

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO DE FATIGA PARA ACEROS AVANZADOS SOLDADOS  
MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA LÁSER**

**POR**

**GENARO ALBERTO FLORES PADILLA**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA  
EN TECNOLOGÍA DE LA SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO COAHUILA, MÉXICO A 20 DE JULIO DE 2019**

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ESTUDIO DE FATIGA PARA ACEROS AVANZADOS SOLDADOS  
MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA LÁSER**

**POR**

**GENARO ALBERTO FLORES PADILLA**

**MONOGRAFÍA**

**EN OPCIÓN COMO ESPECIALISTA EN TECNOLOGÍA DE LA  
SOLDADURA INDUSTRIAL**

**SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO A 20 DE JULIO DE 2019**

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Monografía **“ESTUDIO DE FATIGA PARA ACEROS AVANZADOS SOLDADOS MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA LÁSER”**, realizada por el alumno **(a) GENARO ALBERTO FLORES PADILLA con número de matrícula 18ES-238** sea aceptada para su defensa como **Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial**.

El Comité Tutorial

---

**Dr. Melvyn Álvarez  
Vera**  
Tutor Académico

---

**Dr. Héctor Manuel  
Hernández García**  
Asesor

---

**Dra. Rita Muñoz  
Arroyo**  
Asesor

---

Vo.Bo.  
**Dr. Pedro Pérez  
Villanueva**  
Coordinador de  
Posgrado

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de especialización del alumno **GENARO ALBERTO FLORES PADILLA**, una vez leída y revisada la Monografía titulada “**ESTUDIO DE FATIGA PARA ACEROS AVANZADOS SOLDADOS MEDIANTE EL PROCESO DE SOLDADURA LÁSER**”, aceptamos que la referida monografía revisada y corregida, sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Especialista en Tecnología de la Soldadura Industrial durante la defensa de la monografía correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente el 20 de julio del 2019.

---

**Dr. Mauricio Alberto Garza**

**Castañón.**

Presidente

---

**Dra. Gladys Yerania Pérez**

**Medina.**

Secretario

---

**Dr. Melvyn Álvarez Vera**

Vocal

## Dedicatoria

Este trabajo está dedicado en primera instancia a Dios, que es el autor de todas las obras y a quien debo mis logros y mis ambiciones.

Dios ha puesto en mi camino personas que han colaborado de manera directa e indirecta en la realización de este trabajo. Es por esto que también dedico el presente a quienes me alentaron con un consejo, a quienes me guiaron y aclararon dudas, a quienes hicieron amenos los momentos que parecían tediosos y quien planteo retos que parecían inalcanzables para la culminación de este proyecto.

“Vive como si fueras a morir mañana. Aprende como si fueras a vivir siempre”

Gandhi

## Agradecimientos

### **A Dios:**

Por ser mi guía a lo largo de mi carrera y por el favor de la salud con la que he contado desde el inicio y hasta el final de los proyectos que he emprendido.

### **A COMIMSA:**

Por abrir las puertas de sus instalaciones, y formar un ambiente de aprendizaje y desarrollo propicios para la culminación de mi estudio de postgrado.

### **A CONACYT:**

Porqué al brindar apoyo económico y servicio médico, he logrado realizar mis estudios de tiempo completo y concluir este trabajo de investigación

### **A mis maestros:**

Por la entrega, compromiso y pasión con la que realizan su tarea de guiar por el camino del aprendizaje, por la enseñanza que ha hecho posible terminar este estudio de postgrado.

**A mi familia:**

Por brindar siempre su apoyo incondicional, por alentar mis sueños y mis inquietudes y por motivar mi espíritu en momentos difíciles. Sin ellos jamás tendría el hambre y el arrojo de seguir mis sueños

**A mis amigos y compañeros:**

Por hacer de los momentos de estudio, espacio para la discusión y aprendizaje, por colaborar en tareas y demás deberes que llevan a el desarrollo profesional e interpersonal, por la aportación individual y voluntaria en cada una de las actividades escolares, que hacen crecer como persona y como estudiante.

# INDICE

SÍNTESIS .....	1
1. INTRODUCCION.....	2
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Planteamiento del problema .....	3
1.3 Preguntas de investigación .....	3
1.4 Objetivos generales y específicos .....	3
1.4.1 Objetivo general.....	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
1.5 Justificación del proyecto .....	4
1.6 Aportación científica y tecnológica.....	5
1.7 Alcance y delimitaciones.....	5
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE .....	6
2.1 Marco teórico.....	6
2.1.1 Clasificación de los aceros.....	6
Aceros al Carbono .....	6
Aceros aleados .....	7
Aceros de alta resistencia (HSS).....	7
Aceros endurecidos en horno (BH).....	8
Aceros de baja aleación y alta resistencia (HSLA).....	8

Aceros avanzados de alta resistencia AHSS .....	9
Aceros de doble fase (DP) .....	10
Aceros de fase compleja (CP).....	10
Aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP).....	10
Aceros martensíticos (MS) .....	11
Aceros de plasticidad inducida por maclado (TWIP) .....	11
Aceros inoxidable austeníticos (AUST SS) .....	11
2.1.2    Procesos de soldadura .....	11
Proceso de soldadura láser .....	12
Tipos de soldadura láser .....	13
Modos de transferencia de energía en soldadura láser .....	14
Parámetros del proceso .....	15
2.1.3    Fatiga de los materiales .....	17
Falla por fatiga en el análisis y el diseño .....	22
Método de deformación-vida .....	22
Método de mecánica de fractura .....	22
Método de esfuerzo-vida.....	23
Crecimiento de Grieta.....	24
Normativa para la fabricación de probetas .....	28
2.2    Estado del arte .....	29
2.2.1    Soldadura .....	29
2.2.2    Soldadura Láser .....	29
2.2.3    Resistencia a la fatiga en soldaduras. ....	34
2.2.4    Fatiga en uniones de soldadura láser .....	43
2.2.5    Crecimiento de grieta.....	54
3.    CASO DE STUDIO .....	57
3.1    Estudio teórico del crecimiento de grieta.....	60
3.2    Crecimiento de grieta en función del número de ciclos .....	62
3.3    Crecimiento de grieta en función del incremento del factor de intensidad de esfuerzos.....	65
3.4    Influencia del valor de grieta inicial en el crecimiento de grieta por fatiga .....	68
4.    CONCLUSIONES.....	72
5.    REFERENCIAS.....	74

ÍNDICE DE TABLAS..... 80  
INDICE DE FIGURAS..... 82

# SÍNTESIS

El presente trabajo se centró en el análisis del estado del arte en distintas fuentes, libros, manuales, normas y artículos de publicación científica, con el fin de profundizar en materia de aceros, sus características y sus propiedades, procesos de soldadura láser. Se realizó desde un punto teórico y se consultó la experiencia de distintos autores en materia del mismo proceso de soldadura. Se analizó el tema de la calidad de la soldadura, y se profundiza en el impacto que esta tiene en la resistencia a la fatiga de uniones soldadas.

Por otra parte, se realizó un caso de estudio teórico acerca del crecimiento de grieta. Se desarrolló la ecuación de París para determinar el crecimiento de grieta y los ciclos para su propagación, bajo condiciones de esfuerzos de flexión. Se integran los valores obtenidos de la ecuación y se evaluó un análisis detallado del comportamiento de la grieta bajo condiciones conocidas y bajo condiciones propuestas.

Los resultados obtenidos indican que el comportamiento del crecimiento de grieta depende en gran medida de factores como tamaño de grieta inicial, carga cíclica a la cual es sometida, y el incremento de intensidad de esfuerzo.

Palabras clave: Soldadura láser, fatiga, aceros, crecimiento de grieta.

Campo de estudio: Estudio de fatiga en uniones soldadas

# 1. INTRODUCCION

## 1.1 Antecedentes

Para la industria en general, el ahorro en peso de los materiales utilizados y el aseguramiento de las propiedades mecánicas de los mismos, son características importantes que impulsan el desafío de mejorar constantemente.

Los aceros Avanzados fueron desarrollados principalmente para sustituir a los aceros al carbono. Sus propiedades como alta resistencia, excelente ductilidad, buena soldabilidad y excelente resistencia al impacto a baja temperatura los ha hecho indispensables para diversas aplicaciones en la industria de la construcción, naval, petroquímica y automotriz [1].

Muchos de los elementos estructurales están contruidos mediante procesos de soldadura de aceros. Estas estructuras, dependiendo de su uso y aplicación específica, están sometidas a cargas cíclicas, que al aplicarse de manera constante durante periodos prolongados de tiempo llegan a ocasionar grietas en el material, las cuales normalmente se propagan perpendicularmente a la dirección del esfuerzo, de esta manera se da la fractura por fatiga.

## 1.2 Planteamiento del problema

Durante los procesos de soldadura el calor de entrada modifica las características microestructurales de las uniones soldadas en la zona afectada por el calor (ZAC), y esto genera en algunos casos un deterioro de las propiedades mecánicas de la junta. La resistencia de las uniones soldadas sometida a cargas cíclicas se ve afectada por las condiciones y características del proceso de soldadura y el tipo de unión empleado.

Este trabajo se centra en el análisis de literatura en relación con el comportamiento frente a esfuerzos de fatiga de aceros avanzados, soldados mediante soldadura láser.

## 1.3 Preguntas de investigación

1. ¿Qué modelo describe el comportamiento de fatiga en los aceros?
2. ¿Cómo se afecta la resistencia a la fatiga, del acero cuando es sometido a un proceso de unión por soldadura láser?
3. En base al estado del arte, ¿Cuáles son los efectos de los parámetros de soldadura láser en aceros?
4. En base al estado del arte, ¿microestructuralmente, como se comportan los aceros avanzados soldados con soldadura láser en las fases de inicio, crecimiento de grieta, y falla por fatiga?
5. ¿Cómo se comporta una grieta en un acero al ser sometida a cargas cíclicas de flexión?

## 1.4 Objetivos generales y específicos

### 1.4.1 Objetivo general

Elaborar un documento, basado en el análisis del estado del arte y en un caso de estudio, aplicado al entendimiento del modelo de crecimiento de grieta en uniones de aceros avanzados soldadas mediante procesos de soldadura láser.

### 1.4.2 Objetivos específicos

1. Estudiar, en el estado del arte, el fenómeno de fatiga y el crecimiento de grieta descrito en el modelo propuesto por París.
2. Comprobar mediante el análisis del estado del arte, la afectación que los aceros soldados por el proceso láser, presentan ante cargas cíclicas repetidas.
3. Determinar mediante el estado del arte, el grado de afectación que tienen los parámetros de la soldadura láser en las propiedades mecánicas de los aceros.
4. Analizar en base a la revisión del estado del arte, los cambios microestructurales que la soldadura láser produce en los aceros avanzados.
5. Determinar mediante un caso de estudio, la resistencia a la fatiga de un acero, y explicar cómo se comporta el crecimiento de grieta durante cada una de las etapas del crecimiento de grieta.

## 1.5 Justificación del proyecto

En la actualidad se busca desarrollar conocimiento científico y tecnológico con el fin de dar solución a la demanda de componentes soldados más ligeros y con buenas características mecánicas.

Los componentes soldados están sometidos a cargas cíclicas que determinan su vida útil.

El estudio de las condiciones en que los aceros fallan por fatiga es muy amplio, sin embargo, una parte importante de este fenómeno, el crecimiento de grieta, es útil para predecir los ciclos de carga que resistirá cierto material bajo determinadas condiciones.

Este trabajo recopila información relacionada con el comportamiento ante condiciones de fatiga en uniones de acero soldadas y un caso de estudio el comportamiento del crecimiento de grieta en una pieza de acero.

## 1.6 Aportación científica y tecnológica

Aportación científica:

Este trabajo recopila información teórica y práctica de investigaciones relacionadas con la resistencia a la fatiga en aceros soldados mediante el proceso láser.

Aportación tecnológica.

Este trabajo incluye una explicación de las variables que influyen en el proceso de soldadura láser y su relación con defectos en la calidad de la soldadura.

## 1.7 Alcance y delimitaciones

El alcance de este estudio es la realización de una monografía de nivel de especialidad, la cual contiene la recopilación del estado del arte referente a la resistencia en fatiga de uniones de acero soldadas por el proceso láser y un caso de estudio teórico del crecimiento de grieta en un acero sometido a cargas de flexión.

Las conclusiones mostradas en este documento tienen su fundamento en el estudio del arte y en el análisis de los resultados obtenidos en el caso de estudio teórico.

## 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Marco teórico.

#### 2.1.1 Clasificación de los aceros

##### Aceros al Carbono

Los aceros al carbono, según ASM, son aquellos que no tienen un contenido mínimo o especificado de sus elementos aleantes como, cloro, níquel, molibdeno, vanadio, cobalto, niobio, titanio, aluminio Zirconio o cualquier elemento agregado en la composición química para obtener un determinado efecto en la aleación deseada. Los aceros al carbono tienen especificaciones acerca del contenido de elementos como cobre, que debe estar entre 0.4 y 0.60, el contenido de manganeso debe ser menor a 1.65%, y e del silicio debe ser o.60% como máximo [2].

Los aceros al carbono puedes clasificarse en distintos grados según el contenido de carbono.

**Tabla 2.1 Clasificación de los aceros al carbono [2].**

<b>Grado de acero</b>	<b>Contenido de Carbono</b>
Bajo carbono	Contenido máximo 0.15%
Medio- Bajo carbono	Contenido máximo mayor que 0.15 y menor que 0.23%
Medio-Alto carbono	Contenido máximo mayor que 0.23 y menor que 0.44%
Alto carbono	Contenido máximo mayor a 0.44%

## Aceros aleados

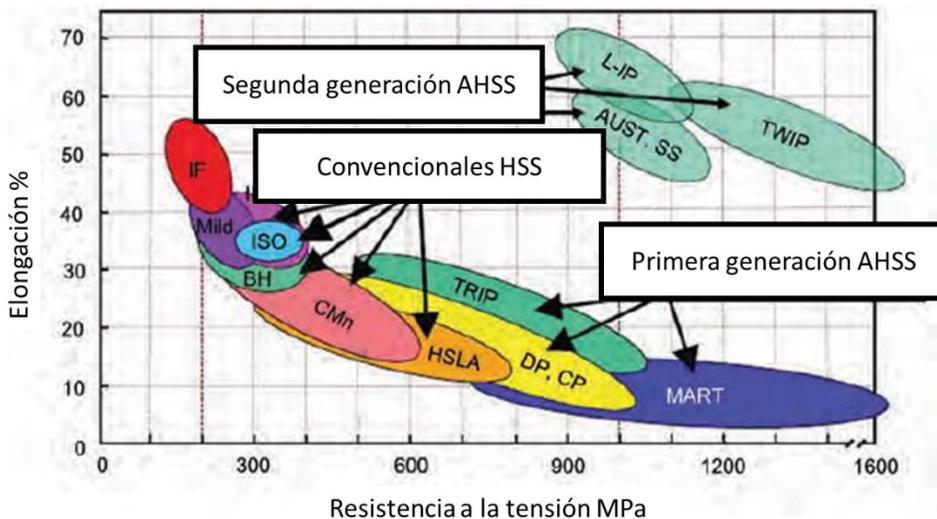
Son aceros al carbón a los que se les ha añadido ciertos elementos químicos que permiten mejorar las propiedades del metal en aplicaciones específicas. Dentro de los elementos de aleación se incluyen manganeso, silicio, cobre, azufre, fósforo, níquel, selenio, molibdeno vanadio y cromo en cantidades menores al 5% en peso. Las propiedades mecánicas de los aceros aleados como resistencia, dureza, resistencia a la fluencia, y resistencia a la fatiga son mayores que en los aceros al carbono. Para mejorar estas propiedades en los aceros es necesario el uso de tratamientos térmicos [3].

## Aceros de alta resistencia (HSS)

Dentro de los aceros convencionales de alta resistencia se encuentran los aceros al carbono –manganeso, aceros endurecidos en horno, los aceros de alta resistencia libres de intersticios, y los aceros de alta resistencia baja aleación.

Los aceros de alta resistencia poseen un límite elástico entre 255 y 550 MPa, y esfuerzo último a la tensión entre 270 y 700 MPa [4].

En la figura 2.1 se muestra la relación elongación-resistencia para aceros HSS convencionales, AHSS de primera y de segunda generación.



**Figura 2.1 Gráfica Elongación / Resistencia aceros HSS y AHSS [3].**

### Aceros endurecidos en horno (BH)

Por sus siglas en inglés Bake-Hardenable, tienen una buena relación de resistencia y formabilidad. Esta combinación los hace apropiados para aplicaciones de estampado. Adquieren un incremento de elasticidad como resultado del endurecimiento en el trabajo de conformado, y un incremento de la resistencia durante procesos de horneado, como el horneado de pintura después del estampado. El límite elástico de estos aceros se incrementa de los 28 a los 56 MPa después de un tratamiento térmico de baja temperatura de 175°C con un tiempo de permanencia de 20 a 30 minutos [3].

### Aceros de baja aleación y alta resistencia (HSLA)

Los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA) se encuentran en una categoría especial de aceros al carbono con elementos de micro aleación, contienen en general hasta un 0.29% en peso de carbono y pequeñas cantidades

de elementos de aleación como, 1.3%Mn, 0.15-0.40% Si, 0.20%Nb o 0.5 %V. Los elementos adicionados en la aleación de los aceros HSLA modifican su microestructura, dan lugar a un refinamiento de grano, endurecimiento por precipitación y la modificación de la temperatura de transformación, esto les confiere propiedades mecánicas como límite elástico de 275MPa hasta 690MPa, y un porcentaje de elongación por encima del 18%. Los aceros HSLA son empleados en una amplia gama de aplicaciones de ingeniería como puentes y edificios en la obra civil, para la fabricación de componentes en la industria automotriz, o en la fabricación para tuberías y ductos empleados para hidráulica o la industria petroquímica [2], [5].

### Aceros avanzados de alta resistencia AHSS

Los aceros avanzados de alta resistencia o AHSS por sus siglas en inglés (Advanced high-strength Steel) son aceros de fase múltiple, compuesta por una matriz ferrítica, e islas de martensita, bainita, austenita, y austenita retenida, presentes en cantidades suficientes para producir ciertas propiedades mecánicas.

Los aceros avanzados de alta resistencia se pueden clasificar en dos categorías, los AHSS de primera y segunda generación. Entre los miembros de la primera generación pueden contarse los aceros de fase doble (DP), de fase compleja (CP), los de plasticidad inducida por transformación (TRIP) y los martensíticos (MS). En la segunda generación están los aceros de plasticidad inducida (TWIP), los aceros ligeros de plasticidad inducida (L-IP) y los aceros inoxidables auténticos (AUST SS)[4].

A continuación, se mencionan las principales características de los aceros AHSS.

## Aceros de doble fase (DP)

Su microestructura está formada por una matriz ferrítica y entre el 20 y 70 % de la fracción de volumen de martensita. El volumen de martensita presente determina el nivel de resistencia de este acero. La estructura doble fase de este acero se produce durante el templado de aceros de bajo carbono al transformar las fases de una región  $\alpha + \gamma$  a una matriz martensítica con islas de ferrita. Estas microestructuras otorgan a los aceros DP alta resistencia por enfriamiento y mejores propiedades para la formabilidad que la que tienen los aceros HSLA. Los aceros DP presentan una resistencia última a la tensión que va de los 600 a los 1000 MPa [4].

## Aceros de fase compleja (CP)

La característica más sobresaliente de los aceros complejos es que cuenta con una fina microestructura de ferrita y una cantidad elevada de el volumen de fases duras presentes formadas por la precipitación de los elementos de aleación, que se diferencian de los aceros TRIP y DP por el contenido de niobio, titanio y vanadio. Los aceros DP poseen una resistencia última a la tensión de 800MPa, además, poseen una alta deformabilidad y una alta tasa de absorción de energía [5]

## Aceros de plasticidad inducida por transformación (TRIP)

Estos aceros contienen dos fases, una matriz de ferrita y bainita y una fase que va desde el 5 al 20 % de austenita retenida, la cual se transforma de manera progresiva a martensita durante la deformación plástica. Esta característica combinación de fases otorga una alta formabilidad por la presencia de austenita, y posteriormente, una alta resistencia después de la transformación a martensita durante el proceso de estampado [4].

