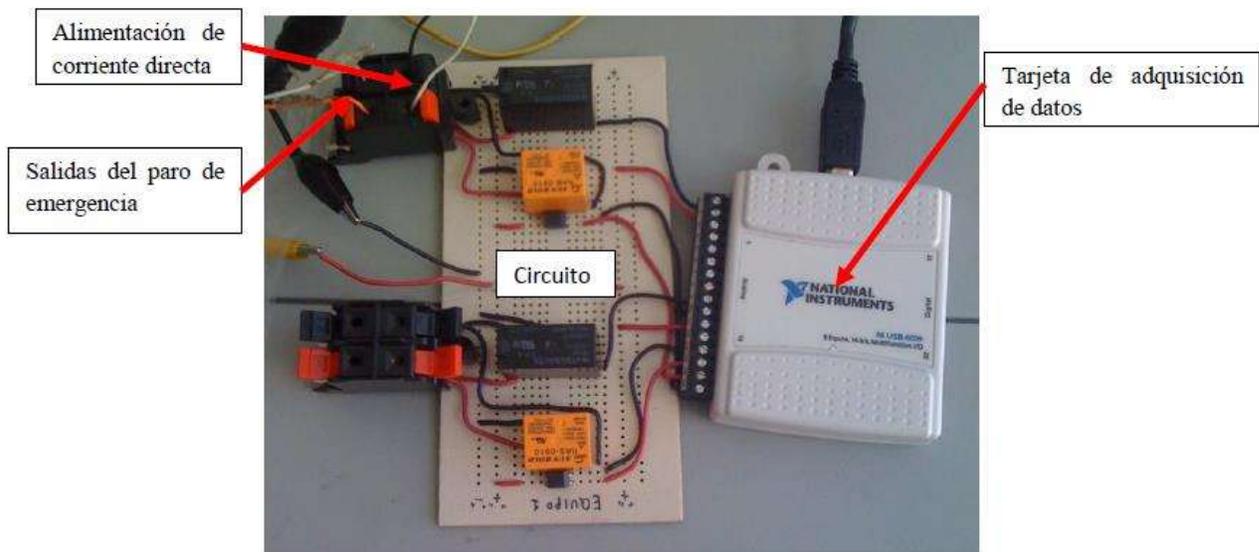


Figura 2.7 Circuito y tarjeta para adquisición de datos provenientes del generador de alta frecuencia.

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 **Figura 2.8**, la cual permite el conteo en tiempo real del tiempo transcurrido del ensayo, así como el paro automático cuando la probeta falla.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES



Figura 2.8 Aplicación desarrollada para el programa de cómputo 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.

2.2.5. 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 **Figura 2.9**. 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.



Figura 2.9 Sensor inductivo de proximidad

2.2.6. Microscopios.

Para la observación de los materiales, tanto antes como después de ser sometidos a fatiga, se utilizaron diferentes equipos, dos diferentes microscopios de barrido electrónicos, un Jeol JCM-6000 PLUS, que se encuentra en la Universidad Michoacana y un Hitachi que se encuentra en la universidad de Maribor, así como se tuvo acceso al microscopio de la universidad de Graz, Austria, que es un microscopio óptico, de la marca Keyence VH-Z100R que genera imágenes en 3D de las superficies de las probetas y mide rugosidad en algunas áreas, los resultados obtenidos de los equipos se detallarán en el capítulo de resultados **Figura 2.10.**

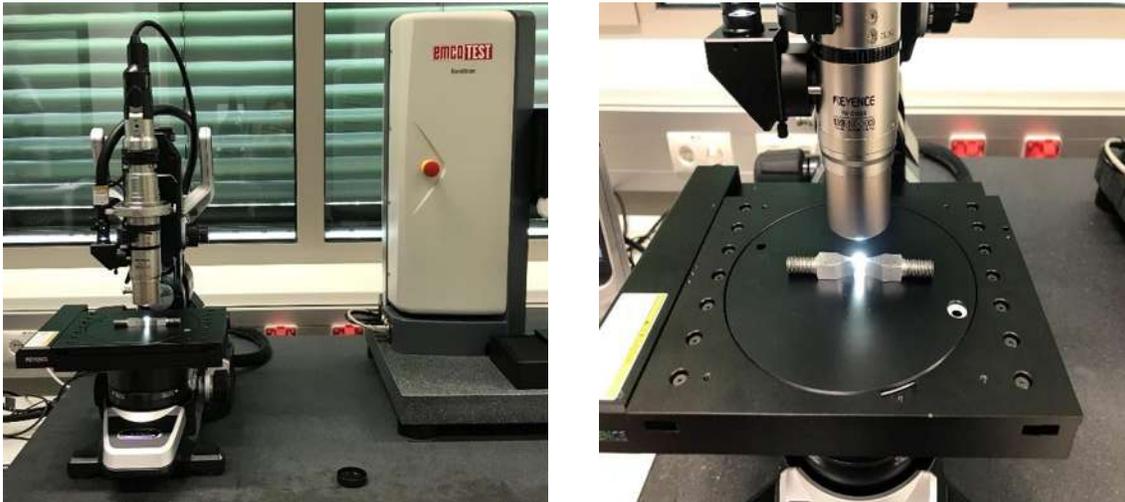


Figura 2.10 Microscopio óptico, de la marca Keyence

SIMULACIÓN NUMÉRICA

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA

3.1. SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA OBTENER EL PERFÍL DE LA PROBETA DE ALUMINIO 7075-T6

En este trabajo se utilizaron tres diferentes probetas, probetas A que son especímenes de material base y probetas con dos picaduras artificiales y hemisféricas separadas 500 mm en esta categoría, hay dos conjuntos B, que son especímenes con dos picaduras orientadas transversalmente a la carga (**Figura 3.1 a**) y especímenes C, que tienen dos picaduras orientadas longitudinalmente a la carga (**Figura 3.1 b**).

Las probetas utilizadas en los ensayos de fatiga ultrasónica deben cumplir con el perfil que sea capaz de entrar en la condición de resonancia, debido a ello, las probetas que serían probadas en fatiga convencional fueron adaptadas al perfil obtenido para fatiga ultrasónica, bajo los tres modelos de probetas descritas en el párrafo anterior, las probetas para ensayos en fatiga ultrasónica y para fatiga convencional se muestran en las **Figuras 3.2** y

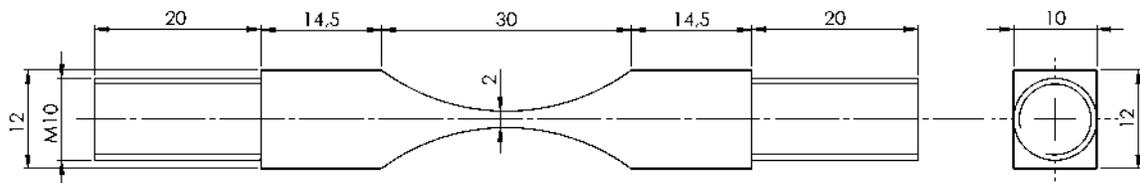


Figura 3.3 donde es posible apreciar las diferencias entre probetas para fatiga ultrasónica y probetas para fatiga convencional, estas últimas cuentan con roscas en los muñones para sujeción y una reducción de la parte estrecha, de 4 a 2 mm.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

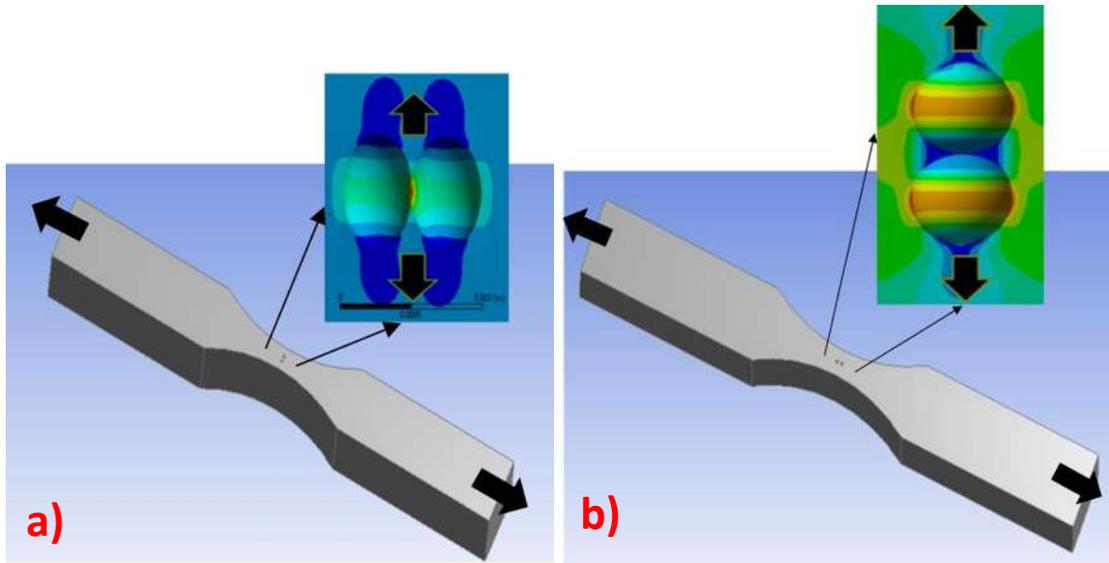


Figura 3.1 a) Probetas A. Picaduras Transversales b) Picaduras B. Picaduras Longitudinales

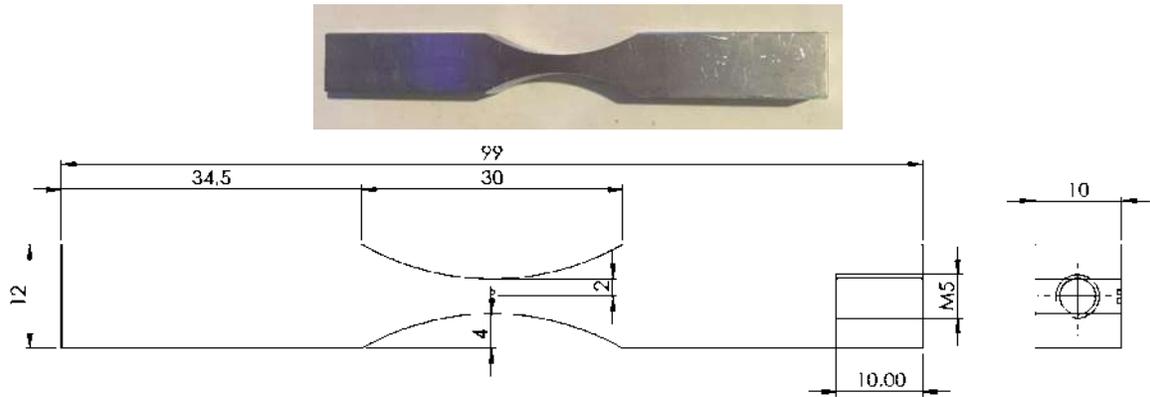


Figura 3.2 Probeta para fatiga ultrasónica con las dimensiones que cumplen con la condición de resonancia

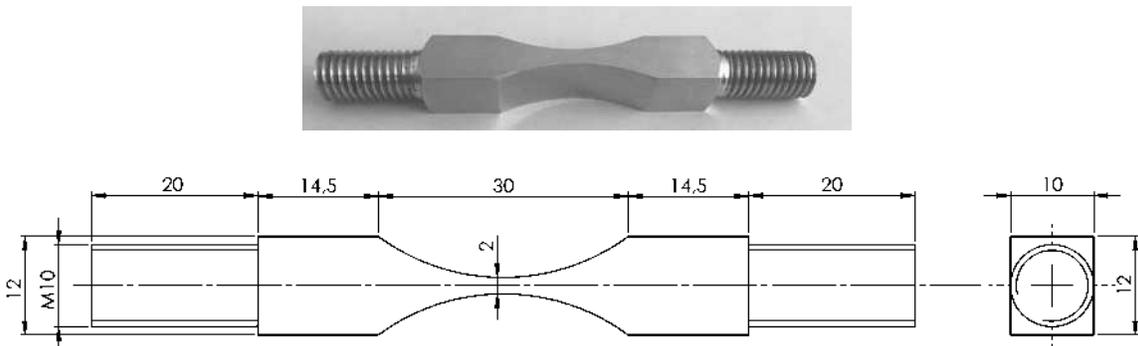


Figura 3.3 Dimensiones de probeta para fatiga convencional

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

Podemos observar la diferencia de geometrías de las probetas utilizadas para fatiga convencional y fatiga ultrasónica, la probeta que se diseñó primero fue la correspondiente a ensayos de fatiga ultrasónica, pues el requerimiento específico de masa para que entre en resonancia con la máquina, genera que el diseño sea muy particular y no se puede adaptar, en cambio, para las pruebas de fatiga convencional es posible adaptar las probetas a la máquina que se estará utilizando para dichas pruebas.

El concentrador de esfuerzo se obtuvo mediante dos métodos diferentes el de Peterson, y mediante simulación numérica en Ansys, el esfuerzo utilizado, utilizando el valor de Von Mises Stress, de la simulación, y el valor nominal del esfuerzo, el valor de la concentración de esfuerzo resulta igual en ambos análisis $K_t = 1.037$.

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 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® 16, 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.

Cuatro medidas se toman en cuenta para poder obtener el perfil óptimo con este material.

1. Propiedades mecánicas y físicas del material, que serán necesarias para el cálculo de las dimensiones por el método de elemento finito.
2. Nivel de carga a utilizar en el material. Se han utilizado niveles de carga aproximadamente del 50% de su límite elástico. (Desde las simulaciones de los concentradores de esfuerzo).

3. 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.
4. Que el perfil de la probeta sea de geometría simple para el proceso de maquinada.

3.1.1. Propiedades necesarias de la AA7075-T6

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. Las propiedades del material utilizado en estas simulaciones fueron previamente seleccionadas de la bibliografía (Aluminio 7075-T6); su composición química en peso, así como sus principales propiedades se muestran en las **Tabla 3.1** y **Tabla 3.2**. **Tabla 3.1.** Composición química en peso de la aleación de Aluminio 7075-T6, respectivamente.

Tabla 3.1. Composición química en peso de la aleación de Aluminio 7075-T6

Zn	Mg	Cu	Cr	Fe	Al
6.9	2.7	1.87	0.2	0.4	Balance
Max.	Max.	Max.	Max.	Max.	

Tabla 3.2 Principales propiedades mecánicas para el Aluminio 7075-T6

PRINCIPALES PROPIEDADES MECÁNICA					
Densidad	Dureza	σ_y	σ_u	Poisson	Módulo de Elasticidad
[Kg/m ³]	[Brinell]	[MPa]	[MPa]	Ratio	[GPa]
2800	87	505	570	0.33	72

3.1.2. Secuencia del proceso de simulación.

Se pueden obtener las dimensiones para la probeta para ensayos de fatiga ultrasónica partiendo de dimensiones propuestas en otros trabajos (Yoshiyuki Furuya, Gigacycle fatigue properties of Ti-6Al-4V alloy under tensile, 2014) (Rayan J. Morrissey, 2005) (Q.Y, 1998),

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

llevando a cabo los análisis de simulación numérica modal mediante el software ANSYS 16® 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 300Hz de tolerancia para que la máquina funcione correctamente). con el fin de obtener la frecuencia requerida para la máquina de ensayos de fatiga ultrasónica utilizada.

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. **Figura 3.4**, Se elige, en el apartado de referencias, el tipo de análisis que realizaremos (Static Structural). En este caso se trata de un análisis estructural pues primero se requiere realizar un plano de la probeta.

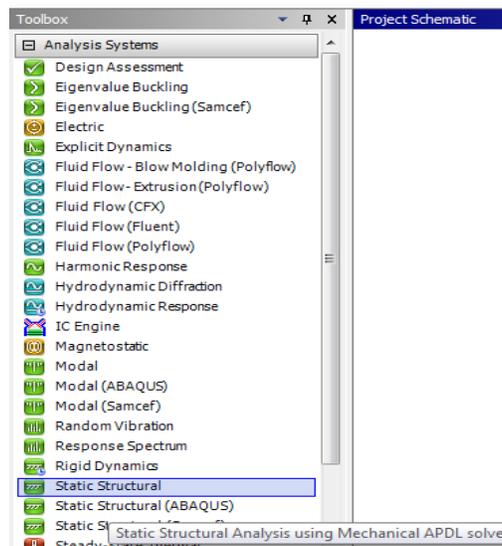


Figura 3.4 Entorno principal de ANSYS Workbench

b) En la ventana de preferencias se ajustan las propiedades del material a utilizar (Propiedades de la tabla 1 y 2) como se muestra **Figura 3.5**.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

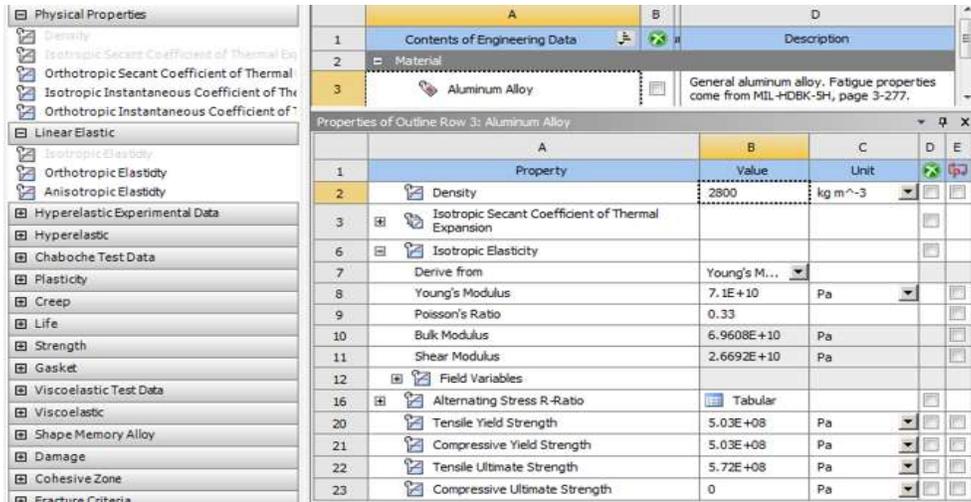


Figura 3.5 Ventana de preferencias.

c) Se dibuja el modelo en el apartado de Geometry/DesignModeler Figura 3.6

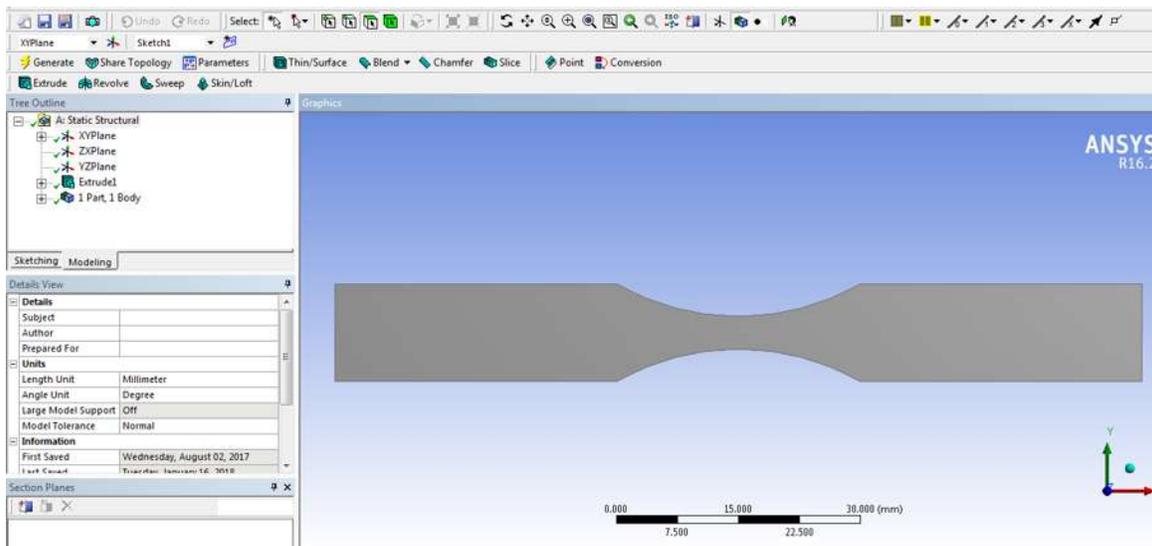


Figura 3.6 Selección del elemento de mallado

d) A continuación se agrega el módulo de “modal” en el entorno principal de ANSYS, y se vincula el modelo la geometría previamente dibujada vinculando las dos ventanas Figura 3.7.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