## Aceros martensíticos (MS)

Como su nombre lo indica, los ceros MS contienen un alto porcentaje de martensita, el contenido de carbono determina el grado de resistencia del material. Los aceros martensíticos son sujetos a tratamientos térmicos post templado para mejorar su formabilidad, sin embargo, conservan una alta resistencia a la tensión de 1500 MPa. Para incrementar la dureza de los aceros martensíticos, son incorporados además de carbono, elementos como manganeso, silicio, cromo, molibdeno, vanadio y níquel [4]

## Aceros de plasticidad inducida por maclado (TWIP)

Se consideran aleaciones de hierro- manganeso, que contienen de 17 a 20% de manganeso, tienen una estructura completamente austenítica, los aceros TWIP poseen propiedades mecánicas como resistencia, ductilidad y endurecimiento por trabajo, debido a un mecanismo que se le conoce como maclado en adición al deslizamiento de dislocaciones en su red cristalina.

## Aceros inoxidables austeníticos (AUST SS)

Su composición química contiene entre el 16 y 26% de cromo y 8% de níquel, su estructura cristalina es FCC con una fase presente de austenita retenida a temperatura ambiente, estos aceros no pueden ser endurecidos por tratamientos térmicos si no que solo son endurecidos por trabajo en frío, poseen las mejores propiedades anticorrosivas de los aceros inoxidables además de excelentes propiedades mecánicas como alta resistencia a la tensión y excelente ductilidad, su alta resistencia es causada por la transformación de austenita a martensita , durante la deformación plástica del acero como en los aceros TRIP [3].

### 2.1.2 Procesos de soldadura

## Proceso de soldadura láser

La palabra láser viene de sus siglas en inglés (light amplification by simulated emission of radiation).

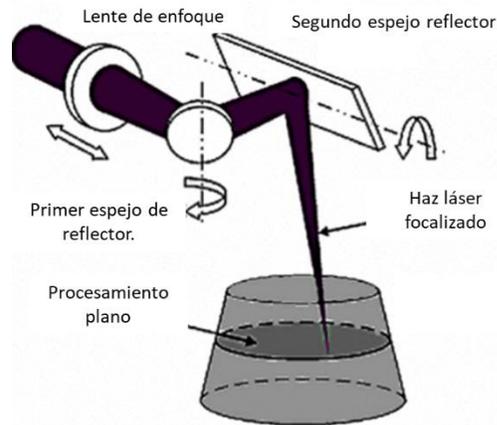
Un láser es un dispositivo que convierte la energía de una fuente primaria (eléctrica, química, térmica, óptica o nuclear) en un haz de radiación electromagnética con una frecuencia específica ultravioleta visible o infrarroja. Esta conversión se da mediante la excitación molecular o atómica que produce una luz monocromática y coherente, o rayo láser [6].

La soldadura con rayo láser LBW es un proceso de soldadura por fusión que produce la unión de materiales por la interacción de un haz coherente láser con la superficie del material, la temperatura aquí se incrementa lo suficiente para fundir el metal y lograr así la coalescencia entre los dos componentes que serán soldados [7].

El rayo láser es dirigido y enfocado por elementos ópticos como espejos y lentes a una pequeña área de la superficie en donde se produce calor no solo para fundir el material sino también para evaporarlo.

En la actualidad la soldadura por láser es aplicada en distintas configuraciones como Nd:YAG, fibra, Disco, o CO<sub>2</sub>, todos estos tipos de soldadura operan de dos maneras, de manera pulsada y de onda continua (CW).

Generalmente los láseres Nd:YAG son de bajo poder, hasta 6kW mientras que el láser de CO<sub>2</sub> es utilizado en tasas de poder altas por arriba de los 40kW.



**Figura 2.2 Esquema de láser focalizado en la pieza de trabajo [8].**

## Tipos de soldadura láser

**Láser de estado sólido.** Los láseres Nd:YAG son los más comunes dentro de los láseres de estado sólido usados para soldadura, los láseres de disco y de fibra también son considerados de estado sólido. Este tipo de láser puede ser utilizado en las dos modalidades pulsado o de onda continua. Nd:YAG pueden producir hasta 750W por cristal aunque la potencia máxima del láser está limitada por la longitud del cristal y la capacidad para disipar el calor de los mismos.

**Láser gas.** El principal tipo de láser gas utilizado es el CO<sub>2</sub>, los láseres de gas son utilizados para producir potencias altas. Para láser de CO<sub>2</sub>, las potencias pueden ser clasificadas como bajas (menores a 1000W), potencia moderada (entre 1 y 5 kW), y altas (mayor a 5 kW). Los láseres de CO<sub>2</sub> pueden operar por las dos modalidades pulsado, con potencias baja a moderada, y de onda continua, que utiliza potencias altas.

**Láser pulsado.** Los láseres pulsados son caracterizados por su elevado grado de enfriamiento, por una zona afectada por calor reducida, y un calor de entrada en el trabajo bajo en general. Este proceso presenta salpicaduras, por lo que la penetración se ve limitada a secciones menores a los 2 mm. El modo pulsado es

ampliamente utilizado en secciones delgadas debido a su capacidad entregar niveles de potencia altos durante periodos muy cortos de tiempo y a la capacidad para controlar el pulso de energía durante el trabajo.

Láser de onda continua (CW). Como su nombre lo indica, los láseres de onda continua producen un rayo de potencia relativamente continua en el tiempo durante este proceso el charco de soldadura permanece fundido de manera estable durante el tiempo de soldadura, lo que permite la reducción de salpicaduras.

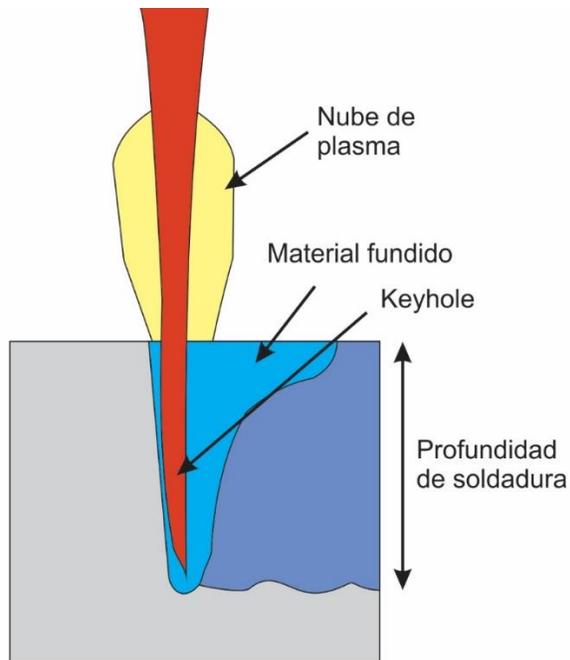
## Modos de transferencia de energía en soldadura láser

### Soldadura por conducción

En la soldadura por conducción la energía es transmitida en la superficie de trabajo mediante los mecanismos de flujo de calor de convección y conducción, este modo es posible obtenerlo con láseres de onda continua o pulsada y con potencias altas o bajas, en este modo de transferencia no existe el desplazamiento de material por efecto del vapor en el charco de soldadura. en cambio, se cuidan aspectos como la óptica de enfoque y la selección de parámetros para obtener una soldadura por conducción sin salpicaduras [8].

### Ojo de cerradura

Ocurre cuando la densidad de potencia del láser está cerca a los  $10^6 \text{W/cm}^2$ , el material se funde y vaporiza en el punto de interacción, fenómenos como la presión de retroceso, y la tensión superficial crean una cavidad profunda cuyas paredes son material fundido, conforme el haz avanza en la trayectoria trazada, en sentido contrario a esta dirección el metal fundido se solidifica en el borde superior formando una zona de soldadura muy estrecha [8].



**Figura 2.3 Esquema de ojo de cerradura de una soldadura láser [8]**

### Parámetros del proceso

Potencia (P). Según el sistema internacional de unidades la potencia es descrita en Watt que es igual a Joule/segundo.

Velocidad de avance (S). Es la velocidad de desplazamiento lineal por la cual la pieza de trabajo se mueve. Está expresada en mm/seg.

Tamaño de punto (D). El diámetro del láser enfocado a la pieza de trabajo. El diámetro depende de la potencia de operación de láser y puede cambiar conforme los elementos ópticos ganan calor.

Densidad de potencia (I). La potencia del rayo láser por unidad de área es comúnmente conocida como densidad de rayo o irradiación. La forma de la zona de fusión es controlada por la densidad de potencia en  $\text{Watt/cm}^2$ . Y se define en la ecuación 1.

$$I = \frac{P}{A}$$

Calor de entrada ( $E'$ ). La capacidad del haz de láser para fundir el material base, depende de la energía entregada ( $P$ ) por unidad por longitud de la soldadura ( $S$ ).

$$E' = \frac{P}{S}$$

Parámetros para el proceso de láser pulsado.

Energía de pulso ( $E$ ). El volumen de la zona fundida por un láser individual pulsado es determinado por el pulso de energía medido en joule.

Duración de pulso ( $t_p$ ). El tiempo de duración de un láser también es conocido como longitud de pulso, una mayor longitud permite una mayor cantidad de energía depositada, sin picos de potencia. Pulsos cortos permiten picos de potencia altos, sin tasas altas de energía depositada en la pieza de trabajo.

Frecuencia de pulso ( $f$ ). La frecuencia de pulsaciones del láser en pulsos por segundo o en Hertz controla junto con la velocidad de soldadura, la cantidad de traslapes en el pulso de soldadura y la potencia media. Para láseres en los que se configura los tiempos de encendido y apagado del pulso, la frecuencia se puede calcular con la ecuación siguiente.

$$f = \frac{1}{t_p + t_o}$$

Potencia pico ( $P_p$ ).

La potencia máxima o potencia pico se establece de varias maneras según el tipo de láser y su construcción, los materiales con alta difusividad térmica requieren una potencia pico alta y una duración de pulso corta para alcanzar la

máxima penetración, mientras que lo opuesto es considerado para un material con baja difusividad térmica. La potencia máxima puede calcularse con la ecuación siguiente.

$$P_p = \frac{E}{t_p}$$

Potencia media (PA). Es la suma de la potencia de todos pulsos de láser promediados, se puede determinar con el producto de la frecuencia de impulso y la energía de impulso de la siguiente manera.

$$P_A = fE$$

[7].

### 2.1.3 Fatiga de los materiales

El descubrimiento del fenómeno de fatiga se dio en Europa en los años 1800 al observar que los componentes estructurales de puentes y de vías del tren sufrían fracturas cuando eran sometidos a cargas repetidas. Con los avances tecnológicos de la época se logró un incremento en el uso de máquinas y construcciones de acero y con ello un aumento en fallas por cargas repetidas o cíclicas. A mediados de siglo XIX A. Wohler propuso un método por el cual las fallas, asociadas con cargas cíclicas, de los componentes fueran mitigadas y en algunos casos eliminadas. Este método dio como resultado preámbulo para el diagrama de estrés-vida y el modelo de prueba para diseño de fatiga.

El requerimiento de máquinas fabricadas con componentes metálicos aumento a finales del siglo XIX y con esto surgió la necesidad de desarrollar procedimientos de diseño a fin de evitar las fallas por cargas cíclicas en todo tipo de equipo.

Pese a grandes avances en el tema de diseño en fatiga en la actualidad se continúa con la tarea de desarrollar métodos que permitan diseñar productos a prueba de fatiga [9].

Según ASTM la definición estándar de fatiga es el proceso de cambio estructural permanente y localizado que ocurre en un material que está expuesto a tensiones fluctuantes en uno o algunos puntos del material y que puede concluir en la presencia de grietas o en algunos casos la fractura después de un determinado número de fluctuaciones [10]

Las características de fractura de una falla por fatiga son distintas a las de una fractura estática y surgen a partir de tres etapas de desarrollo.

La etapa uno es el inicio de una o más microgrietas debido a la deformación plástica cíclica y posteriormente una propagación cristalográfica que se extiende de dos a cinco granos alrededor del origen. Regularmente las grietas formadas en la etapa uno, no son apreciables a simple vista.

Durante la segunda etapa de desarrollo las antes mencionadas microgrietas se transforman a macrogrietas formando superficies paralelas en forma de meseta, separadas por crestas longitudinales. Generalmente las mesetas son normales en dirección al esfuerzo máximo en tensión, estas superficies pueden tener marcas con coloraciones oscuras y claras, estas marcas conocidas como marcas de playa o marcas de concha.

Durante la acción de cargas cíclicas, las superficies con grietas se abren y cierran generando fricción entre sí. Dependiendo de la frecuencia, la carga y el ambiente corrosivo es que se forman las marcas de playa.

La etapa tercera ocurre durante el ciclo de esfuerzo final, cuando el material restante no puede soportar las cargas, lo que resulta en una fractura rápida. Las fracturas en esta etapa pueden ser frágiles, dúctiles o una combinación ambas. A menudo las marcas de playa si existen junto con las líneas chevrón, que son

los patrones representativos de fractura en la etapa III, apuntan hacia los orígenes de las grietas iniciales [11]

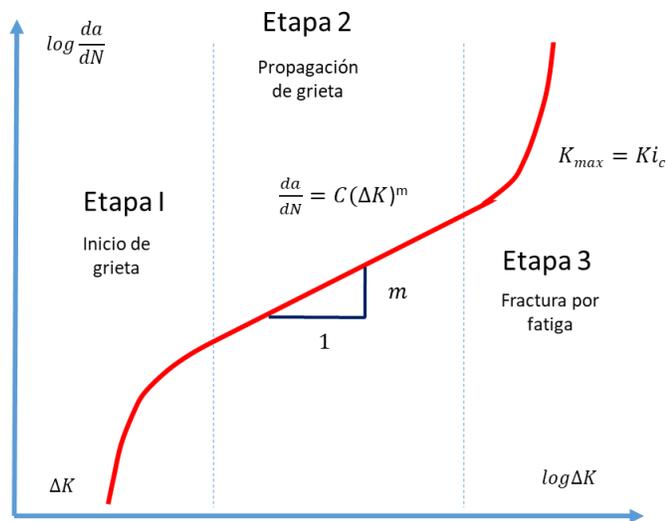


Figura 2.4 Etapas de inicio, propagación de grieta y fractura. [12]

La falla por fatiga es debida a la formación y propagación de grietas, generalmente las grietas se inician en discontinuidades del material donde el esfuerzo cíclico es máximo.

Las discontinuidades pueden presentarse debido a algunas condiciones del material como las que se muestran a continuación.

- Sitios de concentración de esfuerzos como en cambios rápidos de sección transversal, cuneros, orificios, etc.

- Esfuerzos de contacto por debajo de la superficie: elementos que giran y se deslizan entre sí bajo presión alta constante, como cojinetes engranes, levas, etc.
- Errores de fabricación como ralladuras, marcas de herramienta, rebabas, diseños defectuosos de juntas, ensamblajes inapropiados, etc.

Composición del material.

Después de someter el material a diferentes procesos de fabricación como laminado, forjado, fundido o calentado surgen incrustaciones de material extraño, segregaciones, huecos, etc. [13].

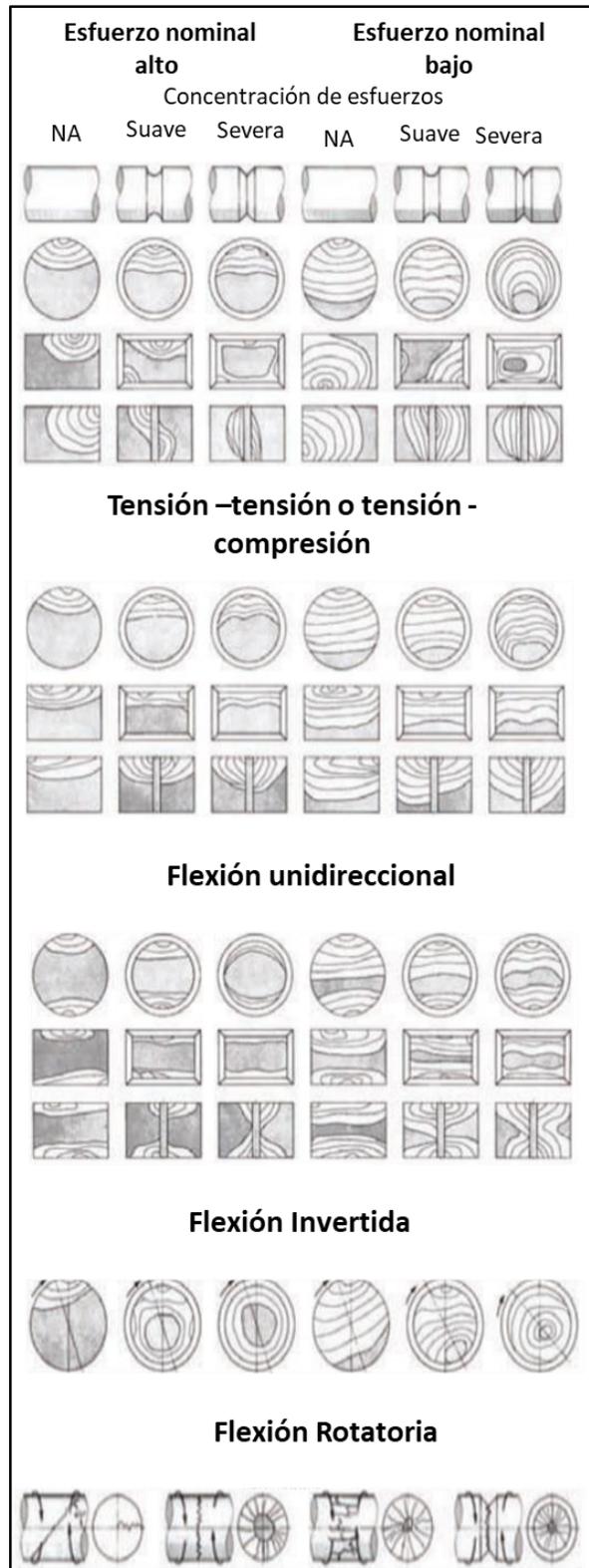


Figura 2.5 Esquema de superficies de fractura por fatiga producidos bajo distintas condiciones de carga y niveles de esfuerzo nominal [14].

## Falla por fatiga en el análisis y el diseño

Existe un gran número de factores que se deben considerar para casos de cargas cíclicas, los métodos de análisis de falla por fractura se hacen a través de una sinergia de conocimientos científicos y de ingeniería se desarrollan métodos complejos para el desarrollo de diseños a prueba de fatiga.

Los métodos más utilizados en el diseño y el análisis de fatiga-vida son el, método de deformación-vida, el método mecánico de fractura lineal- elástico y método de esfuerzo-vida. Estos métodos intentan predecir la vida en número de ciclos hasta la falla (N) bajo un valor de carga dado. Generalmente N La vida de  $1 \leq N \leq 10^3$  ciclos, se clasifica como fatiga de bajo ciclaje, mientras que la fatiga de alto ciclaje se considera que tiene  $N > 10^3$  ciclos.

### Método de deformación-vida

Implica un estudio detallado de la deformación plástica en zonas donde se los esfuerzos y deformaciones son considerados para la estimación de la vida. Generalmente este método es utilizado en aplicaciones de fatiga con bajo ciclaje. Sin embargo, en este método es común que se haga uso de ciertas idealizaciones, lo que conlleva a tener resultados con un grado de incertidumbre. Por esta razón este método se considera útil solo para la comprensión de la naturaleza de la fatiga [15]

### Método de mecánica de fractura

En este método se hace la suposición de la detección de una grieta la cual se emplea para predecir su crecimiento respecto a la intensidad de esfuerzo. Normalmente es aplicado a grandes estructuras y es utilizado sistemas de cómputo y programas de inspección periódica [12]

## Método de esfuerzo-vida

Para determinar la resistencia de materiales que están sometidos a cargas de fatiga. Las muestras se someten a fuerzas repetidas de magnitudes específicas y se cuentan los ciclos de esfuerzo hasta la destrucción.

El equipo de ensayo de fatiga más empleado es el de viga rotativa de alta velocidad R.R. Moore, en la cual se somete la muestra a flexión pura mediante pesos. La muestra deberá ser maquinada y pulida con detalle para evitar ralladuras. Para establecer la resistencia a la fatiga de un material es necesario contar con número muy grande de ensayos debido a la naturaleza estadística de la fatiga. Los datos recabados de cada ensayo del proceso son graficados en la gráfica denominada S-N (esfuerzos vs ciclos) [12].

Existen otros tipos de máquinas para determinar la resistencia de fatiga de los materiales que varían entre sí por el tipo de esfuerzo que aplican, como de esfuerzos axiales fluctuantes o inversos, esfuerzos de torsión o combinados [15].

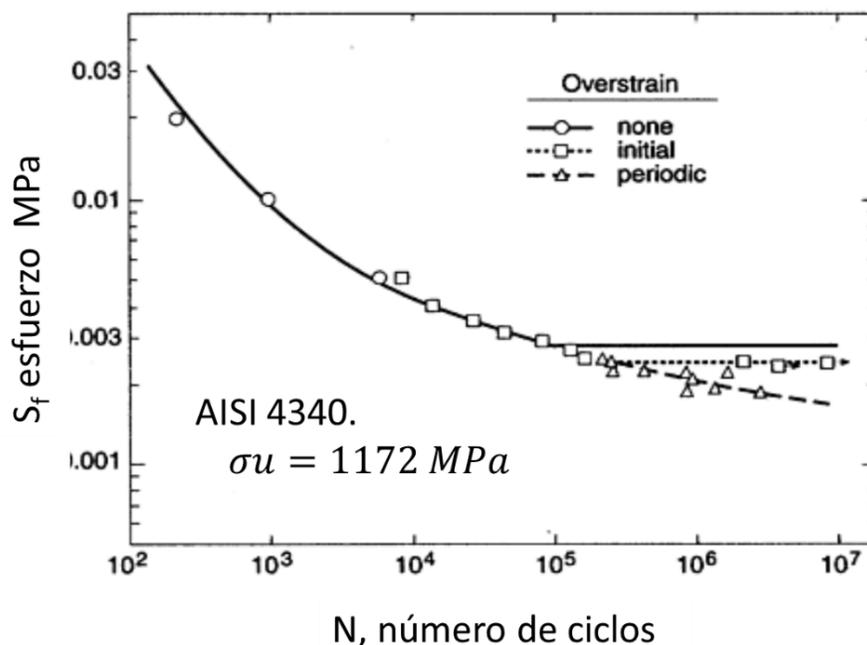


Figura 2.6 Efectos iniciales y periódicos bajo esfuerzo, curva de esfuerzo vida de una aleación de acero [16].

## Crecimiento de Grieta

Las grietas por fatiga aparecen y crecen con la existencia de cargas variantes y con la aplicación de tensión en cada ciclo de esfuerzo.

Si se considera que el esfuerzo está en algún punto entre el esfuerzo mínimo y el máximo.

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}.$$

Mientras que la intensidad de esfuerzo está dada por:

$$\Delta K_I = \beta \Delta\sigma\sqrt{\pi a}$$

En donde  $\beta$  es el factor de modificación de intensidad de esfuerzo. Los valores de  $\beta$  se pueden obtener haciendo uso de las figuras 2.8, 2.9 y 2.10.

El crecimiento de grieta está en función del número de ciclos de esfuerzo  $N$  y depende de  $\Delta\sigma$  siempre que se suponga que la grieta ha iniciado con una longitud inicial  $a_i$  [15] y [17].

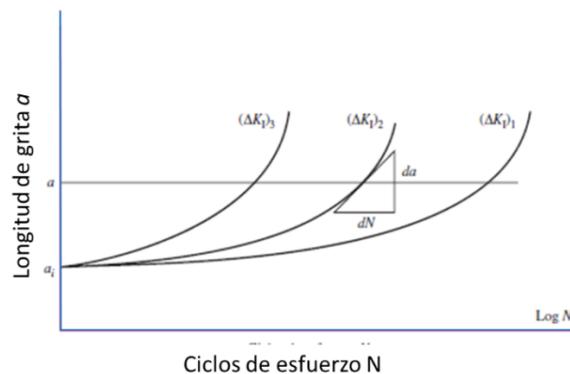
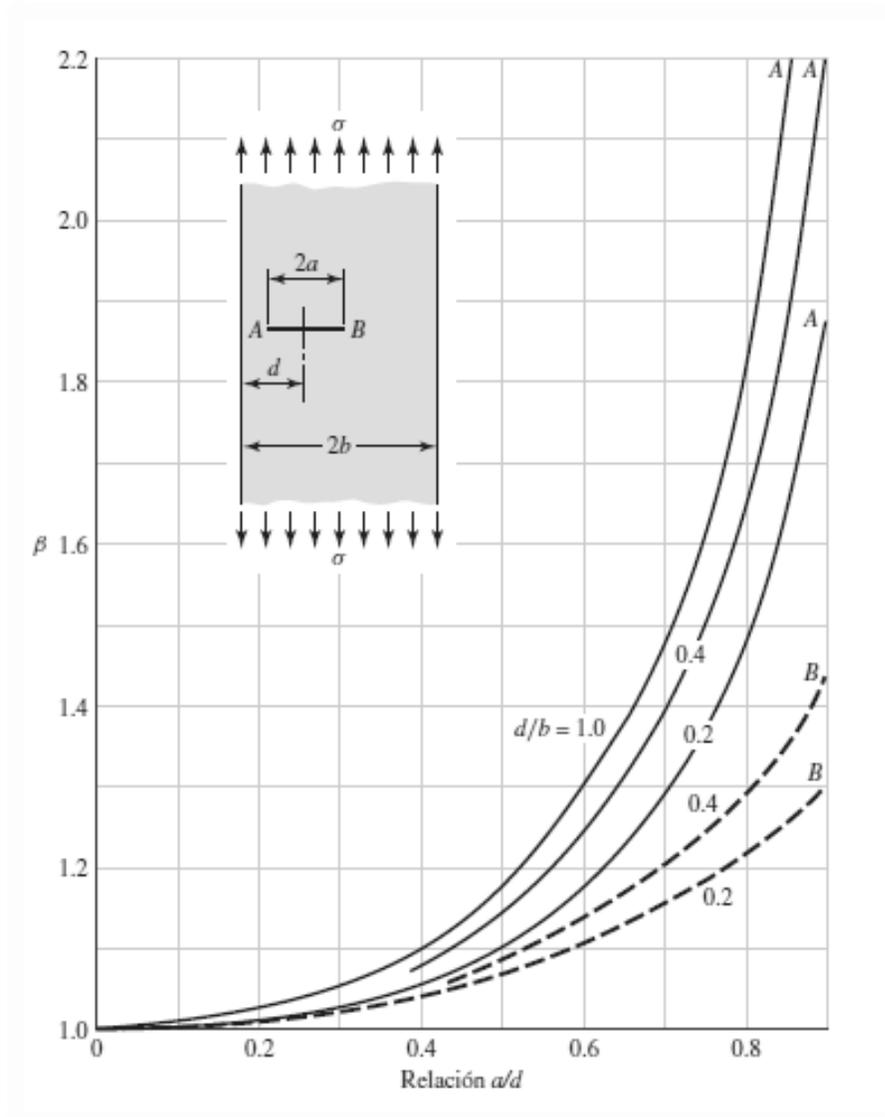


Figura 2.7 Aumento de longitud de la grieta,  $a$ , en función del conteo de ciclos [17].

Cuando se tiene una grieta a inicios de la etapa II, el crecimiento de la misma puede describirse con ayuda de la ecuación de París, en donde  $c$  y  $m$  son constantes empíricas del material y  $\Delta k$  es la intensidad de esfuerzo [11]

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta k_1)^m$$



**Figura 2.8** Grieta transversal excéntrica bajo la aplicación de tensión longitudinal. Las líneas continuas evalúan la grieta en el extremo A, líneas discontinuas evalúan la grieta en extremo B [15].

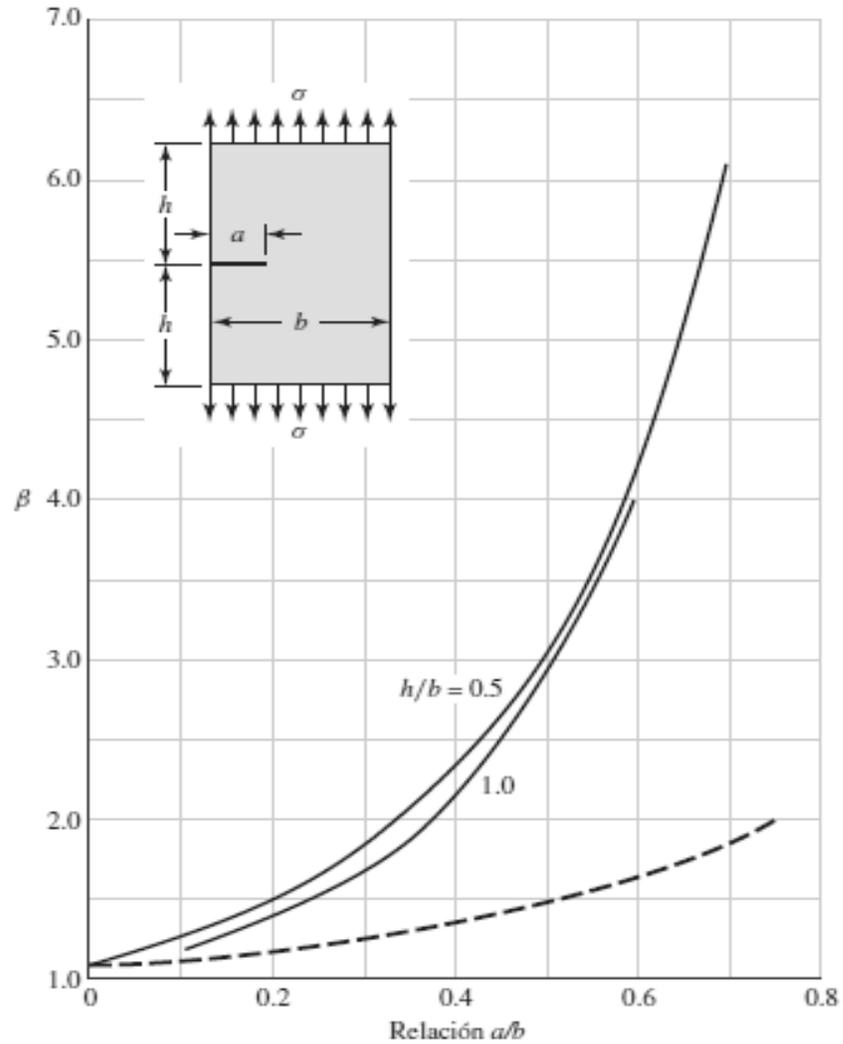


Figura 2.9 Placa sometida a tensión longitudinal, con grieta presente en borde. La línea discontinua n tiene restricciones a la flexión, mientras que la línea discontinua presenta restricciones [15].

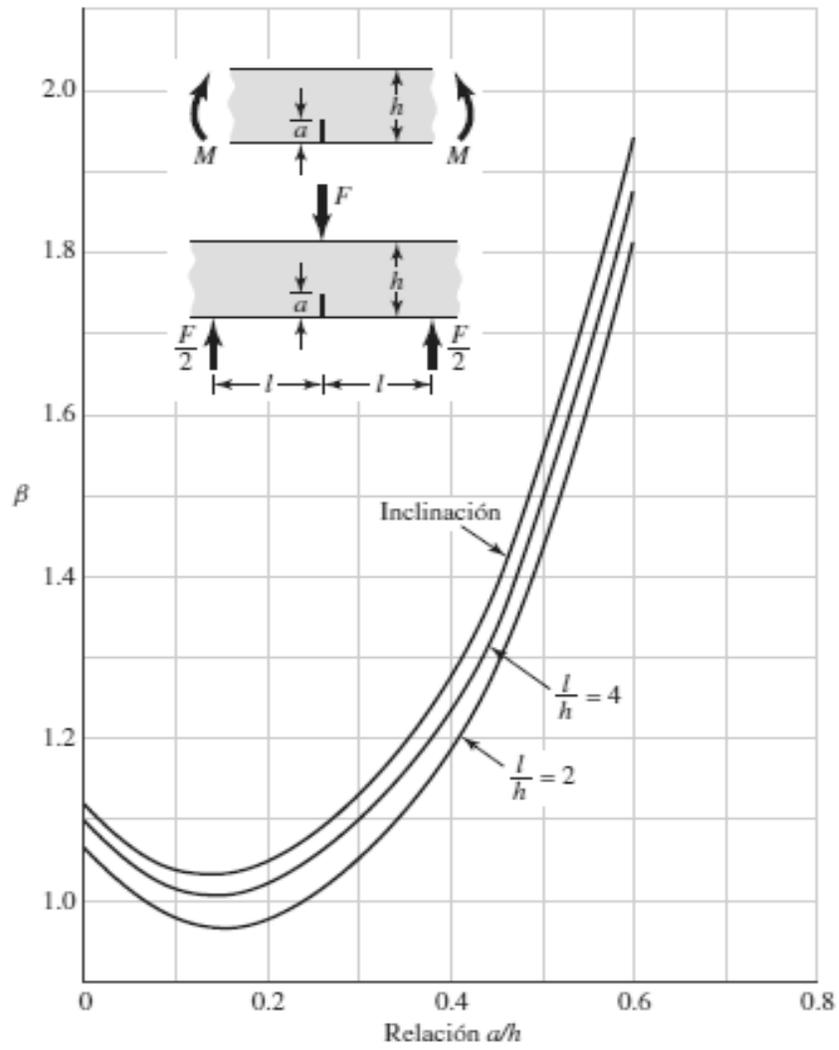
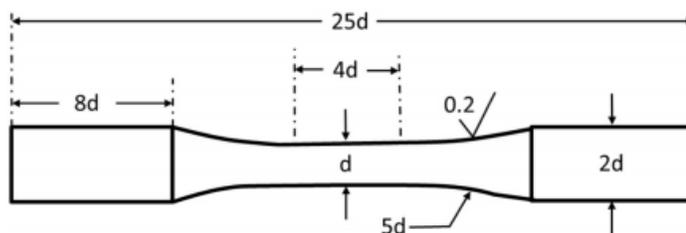


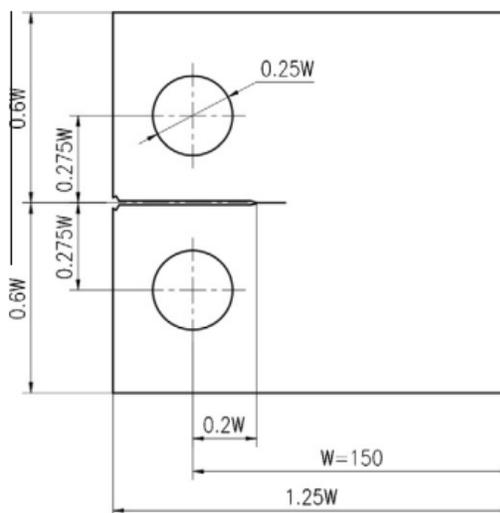
Figura 2.10 Vigas transversales rectangulares con grieta transversal en borde [15].

## Normativa para la fabricación de probetas

Para el estudio experimental de fatiga es muy importante trabajar bajo determinadas normas o especificaciones que homologuen la manera en que se realizan los procedimientos, incluidos la fabricación de probetas y el procedimiento de ensayos a que será sometido el objeto de estudio. La sociedad americana de prueba de materiales ASTM por sus siglas en inglés, muestra las mejores prácticas o practicas recomendadas (normalizadas) para distintas pruebas de materiales, ASTM E606 es la guía para la determinación de las propiedades de fatiga en apoyo de investigación, desarrollo de materiales, diseño mecánico etc. Limitándose a especímenes y no a pruebas de gran escala.



**Figura 2.11 Geometría de especímenes para análisis de fatiga vida según ASTM E606 [18].**



**Figura 2.12 Geometría de especímenes para análisis propagación de grieta según ASTM E399 [19].**

## 2.2 Estado del arte

### 2.2.1 Soldadura

La unión de materiales metálicos mediante procesos de soldadura resulta ser una manera eficiente y económica de construir estructuras complicadas y es ampliamente utilizada en la construcción naval, construcción de centrales eléctricas, equipos de elevación, líneas de tuberías y en la industria en general.

Los procesos más comunes para lograr uniones soldadas en secciones mayores a 10 mm son los procesos de arco eléctrico, SAW, SMAW, GMAW, GTAW, en general estos procesos tienen la capacidad de satisfacer los requerimientos básicos de calidad en la soldadura. Sin embargo, existen factores que se asocian a los procesos de arco como la baja eficiencia, gran cantidad de tiempo requerido en el proceso, y la elevada tasa de entrada de calor, conducen a una distorsión significativa y da lugar a la formación de tensiones residuales en el material soldado.

### 2.2.2 Soldadura Láser

El desarrollo de la tecnología de soldadura láser ha propiciado avances importantes en los procesos de fabricación de muchos sectores industriales, logrando un aumento en la productividad y en la calidad del producto, aunado a una sobresaliente reducción en los costos de fabricación. En la actualidad los láseres empleados en la soldadura poseen la capacidad de realizar penetraciones profundas en placas de secciones gruesas con una reducción en la distorsión como resultado de un control de la energía en el haz de soldadura. Además, las soldaduras realizadas mediante procesos láser presentan mejores propiedades mecánicas y zonas afectas por el calor más estrechas por la reducción de la entrada de calor durante la soldadura [20].

Por otra parte, durante el proceso de soldadura láser, aparece la posibilidad de agrietamiento por las altas tasas de enfriamiento asociadas a este proceso, además de la existencia de porosidad y salpicaduras que a menudo son asociadas con la soldadura láser [21].

Otras desventajas del proceso de soldadura láser son:

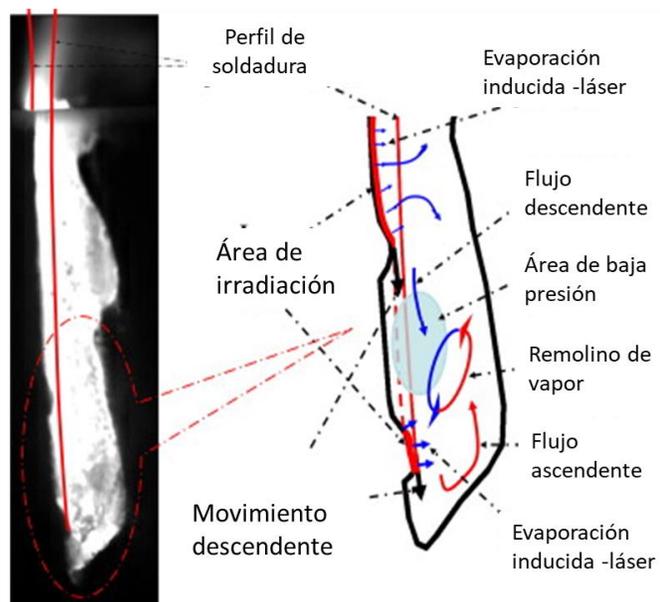
- La inversión de capital resulta cuantiosamente mayor a la inversión en equipos convencionales de arco eléctrico.
- Baja eficiencia energética para el caso de láseres Nd: YAG
- La fijación y ajuste de unión es crítico durante la soldadura láser.
- Dificultad para soldar materiales brillosos como el aluminio

[22]

El estudio de la generación de defectos durante la soldadura láser resulta muy importante pues la presencia de defectos en una unión soldada no solo afecta la calidad de apariencia de la soldadura, si no que defectos como porosidad, distorsión, proyecciones de soldadura, etc. disminuyen las propiedades mecánicas de la unión, puesto que en los defectos se concentran esfuerzos que dan lugar a grietas [23].

En la soldadura por haz láser, como ya se mencionó anteriormente, la calidad de las uniones se puede ver afectada por la aparición de salpicaduras de material, hecho que se relaciona con pérdidas de metal base en el área de soldadura. Kaplan et al [23] observaron cuatro tipos de salpicadura bajo distintos parámetros del proceso, que fueron pequeñas gotas expulsadas delante del ojo de la cerradura, una columna de líquido vertical alta creada detrás del ojo de la cerradura, una columna de líquido inclinada creada detrás del ojo de la cerradura y la Pequeñas gotas expulsadas al lado del ojo de la cerradura [24].

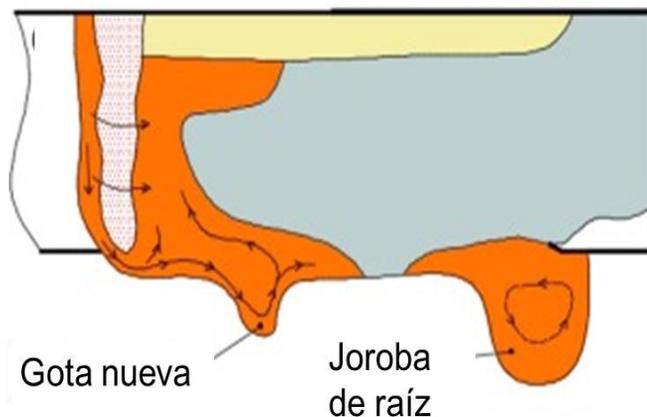
En trabajos realizados por Li.et al [25], estudiaron los charcos de soldadura en procesos láser de alta penetración y alta potencia. Se investigó el mecanismo de formación de salpicaduras y su relación con el comportamiento del charco de soldadura. El aumento de potencia del láser es la causa una evaporación más intensa y provoca más salpicaduras debido al incremento de la energía láser. Se estudió además la relación existente entre el posicionamiento del focal con la aparición de salpicaduras, demostrando que cuando la posición del focal es situada dentro del metal base, el metal fundido fluye de manera estable hacia la parte trasera del charco de soldadura permitiendo así tener una costura de soldadura sólida [25].