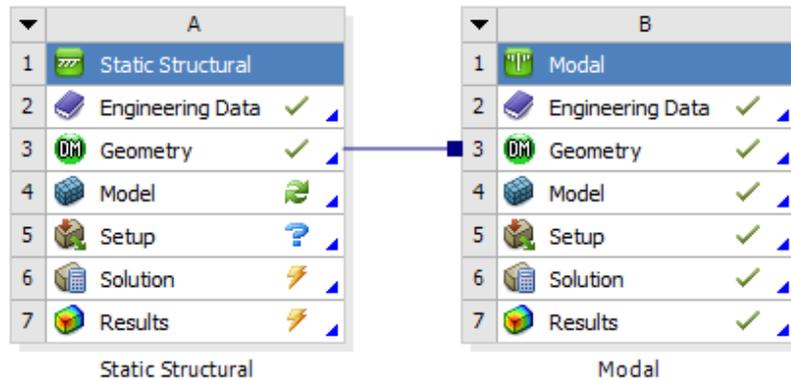


Figura 3.7 Vinculando el módulo Static Structural y Modal y exportando la geometría del modelo 3D

e) Dentro del apartado “Model” se mallar el modelo, para este caso y debido a las simulaciones presentadas anteriormente, se escoge el elemento hexaédrico **Figura 3.8**

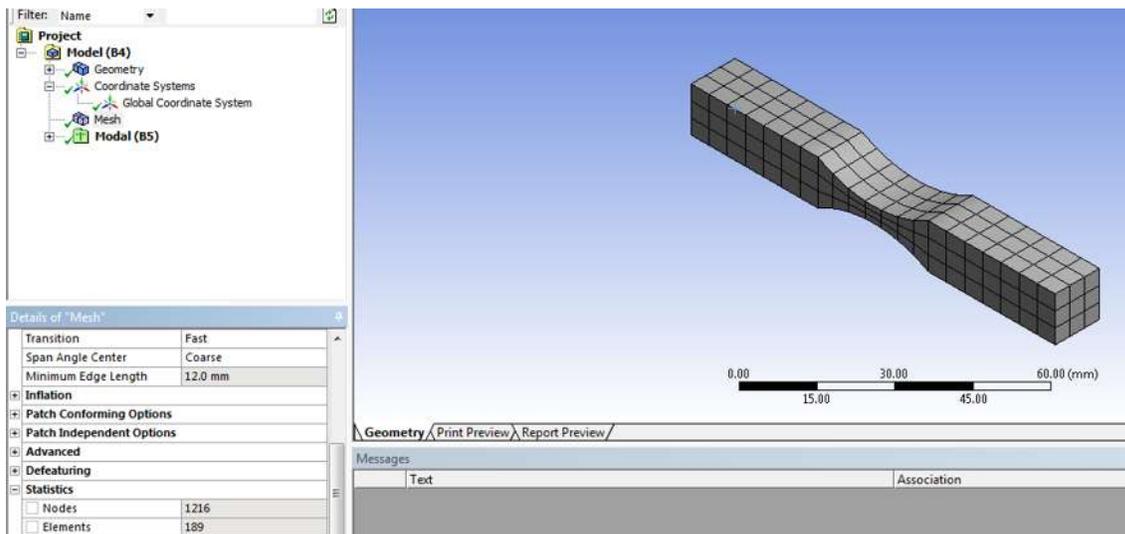


Figura 3.8 Entorno “Mechanical”. Una vez mallado el modelo

f) Como parte final del procedimiento se obtiene la solución para las frecuencias naturales de oscilación, estableciendo una solución tipo modal. Adicionalmente se selecciona el método de extracción de los modos de vibración y un número posible de soluciones (30 en este caso). **Figura 3.9**

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

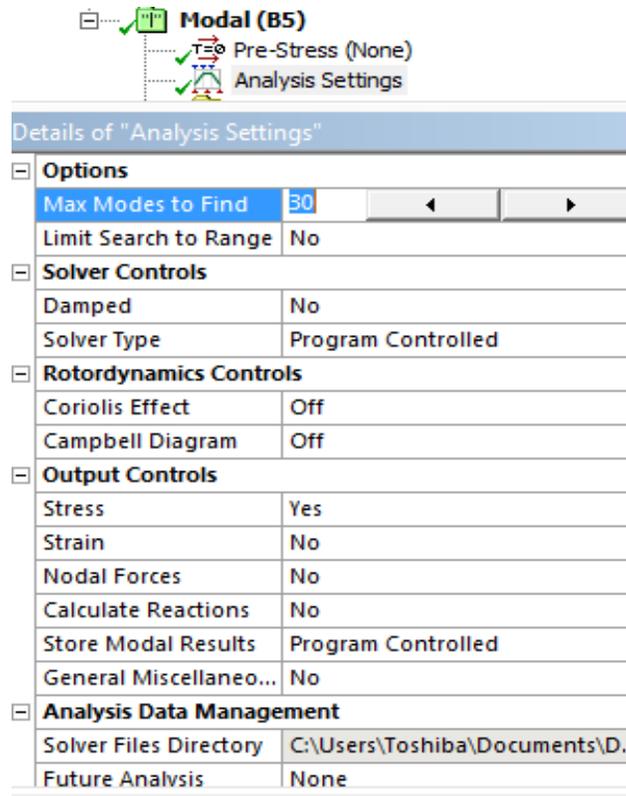


Figura 3.9 Ventana de selección para extraer los modos de vibración

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 caso de que la frecuencia no cumpla con la deseada, 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.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

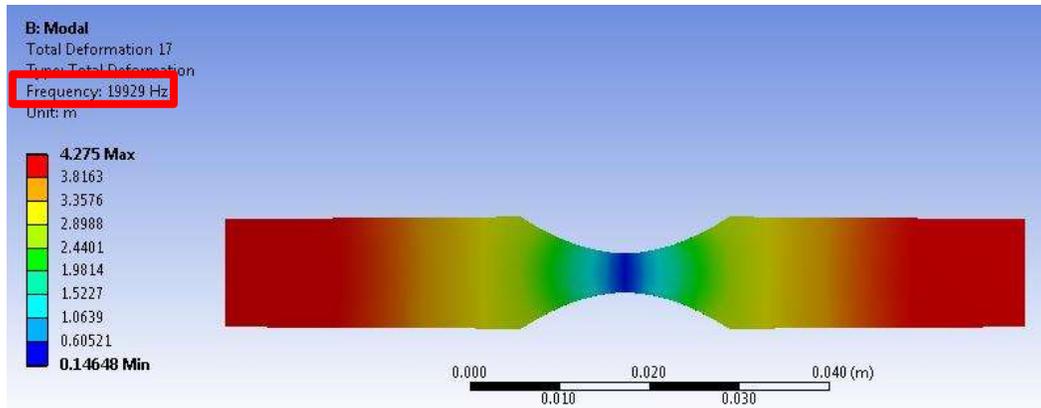
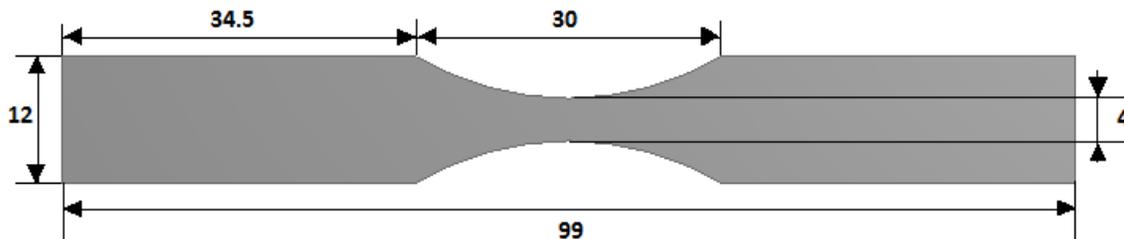


Figura 3.10 Resultado de análisis modal que cumple con la frecuencia requerida

Se llevaron a cabo quince simulaciones de las diferentes geometrías 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 esta aleación de aluminio que cumplen con la frecuencia de 19928 Hz (Figura 3.10), que es muy cercana al valor de vibración de la máquina (20KHz), es con este perfil y dimensiones se llevarán a cabo los ensayos en fatiga ultrasónica.



ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

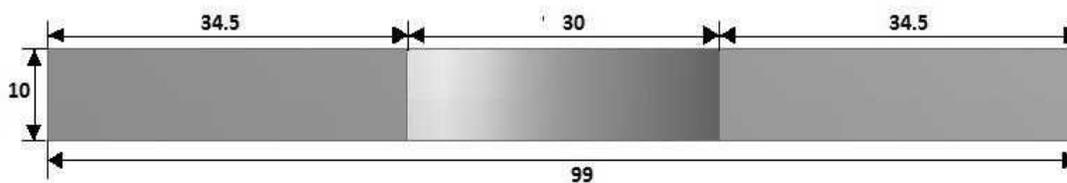


Figura 3.11 Dimensiones de la probeta de la aleación de aluminio cumpliendo con la condición de resonancia

Como es posible observar, la frecuencia natural es de 19928 Hz, que es cercana a la frecuencia de la fuente excitadora de 20 KHz. Teniendo un margen de ± 300 Hz para mantener la máquina ultrasónica en funcionamiento se han retenido estas dimensiones y perfil para los ensayos en fatiga ultrasónica. (**Figura 3.11**)

3.2. ANÁLISIS POR SIMULACIÓN NUMÉRICA DE PICADURAS. [52]

El cálculo mediante elemento finito proporciona una técnica para obtener soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales, en este caso se utilizó para obtener un cálculo previo a los ensayos experimentales sobre el efecto de determinadas picaduras en una placa de aluminio 7075-T6.

Las probetas fueron placas de 100 mm^2 [43] (**Figura 3.12a**) presentando tres diferentes espesores 3 [43], 1.6 [17] y 0.7 mm, como se muestran en las **Figura 3.12b**. Este estudio fue llevado a cabo empleando un programa de elemento finito (ANSYS®). Los modelos, fueron mallados usando elementos hexaédricos con tres grados de libertad en cada nodo, los nodos están gobernados por las ecuaciones 1 a 8, donde N representa las funciones nodales y s, u, and t, las coordenadas no ortogonales en el espacio. El número total de elementos es de entre 1,000,000 a 1,500,000, número que incrementa conforme el espesor del modelo incrementa. Un análisis de convergencia de malla tuvo que ser realizado para cada modelo, **Figura 3.14**, donde el eje vertical representa el esfuerzo máximo para dos picaduras separadas 510 mm entre centros, con una carga uniaxial aplicada de 250 MPa en la dirección transversal con respecto al eje de las picaduras. Se observa que el modelo de menor espesor converge más rápido que para los modelos de 1.6 y 3 mm de espesor, la convergencia de la malla se muestra adecuada a partir de los tres millones de elementos. Adicionalmente, se realizó un análisis de convergencia de malla para diferentes tipos de elementos para seleccionar el elemento más

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

conveniente para cada modelo, los resultados se ilustran en la **Figura 3.15**. De acuerdo con los resultados obtenidos en la gráfica anterior el elemento seleccionado para todas las siguientes simulaciones es el hexaedro dominante, que presenta una menor dispersión en los resultados. (**Figura 3.13**)

Con el fin de obtener información del comportamiento de las picaduras en el modelo, fue necesario realizar un refinamiento de malla alrededor de las picaduras como se muestra en la **Figura 3.16**.

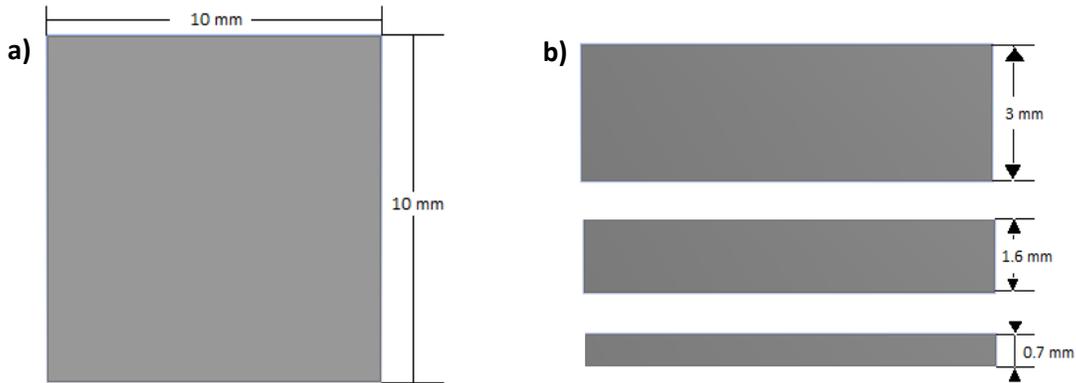


Figura 3.12 a) Dimensiones de la Probeta b) Espesores usados en las probetas.

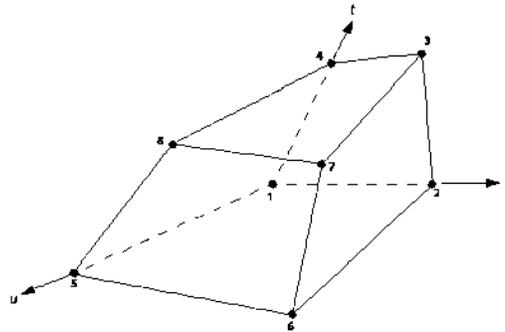


Figura 3.13 Elemento Hexaédrico

$$N_1(s, t, u) = (1 - s)(1 - t)(1 - u) \quad (1)$$

$$N_2(s, t, u) = s(1 - t)(1 - u) \quad (2)$$

$$N_3(s, t, u) = s t(1 - u) \quad (3)$$

$$N_4(s, t, u) = (1 - s)t(1 - u) \quad (4)$$

$$N_5(s, t, u) = (1 - s)(1 - t) u \quad (5)$$

$$N_6(s, t, u) = s(1 - t) u \quad (6)$$

$$N_7(s, t, u) = s t u \quad (7)$$

$$N_8(s, t, u) = (1 - s) t u \quad (8)$$

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

Convergencia de malla para un modelo con dos picaduras separadas 510 μm en tres espesores diferentes

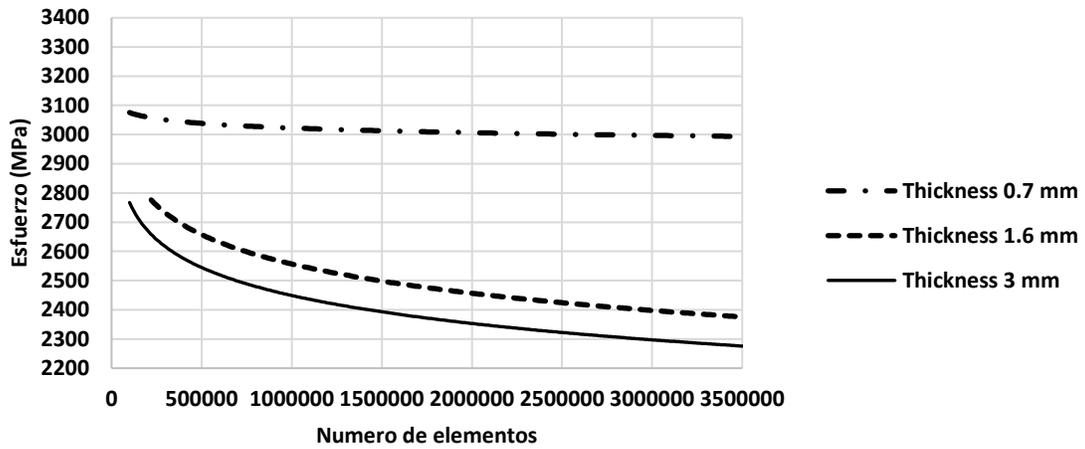


Figura 3.14 Análisis de convergencia de malla para cada espesor de placa

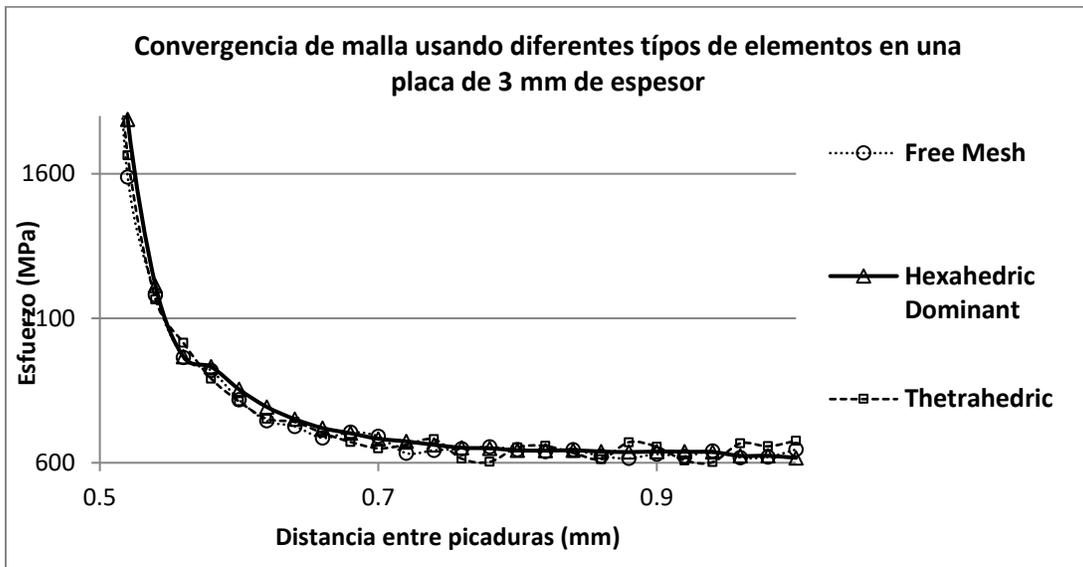


Figura 3.15 Convergencia de malla para una probeta de 3 mm de espesor, usando diferentes tipos de elemento, variando la separación de dos picaduras semi esféricas.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

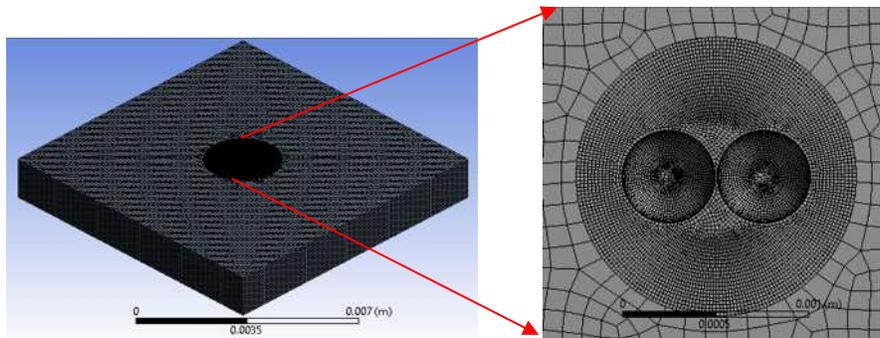


Figura 3.16 Probeta rectangular y refinamiento de malla alrededor de las picaduras

3.3. GEOMETRÍA DE LAS PICADURAS Y CONDICIONES DE LA CARGA.

Se realizaron inicialmente simulaciones para analizar dos perfiles diferentes de picadura: hemisférico **Figura 3.17** Perfil de **picadura semiesférica** **Figura 3.18** Perfil de picadura cilíndrica. El efecto de una picadura en la concentración de esfuerzos fue comparado entre ambas geometrías mencionadas, con carga uniaxial. El diámetro de la picadura se mantuvo constante para todas las simulaciones, para todos los casos el diámetro se consideró $d=500\ \mu\text{m}$ (**Figura 3.17** Perfil de **picadura** semiesférica **Figura 3.18** Perfil de picadura cilíndrica) [53]. Ambos perfiles de picadura muestran resultados similares en término de la concentración de esfuerzo cuando una sola picadura penetra a través del espesor de la placa, la comparación entre la Figura 3.17 (Picadura con perfil cilíndrico), y la Figura 3.18 (picadura con perfil semiesférico). En las figuras **Figura 3.19** y **Figura 3.20** se observa claramente una tendencia: Mientras la picadura penetra en el espesor de placa, la concentración de esfuerzo incrementa también, hasta que se observa una tendencia asintótica, particularmente se observa en la placa con mayor espesor. Inicialmente la profundidad de la picadura para las simulaciones de las **Figura 3.19** y **Figura 3.20** fue de 0.25, se observa que el concentrador de esfuerzo es un poco más alto (alrededor de 25 MPa) para el caso del perfil cilíndrico comparado con el perfil semiesférico para los tres espesores de placa diferentes.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