**Figura 2.13 Comportamiento dinámico del ojo de cerradura [25].**

La aparición de protuberancias metálicas en la raíz de la soldadura se relaciona con la posición del focal láser durante la soldadura de alta penetración Zhang et al [26] analizaron y discutieron el mecanismo de formación de protuberancias en la raíz de la soldadura. Se estudió el impacto de los parámetros de soldadura (enfoque, velocidades y gases de protección) en la formación de protuberancias de raíz, se concluye que la protuberancia de raíz, se forma bajo

condiciones de un charco de soldadura estable, con enfoque negativo, y que un factor que ayuda a mitigar el defecto en la raíz es la utilización de un gas de protección inferior [26].



**Figura 2.14 Formación de protuberancias radicales en la soldadura láser de alta penetración [26].**

La porosidad es uno de los defectos más comunes e indeseables de la soldadura láser, degrada en gran medida la sanidad de las uniones, haciéndolas más débiles en resistencia y fatiga.

Según Lin et al [27]. La porosidad puede ser dividida en dos tipos, la porosidad inducida por acción del ojo de cerradura, y la porosidad inducida por un factor metalúrgico. El “factor metalúrgico” que contribuye a la formación de porosidad es causado por el bajo punto de ebullición de los elementos (hidrógeno y nitrógeno) o por la contaminación en las superficies que serán soldadas [27]. La porosidad inducida por acción del ojo de cerradura es el resultado de la inestabilidad del mismo “ojo de cerradura”, dicha inestabilidad puede ser causada por distintos factores, el flujo del gas de protección, Berger et al [28], encontraron una relación entre la formación de poros y el gas de protección del proceso. Tanto

el ojo de cerradura como las burbujas formadas, contenían gas de protección y vapores del metal de la unión [28].

La potencia y la velocidad del láser juegan un rol muy importante en la formación de porosidad, la relación de la porosidad decrece con el aumento de velocidad, mientras que aumenta con el incremento de potencia. Xu et al [29] estudio la porosidad inducida por “ojo de cerradura” durante la soldadura láser. Observaron la formación y crecimiento de burbujas con cámaras de alta velocidad en la soldadura láser de vidrios de alta resistencia. Encontraron que la inestabilidad o fluctuación del ojo de cerradura origina la formación y aumento en la cantidad de poros, y que la fusión de las burbujas da lugar a la formación de porosidades en forma de gusano o lineales.

Después de analizar los datos de la tabla 2.2 se puede concluir además que el incremento en la potencia del láser y el decremento en la velocidad de soldadura propician la formación de poros grandes [29].

**Tabla 2.2 Resultados de análisis de porosidad en soldadura láser. [29].**

Potencia láser (W)	Velocidad soldadura (m/min)	H/R proporción	No. De poros	Volumen ( $\mu\text{m}^3$ )	Grado de porosidad (%)	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	
						máximo	mínimo
2400	1	0.54	266	$2.65 \times 10^9$	6.12	1309.69	288.42
2700	1	0.58	207	$4.42 \times 10^9$	6.81	1502.46	316.56
3000	1	0.63	175	$5.45 \times 10^9$	7.38	1784.57	366.01
3000	1.3	0.55	224	$2.71 \times 10^9$	5.45	1477.33	285.66
3000	1.6	0.56	226	$1.63 \times 10^9$	4	1079.15	249.3

considerar una distancia de desenfoque de 3.0 mm y distancias de láser al vidrio de 0.25 y 0.5 mm

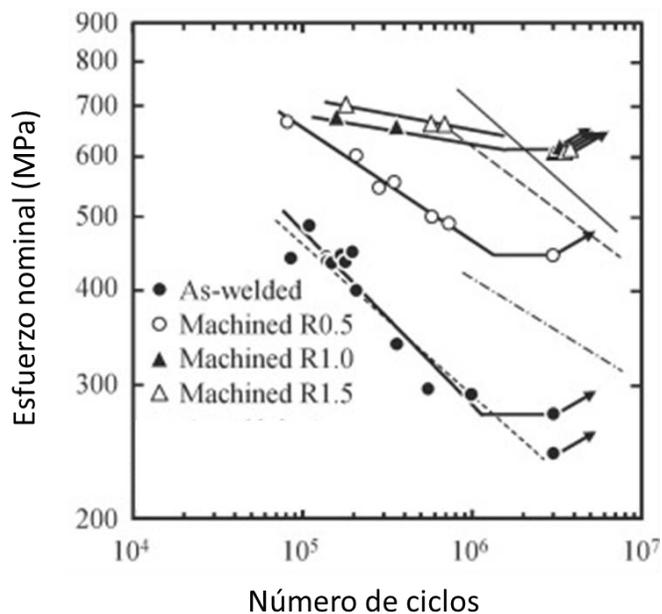
Otro factor que juega un papel importante para la obtención de soldaduras sin discontinuidades, es la presión que la atmosfera ejerce sobre el charco de soldadura. Jiang et al [30] estudiaron diferentes vías para eliminar defectos de soldadura en uniones de acero de alta resistencia de 10 mm soldado mediante el proceso láser con penetración completa. Obteniendo los mejores resultados al reducir la presión ambiental. Para lograr una superficie suave sin defectos se

trabajó en presión de 0.1 KPa, potencias de 4 a 6 kW y velocidades de hasta 1.5 m/min [30].

### 2.2.3 Resistencia a la fatiga en soldaduras.

En los procesos de soldadura, incluyendo el de soldadura por láser, se presentan cambios microestructurales inherentes del proceso, aunados en algunos casos a una serie de defectos de calidad que ponen en riesgo la confiabilidad de las piezas soldadas [20]. Cuando se habla de calidad en uniones soldadas se debe pensar en la magnitud real del defecto. Cada defecto como socavados, porosidades, protuberancias de raíz, salpicaduras entre otros, representan discontinuidades en el material, y estas discontinuidades a menudo son sitios en donde las propiedades mecánicas de las piezas se ven deterioradas.

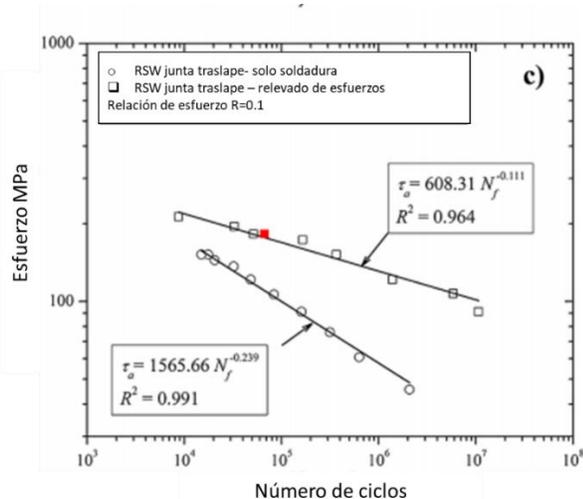
Shiozaki et al [31] realizaron estudios relacionados con el factor de geometría en uniones de acero UHSS 980 soldadas mediante proceso de arco. Se realizaron especímenes con configuraciones de filete en uniones de placas traslapadas. Los pies de los filetes fueron maquinados con distintos radios, de 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm. Los cupones fueron sometidos a cargas cíclicas de flexión para evaluar su resistencia a la fatiga. En la figura 2.15 se muestra una comparativa de la resistencia a la fatiga de las uniones soldadas con distintos radios en el pie de la soldadura, se puede observar que las propiedades de resistencia a la fatiga se ven mejoradas en las uniones con pie de soldadura mecanizado [31].



**Figura 2.15 Diagrama de Wholer. Representación de juntas soldadas y mecanizadas [31].**

Una parte inherente al factor de geometría es la concentración de esfuerzos que existe en diferentes geometrías de soldadura, esto se puede explicar haciendo mención de los estudios realizados por Ordoñez et al [32] quienes estudiaron la concentración de esfuerzos presente en uniones de aceros soldados por el proceso de soldadura por resistencia (SRW), y la relación que tiene esto con la resistencia a la fatiga. Ordoñez, realizó experimentos con láminas de acero de doble fase, DP980, para comparar la resistencia a la fatiga de las uniones soldadas contra piezas soldadas a las que se les aplicó un ciclo de carga para liberar esfuerzos, bajo las mismas condiciones de soldadura, 9.5 KA, 60Hz, 400N. Después de la experimentación se infiere que la soldadura por resistencia induce un cambio microestructural severo, que los picos de soldadura propician la heterogeneidad de las durezas en las superficies en la soldadura. Por otra parte, la concentración de esfuerzos es atribuible a las durezas y geometría del nugget de la soldadura, y la operación de (presetting) ciclo de carga y descarga, acciona como liberador de esfuerzos, y mejora el rendimiento a la fatiga en las soldaduras sin la aplicación de carga, la falla por fatiga se dio

alrededor de los  $1 \times 10^5$  ciclos, mientras que en los especímenes a los que se les aplicó la operación de carga y descarga para liberar esfuerzos fue de  $5 \times 10^6$ , observar figura 2.16 [32].



**Figura 2.16 Diagrama de Wohler. Comparativa entre resistencia a la fatiga de uniones soldadas y uniones soldadas con relevado de esfuerzos [32].**

La relación existente entre geometría del tipo de unión de soldadura y el rendimiento a la fatiga, se han estudiado en uniones a tope y de esquina (filete) en los aceros de alta resistencia Q460D y Q690D por Hongchao et al [33]. Sometieron a fatiga especímenes de metal base, soldados en unión a tope, y soldados a filete, de ambos grados de acero. El proceso de soldadura empleado fue MIG. Los resultados de los análisis son mostrados en las tablas 2.3 y 2.4 para aceros Q460D y Q690D respectivamente comparado con los valores propuestos por algunas normas.

Para ambos aceros, los metales base sobrepasan satisfactoriamente los valores de las normas, para el caso de Q460D, los valores de probabilidad y las normas son similares, pero para el caso de la misma configuración, con acero Q690D, el límite de fatiga de AISC360 y Eurocode3 quedan 36% por debajo del valor de 95% de probable seguridad. Para las soldaduras en filete, Q460D y Q690D los valores de seguridad del 95% cubren todos los datos de prueba [33].

**Tabla 2.3 Comparación de los límites de fatiga en soldaduras y metal base acero Q460D [33].**

Tipo espécimen	Valor de examen (MPa)	95% probabilidad (MPa)	AISC 360 (MPa)	BS7608 (MPa)	Eurocode 3 (MPa)
Metal base	306.56	280.66	120.81	129.88	125
Tope	111.35	87.25	89.23	63.78	90
Esquina, Filete	93.81	76.69	55.17	38.16	36

**Tabla 2.4 Comparación de los límites de fatiga en soldaduras y metal base de acero Q690D [33].**

Tipo espécimen	Valor de examen (MPa)	95% probabilidad (MPa)	AISC 360 (MPa)	BS7608 (MPa)	Eurocode 3 (MPa)
Metal base	401.7	375.66	120.81	129.88	125
Tope	160.88	142.29	89.23	63.78	90
Esquina, Filete	69.34	61.22	55.17	38.16	36

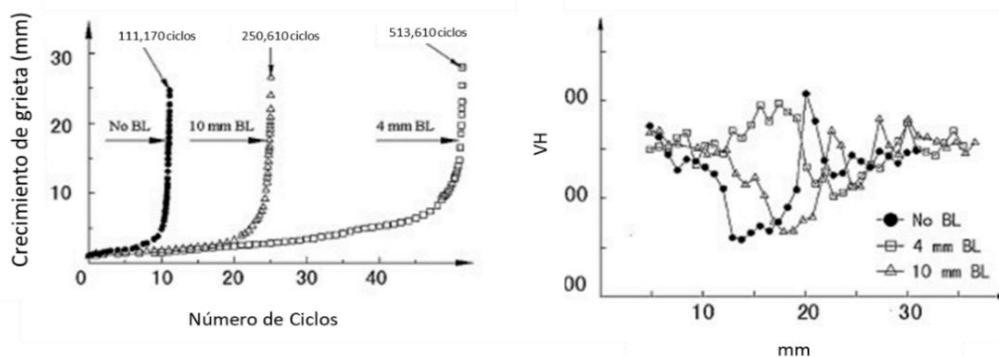
Además de la concentración de esfuerzos por acción del factor geométrico, durante los procesos de soldadura, el calor de entrada ocasiona que el material se tense, a este fenómeno se le conoce como la formación de esfuerzos residuales de la soldadura. La vida en servicio de los componentes estructurales soldados, están en gran medida determinada por la resistencia a la fatiga, la cual se ve afectada principalmente por acción de esfuerzos residuales junto con la concentración de esfuerzos. Cui et al [34], proponen una serie de experimentos con el fin de comprobar que tanto la concentración de esfuerzos por la geometría en la unión y los esfuerzos residuales de la soldadura pueden ser tratados para mejorar el rendimiento a la fatiga de las soldaduras. Se realizaron cupones de soldadura en acero de baja aleación Q370qD, las cuales fueron sometidas distintas operaciones, CFP (corner fillet profile) y UIT (ultrasonic impact treatment) para evaluar su resistencia a la fatiga. En la tabla 2.5 se muestran los resultados de las pruebas de fatiga

Se determinó que el uso de CFP y UIT mejoran la resistencia a la fatiga de la siguiente manera, el uso de CFP aumenta un 24% el rendimiento de la unión, mientras que la aplicación de UIT un 36%, y el uso de ambos mejora hasta 60 % el rendimiento de las uniones soldadas [34].

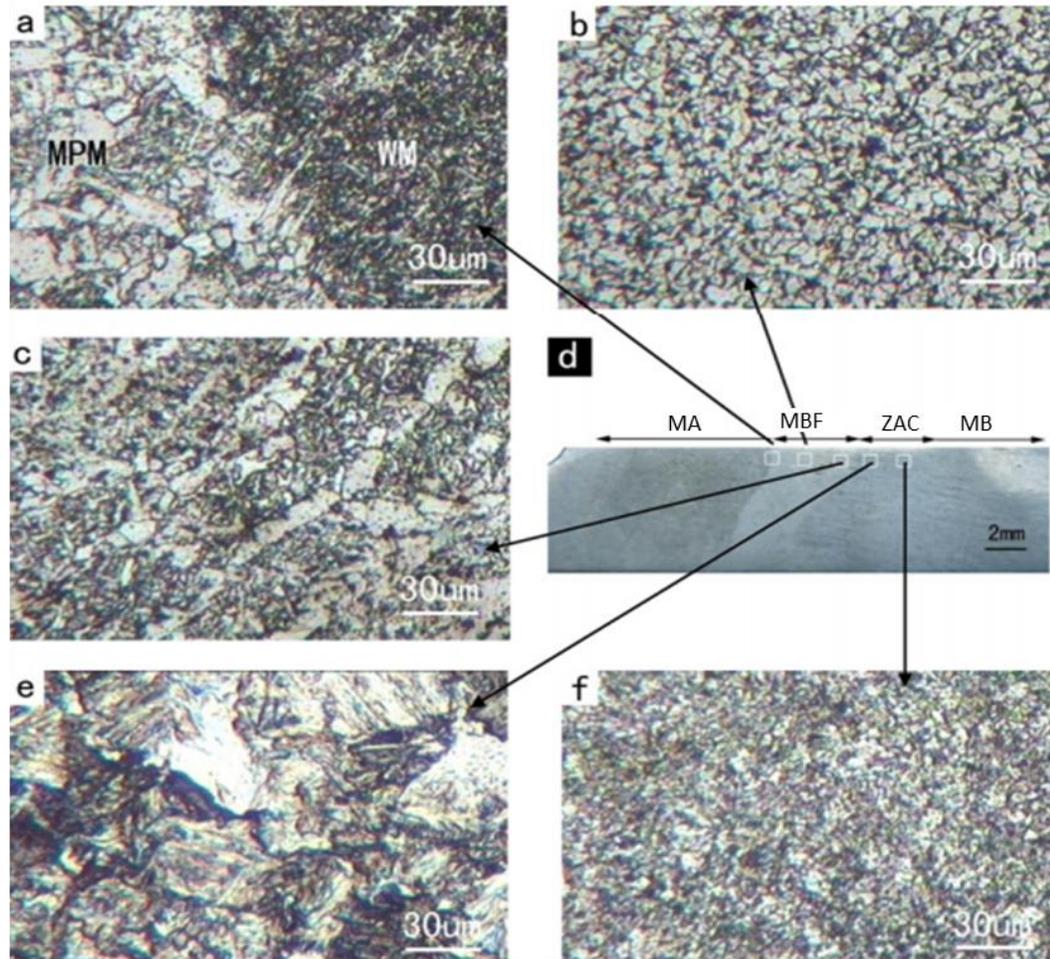
**Tabla 2.5**Lista de resultados de prueba de fatiga. \*NCU indica soldadura sin tratamiento, CFP tratamiento de perfil filete en esquina, CU combinados CFP y CUI [34].

Designación	Esfuerzo nominal (MPa)	Ciclos de falla	Resistencia a la fatiga en 2 millones de ciclos (MPa)	Localización de la falla
NCU-1	130	5623000	85.2	Pie de la soldadura
NCU-2	110	>2034000	110.6	NA
NCU-3	111	2126000	52.6	Pie de la soldadura
NCU-4	83.5	516700	53.2	Pie de la soldadura
CFP-1	220	94000	79.4	Pie de la soldadura
CFP-2	130	950400	101.4	Raíz de la soldadura
CFP-3	90	1888800	88.3	Raíz de la soldadura
CFP-4	200	72600	66.2	Pie de la soldadura
CFP-5	180	140800	74.3	Raíz de la soldadura
CFP-6	150	474200	92.8	Pie de la soldadura
CU-1	200	280500	103.9	Raíz de la soldadura
CU-2	146.7	918428	113.2	Metal base
CU-3	133.3	413900	78.9	Raíz de la soldadura
CU-4	103.7	>2000000	103.7	NA
CU-5	163	662200	112.7	Metal base
CU-6	207.4	218700	99.2	Raíz de la soldadura

Los cambios microestructurales que ocurren en los materiales soldados tienen una influencia en la dureza de los materiales, y en el rendimiento a la fatiga. Se ha comprobado que los materiales base presentan una mejor resistencia a la fatiga que los materiales que han sido sometidos a procesos de soldadura [34]. Sin embargo, se han planteado también diversos métodos para mejorar las propiedades de los materiales que han sido soldados. Zhang et al [35] estudiaron el comportamiento de las propiedades mecánicas (dureza y fatiga) de aceros de alta resistencia soldados, y los cambios que se producen al aplicar un recubrimiento (buffer layer) en distintas cantidades. En las figuras 2.18, 2.19, y 2.20, se muestran las microestructuras de aceros HSLA soldados mediante el proceso flux cored (230 A, 27V CO<sub>2</sub> 100%) [34]. Zhang et al concluyen que existe una relación entre la dureza del material y la resistencia a la fatiga, y que la correcta aplicación de un recubrimiento que amortigüe el calor de entrada en la soldadura, puede mejorar la resistencia a la fatiga de las uniones. En la figura 2.17 se puede observar como la cantidad adecuada del recubrimiento (buffer layer) mejora las características del material, mientras que un exceso del mismo no representa una mejora sustancial. La dureza del material con 4mm se mantiene más homogénea, comparada con 10 mm y sin recubrimiento, que muestran una heterogeneidad excesiva [35].

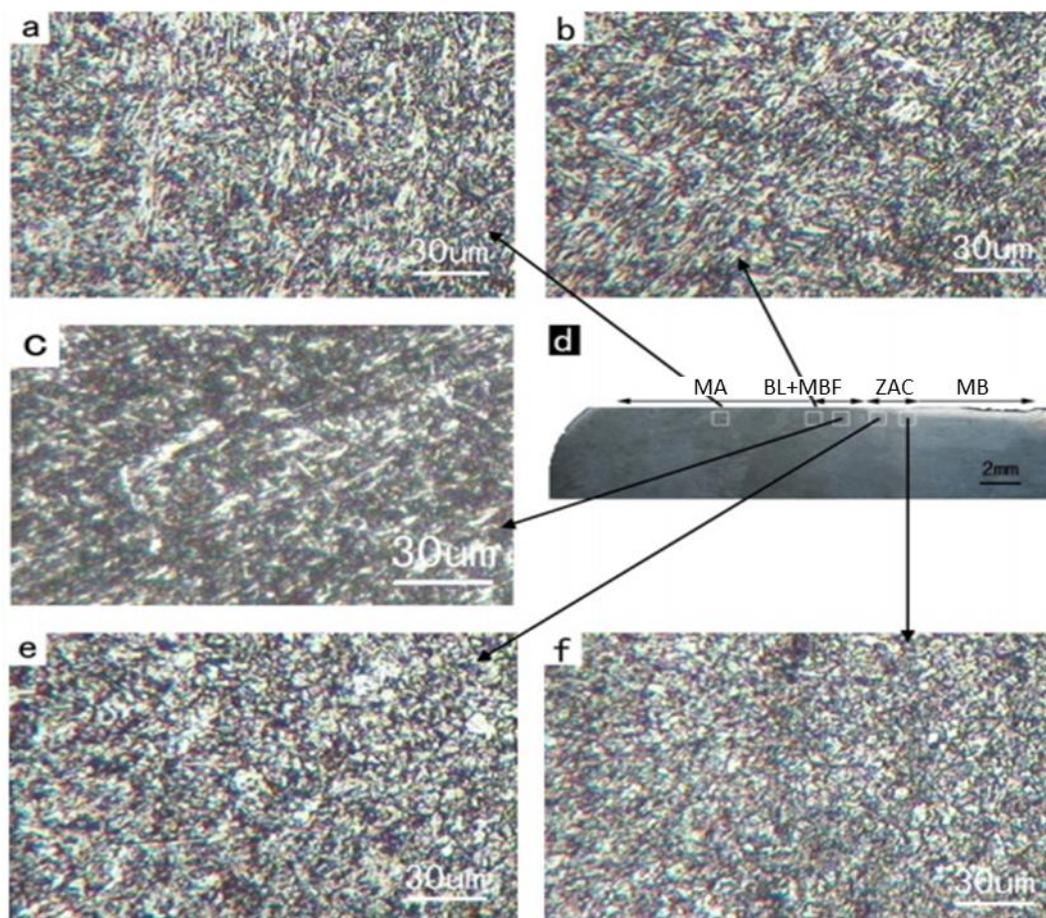


**Figura 2.17 Comparativa entre distintos grados de dureza por efecto de los procesos de soldadura y su relación con el tamaño de grieta por fatiga [34].**



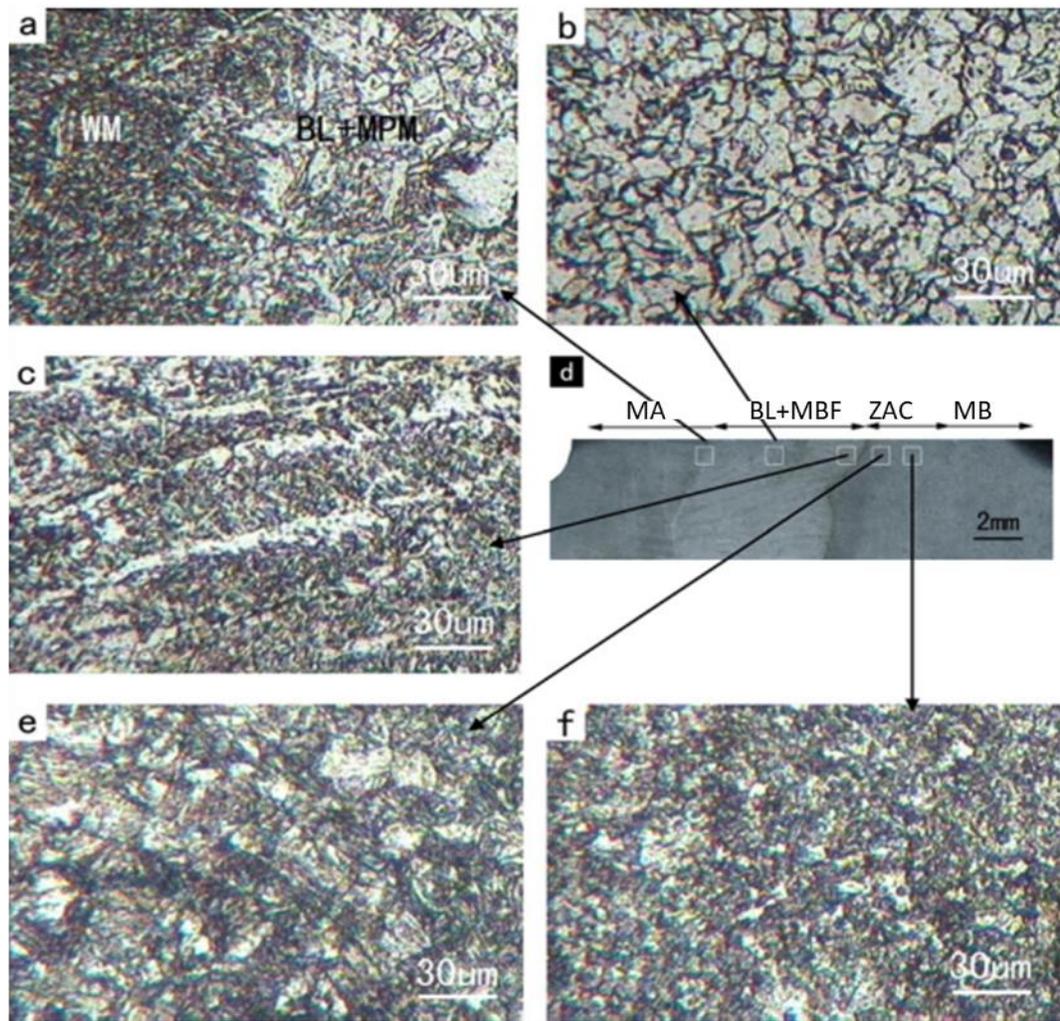
<b>MA</b>	Metal aporte	Ferrita granular y perlita
<b>MBF</b>	Metal base fundido	Ferrita predominante
<b>ZAC</b>	Zona afecta calor	Regiones grano grueso/fino
<b>MB</b>	Metal base	Ferrita predominante

**Figura 2.18** Microestructura óptica de soldadura de acero HSLA (Bisplate 80) sin buffer layer [34].



<b>MA</b>	Metal aporte	<b>Ferrita y perlita granular</b>
<b>MBF+BL</b>	Metal base +BL	Listones de ferrita y perlita granular fina
<b>ZAC</b>	Zona afecta calor	Regiones grano grueso (menor tamaño)/fino
<b>MB</b>	Metal base	ferrita

**Figura 2.19** Microestructura óptica de soldadura de acero HSLA (Bisplate 80) con 4mm buffer layer [34].



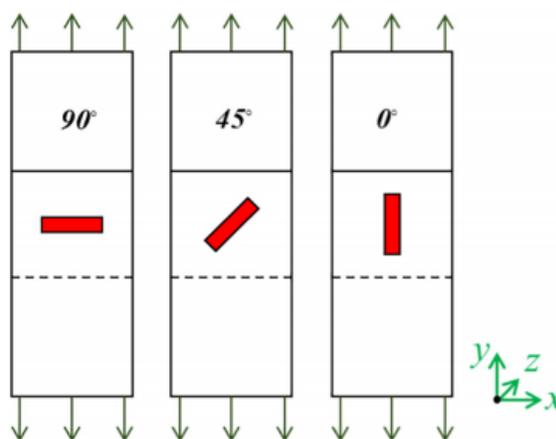
<b>MA</b>	Metal aporte	Ferrita granular y perlita
<b>MBF</b>	Metal base fundido	Ferrita predominante
<b>ZAC</b>	Zona afecta calor	Regiones grano grueso/fino
<b>MB</b>	Metal base	Ferrita predominante

Figura 2.20 Microestructura óptica de soldadura de acero HSLA (Bisplate 80) con 10mm buffer layer [34].

## 2.2.4 Fatiga en uniones de soldadura láser

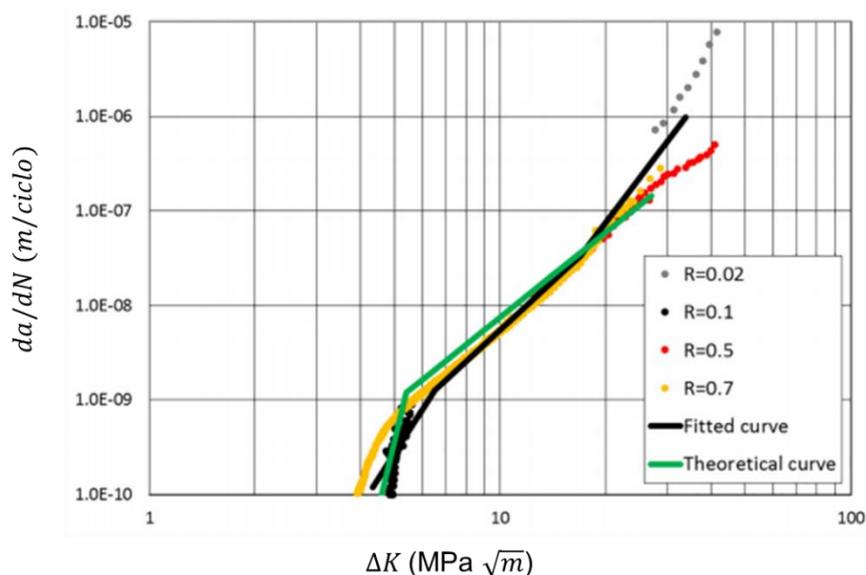
La vida en fatiga de uniones soldadas mediante el proceso láser se ve afectada por las condiciones del proceso de soldadura, anteriormente se ha mencionado como distintas variables del proceso pueden originar determinados defectos de calidad en la soldadura, y como estos están relacionados con la vida en fatiga o resistencia a la fatiga de los materiales soldados.

La soldadura láser representa una solución para corregir problemas de distorsión que son comúnmente asociados a los procesos de arco o de resistencia en soldaduras de placas delgadas, es por eso que un estudio más profundo acerca de las variables del proceso de soldadura láser resulta muy importante. Rakesh et al [36]. Estudiaron la vida en fatiga en soldaduras por láser y la afectación por el efecto de la orientación del láser con respecto al campo de aplicación, el espesor, y la relación de esfuerzo con la que se realizan las pruebas. Un total de 56 pruebas de soldadura láser en configuración de traslape fueron realizadas con orientaciones de haz de soldadura de  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $0^\circ$  como se muestra en la figura 2.21, los espesores del material fueron 1mm, 1.2 mm, 2 mm y 3 mm, los valores de la relación de esfuerzo (R) fueron  $R=0.1$ ,  $R=0.2$ ,  $R=0.3$ , los resultados de este análisis se muestran en las Figura 2.22 y 2.23.



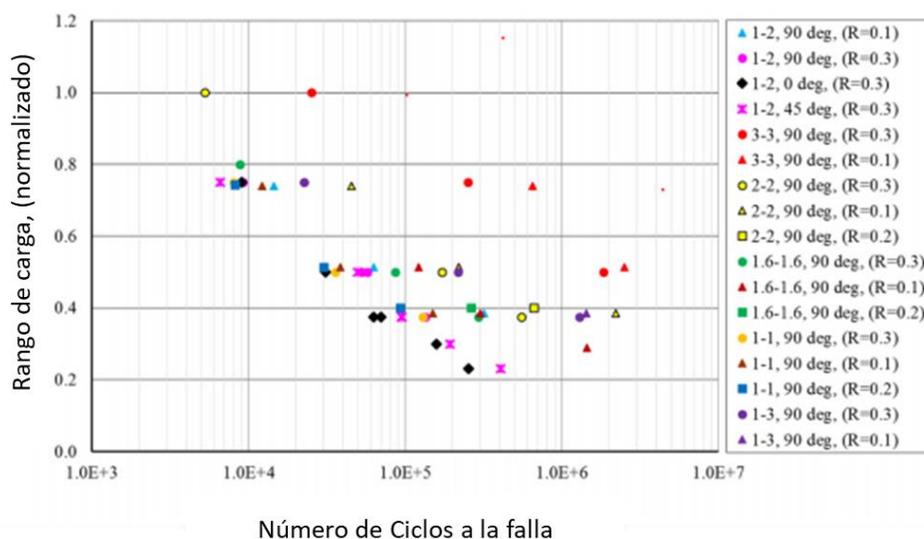
**Figura 2.21 Esquema de la representación de las orientaciones del láser respecto al campo de aplicación [36].**

En la figura 2.22 se muestra el efecto de distintos valores de relación de esfuerzo, en las curvas de crecimiento de grieta en función del incremento del factor de intensidad de esfuerzos  $\Delta k$ . En donde se observa que las curvas de los distintos valores de relación de esfuerzo ( $R$ ) se mantienen próximas a la curva teórica marcada en verde, por lo que se podría inferir que la relación de esfuerzos no representa una variable significativa dentro del rango investigado.



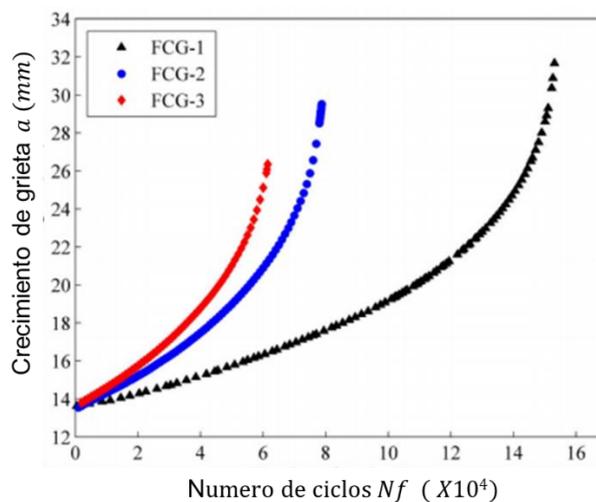
**Figura 2.22 Resultados experimentales del crecimiento de grieta en función del incremento de intensidad de esfuerzo [36]**

Analizando la influencia del ángulo de aplicación del láser en la figura 2.23 se observa que para la unión soldada con orientación de  $90^\circ$  el crecimiento de grietas por fatiga se dio alrededor del borde, después de crecer en el espesor de la placa desde el inicio a la raíz de la soldadura, mientras que en las soldaduras de  $0^\circ$  y  $45^\circ$ , la grieta se inició en el punto de mayor concentración de tensión, en la línea de la raíz de la soldadura y crecieron en dirección de la carga aplicada [36]



**Figura 2.23 Resultados experimentales de fatiga vida de 56 cupones de soldadura láser [36].**

Lo anterior contrasta con los estudios de Wang. Et al [37], que muestran un estudio de la disipación de energía y el crecimiento de grieta en función de  $R$  (relación de esfuerzo), para ensayos realizados bajo diferentes valores de  $R$ . FCG-1, FCG2, y FCG-3 corresponden respectivamente a los valores de relación de esfuerzo de 0.1, 0.2, y 0.5. Con estos valores obtuvieron la gráfica mostrada en la figura 2.24, en donde se presenta la longitud de grieta medida en función del número de ciclos. Se puede inferir que las diferentes tasas de crecimiento de grieta son el resultado de la discrepancia en los valores de la relación de esfuerzo, según Wang X, las tres pruebas fueron realizadas con  $\Delta K_i$  similares [37]

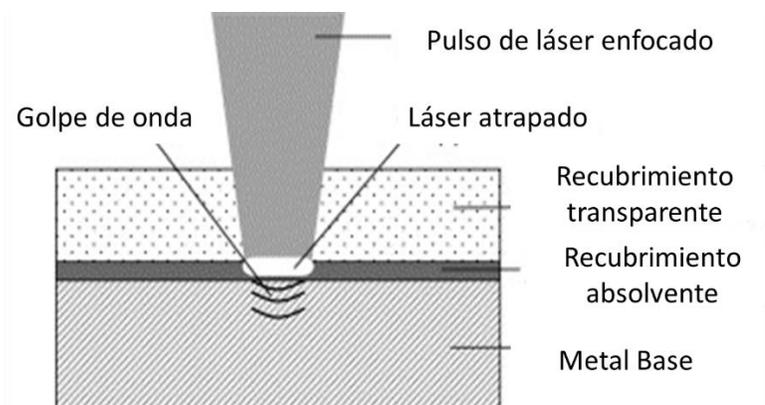


**Figura 2.24 Dimensionamiento de grieta a partir del número de ciclos, bajo diferentes valores de relación de esfuerzo [37]**

La soldadura de placas de acero EH36 para construcción naval en condiciones de servicio produce la formación prematura de grietas. Yun et al [38], con el objetivo de mejorar la resistencia a la fatiga en aceros EH36 soldados, realizó estudios donde evalúa la influencia de (LSP) laser shock processing, impactos de presión y el diámetro de spot en el crecimiento de grieta.

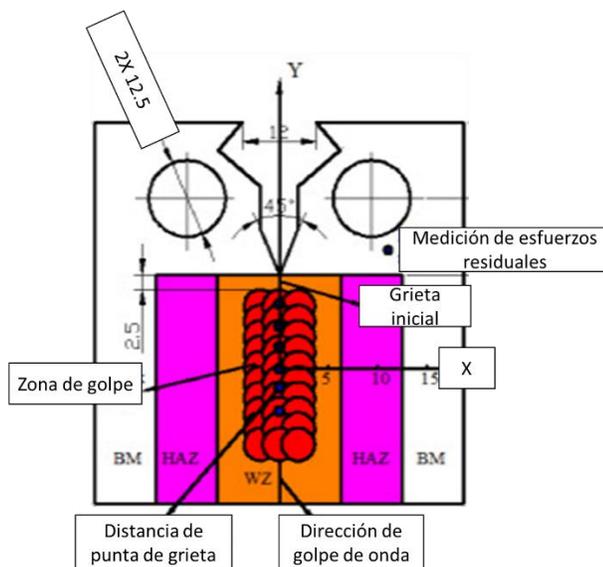
El LSP es una técnica novedosa y prometedora para el mejoramiento de la vida útil de las soldaduras debido a la alta tensión de compresión residual, ha sido utilizado para mejorar las propiedades de fatiga en distintos materiales como en aleaciones de aluminio, aleaciones base níquel y aceros.

La presión máxima de la onda LSP excede la fuerza de la elasticidad dinámica del material, produciendo un esfuerzo de compresión residual útil en la capa superficial, lo que retrasa la fatiga y el inicio de la fisuración [39].



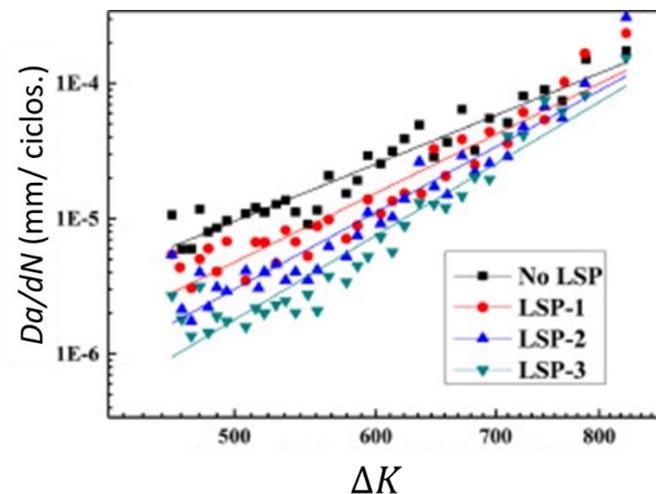
**Figura 2.25 Representación esquemática de láser peening [40].**

Yun et al [38] realizaron soldaduras LSP en una unión soldada. Con el propósito de mejorar las propiedades de fatiga, en la figura 2.26 se muestra un esquema del experimento realizado.



**Figura 2.26 Esquema del experimento realizado con recubrimiento de SLP [38].**

Realizaron pruebas experimentales con variando los tiempos de impacto de la onda de láser, aumentando de 0 a 1, de 1 a 2, y de 2 a 3. La variación de vida en fatiga para cada una de las pruebas se muestra en la figura 2.27. La vida en fatiga aumenta en un 162%, 32% y 6.2% con el aumento de los tiempos de impacto.