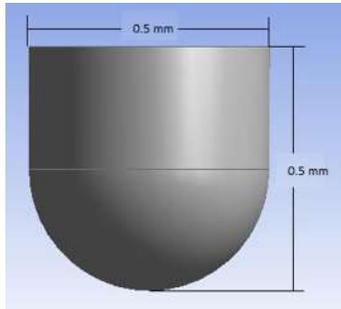


Figura 3.17 Perfil de picadura semiesférica

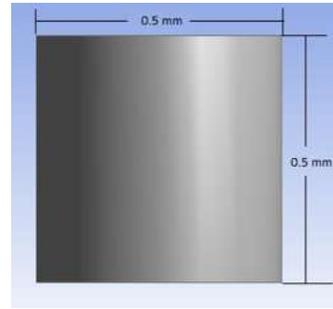


Figura 3.18 Perfil de picadura cilíndrica

Esfuerzo inducido por la penetración de una picadura con perfil cilíndrico

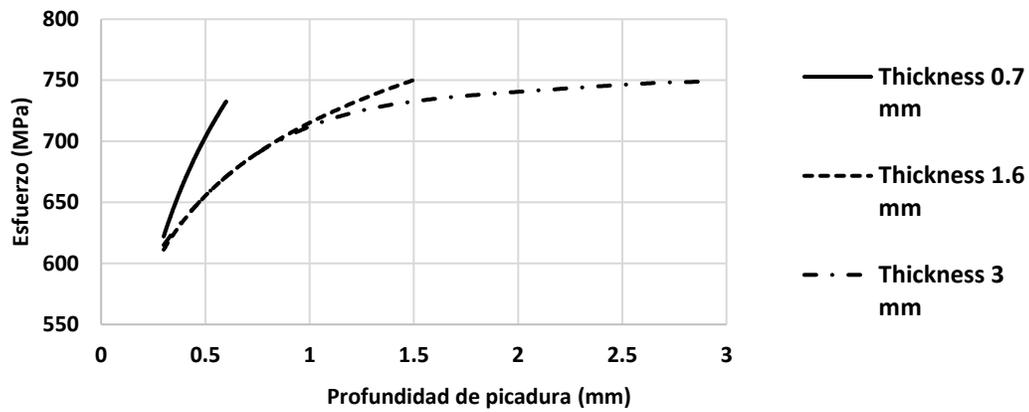


Figura 3.19 Esfuerzo inducido por una picadura con perfil cilíndrico, para diferentes espesores de placa y diferentes profundidades de penetración de picadura.

Esfuerzo inducido por la penetración de una picadura con perfil semiesférico

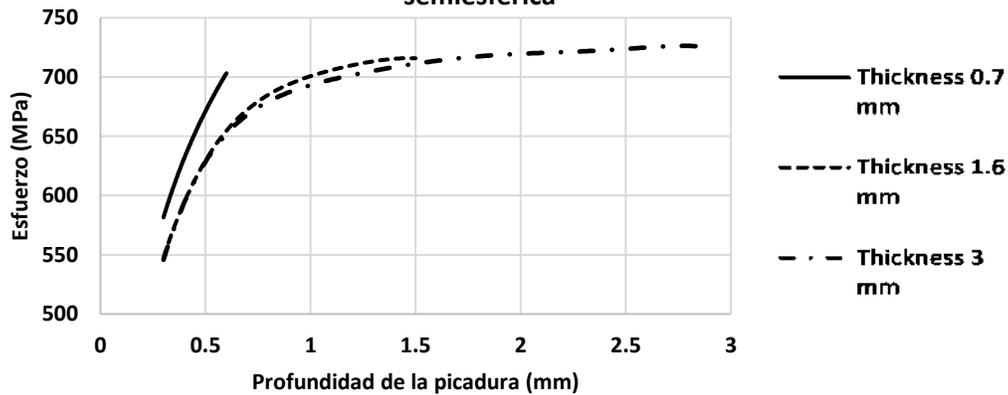


Figura 3.20 Esfuerzo inducido por una picadura con perfil semiesférico para diferentes espesores de placa y diferentes profundidades de penetración de picadura.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

Desde el punto de vista de aplicación de carga en los modelos de placas cuadradas, se tomaron dos arreglos, carga uniaxial y biaxial dichos arreglos de aplicación de carga se observa en la **Figura 3.21**, con una carga nominal constante de 250 MPa.

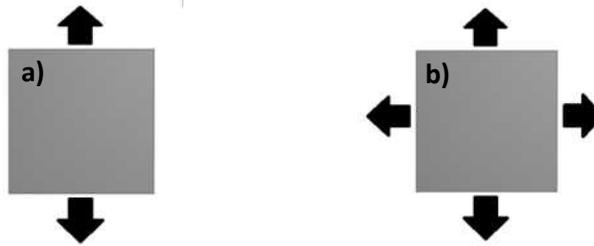


Figura 3.21 Carga aplicada: a) Uniaxial, b) Biaxial.

Durante todas las simulaciones numéricas, se considera temperatura ambiente y no se considera efecto de la humedad del ambiente.

RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DE SIMULACIÓN NUMERICA

4.1.1. Resultados de simulación numérica con carga uniaxial

Una serie de simulaciones numéricas se realizaron con el fin de analizar el efecto del concentrador de esfuerzo con respecto a la proximidad de dos picaduras de igual tamaño en placas con espesores diferentes, se analizaron diferentes separaciones entre centros de picadura las propiedades geométricas de las picaduras, así como la orientación e las mismas se muestran en la **Figura 4.1**. Los resultados obtenidos de las simulaciones se realizaron aplicando las mismas condiciones de carga utilizadas en las simulaciones con una sola picadura: carga nominal de 250 MPa, aplicada en los ejes opuestos de la placa. Sin embargo, se consideraron dos arreglos diferentes para la carga aplicada carga transversal y carga longitudinal a la orientación de las picaduras como indican las flechas que se muestran en la **Figura 4.2**.

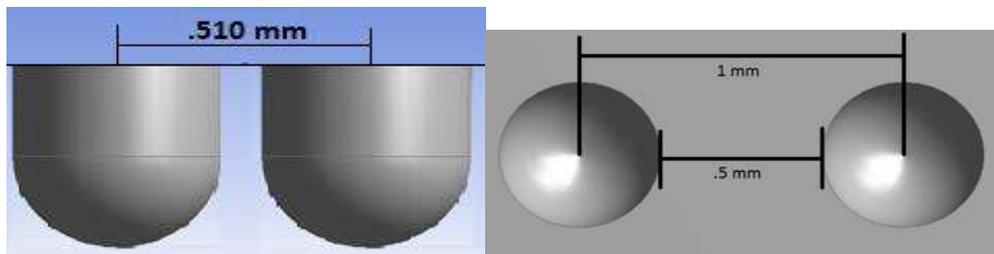


Figura 4.1 Proximidad y geometría del arreglo de dos picaduras

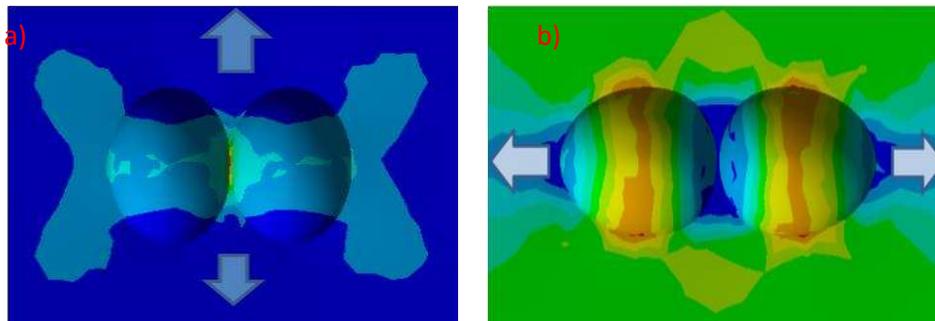


Figura 4.2 a) Carga transversal aplicada a dos picaduras. b) Carga longitudinal aplicada a dos picaduras.

La **Figura 4.3** muestra la evolución del máximo esfuerzo debido a la separación entre centros de dos picaduras transversales (para una distancia mínima o inicial de 510 μm , hasta una distancia de 1000 μm) (**Figura 4.1**). Existe una separación máxima en donde las picaduras ya

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

no interactúan entre sí, esta distancia es de 1000 μm de distancia entre centros (**Figura 4.1**); a partir de esta separación las picaduras se comportan como picaduras individuales con un concentrador de esfuerzo $K_t \approx 750/250 \approx 3$, Fig. 13. Por otro lado, si se reduce la separación entre las dos picaduras transversales, el concentrador de esfuerzo crece exponencialmente, como se muestra en la misma figura. Es importante remarcar que todas las simulaciones aquí presentadas para analizar la proximidad de picaduras fueron realizadas con picaduras con una profundidad constante de 500 μm .

Adicionalmente se observa que el concentrador de esfuerzo es más alto para una cierta proximidad, cuando el espesor de placa es menor. En el caso de a proximidad entre centros de picadura de 510 μm , cuyo espesor es 0.7 mm presenta un valor máximo de esfuerzo de 3029 MPa, mientras que para la probeta de espesor de 3mm el esfuerzo máximo es de 2600 MPa. Ahora bien, analizando la localización del máximo esfuerzo para el caso de carga transversal, este esfuerzo máximo se localiza en el lado de la cara común de las dos picaduras, es decir, entre ambas picaduras, como se muestra en la **Figura 4.2a**.

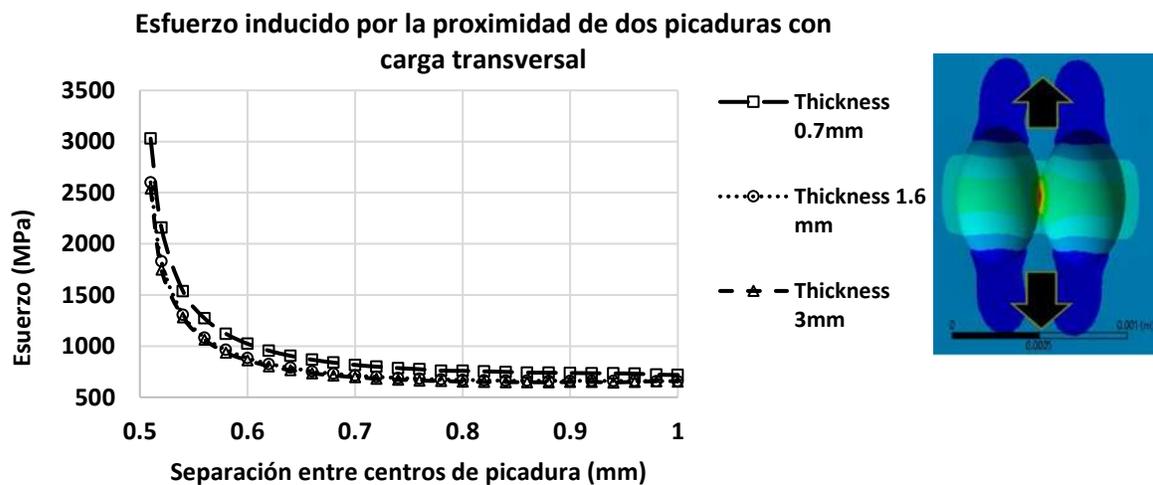


Figura 4.3 Esfuerzo inducido por la proximidad de dos picaduras, con carga transversal (uniaxial). El efecto de proximidad entre dos picaduras con arreglo longitudinal de la carga aplicada, como se mostró en la **Figura 4.2b**, ahora se presenta en resultados con las **Figura 4.3** y **Figura 4.4**. Las condiciones para las simulaciones numéricas de este caso son similares al caso

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

anterior, variando la proximidad entre picaduras longitudinales, con una carga nominal aplicada igual a la anterior de (250 MPa), y misma profundidad de las picaduras: 500 μm ., En los resultados obtenidos para este caso, el concentrador de esfuerzos decrece cuando la distancia entre las dos picaduras decrece, contrariamente al arreglo anterior de dos picaduras transversales. Se obtiene también que el concentrador de esfuerzos se desplaza del lado común de las picaduras al centro de las picaduras en arreglo longitudinal **Figura 4.4**. El comportamiento con respecto a el espesor de la placa es similar al presentado en el caso del arreglo transversal, el esfuerzo incrementa conforme el espesor es. Por ejemplo, el máximo esfuerzo para la placa de 0.7 mm de espesor, con 1 mm de separación entre centros presenta un esfuerzo de 628 MPa; mientras que para la misma separación de picaduras en la placa de espesor de 3 mm el esfuerzo máximo es de 592 MPa. Adicionalmente a la obtención de las curvas de tendencia, se obtuvieron ecuaciones lineales planteadas en la **Figura 4.4**, donde el eje de las abscisas representa el esfuerzo y el eje de las ordenadas representa la distancia entre centros de las picaduras.

De estos resultados obtenidos se concluye que el esfuerzo producido por una carga aplicada en dirección longitudinal a la orientación de las picaduras decrece cuando las picaduras se aproximan entre ellas, para los tres diferentes espesores de placa.

Se llevaron a cabo adicionalmente simulaciones numéricas con picaduras penetrando a través del espesor de las placas con dos picaduras separadas a tres distancias entre centros, separaciones específicas como se muestra en las **Figura 4.5** y **Figura 4.6**. En la **Figura 4.5** se presenta la evolución del esfuerzo producido por las picaduras al atravesar del espesor de la placa separadas dichas picaduras 510, 600 y 800 μm entre centros, sometidas a carga aplicada transversal; mientras que **Figura 4.6** presenta la evolución de esfuerzo bajo las mismas condiciones de separación, pero ahora con carga aplicada longitudinal.

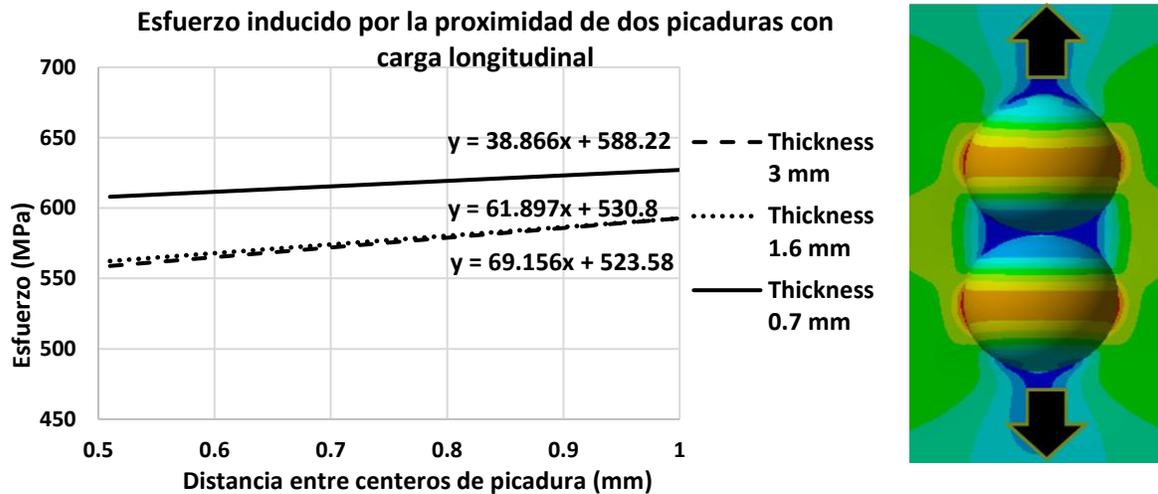


Figura 4.4 Esfuerzo inducido por la proximidad de dos picaduras con carga longitudinal (uniaxial).

Los resultados numéricos mostrados en la **Figura 4.5** presentan que la magnitud del esfuerzo es más alta para la menor separación de picaduras y va decreciendo conforme la separación entre centros de ambas picaduras incrementa. Con respecto al el espesor de las placas, el esfuerzo aumenta conforme el espesor de la placa decrece, para las tres separaciones entre picaduras analizadas, el comportamiento se observa de forma clara para la menor separación entre picaduras (510 mm), y decrece cuando la separación entre ellas aumenta (particularmente para los casos de 600 y 800 mm). Bajo la condición de carga transversal para dos picaduras en la placa, el esfuerzo incrementa conforme las picaduras avanzan a través de la placa, particularmente en la menor distancia entre dichas picaduras.

Por otro lado, en la **Figura 4.6** se presentan las curvas de evolución del esfuerzo de dos picaduras a través de la placa, sin embargo, en este caso, la orientación de las picaduras con respecto a la carga aplicada será longitudinal. Los resultados obtenidos son diferentes comparados con las picaduras transversales a la carga aplicada: en este caso el esfuerzo incrementa conforme las dos picaduras atraviesan la placa, pero esta vez el máximo esfuerzo está asociado con la mayor separación entre las picaduras para los tres espesores de placa utilizados. Además, la diferencia del esfuerzo en los mismos espesores de placa, y para las tres separaciones incrementa significativamente conforme el espesor de placa incrementa. Las **Figura 4.5** y **Figura 4.6** permiten observar el comportamiento asintótico del esfuerzo producido cuando dos picaduras atraviesan el espesor de la placa. Adicionalmente y

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

considerando en ambos casos el espesor de 0.7, y 510 mm de separación entre las picaduras, el máximo valor del esfuerzo para carga transversal es alrededor de 3500MPa; mientras que para el caso de carga longitudinal el valor del esfuerzo ronda los 630 MPa. Es posible concluir que la carga transversal es mucho más perjudicial comparada con la carga longitudinal, especialmente cuando la separación entre las picaduras decrece.

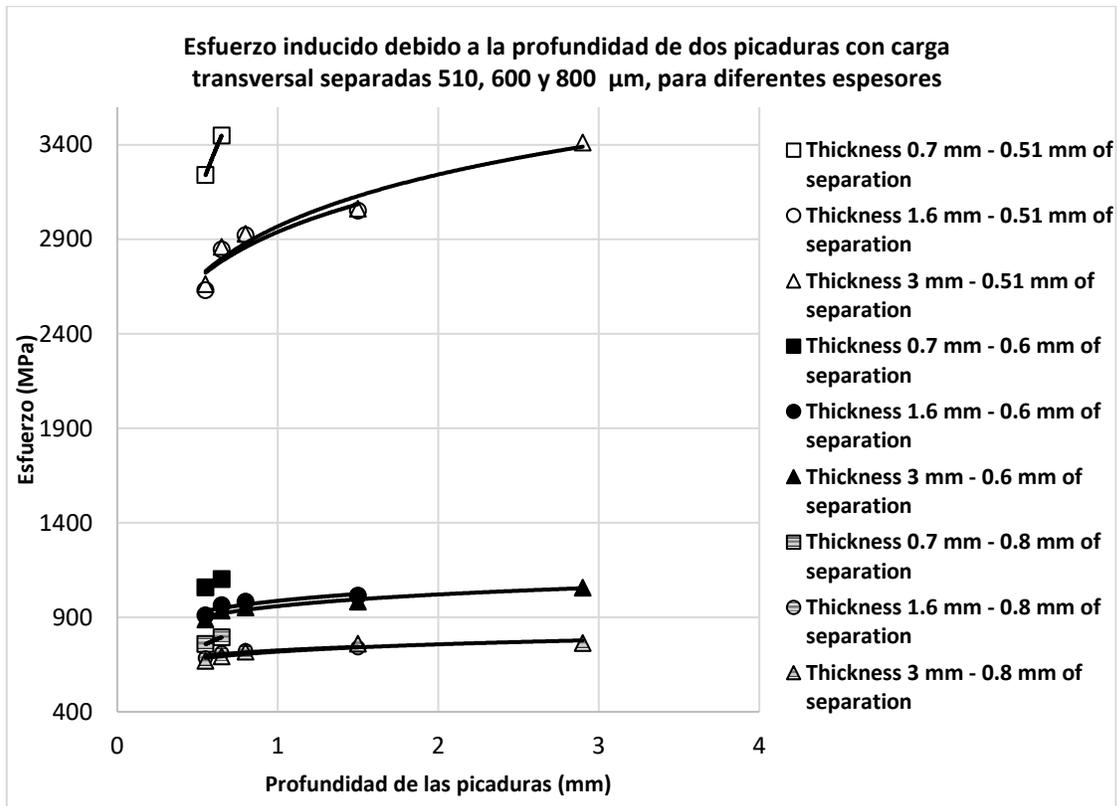


Figura 4.5 Esfuerzo inducido por dos picaduras separadas entre centros 510, 600 y 800 μm con carga transversal a través del espesor de la placa.