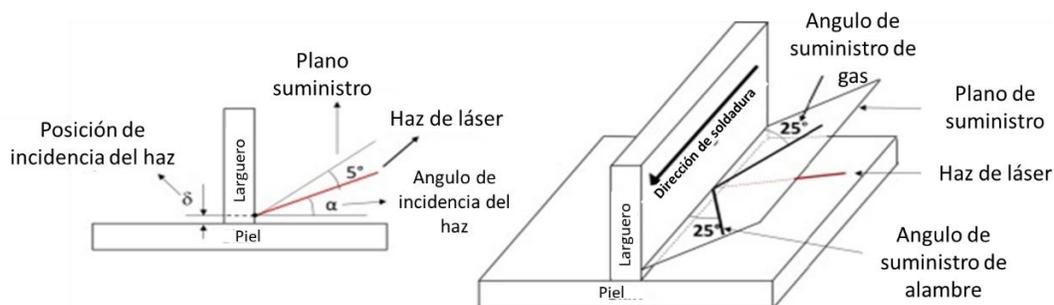


**Figura 2.27** Tasa de crecimiento de grieta en soldaduras EH36 con diferentes impactos LSP [38]

Las soldaduras EH36 con LSP-3 obtuvieron la vida en fatiga más alta, esto se atribuye a la mayor distribución de tensiones residuales y aun evidente refinamiento de grano inducido por LSP

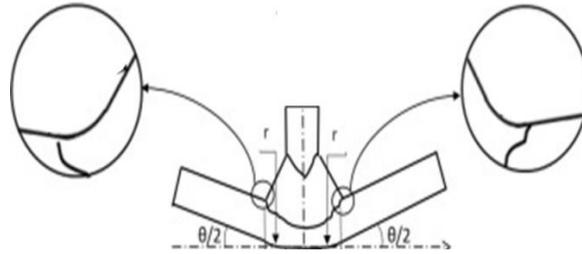
Oliveira et al [41] estudiaron la distorsión angular de juntas en T de aleaciones de aluminio soldadas con láser y su efecto en las curvas de fatiga.

En la figura 2.28 se muestra el esquema de configuración del cupón de soldadura.



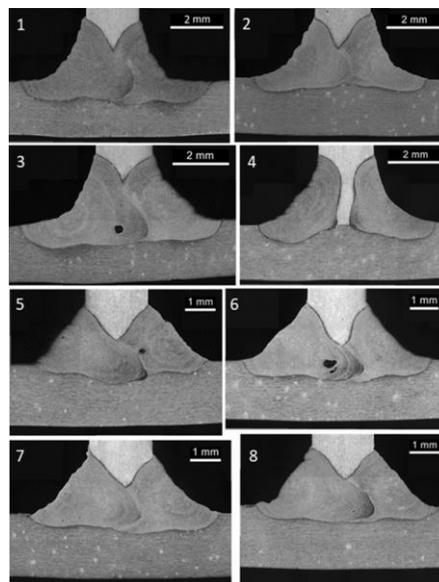
**Figura 2.28** cupón e soldadura láser en T [41]

La distorsión angular se ve afectada por los diferentes parámetros de soldadura, principalmente la potencia del rayo láser, la velocidad de soldadura y el ángulo del haz incidente. La distorsión angular también se ve afectada por la distancia entre los dedos de soldadura.



**Figura 2.29 Diagrama de distorsión angular en unión T por soldadura láser [41]**

En la figura 2.30 se muestra la existencia de poros en las macrografías de las soldaduras, este tipo de imperfección puede actuar como una muesca de soldadura, como un sitio en el cual se puede dar el inicio de grietas por fatiga.



**Figura 2.30 macrografías de unión en T soldada por proceso láser [41].**

La prueba de fatiga muestra que la dispersión y la pendiente de las curvas SN se ven afectadas por la desalineación angular. Por lo tanto, las curvas SN, que consideran la desalineación, tienen menor dispersión y mayor pendiente que la curva SN para la tensión nominal.

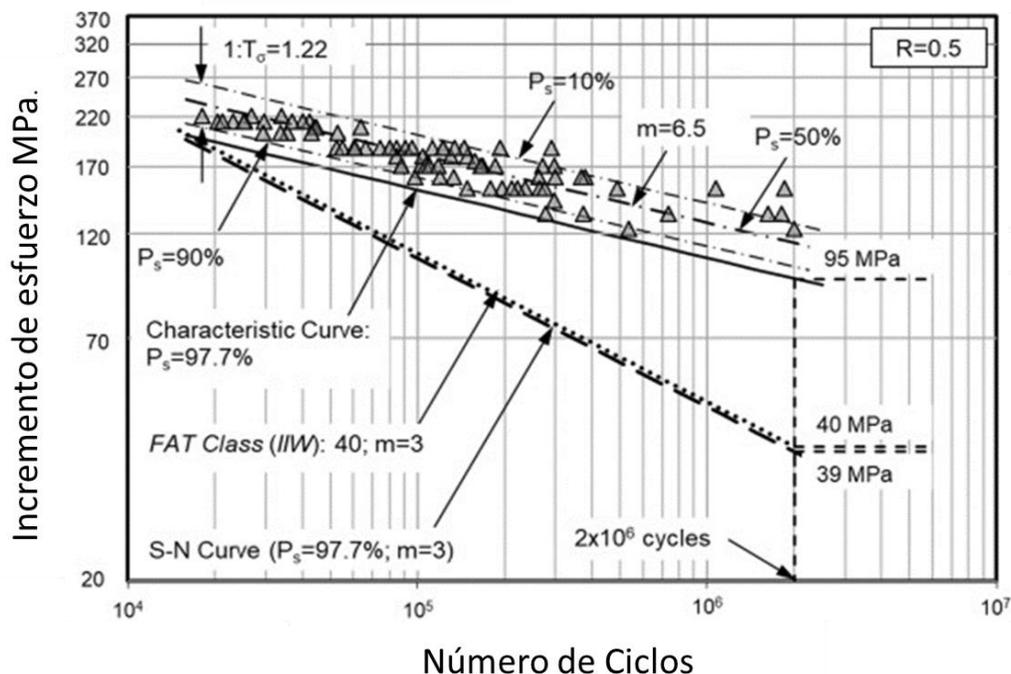


Figura 2.31 Diagrama SN de las muestras de uniones soldadas en T [41]

La alta tensión de flexión inducida por una alta desalineación angular aumenta la resistencia a la fatiga en  $2 \times 10$  ciclos de las curvas características.

Grbovico et al. [42] presenta el análisis numérico y experimental del crecimiento de grieta en paneles (Skin-Stringer) compuestos por capas o pieles de chapas de aleaciones de aluminio 6156 T6 y 6156 T4, soldadas mediante el proceso láser (LBW).

Se determinaron por medio de los coeficientes de París, las características de fatiga de los paneles con espesor de 2.6 mm, el  $\sigma_{max} = 57.16$  MPa, con la reacion de esfuerzos de  $R=0.146$ . los rangos para resultados de crecimiento de grieta en

función del factor de intensidad de esfuerzos ( $\Delta K$ ) se dan en la figura 2.31 para ambos materiales.

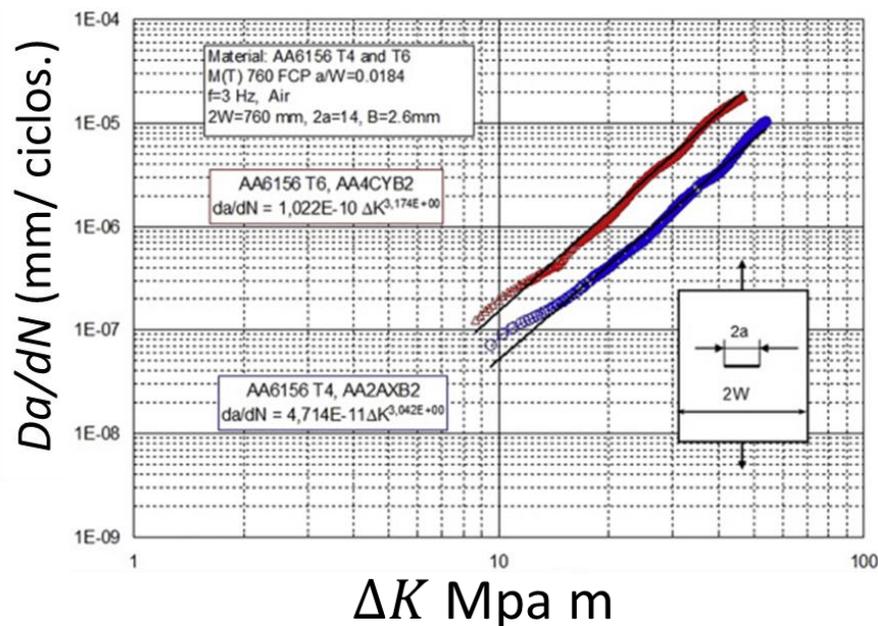
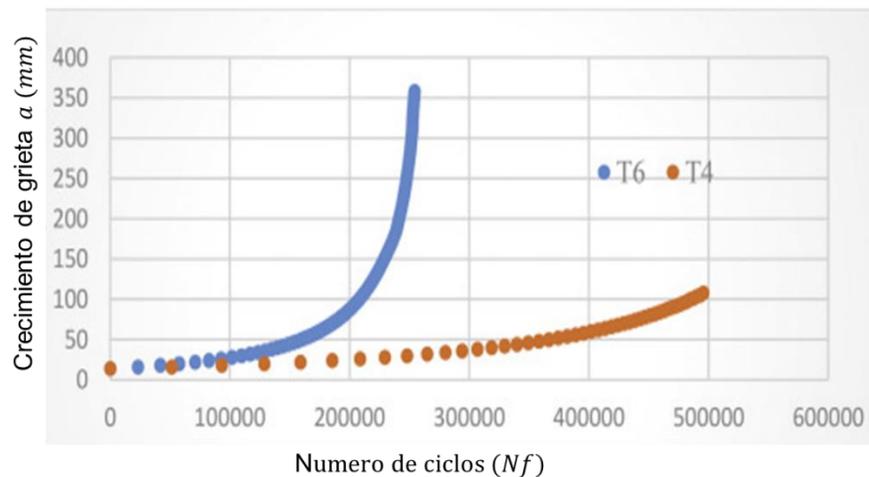


Figura 2.32 Crecimiento de grieta  $da/dN$  en función del incremento de esfuerzo [42]

Tabla 2.6 Valores de  $c$  y  $m$  aparecen en la tabla 2.6 para ambos materiales [42].

Material	C	m
AA 6156 T6	$1.022 \times 10^{-10}$	3.174
AA 6156 T4	$4.714 \times 10^{-10}$	3.042

El efecto del material resulta muy importante, ya que un ligero cambio en sus propiedades determina la vida de fatiga de los mismos, en la figura 2.32 se puede apreciar el crecimiento de grieta para ambas aleaciones de aluminio en función del número de ciclos.



**Figura 2.33 Crecimiento de grieta en función del número de ciclos [42]**

Para AA 6156 T6 se obtuvo 169 076 ciclos, mientras que para AA 6156 T4 el número de ciclos que resistió es de 189 5414 ciclos, una diferencia del 10.5 % para el mismo valor de grieta inicial 60mm.

Sowards et al. [43] presentan un procedimiento de láser por fibra para soldaduras a tope de láminas de acero HSLA, y un análisis de fatiga de bajo ciclo.

Dos láminas de acero de 100mm X 300mm se soldaron a tope utilizando un láser de fibra Yb de 1070 nm de onda continua.

La soldadura con láser dio lugar a esfuerzos residuales alrededor de la zona de fusión. En la figura 2.33 se puede apreciar las zonas dañadas por la acción de la fatiga.

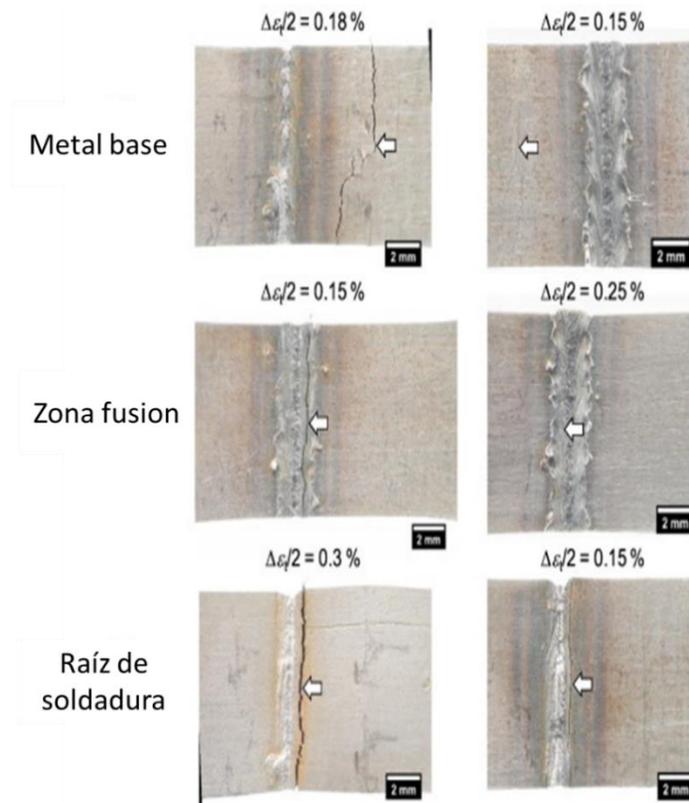


Figura 2.34 Zonas afectadas por acción de la fatiga del material [43].

Se encontró que La susceptibilidad a la fatiga de la soldadura fue mayor que la del metal base en amplitudes de deformación más altas la resistencia cíclica en el área de soldadura aumenta significativamente en comparación al metal base, debido a la formación de martensita en la soldadura causada por el enfriamiento rápido relacionado con la soldadura por láser. En la figura 2.34 se muestra la comparativa de vida en fatiga para metal base y soldadura.

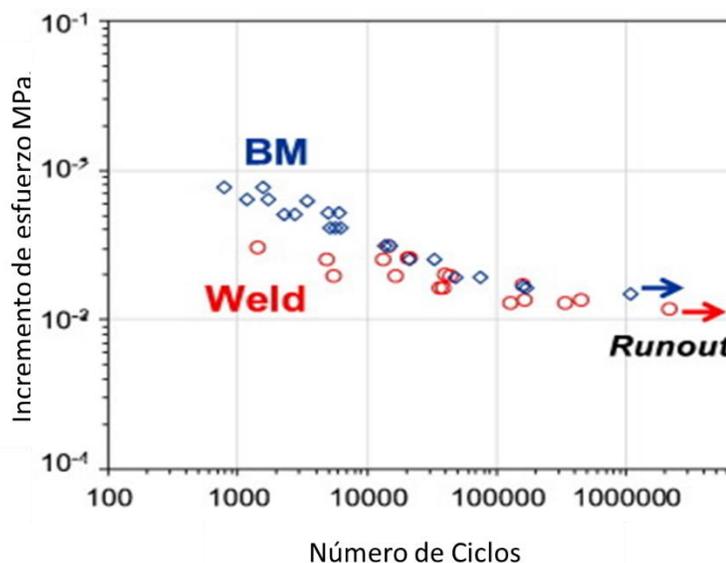


Figura 2.35 Comparativa de vida en fatiga para metal base y soldadura [43].

El daño por fatiga encontrado en las muestras de soldadura está presente en tres ubicaciones, en el metal base a distancia de la soldadura, en las marcas de ondulación dentro de la zona de fusión, y en la raíz de la soldadura.

### 2.2.5 Crecimiento de grieta.

La ley de crecimiento de grietas estece que la vida en fatiga es el número de ciclos necesarios para lograr una determinada dimensión de grieta final, este proceso se divide en dos etapas iniciación y propagación de grietas. El tamaño de grieta se puede presentar como la adición lineal del tamaño de grieta inicial y la propagación. La propagación de grieta se puede obtener a través de la ecuación de París [39]

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta k_1)^m$$

Liu et al [44], realizó un extenso estudio de la resistencia a la propagación de grietas integrando el parámetro de ruptura por fluencia de Manson Haferd en la ecuación de fatiga de Mason Coffin, demostrando que es posible modelar la iteración de fatiga por arrastre a partir de fatiga pura [44].

La relación de esfuerzos  $R$ , juega un papel muy importante en el crecimiento de grieta, y determina en medida el fenómeno de propagación de grieta. Esto debido a que  $C$  varía con la relación de esfuerzo. Li t al [45] estableció la relación entre  $C$  y  $m$  en términos de  $R$ , desarrollado las ecuaciones originales de París y Walker, además propone algunas modificaciones para la ecuación de Walker [40]

En la figura 2.35 se muestra el efecto de  $R$  en el crecimiento de grieta.

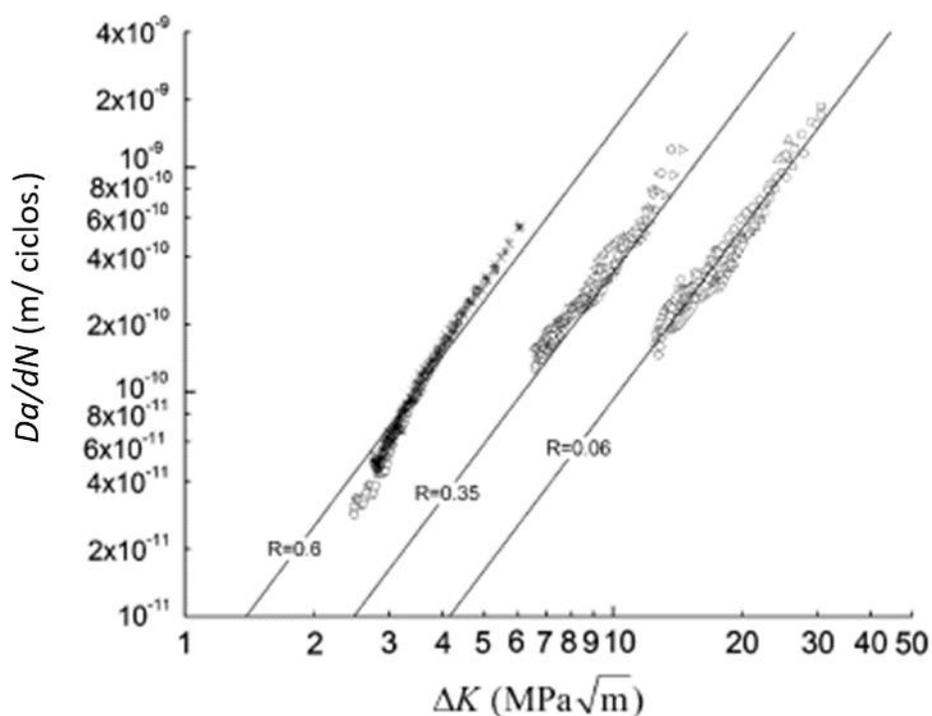


Figura 2.36 Resultados experimentales. Ecuación de Walker (aleación 2324-T39) [44]

En la actualidad existen distintas teorías del crecimiento de grieta para estudiar este fenómeno en materiales soldados. Sin embargo, verificar resultados de grietas pequeñas y tasas de crecimiento lentas puede resultar difícil por la falta de pruebas experimentales. Smith et al [46] emplean tamaños de defectos arbitrarios en los cálculos de fatiga vida junto con un análisis de tensión bidimensional. Se desarrollaron pruebas experimentales y teóricas para determinar el rendimiento en fatiga de una soldadura en filete con alivio de tensiones. Los resultados del crecimiento de grietas en los pies de la soldadura, se utilizaron para correlacionar la elasticidad con la intensidad de esfuerzos. [46]

### 3. CASO DE ESTUDIO

Durante las pruebas de fatiga el componente está sometido a cargas cíclicas que tensionan el material de manera no uniforme, dichos esfuerzos propician la formación y el crecimiento de grietas. En la figura 3.2 se muestra un esquema basado en la norma ASTM E399 en donde se aprecia el modo de aplicación de cargas para las pruebas de crecimiento de grieta.