La evolución del esfuerzo crece exponencialmente, al disminuir la separación entre las dos picaduras para la carga transversal; mientras que, para la carga longitudinal, parece que un esfuerzo mayor se encuentra en función de la profundidad de las picaduras: el esfuerzo a una profundidad de 1.5 mm es mayor en comparación con el esfuerzo con la misma separación entre picaduras y diferente espesor de placa, para los tres casos de separación de las picaduras.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

La orientación de la carga aplicada (transversal y longitudinal) con respecto al eje de las picaduras, juega un papel importante, como se ha señalado en las dos figuras anteriores; cuando la carga se aplica longitudinalmente, parece producirse una relajación de las tensiones cuando disminuye la separación entre las picaduras.

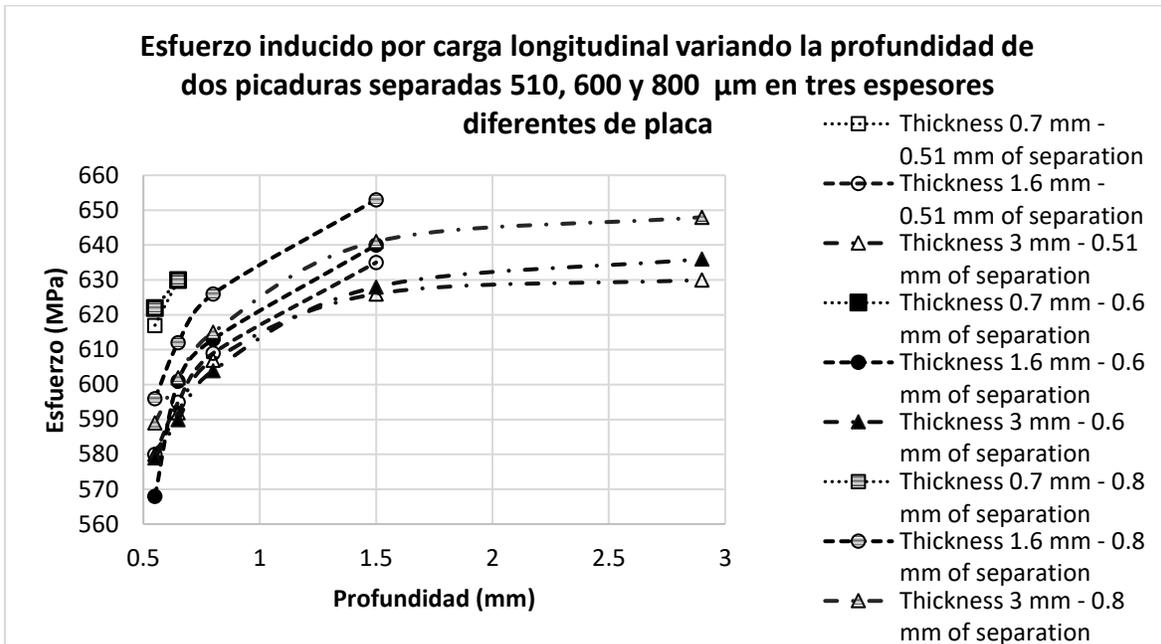


Figura 4.6 Esfuerzo inducido por carga longitudinal variando la profundidad de dos picaduras separadas 510, 600 y 800 μm en tres espesores diferentes de placa.

4.1.2. Simulaciones con carga biaxial.

Se obtuvieron resultados de simulaciones numéricas bajo las mismas condiciones: tres espesores para las placas (0.7, 1.6 y 3.0 mm), carga nominal aplicada (250 MPa) y las mismas dimensiones de la placa (100 mm²), pero esta vez las simulaciones se realizaron bajo la modalidad de carga biaxial, para analizar el efecto de proximidad y profundidad de dos picaduras.

Las simulaciones con carga biaxial, arrojaron valores de tensión ligeramente más bajos, Fig. 19, con respecto a los casos de dos picaduras con carga transversal y tensión uniaxial, Fig. 13. Para el caso biaxial, ocurre la misma tendencia: el concentrador de esfuerzo aumenta a

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

medida que el espesor disminuye, como se muestra en la **Figura 4.7**. Además, la concentración de esfuerzos en función de la separación de las picaduras parece similar para el espesor de placa de 3 y 1.6 mm; mientras que para la placa de 0,7 mm de espesor el concentrador de esfuerzo aumenta. El último comportamiento parece indicar que el aumento del esfuerzo que se da en función del grosor de la placa, es una función exponencial.

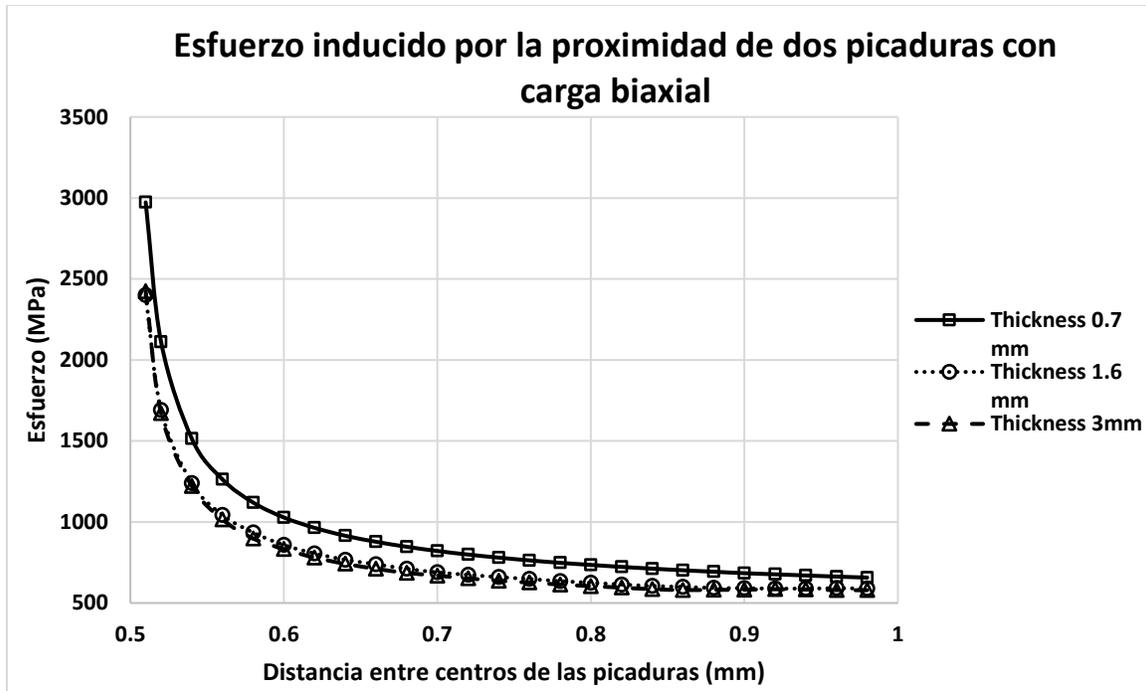


Figura 4.7 Esfuerzo inducido por la proximidad de dos picaduras con carga biaxial para tres diferentes espesores

La **Figura 4.8** muestra la confrontación entre la carga uniaxial (dirección transversal) y la carga biaxial para placas con espesores de 0.7 y 3 mm, y la evolución del esfuerzo producido debido al concentrador, con la separación de dos picaduras. La concentración de esfuerzo es ligeramente mayor en el caso de carga uniaxial en comparación con biaxial, a lo largo de la separación entre las dos picaduras; sin embargo, esta tendencia es más evidente cuando la separación entre las picaduras aumenta para los dos espesores de la placa.

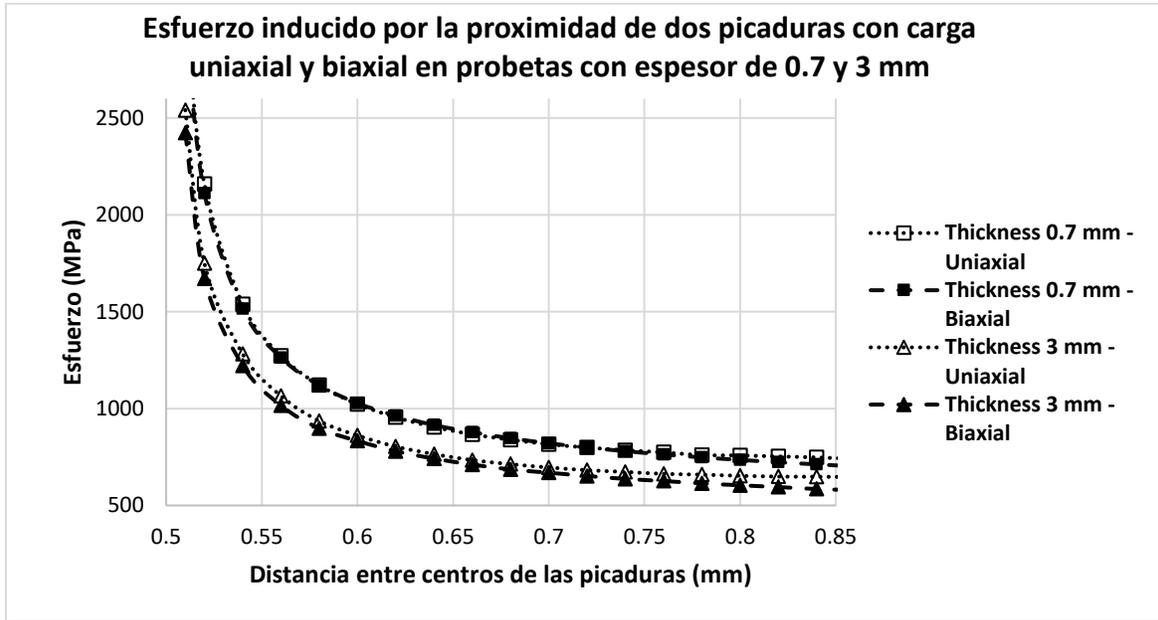


Figura 4.8 Esfuerzo inducido por la proximidad de dos picaduras bajo carga biaxial y uniaxial para espesores de 0.7 y 3 mm

Las **Figuras 4.9 a 4.11** presentan la evolución del esfuerzo a lo largo de la profundidad de la placa para tres separaciones entre los centros de las dos picaduras: 510, 600 y 800 μm , respectivamente. Además, en estas figuras se grafican los resultados numéricos del esfuerzo a lo largo de los tres espesores de la placa y la confrontación entre la carga uniaxial (dirección transversal) y la carga biaxial.

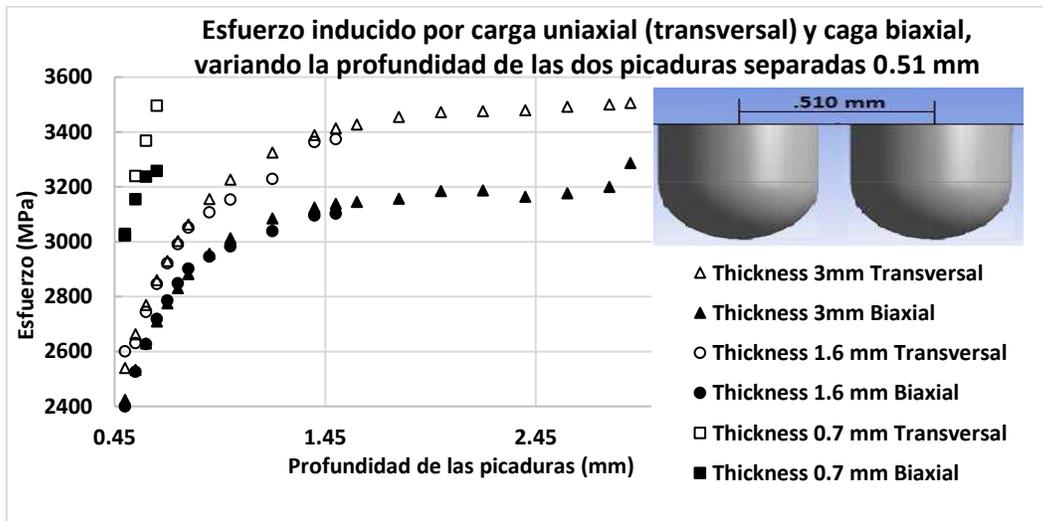


Figura 4.9 Esfuerzo inducido por la profundidad de dos picaduras separadas 510 mm de separación entre centros bajo carga uniaxial (transversal) y carga biaxial, para todos los espesores de placa.

Esfuerzo inducido por carga uniaxial (transversal) y biaxial, varando la profundidad de dos picaduras separadas 0.6 mm

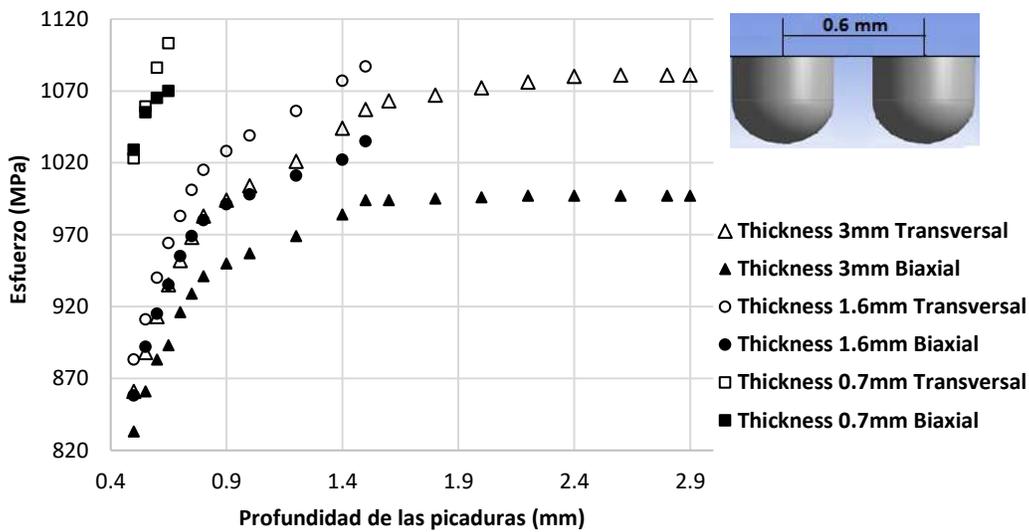


Figura 4.10 Esfuerzo inducido por la profundidad de dos picaduras separadas 600mm entre centros bajo carga uniaxial (transversal) y carga biaxial, para todos los espesores de placa.

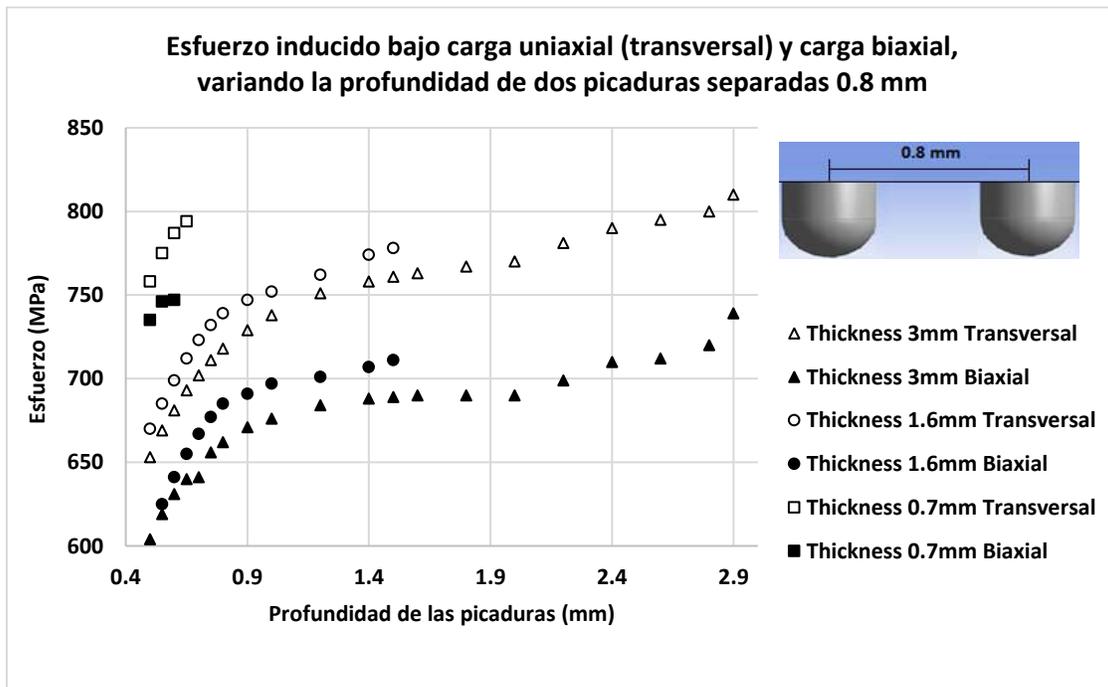


Figura 4.11 Esfuerzo inducido por la profundidad de dos picaduras separadas entre centros 800mm entre centros bajo carga uniaxial (transversal) y carga biaxial, para todos los espesores de placa.

Bajo una estrecha separación entre las dos picaduras, como se muestra en la Fig. 21, el grosor de la placa de 1.6 y 3 mm parece no afectarle la evolución del esfuerzo a lo largo de la

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

profundidad de la placa, al comparar la carga uniaxial o biaxial por separado. El efecto del grosor para 1.6 y 3.0 mm, se observa claramente en las **Figura 4.9** y **Figura 4.10**, donde al aumentar la separación entre las picaduras, esta vez, el esfuerzo para 1,6 mm de espesor es mayor en comparación con 3 mm de espesor para carga uniaxial o biaxial, cuando se compara por separado.

4.1.3. Análisis de los resultados

Se realizaron simulaciones numéricas siguiendo diferentes caminos a lo largo de las dos picaduras semi-hemisféricas separadas entre centros 510mm, para tres condiciones de carga: transversal, longitudinal y biaxial y para dos espesores de placa: 0.7 y 3 mm. La carga nominal aplicada fue en todos los casos de 250 MPa en los bordes de la placa. La profundidad del path o camino desde la superficie fue de 50 μm , en el caso de los paths 1, 3 y 5; mientras que la profundidad era de 500 μm para los caminos: 2, 4 y 6.

En la **Figura 4.12** se grafica la evolución del esfuerzo para los paths 1 y 2 bajo carga transversal y para los dos espesores de la placa. En la **Figura 4.13** se ilustran los resultados numéricos para las rutas 1 y 2, correspondientes a la placa con 0,7 mm de espesor.

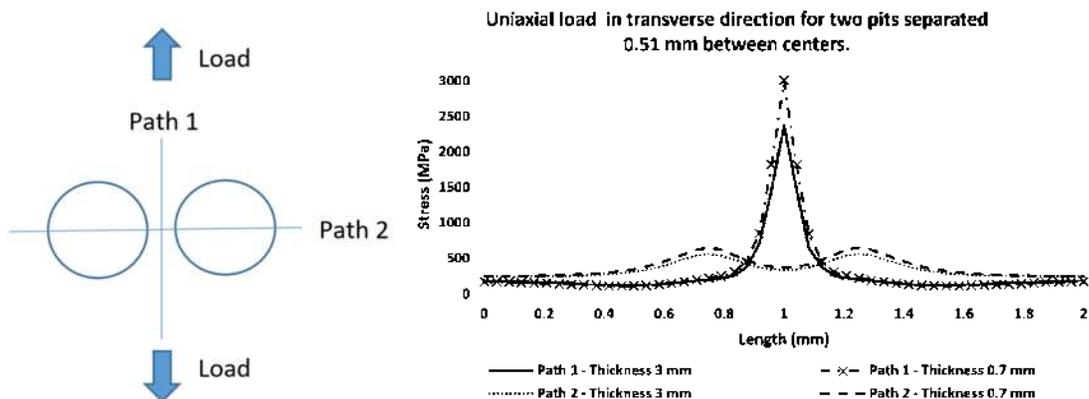
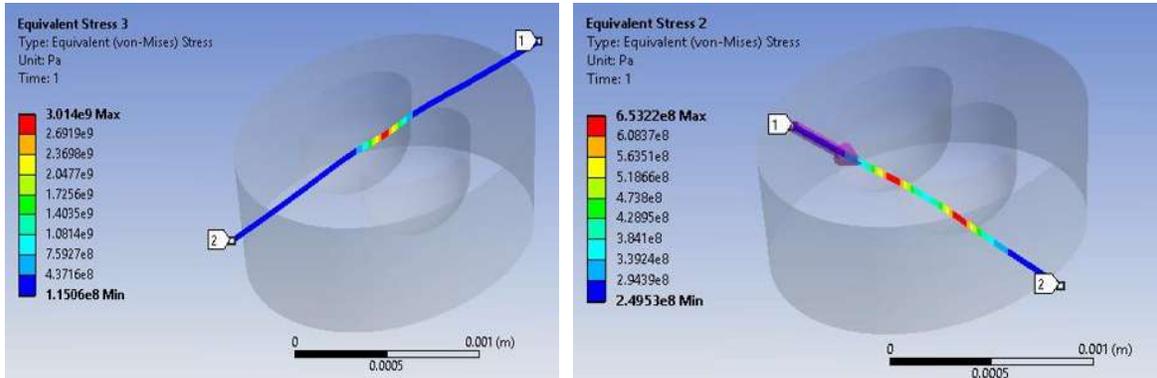


Figura 4.12 Evolución de esfuerzo en dos direcciones, debido a dos picaduras separadas entre centros de 0.510 mm con carga transversal para dos direcciones y dos espesores de placa.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES



Path 1 – Espesor 0.7 mm

Path 2 – Espesor 0.7 mm

Figura 4.13 Evolución del esfuerzo: Path 1 y 2 bajo carga transversal en placas de 0.7 mm de espesor.

La **Figura 4.14** presenta la evolución de la tensión para los paths 3 y 4 bajo carga longitudinal y para los dos espesores de la placa. En la **Figura 4.15** se ilustran los resultados numéricos para los caminos 3 y 4, correspondientes a la placa con 0,7 mm de espesor.

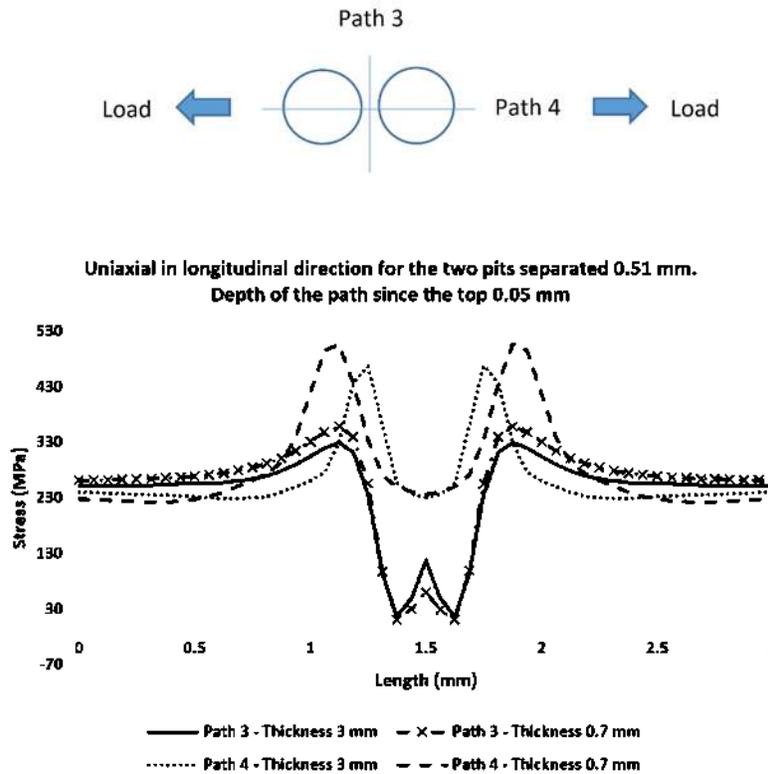
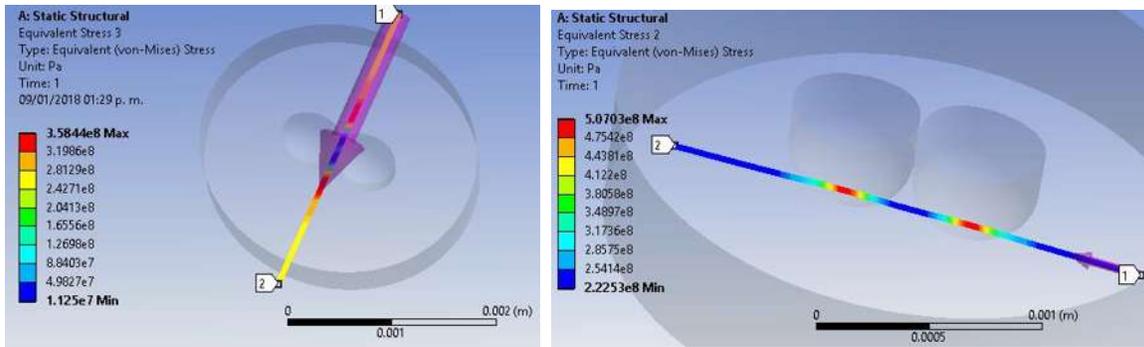


Figura 4.14 Evolución del esfuerzo debido a dos picaduras separadas entre centros 0.510 mm bajo carga longitudinal para dos direcciones de path y dos espesores de placa

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES



Path 3 – Espesor 0.7 mm

Path 4 – Espesor 0.7 mm

Figura 4.15 Evolución del esfuerzo path 3 y 4 bajo carga longitudinal en placa de 0.7 mm de espesor.

Finalmente, en la **Figura 4.16** se representa la evolución del esfuerzo para los paths 5 y 6 bajo carga biaxial y para los dos espesores de la placa. En la **Figura 4.17** se ilustran los resultados numéricos para las rutas 5 y 6, correspondientes a la placa con 3 mm de espesor.

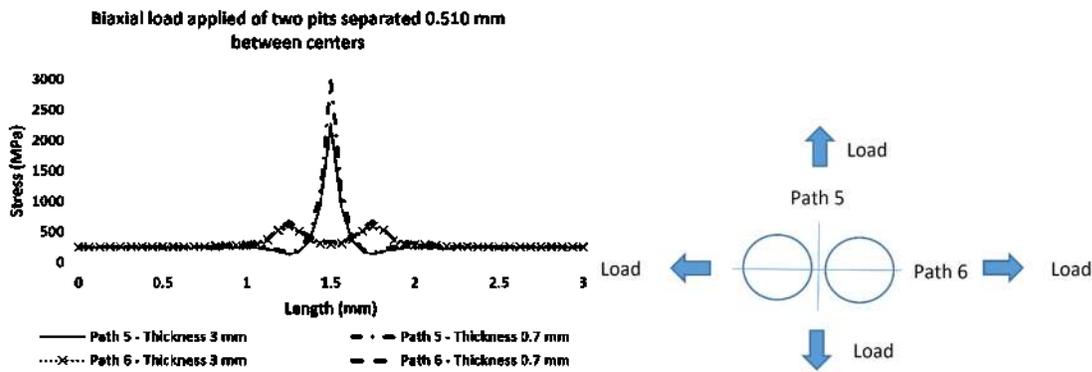
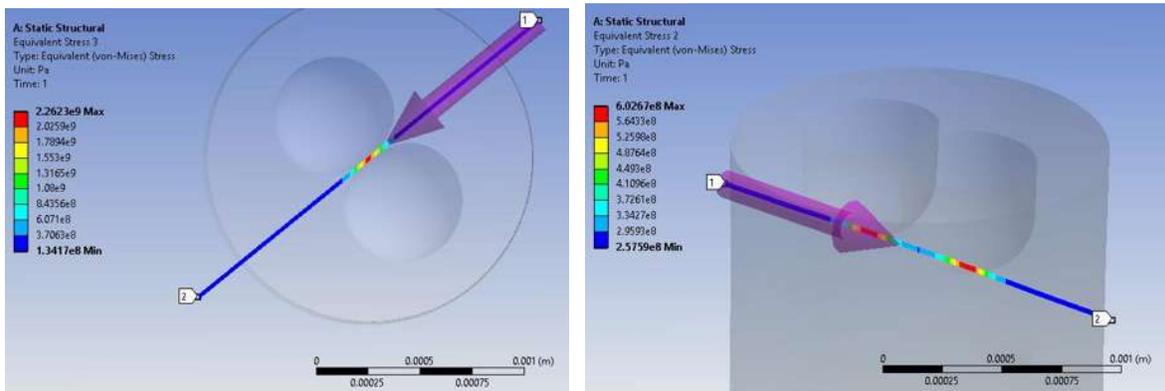


Figura 4.16 Evolución del esfuerzo debido a dos picaduras separadas entre centros 0.510 mm bajo carga biaxial para dos direcciones del path en dos espesores de placa.



Path 5 – Espesor 3 mm

Path 6 – Espesor 3 mm

Figura 4.17 Evolución del esfuerzo sobre: path 5 y 6 bajo carga biaxial, usando placas de 3mm de espesor

4.2.RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.2.1. Ensayos de fatiga ultrasónica

El material fue obtenido en placa, pudiendo obtener de dicha placa una cantidad aproximada de 100 probetas.

El maquinado se llevó a cabo en una primera probeta mediante una fresadora, donde se maquina dos probetas primero, llamadas “probetas muestra”, que será con las que se verificará que el perfil diseñado sea el correcto y entre en resonancia con la máquina. (Figura 4.18)



Figura 4.18 Material base y probeta muestra

Cuando se prueba la primera probeta, se verifica manualmente que la probeta se sienta vibrando, para después verificar mediante una cámara termográfica para verificar que el esfuerzo se encuentre localizado en el centro de la misma, es decir en la parte estrecha de la probeta, como muestra la Figura 4.19, una vez verificado esto corroboramos que el diseño de la probeta es correcto, procediendo entonces a maquinar el resto de las probetas.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

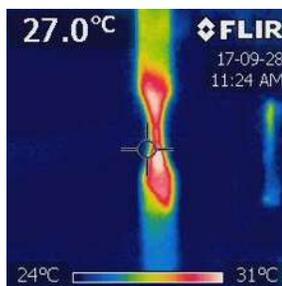


Figura 4.19 Contornos de temperatura de la probeta muestra en la máquina ultrasónica

La máquina de fatiga ultrasónica tiene la capacidad de provocar un desplazamiento en el extremo libre de la probeta de $1.25 \mu\text{m}$ por cada volt aplicado en el generador. Este desplazamiento genera un esfuerzo máximo en la parte estrecha de la probeta de aproximadamente 3.7 MPa por cada volt aplicado, en la **Figura 4.20** presenta las gráficas del esfuerzo y el desplazamiento de modo independiente, obtenidas por simulación numérica para la probeta de Aluminio 7075-T6, con un desplazamiento impuesto en los extremos de $12.5 \mu\text{m}$. El esfuerzo inducido en la zona estrecha de la probeta es de 37.5 MPa con un voltaje aplicado de 10 volts, correspondiente a un 7 % del límite elástico de esta aleación de aluminio. 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** Relación: voltaje-desplazamiento-esfuerzo- esfuerzo/límite elástico.

Los títulos en la tabla corresponden a:

- *Voltaje*. Es el valor en volts aplicado en el generador de alta frecuencia.
- *Desplazamiento* (μm). 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.
- σ/σ_y . Es el porcentaje del esfuerzo inducido, en referencia al límite elástico del material de prueba.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

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 de este.

Retomando la **Figura 4.20** muestra las gráficas del esfuerzo y el desplazamiento de modo independiente, obtenidas por simulación numérica, se observa el comportamiento de la probeta en un ensayo de fatiga ultrasónica, donde en la probeta se establece una onda elástica estacionaria longitudinal, que condiciona el mayor desplazamiento en los extremos de la probeta, mientras que el mayor esfuerzo se encuentra en el centro de la probeta.

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

Voltaje	Desplazamiento (μm)	Esfuerzo inducido (MPa)	σ/σ_n %
10	13	44	8.74
20	26	88	17.49
30	39	132	26.24
40	52	176	34.9
45	58	198	39.36
46	59.8	202	40.23
50	65	220	43.73
52	67.6	229	45.48
54	70.2	238	47.23
56	72.8	246	48.90
60	78	264	52.48

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

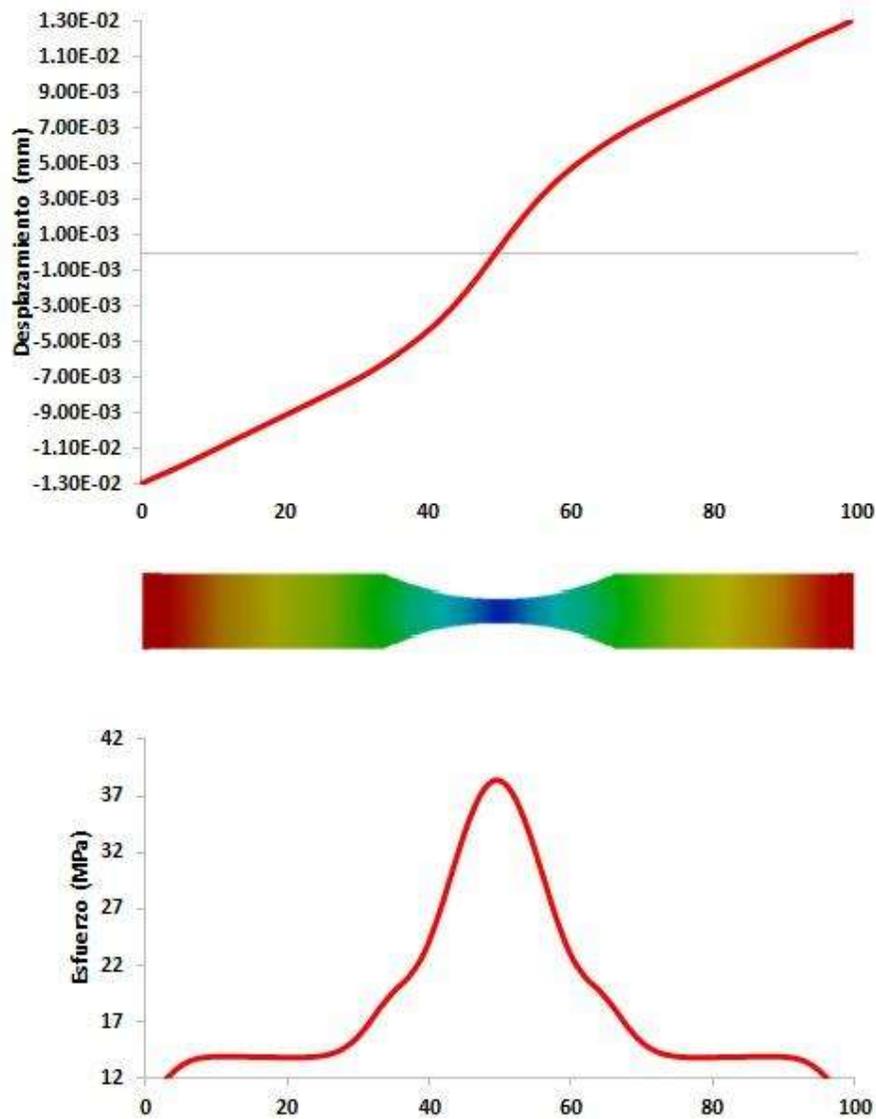


Figura 4.20 Gráficas de esfuerzo y desplazamiento de la probeta

Los primeros ensayos realizados fueron sobre el material base, es decir, sin pre-corrosión. En la **Figura 4.21** se presenta una de las probetas de “Ensayos de calibración”, montada sobre el sonotrodo de la máquina de ensayos en fatiga ultrasónica.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES



Figura 4.21 Probeta lista para ser montada en la máquina ultrasónica.

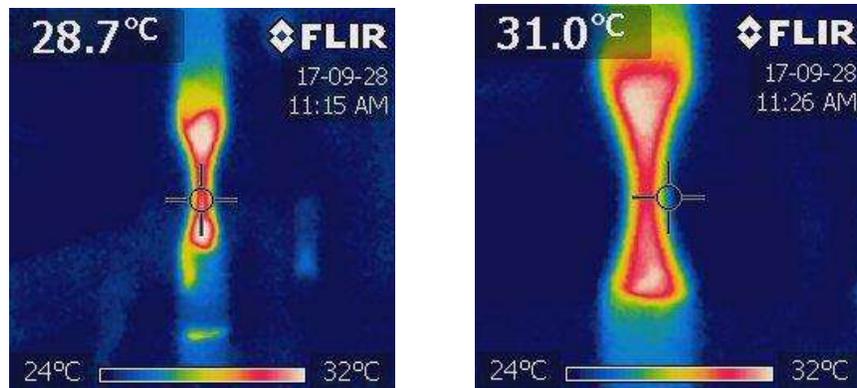


Figura 4.22 Imágenes termográficas de ensayos

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 (**Figura 4.22**). 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.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

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 Δs 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 4.2 Resultados de fatiga ultrasónica de las probetas sin pre-corrosión.

Probeta	Tiempo de ataque	No. Ciclos (Hz)	Temperatura °C	Voltaje	σ/σ_n %
1	Sin corrosión	2478661	31	60	56
2	Sin corrosión	2637030	31	60	56
3	Sin corrosión	2504988	31	60	56
4	Sin corrosión	6248397	31	60	56
5	Sin corrosión	8804143	31	60	56
6	Sin corrosión	5652403	31	60	56
7	Sin corrosión	3167881	31	60	56
8	Sin corrosión	3464878	31	60	56
9	Sin corrosión	3525021	31	60	56
10	Sin corrosión	4000828	31	60	56
11	Sin corrosión	13272000	30	54	50
12	Sin corrosión	13972000	30	54	50
13	Sin corrosión	12545677	30	54	50
14	Sin corrosión	101099462	30	50	46
15	Sin corrosión	131430597	30	50	46
16	Sin corrosión	1151152449	30	46	32
17	Sin corrosión	2196000000	30	46	32
18	Sin corrosión	333940640	30	46	32
19	Sin corrosión	265341956	30	46	32
20	Sin corrosión	19021862908	28	40	30
21	Sin corrosión	19038852410	28	40	30

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

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 4.2** Resultados de fatiga ultrasónica de las probetas sin pre-corrosión. presenta los resultados obtenidos de 21 experimentos.

A partir de los ensayos experimentales, se construyó la gráfica característica S-N (gráfica de Wöhler), para este material bajo ensayos de fatiga ultrasónica, **Figura 4.23**.