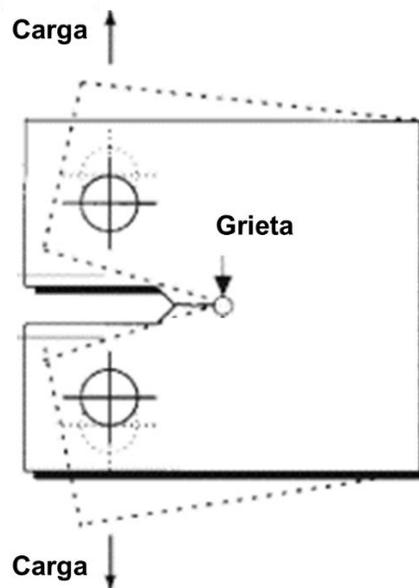


Figura 3.1 Esquema de aplicación de cargas en una prueba de crecimiento de grieta [12]

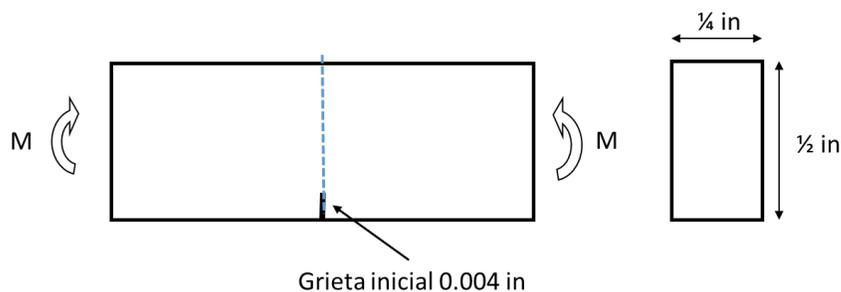
Para este trabajo, se propone un caso de estudio teórico del análisis del crecimiento de grieta por medio de la ley de París, haciendo uso de datos propuestos en la literatura para un acero AISI 4430. En la figura 3.2 se aprecia un esquema de la pieza de estudio.

Las propiedades del material aparecen a continuación en la tabla 4.1

**Tabla 3.1 Propiedades del acero AISI 4430 [15].**

$S_{ut}$	$S_Y$	$K_{IC}$	$c$	$m$
Kpsi	Kpsi	Kpsi $\sqrt{\text{in}}$	-	-
185	170	73	$3.8 \times 10^{-11}$	3

Se evalúa el crecimiento de grieta en una barra de acero AISI 4430 sometida a cargas repetidas de flexión, con un momento máximo de 1200 lbf in, bajo la consideración de tener una grieta inicial de 0.004 in.



**Figura 3.2 Esquema de condiciones iniciales de prueba de fatiga.**

En la tabla 3.2 se mencionan conceptos relacionados con la ecuación de París, que son útiles para determinar el crecimiento de grieta.

Tabla 3.2 Conceptos y fórmulas relacionados con la ecuación de París [47]

Ecuación de París	$\frac{da}{dN} = C(\Delta k_1)^m$
Relación de esfuerzo	$\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}} = R$
Incremento intensidad de esfuerzo	$\Delta K = K_{max} - K_{min}$
Intensidad de esfuerzo máxima	$K_{max} = \beta \sigma_{max} \sqrt{\pi a}$
Intensidad de esfuerzo mínima	$K_{min} = \beta \sigma_{min} \sqrt{\pi a}$
Incremento intensidad de esfuerzo	$\Delta K = \beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$

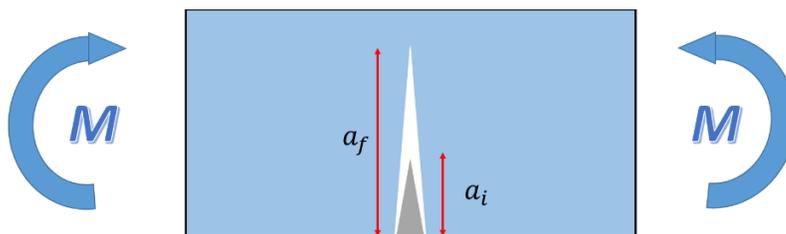


Figura 3.3 Caso de estudio representado de manera esquemática.

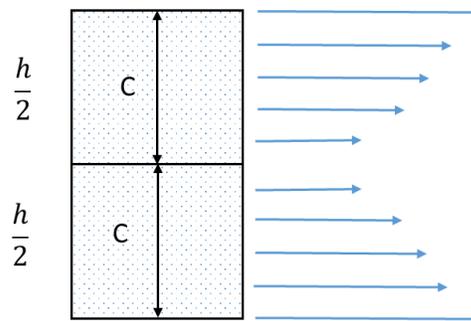
En el esquema mostrado en la figura 3.3 se aprecia que, a partir de un tamaño de grieta inicial, se calcula el tamaño final de grieta y los números de ciclos requeridos bajo la acción de una carga de flexión conocida.

### 3.1 Estudio teórico del crecimiento de grieta

La ley de París sirve para estudiar y determinar el crecimiento de grieta en la segunda etapa de fatiga de los materiales. El campo de aplicación de esfuerzo en fatiga oscila entre un esfuerzo máximo y uno mínimo que corresponden a las cargas máxima y mínima a que está sometido el material durante un ciclo de carga. Para calcular el incremento de esfuerzo ( $\Delta\sigma$ ) se utiliza el módulo de sección ( $S$ ), considerando un área nominal sin grieta.

$$S = \frac{I}{C}$$

en donde ( $I$ ) corresponde a el momento de inercia y ( $C$ ) al centro de gravedad o primer centroide.



**Figura 3.4 Centros de gravedad**

El momento de inercia está definido por la integral de la siguiente función. En donde  $b$  y  $h$  corresponden a base y altura que para este caso son 0.25 in y 0.5 in respectivamente.

$$I = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} y^2 (b dy); I = \frac{bh^3}{12}$$

El esfuerzo máximo está dado por el momento máximo de la prueba y por el módulo de sección como se muestra a continuación.

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S}$$

$$S = \frac{bh^2}{6} = \frac{(0.25)(0.5)^2}{6} = 0.01041667 \text{ in}^3$$

$$\sigma_{max} = \frac{M}{S} = 115.2 \frac{\text{lb}f}{\text{in}^2}$$

Del incremento de intensidad de esfuerzo, mostrado en la ecuación siguiente, se puede despejar para calcular el tamaño final de grieta, bajo las condiciones dadas.

$$\Delta K = \beta \sigma_{max} \sqrt{\pi a_f}$$

Cuando la grieta crece, en algún momento será lo suficientemente grande como para que se presente la fluencia del material o una fractura frágil. Es por eso que se supone la igualdad de la intensidad de esfuerzo ( $\Delta k$ ) y la tenacidad a la fractura ( $K_{IC}$ ), con valor de  $\beta = 1$ .

$$a_f = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{IC}}{\beta \sigma_{max}} \right)^2 = 0.1278 \text{ in}$$

Con la siguiente relación se calcula  $\beta$  en la figura 2.1-8.

$$\frac{a_f}{h} = 0.256; \quad \frac{1}{h} = 4$$

Con el valor de  $\beta = 1.07$  se calcula nuevamente el tamaño de grieta final como se muestra a continuación.

$$a_f = \frac{1}{\pi} \left( \frac{73 \text{ Kpsi} \sqrt{\text{in}}}{(1.07) \left( 115.2 \frac{\text{klbf}}{\text{in}^2} \right)} \right)^2 = 0.1116409 \text{ in}$$

La cantidad de ciclos que la pieza requerirá para crecer su grieta hasta el valor final, bajo determinadas condiciones está dada por la integral definida de la siguiente función.

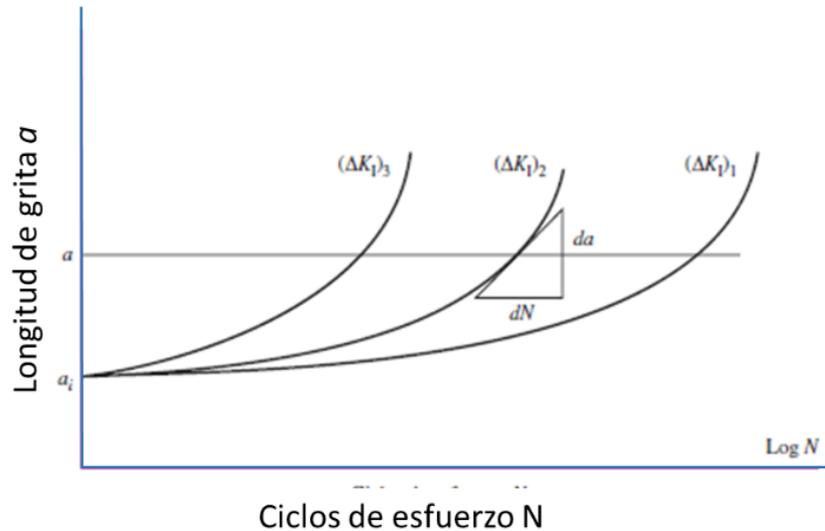
$$Nf = \frac{1}{c} \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{\beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a_f}}$$

$$\frac{1}{C \beta^3 \Delta \sigma^3 \pi^{\frac{3}{2}}} \int_{0.004 \text{ in}}^{0.112 \text{ in}} \frac{da}{\sqrt{a^3}}$$

$$Nf = 64\,691.9937 \text{ ciclos}$$

### 3.2 Crecimiento de grieta en función del número de ciclos

La aparición y crecimiento de grietas se da con la aplicación de cargas variantes y con la existencia de esfuerzos en cada ciclo de esfuerzo. Esto se puede observar de manera gráfica en la figura 2.7, en donde se observa comportamientos distintos para curvas de crecimiento de grieta, y como la cantidad de ciclos requerida para alcanzar un determinado tamaño de grieta es distinta para cada valor de intensidad de esfuerzo.

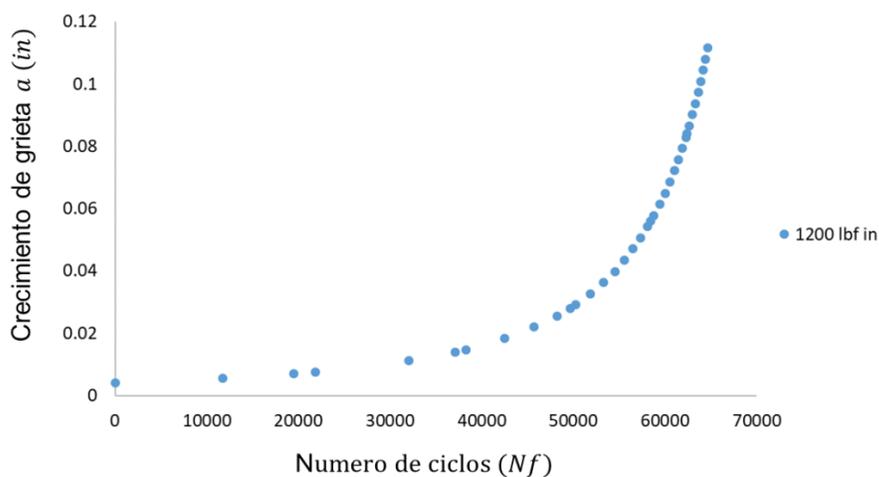


**Figura 2.7 Aumento de longitud de la grieta, ( $a$ ), en función del conteo de ciclos [17].**

Para entender el proceso de crecimiento de grieta durante los  $n$  cantidad de ciclos que la pieza del caso de estudio soportará, es necesario estudiar la ecuación dentro de los valores de la integral definida para  $Nf$ .

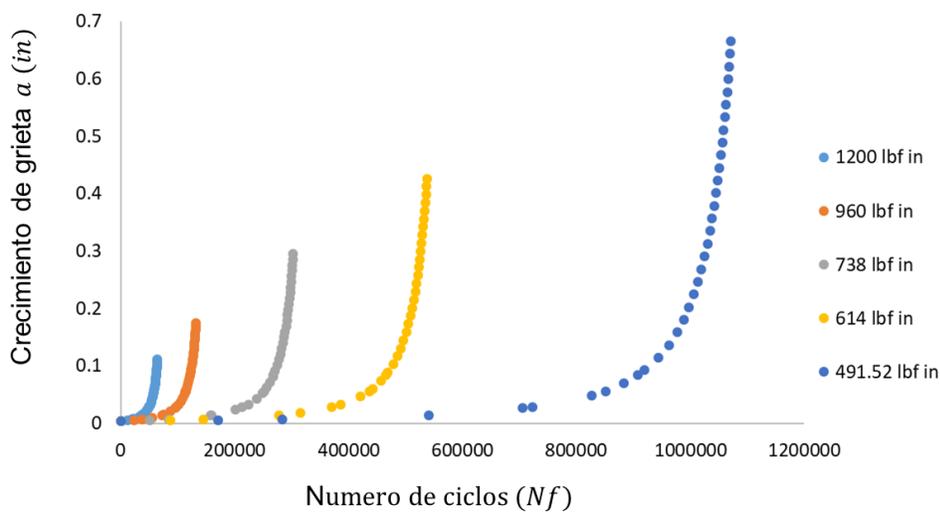
Por tal motivo se plantean distintos valores arbitrarios para  $a_f$  siempre respetando 0.004 in como el valor más bajo y 0.112 in como el máximo, esto se puede estudiar de manera gráfica en la curva descrita en la figura 3.5

Para el efecto de crecimiento de grieta resulta también importante estudiar el comportamiento de la misma, al variar la carga aplicada en cada ciclo, en la figura 3.6, se muestra el comportamiento el crecimiento de la grieta al variar la carga aplicada en el momento de flexión.



**Figura 3.5** Gráfica del comportamiento del tamaño de grieta en función del número de ciclos.

Para el efecto de crecimiento de grieta resulta también importante estudiar el comportamiento de la misma, al variar la carga aplicada en cada ciclo, a continuación, se muestra el comportamiento el crecimiento de la grieta al variar la carga aplicada en el momento de flexión.



**Figura 3.6** Comparativa de crecimientos de grieta con respecto al número de ciclos de distintos valores de carga en flexión.

En el crecimiento de grieta mostrado en la figura 3.5 se puede observar que durante los primeros ciclos se mantienen una tasa de crecimiento baja, pero a medida que la grieta comienza a propagarse, 45000 ciclos aproximadamente, el crecimiento se vuelve exponencial y cambia drásticamente a grandes tasas de crecimiento con bajos ciclos.

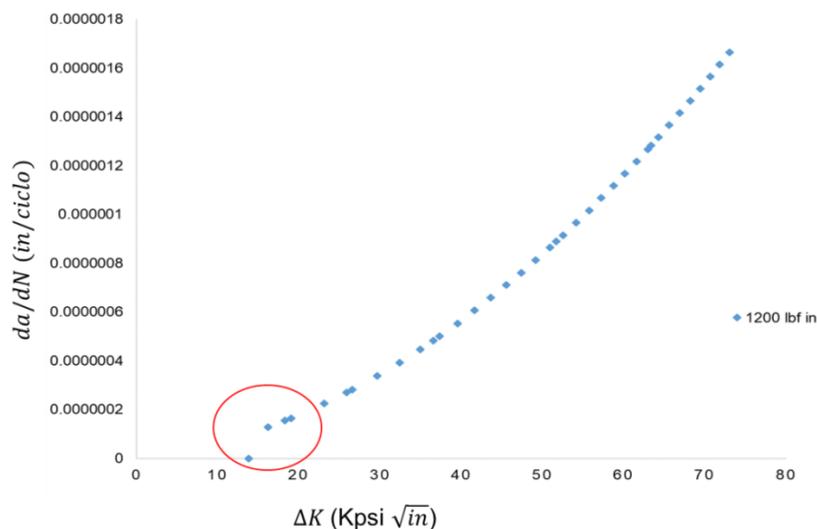
El mismo comportamiento se puede observar en la figura y 3.6, sin embargo, lo que es interesante recalcar en estas, es que a pesar de todas se calcularon con el mismo tamaño de grieta inicial, la disminución de la carga de 1200 lbf in a 491.52 lbf in del momento de flexión, ocasiona que la etapa en la que la grieta se propaga se incremente de 45 000 ciclos a hasta cerca de 900 000 ciclos.

### 3.3 Crecimiento de grieta en función del incremento del factor de intensidad de esfuerzos

La falla por fatiga está dada en tres etapas, inicio de grieta, propagación, y falla fractura por fatiga [12]. Este caso de estudio se basa en el análisis de la etapa 2, propagación de grieta, la cual es descrita por la ecuación de París. En la figura 3.7 se puede apreciar como es el comportamiento de la curva del crecimiento de grieta en función de la intensidad de esfuerzo.

Durante la primera etapa, la tasa de crecimiento de grieta es mayor, pues la grieta tiene un mayor crecimiento con un bajo incremento de intensidad de esfuerzo. En la segunda etapa, se describe una función lineal en donde el crecimiento de grieta es proporcional al incremento de intensidad de esfuerzos. Y en la tercera se aprecia como la grieta se propaga hasta su fractura, con un incremento de intensidad de esfuerzo bajo.

En las figuras 3.7 y 3.8 se puede observar que la tasa de crecimiento de grieta con respecto a los ciclos de carga dentro del rango de valores del caso de estudio.

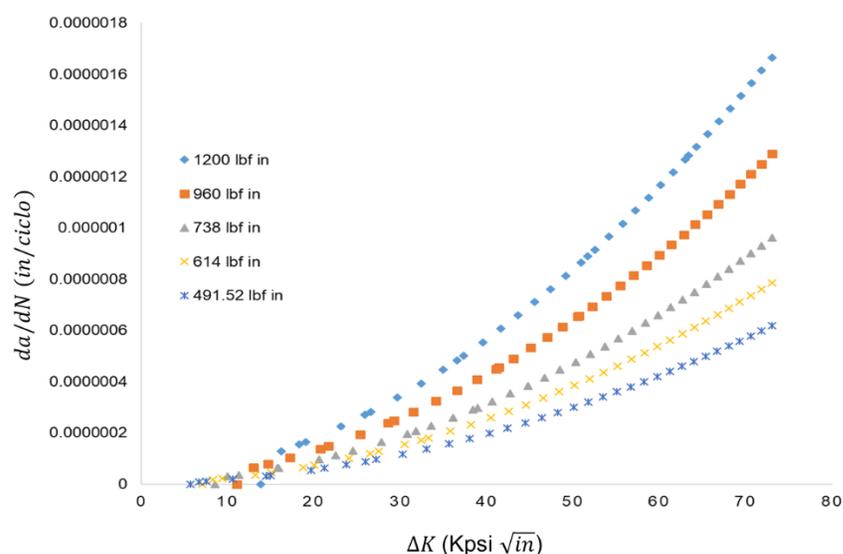


**Figura 3.7 Gráfica de crecimiento de grieta en función de los ciclos con respecto a incremento de la intensidad de esfuerzo para una carga de 1200 lbf in.i**

En la figura 3.7 se puede observar fácilmente las etapas de inicio y crecimiento de grieta, pero no la etapa de fractura por fatiga. La etapa de inicio de grieta se aprecia de manera similar que en la figura XX, debido a que el valor inicial de grieta o micro grieta es muy pequeño, tan cercano a 0 in que se permite apreciar un fenómeno muy parecido al inicio de grieta. Si observamos la parte señalada por el círculo rojo en la figura 3.7, se aprecia que el comportamiento de la curva se apega a las características de etapa I desde 0 y hasta  $2 \times 10^{-7}$  in/ciclo y aproximadamente  $16 \text{ Kpsi} \sqrt{in}$ . A partir de este punto el comportamiento de la curva corresponde a la segunda etapa, la propagación de grieta, con un comportamiento casi lineal que se prolonga hasta un crecimiento de grieta de  $1.6 \times 10^{-6}$  in/ciclos.

La etapa III de fractura por fatiga no se aprecia en las tablas 3.7 y 3.8, a pesar de que se utilizó el valor de  $K_{Ic}$  tenacidad a la fractura para calcular el número de ciclos. Por otra parte, se considera que la etapa III no se aprecia debido a que el valor para la tenacidad para la fractura y el incremento de intensidad de esfuerzos coinciden en  $73 \text{ Kpsi}\sqrt{\text{in}}$ .

Por otra parte, en la figura 3.8 se puede apreciar que el crecimiento de grieta puede verse afectado por la carga aplicada, la tasa de crecimiento de grieta para la carga de  $1200 \text{ lbf in}$  es de  $1.6 \times 10^{-6} \text{ in/ciclos}$ , lo que resulta sustancialmente mayor en comparación con  $6 \times 10^{-7} \text{ in/ciclo}$  para la carga de  $491.52 \text{ lbf in}$ .



**Figura 3.8** Grafica comparativa de  $da/dN$  con respecto al incremento de intensidad de esfuerzo bajo la acción de distintas cargas de flexión.

### 3.4 Influencia del valor de grieta inicial en el crecimiento de grieta por fatiga

Además del valor de carga cíclica a que es sometida una pieza, la muesca o grieta inicial, determina el crecimiento de grieta en una prueba de fatiga, ya que afecta directamente la forma en que se propagara la grieta a medida que aumenta el número de ciclos de carga.