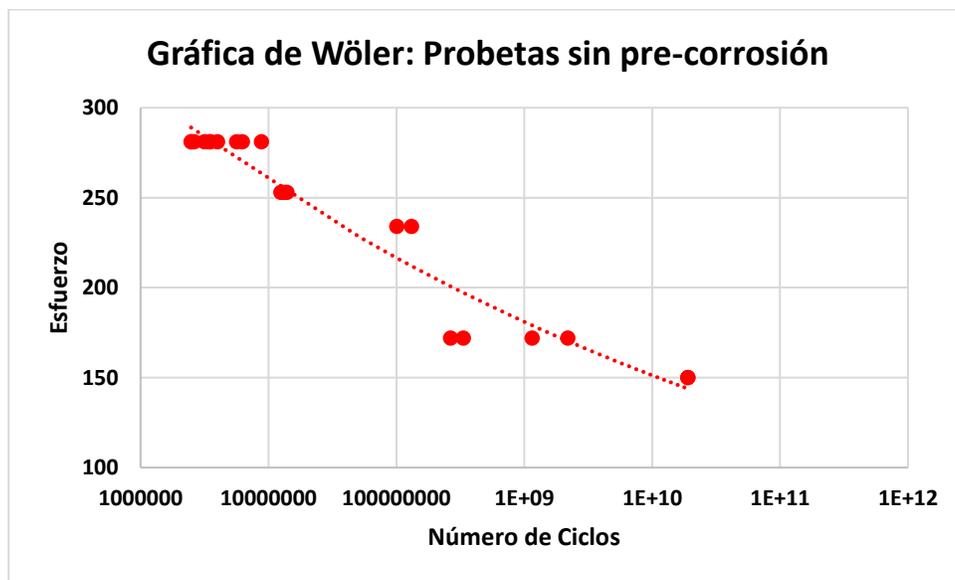


Figura 4.23 Gráfica de Wöhler de resistencia en fatiga ultrasónica: probetas sin pre-corrosión

4.2.2. Resultados de pruebas de fatiga convencional

Cálculos de esfuerzos y fuerzas para llevar a cabo los ensayos.

Como se mencionó anteriormente, las probetas utilizadas en las pruebas de fatiga convencional, fueron adaptadas a partir del diseño de la probeta que se tenía para fatiga ultrasónica **Figura 4.24**, es posible observar a la probeta adaptada montada en la máquina de fatiga convencional **Figura 4.25**. Las pruebas se dividieron en 3 tipos diferentes de prueba, las diferencias entre las pruebas fueron con respecto al ancho del cuello de la muestra, detallados en la **Tabla 4.3**, los valores rojos son el ancho original del cuello de 4 mm, luego el cuello se redujo a 3 mm (prueba amarilla) y la tercera serie de las pruebas con un ancho de cuello de 2 mm (prueba verde), como se presentó en la sección anterior, el diseño de la muestra provoca la tensión máxima en el cuello de la muestra, el rango de tensión es: tensión mínima de 11 MPa y máxima tensión de 110 MPa, esto se convirtió en una constante en todas las pruebas, y las fuerzas variaron dependiendo del área real en cada muestra, en la **Tabla 4.3** se presenta un resumen detallado de la tensión y las fuerzas.

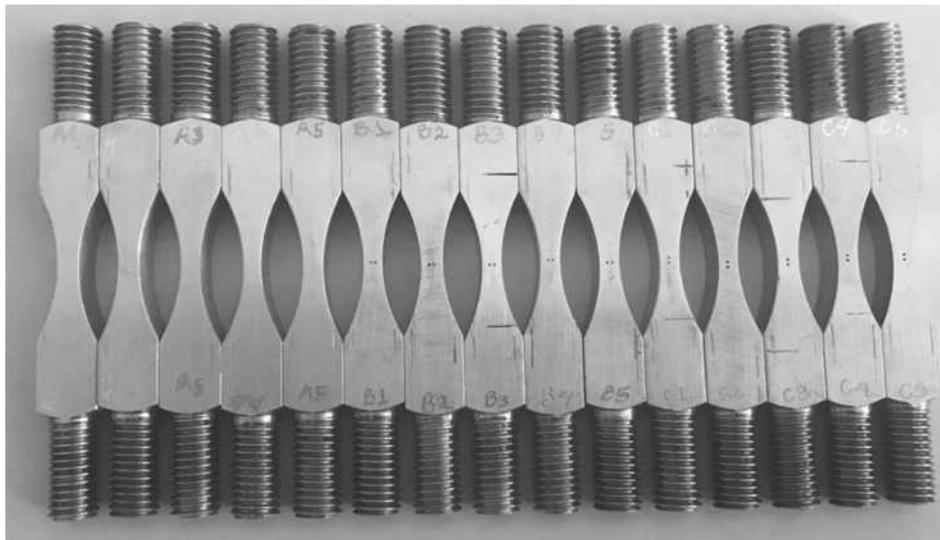


Figura 4.24 Probetas maquinadas para pruebas de fatiga convencional

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES



Figura 4.25 Probeta montada en la máquina de fatiga convencional

Tabla 4.3 Concentrado de las fuerzas y esfuerzos en cada probeta

Specimen	R	A (mm ²)	f (Hz)	σ_{\max} (MPa)	σ_{\min} (MPa)	F _{max} (kN)	F _{min} (kN)	F _{mean} (kN)	ΔF_{\square} (kN)	DATE
A1	0.1	44.19	20	110	11	4.86	0.49	2.67	2.19	16/04/2019
A3	0.1	39.95	20	110	11	4.39	0.44	2.42	1.98	19/04/2019
A4	0.1	31.69	20	110	11	3.49	0.35	1.92	1.57	09/05/2019
A5	0.1	21.03	20	110	11	2.31	0.23	1.27	1.04	28/05/2019
A6	0.1	20.42	20	110	11	2.25	0.22	1.24	1.01	05/06/2019
A7	0.1	21.27	20	110	11	2.34	0.23	1.29	1.05	06/06/2019
A8	0.1	20.62	20	110	11	2.27	0.23	1.25	1.02	07/06/2019
B1	0.1	38.50	20	110	11	4.24	0.42	2.33	1.91	17/04/2019
B3	0.1	20.80	20	110	11	2.29	0.23	1.26	1.03	27/05/2019
B4	0.1	30.68	20	110	11	3.38	0.34	1.86	1.52	10/05/2019
B5	0.1	20.96	20	110	11	2.31	0.23	1.27	1.04	04/06/2019
B6	0.1	20.82	20	110	11	2.29	0.23	1.26	1.03	05/06/2019
B7	0.1	21.14	20	110	11	2.33	0.23	1.28	1.05	06/06/2019
C1	0.1	41.67	20	110	11	4.58	0.46	2.52	2.06	18/04/2019
C3	0.1	20.73	20	110	11	2.28	0.23	1.25	1.03	21/05/2019
C4	0.1	20.79	20	110	11	2.29	0.23	1.26	1.03	03/06/2019
C5	0.1	20.17	20	110	11	2.22	0.22	1.22	1.00	04/06/2019
C6	0.1	20.80	20	110	11	2.29	0.23	1.26	1.03	05/06/2019
C7	0.1	21.11	20	110	11	2.32	0.23	1.28	1.04	06/06/2019

En el caso de las pruebas de fatiga convencional, no se llevó la probeta hasta que el material fracturara, pues el principal objetivo de estas pruebas era conocer que sucedía en las primeras

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

etapas de la vida en fatiga del material, si desde etapas tempranas se podía presentar grietas, durante las pruebas en fatiga ultrasónica, se alcanza un número elevado de ciclos en un pequeño tiempo, volviendo desconocido lo que puede suceder en los primeros ciclos de vida del material, de esta manera, se fijó un límite de ciclos en fatiga y se observaba el antes y el después de las probetas midiendo ciertos valores, como los esfuerzos residuales, rugosidad de la superficie en todas las caras, estableciendo una metodología que será explicada de acuerdo a los resultados obtenidos.

Tabla 4.4 Localización de la falla en la probeta y el número de ciclos de prueba

Probeta	Objetivo	No. de ciclos de falla	Localización de la fractura	Condición final	Características de la probeta
A1	10^7	382956	Bolt	No fracture	4 mm in the neck
A2	50000	50000	No Failure	No fracture	3 mm in the neck
A3	10^7	460002	Bolt	No fracture	3 mm in the neck
A4	10^7	354215	Bolt	No fracture	2 mm in the neck
A5	10^7	10^7	No Failure	No fracture	2 mm in the neck
A6	100000	100000	No Failure	No fracture	2 mm in the neck
A7	200000	200000	No Failure	No fracture	2 mm in the neck
A8	10^7	10^7	No Failure	No fracture	2 mm in the neck
B1	10^6	692023	Center	Broken	4 mm in the neck
B2	10000	10000	No Failure	Non tested	3 mm in the neck
B3	10^7	473263	Center	Broken	2 mm in the neck
B4	10^7	165047	Bolt	No fracture	2 mm in the neck
B5	50000	50000	No Failure	No fracture	2 mm in the neck
B6	100000	100000	No Failure	No fracture	2 mm in the neck
B7	200000	200000	No Failure	No fracture	2 mm in the neck
C1	10^6	335033	Bolt	No fracture	4 mm in the neck
C2				Non tested	3 mm in the neck
C3	10^7	10^7	No Failure	No fracture	2 mm in the neck
C4	700000	700000	No Failure	No fracture	2 mm in the neck
C5	50000	50000	No Failure	No fracture	2 mm in the neck
C6	100000	100000	No Failure	Non tested	2 mm in the neck
C7	200000	200000	No Failure	Non tested	2 mm in the neck

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

Mediciones de rugosidad

Las mediciones de rugosidad y esfuerzos residuales junto con observaciones por medio de microscopio se llevaron a cabo en aleación de aluminio AISI 7075-T6 después y antes de que los resultados de la prueba se presenten en diferentes gráficas.

Después de las pruebas de fatiga, se encontró que la rugosidad disminuye en la mayoría de las probetas serie A (sin agujeros), en las muestras C y B (picaduras longitudinales y transversales respectivamente) la rugosidad disminuye en dirección de la carga aplicada y aumenta en la dirección transversal de la carga aplicada suponiendo que el material sufre deformación plástica en una dirección.

Dichos resultados fueron tomados en las probetas sometidas a pruebas de fatiga ultrasónica. En la **Tabla 4.4** se presentan los valores medidos de rugosidad antes y después de las pruebas.

No todas las pruebas se han llevado a cabo para fallar en la prueba de fatiga de ciclo bajo, la razón principal de esta metodología fue investigar cómo cambia la superficie del material en la vida de fatiga temprana, esto es ≤ 107 ciclos y cómo esto se relaciona con el límite de fatiga del material,



Figura 4.26 Probeta durante mediciones de rugosidad y display de valores obtenidos por el instrumento

Tabla 4.5 Valores de rugosidad antes y después de las pruebas de fatiga convencional

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

PROBETA	CICLOS	Ra (μm)			
		SUPERFICIE	LATERAL	DIRECCIÓN VERTICAL	DIRECCIÓN VERTICAL LATERAL
A1	0	0.179	0.252	0.225	0.705
	382,956	0.144	0.358	0.292	0.23
A4	0	0.17	0.323	0.193	0.871
	354,215	0.176	0.298	0.224	0.548
A5	0	0.103	0.556	0.197	0.747
	10000000	0.09	0.283	0.182	0.66
A6	0	0.105	0.48	0.145	0.253
	100000	0.113	0.441	0.145	0.606
A7	0	0.128	0.379	0.138	0.59
	200000	0.104	0.258	0.208	0.595
A8	0	0.11	0.409	0.322	0.643
	10000000	0.103	0.331	0.158	0.590
B1	0	0.31	0.538	0.4	0.731
	1000000	0.271	0.375	0.755	0.999
B3	0	0.166	0.518	0.386	0.83
	10000000	0.113	0.423	0.467	0.963
B4	0	0.228	0.467	0.403	0.866
	10000000	0.145	0.393	0.342	0.885
B5	0	0.128	0.409	0.25	0.55
	50000	0.103	0.447	0.219	0.623
B6	0	0.119	0.599	0.18	0.663
	100000	0.125	0.45	0.189	0.654
B7	0	0.114	0.434	0.371	0.776
	200000	0.106	0.275	0.214	0.838
C1	0	0.244	0.586	0.382	0.98
	1000000	0.159	0.596	0.395	1.091
C3	0	0.163	0.483	0.336	0.912
	10000000	0.149	0.288	0.278	0.53
C4	0	0.166	0.643	0.265	0.812
	700000	0.17	0.486	0.273	0.909
C5	0	0.168	0.58	0.383	0.877
	50000	0.127	0.45	0.339	0.672
C6	0	0.155	0.538	0.279	0.709
	100000	0.143	0.461	0.286	0.717
C7	0	0.167	0.582	0.248	0.712
	200000	0.14	0.286	0.282	0.715

Mediciones de esfuerzos residuales

Los esfuerzos residuales acumulados antes del proceso de maquinado, se estiman a partir de las variaciones de deformación registradas por las **Figura 4.27** a **Figura 4.29** muestran en qué lugares se encuentra la medición del esfuerzo residual, las mediciones de esfuerzos residuales presentes son después de haber electro pulido arrojando resultados que tienden o muy cercanos a cero, los resultados después de la prueba se presentan en la tabla 5. Es importante mencionar que para llevar a cabo dichas mediciones, se requirió hacer electro pulido del materias, que es una técnica de remoción de materiales en una profundidad de micrones, para que las mediciones puedan hacerse de la forma más precisas posibles. (**Figura 4.30**)

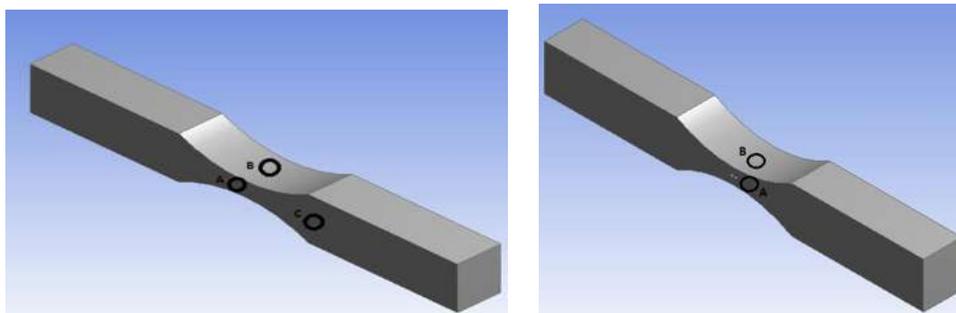


Figura 4.27 Probetas (SERIE B) 1 y 7

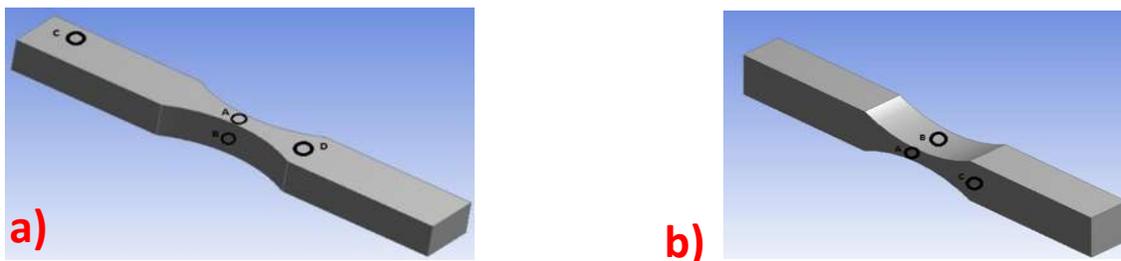


Figura 4.28 a) Probeta 5 (SERIE A) (Antes y después del Electro pulido) b) Probeta 6 (SERIE A) Material Base

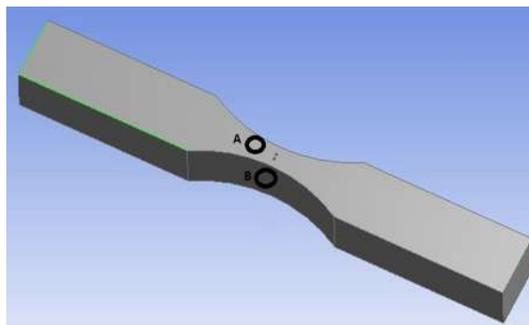


Figura 4.29 Probeta 9 (SERIE C) Picaduras Transversales

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES



Figura 4.30 Electro pulido en las probetas para medir esfuerzos residuales

Tabla 4.6 Esfuerzos residuales en las probetas AA7075-T6

Tipo	Probeta	σ_x (MPa)	Dev (MPa)	τ_{xy} (MPa)	Dev. (MPa)	PDF Name
Picaduras Longitudinales (SERIE C)	1_A	-201	65.66	14	44.66	
	1_A Longitudinal	-46	48	-22	25	Specimen 1_2
	1_B	-50	31	-12	49	Specimen 1_51
	1_C Transversal	-94.5	22.5	12.5	32	
	7_A	5	34	-10	26	Specimen 7_1
	7_B	-15	18	14	19	Specimen 7_2
Picaduras Transversales (SERIE B)	9_A	-30	28	10	15	Specimen 9_1
	9_B	-56	31	-7	13	Specimen 9_2
Material Base Antes del Electro Pulido (SERIE A)	5_A	-108	27	10	26	Specimen 5_5
	5_B	-144	32	-32	19	Specimen 5_6
	5_C	-165	15	-3	21	Specimen 5_7
	5_D	-170	26	29	27	Specimen 5_8
	5_A	28	30	11	20	Specimen 5_9e
Después del Electro pulido (SERIE A)	5_B	-28	18	2	6	Specimen 5_10e
	5_B	-55	32	-5	12	Specimen 5_41
	5_B	-85	30	-7	11	Specimen 5_42
	6_A	-152	36	13	17	Specimen 6_1
Material Base (SERIE A)	6_B	-165	21	5	6	Specimen 6_2
	6_C	-126	37	15	35	Specimen 6_3

4.3.COMPARACIÓN FATIGA ULTRASÓNICA Y CONVENCIONAL

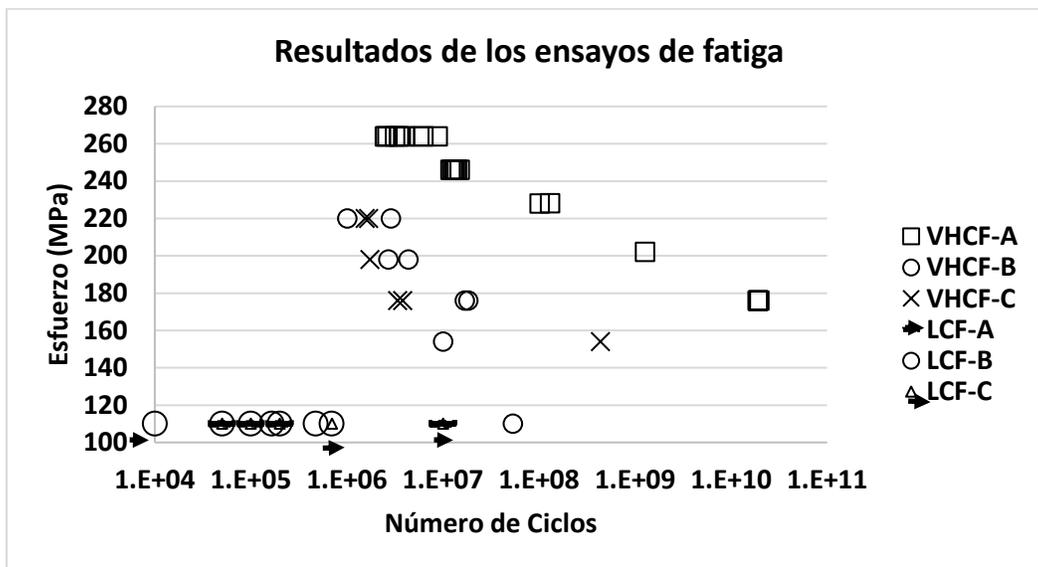


Figura 4.31 Resultados de pruebas de fátiga ultrasónica y fatiga convencional

Dentro de los objetivos de este trabajo estaba realizar pruebas de fatiga ultrasónica y convencional del material, la **Figura 4.31** tiene concentrados los resultados de ambos tipos de ensayo, podemos observar en la imagen que el obtener el comportamiento del material durante toda la vida en fatiga fue posible, ahora sabemos que está sucediendo en el material desde un número bajo de ciclos hasta un elevado número, pero esta tabla no solo nos presenta muy claramente lo antes mencionado, sino que también podemos retomar los resultados obtenidos mediante simulación numérica donde aquellos modelos que tenían las picaduras de forma transversal a la carga sufrían niveles de esfuerzo muy elevados, que se ve reflejado en aquellas probetas de la serie B, donde validamos la hipótesis planteada desde el inicio de esta investigación confirmando con ello que dos picaduras en dirección transversal inducen mayor efecto perjudicial en la resistencia a la fatiga asociada con los factores de alta concentración de esfuerzo, viéndose dicho comportamiento en pruebas de fatiga ultrasónica y en pruebas de fatiga convencional

4.4.MICROSCOPIA DE SUPERFICIES DE FRACTURA

Se observaron fracturas y grietas sistemáticamente en la sección del cuello de las probetas, para obtener una mejor comprensión de los fenómenos que ocurrieron durante y antes de las pruebas, se dividieron en el análisis microscópico de muestras de fatiga ultrasónica y muestras de fatiga convencionales, para ver la diferencias en la superficie sobre cierto número de ciclos. Durante la prueba de fatiga ultrasónica, se desarrolló sistemáticamente un camino de fractura en la sección del cuello del espécimen, en el caso de especímenes con picaduras transversales (Serie B) la grieta cruza ambas picaduras.

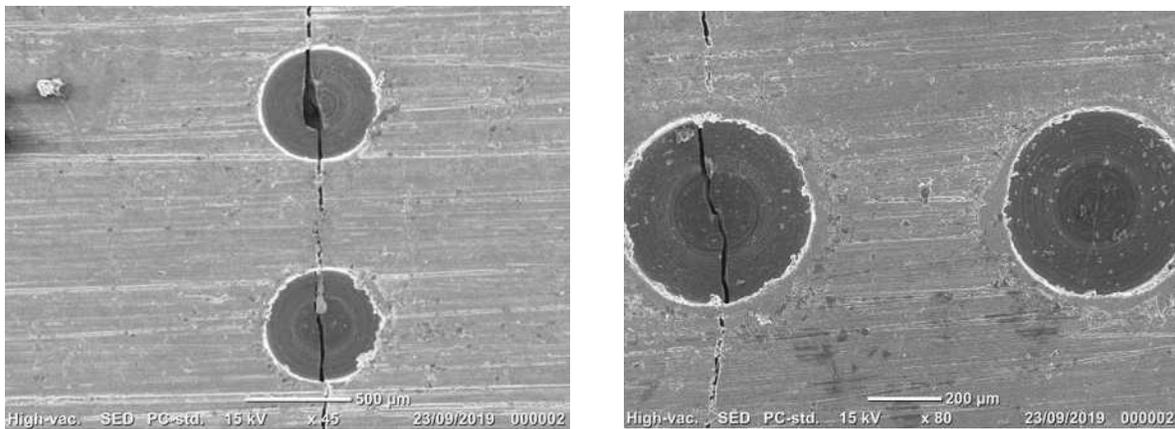


Figura 4.32 mientras que en las probetas con picaduras longitudinales (Series C) la grieta aparece solo en una sola de las picaduras **Figura 4.33**, generalmente la superior, más próxima al sorotrodo. Estos resultados validan las simulaciones numéricas donde la carga transversal con respecto a la orientación de las picaduras es más destructiva y peligrosa que las probetas que tienen picaduras longitudinales.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

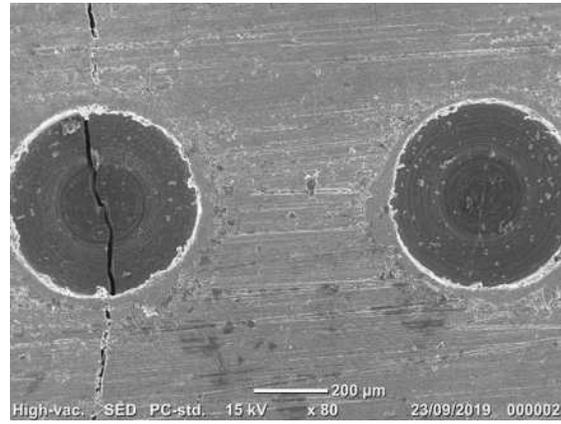
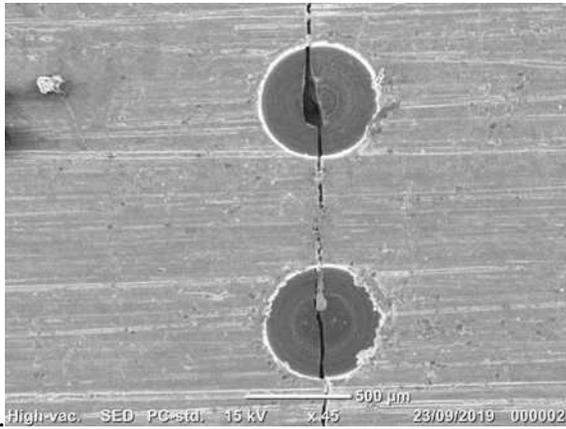


Figura 4.32 Probeta C. Picaduras Transversales **Figura 4.33** Probeta C. Picaduras Longitudinales

Si observamos algunas de las imágenes obtenidas después de realizadas las pruebas, validamos las simulaciones que nos mostraban que aquellas probetas con carga transversal presentarían esfuerzos máximos en la parte central de las probetas, mientras que aquellas probetas cuya carga esté orientada de manera longitudinal a las picaduras desplazaría el esfuerzo máximo, en este caso lo vemos desplazado a una sola de las picaduras.

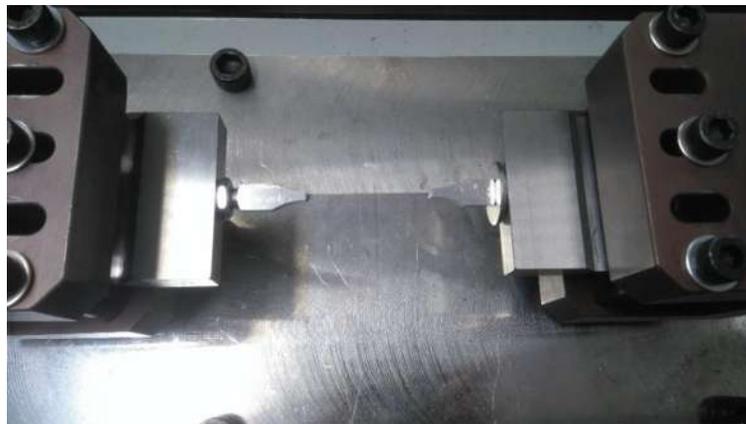


Figura 4.34 Probeta B fracturada, montada sobre la máquina de fatiga convencional

En el caso de los resultados obtenidos durante las pruebas de fatiga convencional, solamente las probetas de la serie B, fracturaron, sin embargo, por medio de microscopía óptica (**Figura 4.35** Imágenes de microscopio óptico probeta C3a **Figura 4.39**), observamos microgrietas en el material, esto lo podemos analizar de la siguiente manera: el material empieza a generar deformaciones plásticas en etapas muy tempranas de su vida en fatiga, por debajo de cien mil ciclos, que generarán con el incremento de los ciclos seguramente grietas que sean las causantes del fallo definitivo del material. Por medio del análisis hecho por microscopía óptica, observamos no solo las superficies,

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

sino que también fue posible obtener imágenes tridimensionales de la superficie y medir la rugosidad en la misma, el comportamiento de los resultados fue similar al mostrado con anterioridad, los valores de rugosidad cambiaron para las diferentes orientaciones, en la orientación de la carga tanto para la vista frontal como para la vista lateral los valores de rugosidad bajaron considerablemente, ello fue indistinto de las probetas A, B y C.

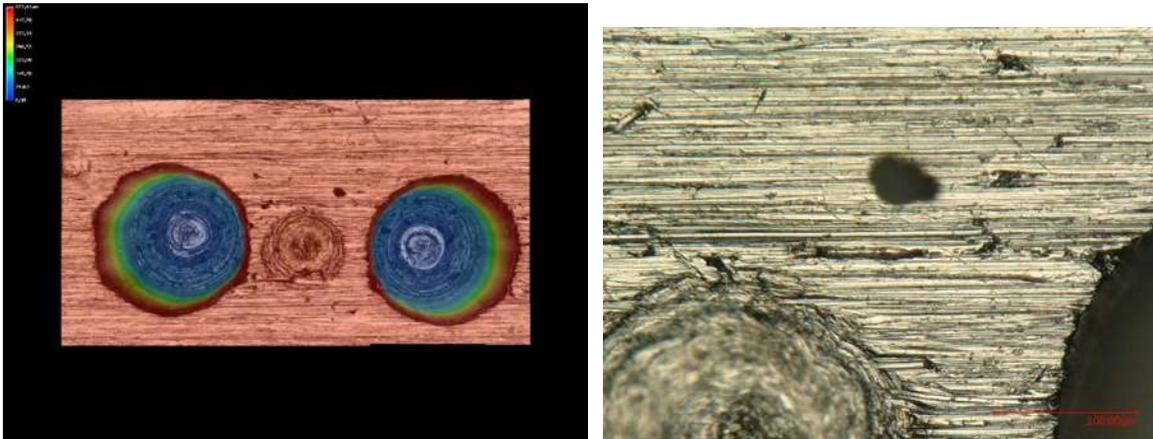


Figura 4.35 Imágenes de microscopio óptico probeta C3

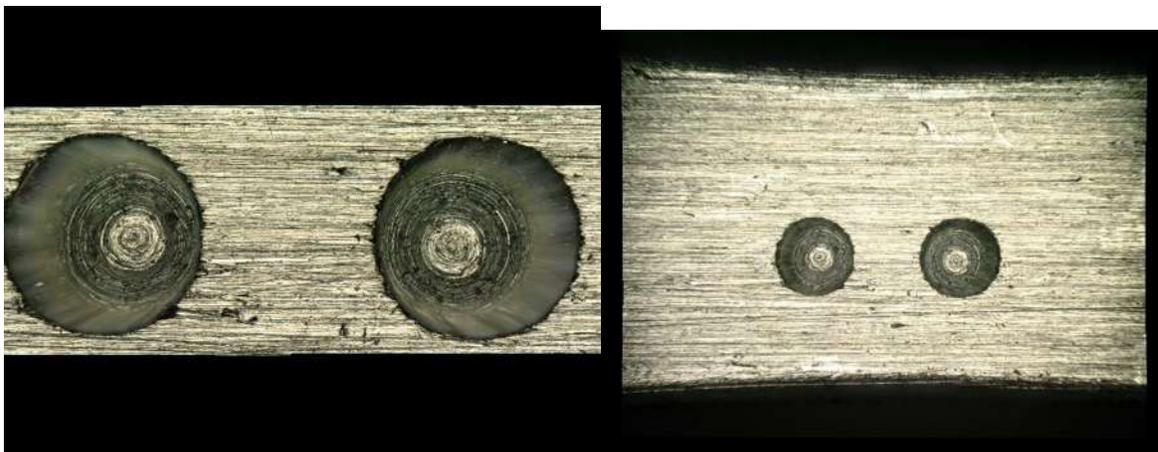


Figura 4.36 Imagen de microscopio óptico probeta C7

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

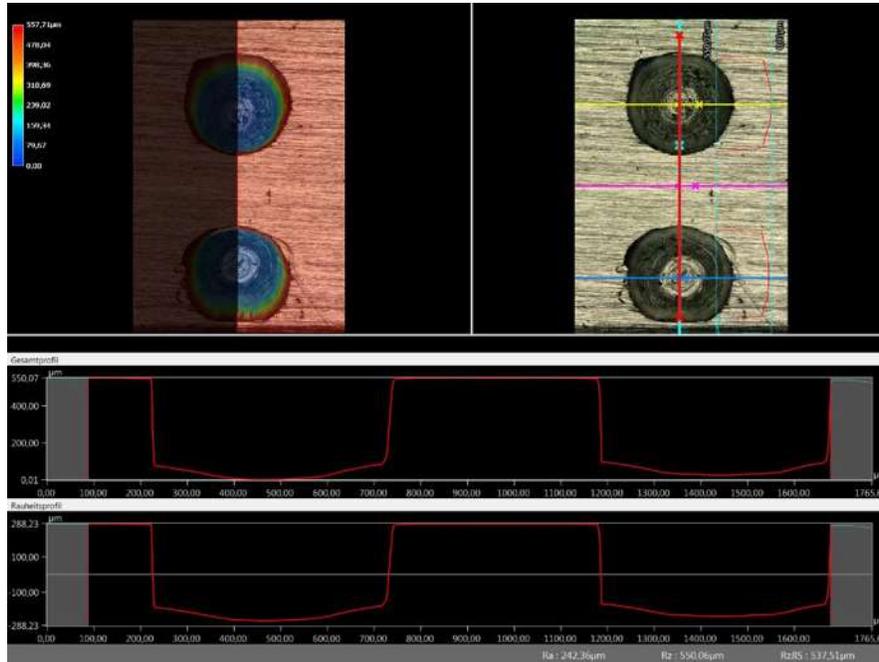


Figura 4.37 Imagen de microscopio óptico probeta B7

En otro análisis sobre las probetas B y C (con dos picaduras transversales y longitudinales respectivamente) se observó que alrededor de las picaduras la rugosidad incrementó sin embargo no en las mismas zonas, ello solo fue posible medirlo con el microscopio en las observaciones tridimensionales.

Para las probetas A, donde fueron apareciendo grietas desde muy bajo número de ciclos, se observó que aun que la densidad de aparición de grietas fue alta, dichas grietas no crecieron significativamente con el número de ciclos durante las pruebas de fatiga convencional, que se asociaban principalmente con el acabado superficial del material, y con algunos defectos superficiales del material.

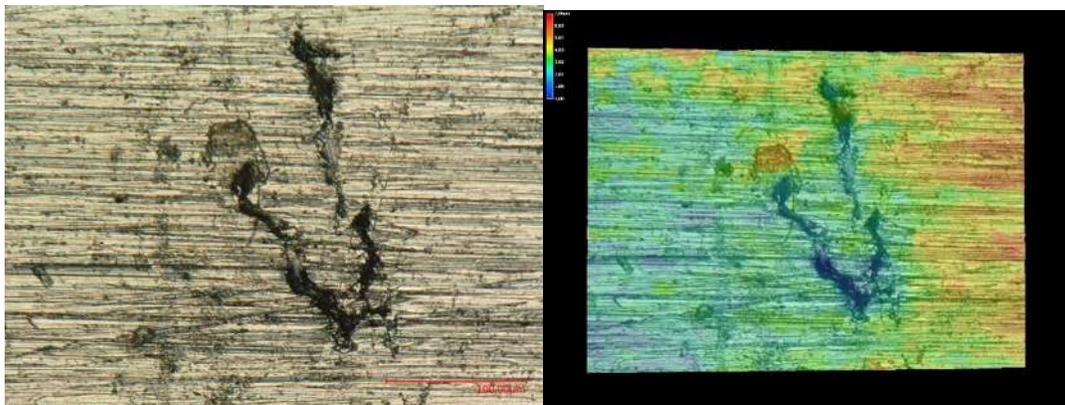


Figura 4.38 Imagen de microscopio óptico probeta A5

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

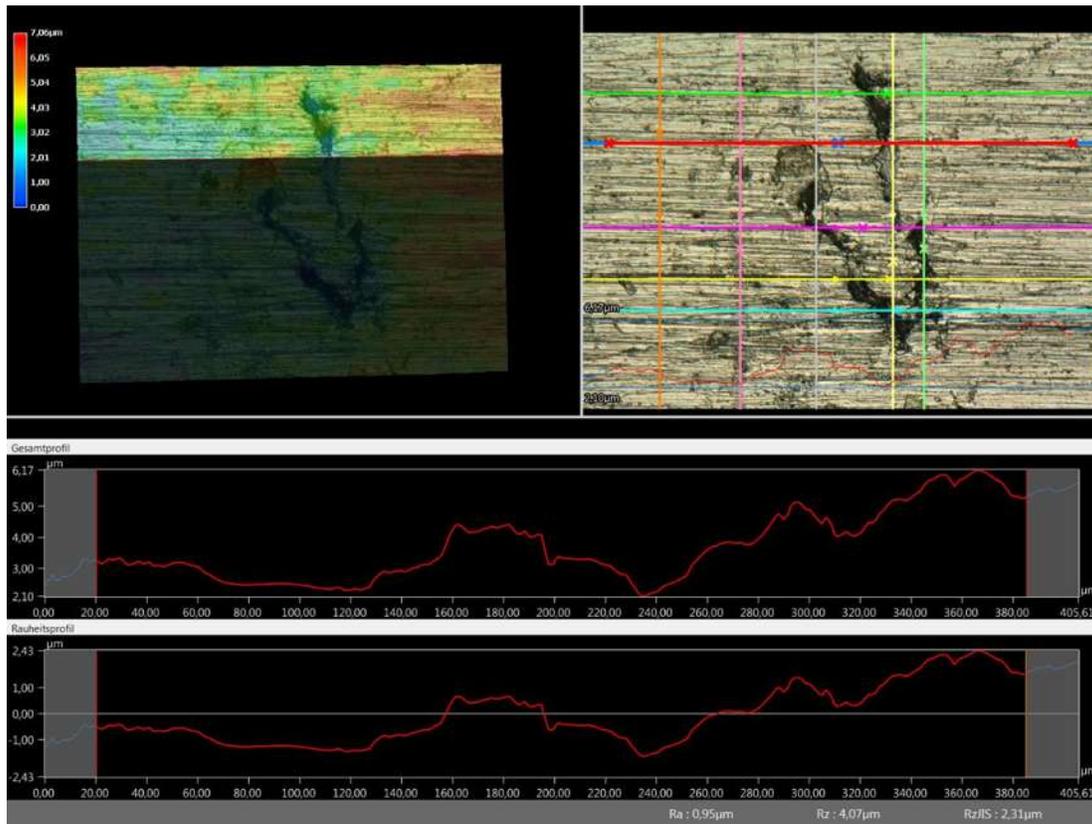


Figura 4.39 Imagen de microscopio óptico probeta A5

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Retomando el objetivo planteado en esta tesis, se concluye que el objetivo general fue cumplido, se detalló el estudio del efecto de los parámetros geométricos de las picaduras sobre la resistencia en fatiga convencional y ultrasónica de la aleación de aluminio 7075-T6. Se han obtenido resultados concluyentes de las pruebas de fatiga ultrasónica y fatiga convencional en el material base AA 7075-T6, para obtener el comportamiento del material en condiciones de fatiga, así como se probó mediante diferentes técnicas la hipótesis donde se relacionaron propiedades geométricas de picaduras artificiales con el aumento en el factor de concentración de esfuerzos que afecta directa y relevantemente la vida en fatiga del material.

La orientación de las picaduras con respecto a la carga aplicada, juega un papel importante en la vida de fatiga del material, la muestra con dos picaduras transversales se fractura por debajo de millones de ciclos, mientras que los especímenes con picaduras longitudinales resisten 10^7 ciclos, dicho comportamiento fue predicho correctamente desde las simulaciones numéricas, validado sistemáticamente con las pruebas mecánicas, tanto las de fatiga ultrasónica como las de fatiga convencional, demostrando que los resultados numéricos anteriores, que muestran que la proximidad de dos picaduras de perforación hemisféricas transversales, en la sección del cuello de la muestra, es crítica para el aumento del factor de concentración de estrés K_t .

Las imágenes del microscopio revelan que la deformación plástica aparece en la zona elástica en la etapa inicial de la prueba, esto es alrededor de 2×10^5 ciclos **Figura 0.1, Figura 0.2, Figura 3.**, asociamos el comportamiento con micro plasticidad debida a la tensión y a la compresión según sea la forma en la que actúa la carga de acuerdo a la orientación de las picaduras, relacionado a las grietas podemos ver la iniciación de la fisura frecuentemente asociadas con una o ambas picaduras y en el fondo de la picadura, como se detalla en los resultados obtenidos.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

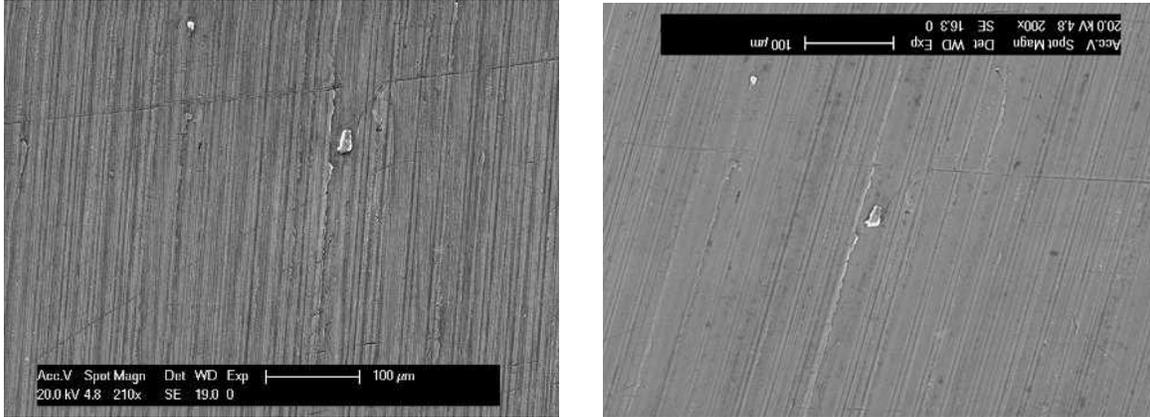


Figura 0.1 Espécimen A5 a) Material Base 0 Ciclos b) Material Base después de 10^7 Ciclos

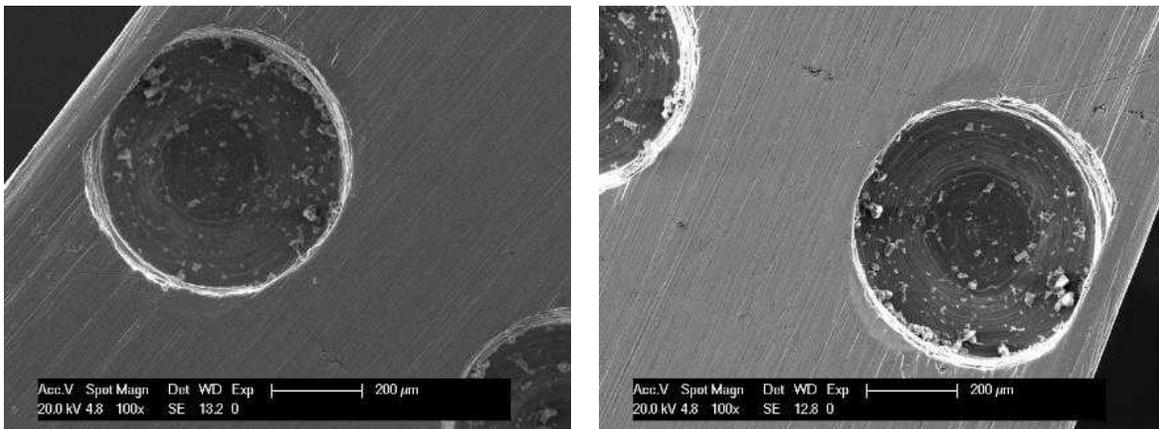


Figura 0.2 Espécimen B7- a) Picaduras Transversales 0 Ciclos, b) Picaduras Transversales después de 200000 Ciclos

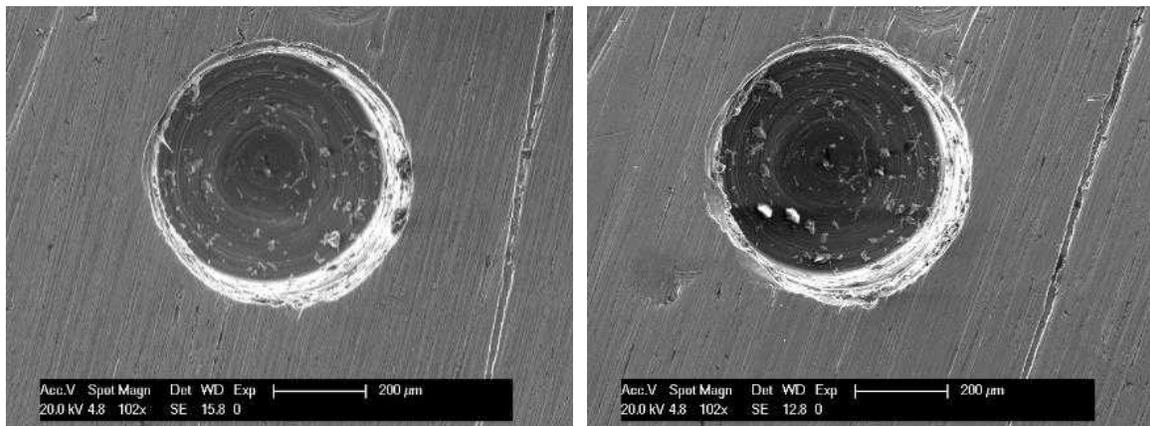


Figura 3 a) Picaduras Longitudinales 0 Ciclos b) Picaduras Longitudinales después de 10^7 Ciclos

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS INDUSTRIALES

El factor de concentración de esfuerzos K_t , juega un papel principal en la resistencia a la fatiga en las probetas con dos picaduras artificiales; los valores de K_t se obtuvieron mediante simulación numérica, el factor de intensidad de esfuerzos se obtuvo mediante simulación numérica utilizando el método de correlación de esfuerzos, desde el inicio de la fisura hasta la fractura.

El efecto de la concentración de esfuerzos usando perfiles de picadura cilíndrica comparada con un perfil semiesférico presentan variaciones de aproximadamente 3%, de las simulaciones numéricas podemos concluir que el factor prioritario para la aparición y propagación de grieta, es primeramente la proximidad de las picaduras así como su orientación con respecto a la carga, dejando en último lugar al factor de la geometría de la picadura y su tendencia a esférica, todo lo anterior planteado fue completamente probado tanto por las simulaciones numéricas como por las imágenes por técnicas de microscopía de las probetas, la proximidad crítica será el factor más desafiante para abordar el tema del daño superficial del material pues, representa un permanente análisis del material bajo ambientes corrosivos,

Este documento demuestra que la fatiga de bajos ciclos y la fatiga de altos ciclos son técnicas complementarias que permiten la comprensión completa del comportamiento en la fatiga de un material, en lugar de tomarse como técnicas excluyentes una de la otra,

El uso de fatiga de bajo ciclo permite el análisis del material en la zona elástica, mientras que la técnica de fatiga ultrasónica permite completar rápidamente un gran número de ciclos de prueba y alcanzar el punto de ruptura del material.

Sin embargo se deben realizar investigaciones físicas y numéricas adicionales para evaluar la efectos de las picaduras en las superficies corroídas, en particular los efectos de interacción de las picaduras cercanas asociadas con la iniciación y propagación de la grieta.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- [1] A. P. Borelli and R. J. Schmidt, *Advanced Mechanics of Materials*, no. January. 2003.
- [2] L. Campbell, Y. Shen, H. Zhou, and M. Haapasalo, “Effect of Fatigue on Torsional Failure of Nickel-Titanium Controlled Memory Instruments,” *J. Endod.*, pp. 1–4, 2014, doi: 10.1016/j.joen.2013.12.035.
- [3] J. L. A. Ambriz, G. M. D. Almaraz, C. Julio, V. Juárez, E. C. Gomez, and I. F. Zuñiga, “DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TORSION FATIGUE MACHINE : TORSION FATIGUE TESTS ON TWO INDUSTRIAL ALUMINUM ALLOYS,” ISSN 1454-2358, vol. 79, 2017.
- [4] R. P. Mora, “École doctorale n ° 432 : Sciences et Métiers de l ’ ingénieur Doctorat ParisTech CIATEQ , A . C . (Centro (C de Tecnología Avanzada) Avanzada l ’ École Nationale Supérieure d ’ Arts et Métiers Study of the fatigue strength in the gigacycle regime,” 2010.
- [5] B. Pyttel, D. Schwerdt, and C. Berger, “Very high cycle fatigue - Is there a fatigue limit?,” *Int. J. Fatigue*, vol. 33, no. 1, pp. 49–58, 2011, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2010.05.009.
- [6] H. Mayer, M. Fitzka, and R. Schuller, “Constant and variable amplitude ultrasonic fatigue of 2024-T351 aluminium alloy at different load ratios.,” *Ultrasonics*, vol. 53, no. 8, pp. 1425–32, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.ultras.2013.02.012.
- [7] I. Marines, X. Bin, and C. Bathias, “An understanding of very high cycle fatigue of metals,” *Int. J. Fatigue*, vol. 25, no. 9–11, pp. 1101–1107, 2003, doi: 10.1016/S0142-1123(03)00147-6.
- [8] S. E. Stanzl-Tschegg and H. Mayer, “Fatigue and fatigue crack growth of aluminium alloys at very high numbers of cycles,” *Int. J. Fatigue*, vol. 23, pp. 231–237, 2001, doi: 10.1016/S0142-1123(01)00167-0.
- [9] H. Mayer, “Ultrasonic torsion and tension–compression fatigue testing: Measuring principles and investigations on 2024-T351 aluminium alloy,” *Int. J. Fatigue*, vol. 28, no. 11, pp. 1446–1455, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2005.05.020.
- [10] I. F. Zuñiga Tello, G. M. Domínguez Almaraz, M. G. Tapia, and J. L. Avila Ambriz, “Controlled pre-corrosion attack and ultrasonic fatigue endurance of titanium alloy Ti–6Al–4V,” *Lat. Am. J. Solids Struct.*, vol. 14, no. 3, 2017, doi: 10.1590/1679-78253113.
- [11] J. Liu, X. Gao, L. Zhang, and J. Zhang, “A study of fatigue damage evolution on pulsed Nd : YAG Ti6Al4V laser welded joints,” *Eng. Fract. Mech.*, 2014, doi: 10.1016/j.engfracmech.2014.01.005.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

- [12] B. Lin, C. Lupton, S. Spanrad, J. Schofield, and J. Tong, "Fatigue crack growth in laser-shock-peened Ti-6Al-4V aerofoil specimens due to foreign object damage," *Int. J. Fatigue*, vol. 59, pp. 23-33, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2013.10.001.
- [13] R. Gaddam, R. Pederson, M. Hörnqvist, and M.-L. Antti, "Fatigue crack growth behaviour of forged Ti-6Al-4V in gaseous hydrogen," *Corros. Sci.*, vol. 78, pp. 378-383, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.corsci.2013.08.009.
- [14] A. Chemin, D. Spinelli, W. Bose Filho, and C. Ruchert, "Corrosion fatigue crack growth of 7475 T7351 aluminum alloy under flight simulation loading," *Procedia Eng.*, vol. 101, no. C, pp. 85-92, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.02.012.
- [15] S. I. Rokhlin, J.-Y. Kim, H. Nagy, and B. Zoofan, "Effect of pitting corrosion on fatigue crack initiation and fatigue life," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 62, no. 4-5, pp. 425-444, 1999, doi: 10.1016/S0013-7944(98)00101-5.
- [16] F. Cavalieri, C. Luengo, and A. Cardona, "Análisis de fatiga en muy alto número de ciclos," *Fatigue Anal. high cycles numbers*, vol. 15, no. 1, pp. 3-12, 2011.
- [17] G. S. Chen, K.-C. Wan, M. Gao, R. P. Wei, and T. H. Flournoy, "Transition from pitting to fatigue crack growth—modeling of corrosion fatigue crack nucleation in a 2024-T3 aluminum alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 219, no. 1-2, pp. 126-132, 1996, doi: 10.1016/S0921-5093(96)10414-7.
- [18] C. Bathias, "Piezoelectric fatigue testing machines and devices," *Int. J. Fatigue*, vol. 28, no. 11, pp. 1438-1445, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2005.09.020.
- [19] S. Heinz, F. Balle, G. Wagner, and 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, no. 8, pp. 1433-1440, doi: 10.1016/j.ultras.2013.03.002.
- [20] S. Stanzl-tschegg, "International Journal of Fatigue Fatigue crack growth and thresholds at ultrasonic frequencies," *Int. J. Fatigue*, vol. 28, pp. 1456-1464, 2006, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2005.06.058.
- [21] S. S. Rao, *Vibraciones mecánicas*. 2012.
- [22] I. Altenberger, R. K. Nalla, Y. Sano, L. Wagner, and R. O. Ritchie, "On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti - 6Al - 4V at elevated temperatures up to 550 ° C," *Int. J. Fatigue*, vol. 44, pp. 292-302, 2012, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2012.03.008.
- [23] P. Ridge, "Corrosion Resistant Materials," no. December, p. 1994, 1994.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

- [24] H. Overview et al., *Corrosion for Everybody*, vol. 53, no. 9. 2013.
- [25] M. Freitas, L. Reis, V. Anes, D. Montalvão, A. M. Ribeiro, and M. Fonte, “Design and assembly of an ultrasonic fatigue testing machine,” *An. Mecánica la Fract.*, vol. 1, no. 2011, pp. 335–340, 1965.
- [26] X. Nie, W. He, L. Zhou, Q. Li, and X. Wang, “Materials Science & Engineering A Experiment investigation of laser shock peening on TC6 titanium alloy to improve high cycle fatigue performance,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 594, no. 2014, pp. 161–167, 2013, doi: 10.1016/j.msea.2013.11.073.
- [27] M. Ouarabi, R. P. Mora, and C. Bathias, “Very high cycle fatigue strength and crack growth of thin steel sheets,” vol. 36, pp. 112–118, 2016, doi: 10.3221/IGF-ESIS.36.11.
- [28] Q. Wang, M. K. Khan, and C. Bathias, “Current understanding of ultra-high cycle fatigue,” *Theor. Appl. Mech. Lett.*, vol. 2, no. 3, p. 031002, 2012, doi: 10.1063/2.1203102.
- [29] S. X. Li, P. Y. Zhang, and S. R. Yu, “Experimental study on very high cycle fatigue of martensitic steel of 2Cr13 under corrosive environment,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 37, no. 10, pp. 1146–1152, 2014, doi: 10.1111/ffe.12197.
- [30] G. M. D. Almaraz, E. C. Gomez, F. M. Z. A, and E. R. M. Mena, “Ultrasonic Fatigue Testing on Polymeric material ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene),” *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 3, no. 11, pp. 404–409, 2013.
- [31] S. A. Barter and L. Molent, “Fatigue cracking from a corrosion pit in an aircraft bulkhead,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 39, 2014, doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.01.020.
- [32] G. M. Domínguez Almaraz, E. C. Gómez, J. C. Verduzco Juárez, and J. L. Avila Ambriz, “Crack initiation and propagation on the polymeric material ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), under ultrasonic fatigue testing,” *Frat. ed Integrita Strutt.*, vol. 9, no. 34, pp. 498–506, 2015, doi: 10.3221/IGF-ESIS.34.55.
- [33] R. Baptista, L. Reis, J. F. A. Madeira, and M. Freitas, “ScienceDirect ScienceDirect Numerical study of fatigue crack initiation and propagation on optimally designed cruciform specimens Thermo-mechanical modeling of a high pressure turbine blade of an airplane gas turbine engine,” *Struct. Integr. Procedia*, 2016, doi: 10.1016/j.prostr.2016.02.014.
- [34] J. Everaerts, B. Verlinden, and M. Wevers, “The influence of the alpha grain size on internal fatigue crack initiation in drawn Ti-6Al-4V wires,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 2, pp. 1055–1062, 2016, doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.135.

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

- [35] S. I. Rokhlin, N. E. Program, and E. Joining, “in-Situ Ultrasonic Characterization of Fatigue Crack Initiation and Evolution From Surface Damage : Crack Closure Effect,” ICF10, Honolulu, Hawaii - 2001, pp. 2–7, 2001.
- [36] M. Meischel, S. E. Stanzl-Tschegg, A. Arcari, N. Iyyer, N. Apetre, and N. Phan, “Constant and variable-amplitude loading of aluminum alloy 7075 in the VHCF regime,” *Procedia Eng.*, vol. 101, no. C, pp. 501–508, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.02.060.
- [37] D. R. Askeland, “The Science and Engineering of Materials,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 212, pp. 186–187, 1996, doi: 10.1016/j.msea.2008.04.012.
- [38] M. P. H. Gerhardus H. Koch and N. G. T. Y. P. V. J. H. P. Brongers, “Corrosion costs and preventive strategies in the United States,” *Summ. Shute. Inst.*, pp. 1–12, 2002, doi: FHWA-RD-01-156.
- [39] S. J. Kim and J. Y. Ko, “Electrochemical properties of Al and Al alloys relevant to corrosion protection in seawater environments,” *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 23, no. 5, pp. 847–853, 2006, doi: 10.1007/BF02705939.
- [40] K. K. Sankaran, R. Perez, and K. V. Jata, “Effects of pitting corrosion on the fatigue behavior of aluminum alloy 7075-T6: modeling and experimental studies,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 297, no. 1–2, pp. 223–229, 2001, doi: 10.1016/S0921-5093(00)01216-8.
- [41] J. Liu, X.-L. Gao, L.-J. Zhang, and J.-X. Zhang, “A study of fatigue damage evolution on pulsed Nd:YAG Ti6Al4V laser welded joints,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 117, pp. 84–93, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.engfracmech.2014.01.005.
- [42] J. W. Dini, *Electrodeposition: The Materials Science of Coatings and Substrates*. 1993.
- [43] a. Shekhter, B. R. Crawford, C. Loader, and W. Hu, “The effect of pitting corrosion on the safe-life prediction of the Royal Australian Air Force P-3C Orion aircraft,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 55, pp. 193–207, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.05.020.
- [44] L. A. Godoy, A. D. Boccardo, F. J. Rodríguez, and P. M. Dardati, “Stress concentration around perforations produced by corrosion in steel storage tanks,” *Lat. Am. J. Solids Struct.*, vol. 11, no. 10, pp. 1830–1845, 2014.
- [45] F. King, *Aluminum and its Alloys*, 1st Editio. Ellis Horwood, Chichester, 1987.
- [46] Q. Y. Wang, N. Kawagoishi, and Q. Chen, “Effect of pitting corrosion on very high cycle fatigue behavior,” *Scr. Mater.*, vol. 49, no. 7, pp. 711–716, 2003, doi: 10.1016/S1359-6462(03)00365-8.
- [47] I.-W. Huang, B. L. Hurley, F. Yang, and R. G. Buchheit, “Dependence on Temperature, pH, and Cl⁻ in the Uniform Corrosion of Aluminum Alloys 2024-T3, 6061-T6, and 7075-T6,” *Electrochim. Acta*, vol. 199, pp. 242–253, 2016, doi:

ESTUDIO DEL EFECTO DE PRE-CORROSIÓN CONTROLADO SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE
ESFUERZOS Y RESISTENCIA EN FATIGA DE ALGUNAS ALEACIONES METÁLICAS
INDUSTRIALES

10.1016/j.electacta.2016.03.125.

- [48] P. S. Pao, S. J. Gill, and C. R. Feng, "On fatigue crack initiation from corrosion pits in 7075-T7351 aluminum alloy," *Scr. Mater.*, vol. 43, no. 5, pp. 391–396, 2000, doi: 10.1016/S1359-6462(00)00434-6.
- [49] H. Wang, C. Ning, Y. Huang, Z. Cao, X. Chen, and W. Zhang, "Improvement of abrasion resistance in artificial seawater and corrosion resistance in NaCl solution of 7075 aluminium alloy processed by laser shock peening," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 90, no. October 2016, pp. 179–185, 2017, doi: 10.1016/j.optlaseng.2016.10.016.
- [50] A. M. M. Toledano, M. A. Arenas, J. J. Galán, L. Ramirez, S. M. Borja, A. Conde, "Resistencia a Fatiga De La Aleación De Aluminio 7075-T6 En Función Del Tipo De," *ResearchGate*, no. February 2016.
- [51] M. Perić, S. Nižetić, I. Garašić, N. Gubeljak, T. Vuherer, and Z. Tonković, "Numerical calculation and experimental measurement of temperatures and welding residual stresses in a thick-walled T-joint structure," *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2020, doi: 10.1007/s10973-019-09231-3.
- [52] I. F. Zuñiga Tello, G. M. Domínguez Almaraz, V. López Garza, and M. Guzmán Tapia, "Numerical investigation of the stress concentration on 7075-T651 aluminum alloy with one or two hemispherical pits under uniaxial or biaxial loading," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 131, 2019, doi: 10.1016/j.advengsoft.2018.09.013.
- [53] W. TIAN, S. LI, J. LIU, M. YU, and Y. DU, "Preparation of bimodal grain size 7075 aviation aluminum alloys and their corrosion properties," *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 30, no. 5, pp. 1777–1788, 2017, doi: 10.1016/j.cja.2017.06.001.