Se han planteado evaluar el crecimiento de grieta para distintos valores de  $a_0$ , para valores fijos de  $\Delta\sigma$  bajo cargas de flexión de 1200, 960, 738, 614, 491 lbf in. Los valores numéricos se encuentran en las tablas 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7, respectivamente.

**Tabla 3.3 Crecimiento de grieta para distintos valores iniciales de grieta para una carga de 1200 lbf in.**

$M$ lbf.in	$a_0$ in	$\Delta\sigma$ Kpsi	$a_f$ in	$N_f$ Ciclos	$\frac{da}{dN}$
<b>1200</b>	<b>0.004</b>	<b>115.2</b>	<b>0.1116409</b>	<b>64691.994</b>	<b>1.6639E-06</b>
1200	0.022	115.2	0.1116409	18920.943	4.73766E-06
1200	0.04	115.2	0.1116409	10129.491	7.07251E-06
1200	0.058	115.2	0.1116409	5851.2193	9.16747E-06
1200	0.076	115.2	0.1116409	3202.2105	1.11301E-05
1200	0.094	115.2	0.1116409	1356.4034	1.30056E-05

**Tabla 3.4 Crecimiento de grieta para distintos valores iniciales de grieta para una carga de 960 lbf in.**

$M$ lbf.in	$a_0$ in	$\Delta\sigma$ Kpsi	$a_f$ in	$N_f$ Ciclos	$\frac{da}{dN}$
<b>960</b>	<b>0.004</b>	<b>92.16</b>	<b>0.1744389</b>	<b>132251.67</b>	<b>1.28875E-06</b>
960	0.022	92.16	0.1744389	42855.091	3.55708E-06
960	0.04	92.16	0.1744389	25684.286	5.23429E-06
960	0.058	92.16	0.1744389	17328.287	6.71959E-06
960	0.076	92.16	0.1744389	12154.442	8.09901E-06
960	0.094	92.16	0.1744389	8549.35	9.40877E-06

**Tabla 3.5 Crecimiento de grieta. Distintos valores iniciales de grieta para una carga de 738 lbf in.**

$M$ lbf.in	$a_0$ in	$\Delta\sigma$ Kpsi	$a_f$ in	$N_f$ Ciclos	$\frac{da}{dN}$
<b>738</b>	<b>0.004</b>	<b>70.848</b>	<b>0.2951706</b>	<b>303115.3</b>	<b>9.60594E-07</b>
738	0.022	70.848	0.2951706	106342.28	2.56879E-06
738	0.04	70.848	0.2951706	68547.203	3.72255E-06
738	0.058	70.848	0.2951706	50154.609	4.72879E-06
738	0.076	70.848	0.2951706	38766.332	5.65363E-06
738	0.094	70.848	0.2951706	30831.075	6.52493E-06

**Tabla 3.6 Crecimiento de grieta para distintos valores iniciales de grieta para una carga de 614 lbf in.**

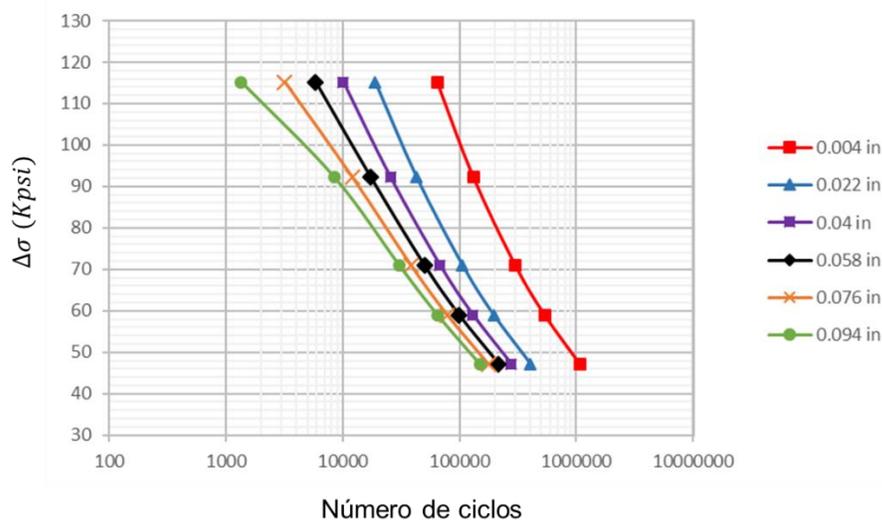
$M$ lbf.in	$a_0$ in	$\Delta\sigma$ Kpsi	$a_f$ in	$N_f$ Ciclos	$\frac{da}{dN}$
<b>614</b>	<b>0.004</b>	<b>58.944</b>	<b>0.4264313</b>	<b>537998.06</b>	<b>7.85191E-07</b>
614	0.022	58.944	0.4264313	196310.23	2.06016E-06
614	0.04	58.944	0.4264313	130680.71	2.95706E-06
614	0.058	58.944	0.4264313	98742.766	3.73122E-06
614	0.076	58.944	0.4264313	78967.515	4.43766E-06
614	0.094	58.944	0.4264313	65188.285	5.09956E-06

**Tabla 3.7 Crecimiento de grieta para distintos valores iniciales de grieta para una carga de 491.52 lbf in.**

$M$ lbf.in	$a_0$ in	$\Delta\sigma$ Kpsi	$a_f$ in	$N_f$ Ciclos	$\frac{da}{dN}$
<b>491.52</b>	<b>0.004</b>	<b>47.18592</b>	<b>0.6654316</b>	<b>1071160.4</b>	<b>6.17491E-07</b>
491.52	0.022	47.18592	0.6654316	405103.97	1.58831E-06
491.52	0.04	47.18592	0.6654316	277171.5	2.25648E-06
491.52	0.058	47.18592	0.6654316	214914.46	2.82639E-06
491.52	0.076	47.18592	0.6654316	176366.31	3.34209E-06
491.52	0.094	47.18592	0.6654316	149506.28	3.82212E-06

De lo anterior se observa que a medida que aumenta el tamaño de grieta inicial, los ciclos necesarios para  $a_f$  disminuyen. El comportamiento de  $\frac{da}{dN}$  es ascendente, de modo que para una grieta inicial menor, el valor de  $\frac{da}{dN}$  será mayor que para un valor más grande de  $a_i$ .

En la figura 3.9 se aprecia gráficamente la propagación de grietas con distintos valores de incremento de esfuerzo y grietas iniciales.



**Figura 3.9 Propagación de fractura para distintos valores de grieta inicial.**

Con base a lo observado en la figura 3.9, las tendencias de la cantidad de ciclos en función del incremento de esfuerzo utilizado, depende del tamaño de la grieta inicial de modo que, a mayor tamaño de grieta inicial, menor será el número de ciclos que soportará, para un determinado incremento de esfuerzo.

## 4. CONCLUSIONES

En el caso de estudio, se muestra el análisis del crecimiento de una grieta bajo determinadas condiciones. Se puede concluir que es posible calcular el crecimiento de grieta y los ciclos necesarios para alcanzar dicho crecimiento en distintos tipos de soldadura con ayuda de la ecuación de París.

En base al estudio teórico del crecimiento de grieta se puede concluir que:

- En base al crecimiento de grieta en función del número de ciclos, para 1200 lbf in, el comportamiento de la curva descrita por la función, se mantiene de 0 a 45,000 ciclos con una tasa de crecimiento baja cercana a los 0.02 in, y a partir de los 45,000 ciclos, el crecimiento de vuelve exponencial. Para 491.52 lbf in, el punto en el que el crecimiento de grieta se da de manera exponencial se da hasta los 950,000 ciclos. De manera que una carga de flexión baja, requiere una cantidad de ciclos elevada para generar el crecimiento de grieta.
- La disminución de la carga en el momento de flexión, ocasiona que la etapa en la que la grieta se propaga se incremente de 45 000 ciclos a 110 000 ciclos aproximadamente para la reducción de 20% de la carga.

- Para el crecimiento de grieta por ciclo en función del incremento de la intensidad de esfuerzo de la figura 3.7, la curva descrita hasta  $15 \text{ Kpsi}\sqrt{\text{in}}$  con un crecimiento de  $2 \times 10^{-7} \text{ in}$  por ciclo corresponde el inicio de grieta. Mientras que de  $15$  a  $73 \text{ Kpsi}\sqrt{\text{in}}$ , es en esta región en donde se da el crecimiento de grieta para la carga de  $1200 \text{ lbf in}$ .
- El valor de  $a_0$  tiene una significativa repercusión en la cantidad de ciclos, para el tamaño de grieta inicial de  $0.004 \text{ in}$  la curva trazada esta entre  $1071160.42$  y  $64691.99$  ciclos, para esfuerzos de  $47.18592$  y  $115.2 \text{ Kpsi}$  respectivamente. Mientras que la curva trazada con los valores de tamaño de grieta inicial más grandes,  $0.094 \text{ in}$ , está delimitada por los valores de  $149506.281$  y  $1356.40336$  ciclos para esfuerzos de  $47.18592$  y  $115.2 \text{ Kpsi}$ , respectivamente.

## 5. REFERENCIAS

- 1 Nathan, s. Ragu, et al. Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints. Defence technology, 2015, vol. 11, no 3, p. 308-317
- 2 ASM International, "Properties and selection: irons steels and high performance alloys," ASM Hand book., vol. 1, p. 1870–1871/656, 2005.
- 3 Semiatin, S.L. (2006; 2009). ASM Handbook, Volume 14B - Metalworking: Sheet Forming - 52.1 Classification of HSS and AHSS. ASM International.
- 4 Demeri, Mahmoud Y. (2013). Advanced High-Strength Steels - Science, Technology, and Applications - 2.4.4 High-Strength, Low-Alloy (HSLA) Steels. ASM International.
- 5 2001 ASM international. Alloying: understanding the basics
- 6 Lembersky, michael. (2016). Realistic cost estimating for manufacturing (3rd edition) - 9.5 electron beam welding. Society of manufacturing engineers (sme).
- 7 American welding society (aws). (2010). Recommended practices for láser beam welding, cutting, and allied processes (2nd edition).

8 Information resources management association. (2017). Materials science and engineering - concepts, methodologies, tools, and applications - 14.5 láser surface treatment. Igi global

9 Wohler, z. Bauw, vol 10, 1860, Pp 583

10 ASM 1150-1987, standard definitions of fatigue, 1995 annual book of standards, astm, 1995, p 753-762

11 Jorge Luis Gonzales Velazquez, mecánica de fractura, 2004, ed Limusa S.A de C.V.

12 Campbell, F.C. (2012). Fatigue and Fracture - Understanding the Basics - 5.7.1 Example Problem - Calculation of Fatigue Lives. ASM International.

13 J Eduard Pope. Soluciones prácticas para el ingeniero mecanico..editorial Mc Graw Hill. 2000.

14 Asm handbook, fractography, asm international, metals park, ohio, vol.12 9ª ed., 1987]

15 R. Budynas and J. Keith, Diseño en ingeniería mecánica de Shingley, Octava edición. no. 1408. McGraw-Hill, 2008.

16 N.e. Dowling, fatigue life and inelastic strain response under complex histories for an alloy steel, j. Test. Eval., vol 1 (no. 4), july 1973, p 271-287

17 Fatigue Crack Growth: Detect Volumen 227 de Solid Mechanics and Its Applications. Hans Albert Richard, Manuela Sander

18 ASTM E606. Standard test method for strain controlled fatigue testing. 2012

19 ASTM E399. Standard test method for lineal elastic plane strain fracture toughness  $K_{Ic}$  of metallic materials 2017

20 Schjødt-Thomsen, J., & Andreasen, J. H. (2018). Low cycle fatigue behaviour of welded T-joints in high strength steel. *Engineering Failure Analysis*,93, 38-43.

21 Olsen, Flemming Ove. (2009). Hybrid Láser-Arc Welding - 1.2.2.1 Equipment. Woodhead Publishing.

22 Faraji, A. H., Moradi, M., Goodarzi, M., Colucci, P., & Maletta, C. (2017). An investigation on capability of hybrid Nd: YAG laser-TIG welding technology for AA2198 Al-Li alloy. *Optics and Lasers in Engineering*,96, 1-6.

23 Xiao, R., & Zhang, X. (2014). Problems and issues in laser beam welding of aluminum–lithium alloys. *Journal of Manufacturing Processes*,16(2), 166-175.

24 Kaplan, A. F. H., & Powell, J. (2011). Spatter in laser welding. *J. Laser Appl*, 23(3), 032005.

25 Li, S., Chen, G., Katayama, S., & Zhang, Y. (2014). Relationship between spatter formation and dynamic molten pool during high-power deep-penetration laser welding. *Applied Surface Science*,303, 481-488.

26 Zhang, M., Zhang, Y., Mao, C., Hu, Y., Chen, G., & Bi, Z. (2019). Experiments on formation mechanism of root humping in high-power laser autogenous welding of thick plates with stainless steels. *Optics & Laser Technology*,111, 11-19.

27 Lin, R., Wang, H. P., Lu, F., Solomon, J., & Carlson, B. E. (2017). Numerical study of keyhole dynamics and keyhole-induced porosity formation in remote laser welding of Al alloys. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,108, 244-256.

28 Berger, P., Hügel, H., & Graf, T. (2011). Understanding pore formation in laser beam welding. *Physics Procedia*,12, 241-247.

29 Xu, J., Rong, Y., Huang, Y., Wang, P., & Wang, C. (2018). Keyhole-induced porosity formation during laser welding. *Journal of Materials Processing Technology*,252, 720-727.

30 Jiang, M., Tao, W., Chen, Y., & Li, F. (2019). Comparison of processing window in full penetration laser welding of thick high-strength steel under atmosphere and sub-atmosphere. *Optics & Laser Technology*,109, 449-455.

31 Shiozaki, T., Yamaguchi, N., Tamai, Y., Hiramoto, J., & Ogawa, K. (2018). Effect of weld toe geometry on fatigue life of lap fillet welded ultra-high strength steel joints. *International Journal of Fatigue*,116, 409-420.

32 Ordoñez, J. H., et al. Overloading effect on the fatigue strength in resistance spot welding joints of a DP980 steel. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 121, p. 163-171.

33 Guo, Hongchao, et al. Experimental study on fatigue performance of high strength steel welded joints. *Thin-Walled Structures*, 2018, vol. 131, p. 45-54

34 Cui, Chuang, et al. Fatigue performance and evaluation of welded joints in steel truss bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, vol. 148, p. 450-456.

35 Zhang, Chunguo, et al. Microstructure characteristics and fatigue properties of welded HSLA with and without buffer layer. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, vol. 546, p. 169-179.

36 Goyal, Rakesh, et al. Fracture mechanics based estimation of fatigue lives of laser welded joints. *Engineering Failure Analysis*, 2018, vol. 93, p. 340-355.

37 Wang, X. G., et al. An energy dissipation-based fatigue crack growth model. *International Journal of Fatigue*, 2018, vol. 114, p. 167-176.

38 Yun, W., Philip, B., Zhenying, X., & Junfeng, W. (2019). Study on fatigue crack growth performance of EH36 weldments by laser shock processing. *Surfaces and Interfaces*, 15, 199-204

39 Srinivasan, S., Garcia, D. B., Gean, M. C., Murthy, H., & Farris, T. N. (2009). Fretting fatigue of laser shock peened Ti-6Al-4V. *Tribology International*, 42(9), 1324-1329

40 Montross, C. S., Wei, T., Ye, L., Clark, G., & Mai, Y. W. (2002). Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review. *International journal of fatigue*, 24(10), 1021-1036.

41 Oliveira, P. I., Antunes, F. V., Loureiro, A., & Costa, J. M. (2019). Effect of the angular misalignment of laser welded T-joints on fatigue curves. *International Journal of Fatigue*.

42 Grbović, A., Sedmak, A., Kastratović, G., Petrašinović, D., Vidanović, N., & Sghayer, A. (2019). Effect of laser beam welded reinforcement on integral skin panel fatigue life. *Engineering Failure Analysis*, 101, 383-393.

43 Sowards, J. W., Pfeif, E. A., Connolly, M. J., McColskey, J. D., Miller, S. L., Simonds, B. J., & Fekete, J. R. (2017). Low-cycle fatigue behavior of fiber-laser welded, corrosion-resistant, high-strength low alloy sheet steel. *Materials & Design*, 121, 393-405.

44 Liu, Dan; PONS, Dirk John; WONG, E. H. Creep-integrated fatigue equation for metals. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 98, p. 167-175.

45 Li, Yazhi; WANG, Hai; GONG, Dezhi. The interrelation of the parameters in the Paris equation of fatigue crack growth. *Engineering Fracture Mechanics*, 2012, vol. 96, p. 500-509

46 Smith, Ian Fleming Campbell; SMITH, R. A. Fatigue crack growth in a fillet welded joint. *Engineering Fracture Mechanics*, 1983, vol. 18, no 4, p. 861-869.

47 A.A Andrade,et.al.Models of fatigue crack growth. Entre la ciencia e ingeniería. 2015. P.39-48

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de los aceros al carbono [2] .....	7
Tabla 2.2 Resultados de análisis de porosidad en soldadura láser [29] .....	33
Tabla 2.3 Comparación de los límites de fatiga en soldaduras y metal base acero Q460D [33]. .....	37
Tabla 2.4 Comparación de los límites de fatiga en soldaduras y metal base de acero Q690D [33].....	37
Tabla 2.5 Lista de resultados de prueba de fatiga. *NCU indica soldadura sin tratamiento, CFP tratamiento de perfil filete en esquina, CU combinados CFP y CUI [34].....	38
Tabla 2.6 Valores de c y m aparecen en la tabla 2.6 para ambos materiales [42]. .....	51
Tabla 3.1 Propiedades del acero AISI 4430 [15]. .....	58
Tabla 3.2 Conceptos y formulas relacionados con la ecuación de París [47] .....	59
Tabla 3.3 Crecimientos de grieta para distintos valores iniciales de grieta para una carga de 1200 lbf in .....	68
Tabla 3.4 Crecimientos de grieta para distintos valores iniciales de grieta para una carga de 960 lbf in .....	68
Tabla 3.5 Crecimientos de grieta. Distintos valores iniciales de grieta para una carga de 738 lbf in. ....	69

Tabla 3.6 Crecimientos de grieta para distintos valores iniciales de grieta para una carga de 614 lbf in .....69

Tabla 3.7 Crecimientos de grieta para distintos valores iniciales de grieta para una carga de 491.52 lbf in .....69

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Gráfica Elongación / Resistencia aceros HSS y AHSS [3].....	8
Figura 2.2 Esquema de láser focalizado en la pieza de trabajo [7].....	12
Figura 2.3 Esquema de ojo de cerradura de una soldadura láser [7].....	15
Figura 2.4 Etapas de inicio, propagación de grieta y fractura. [12] .....	19
Figura 2.5 Esquema de superficies de fractura por fatiga producidos bajo distintas condiciones de carga y niveles de esfuerzo nominal [14]. .....	21
Figura 2.6 Efectos iniciales y periódicos bajo esfuerzo, curva de esfuerzo vida de una aleación de acero [16]. .....	23
Figura 2.7 Aumento de longitud de la grieta, $a$ , en función del conteo de ciclos [17]. .....	24
Figura 2.8 Grieta transversal excéntrica bajo la aplicación de tensión longitudinal. Las líneas continuas evalúan la grieta en el extremo A, líneas discontinuas evalúan la grieta en extremo B [15]. .....	25
Figura 2.9 Placa sometida a tensión longitudinal, con grieta presente en borde. La línea discontinua $n$ tiene restricciones a la flexión, mientras que la línea discontinua presenta restricciones [15]. .....	26
Figura 2.10 Vigas transversales rectangulares con grieta transversal en borde [15]. .....	27
Figura 2.11 Geometría de especímenes para análisis de fatiga vida según ASTM E606 [18]. .....	28

Figura 2.12 Geometría de especímenes para análisis propagación de grieta según ASTM E399 [19].	28
Figura 2.13 Comportamiento dinámico del ojo de cerradura [25].	31
Figura 2.14 Formación de protuberancias radiculares en la soldadura láser de alta penetración [26].	32
Figura 2.15 Diagrama de Wholer. Representación de juntas soldadas y mecanizadas [31].	35
Figura 2.16 Diagrama de Wohler. Comparativa entre resistencia a la fatiga de uniones soldadas y uniones soldadas con relevado de esfuerzos [32].	36
Figura 2.17 Comparativa entre distintos grados de dureza por efecto de los procesos de soldadura y su relación con el tamaño de grieta por fatiga [34].	39
Figura 2.18 Microestructura óptica de soldadura de acero HSLA (Bisplate 80) sin buffer layer [34].	40
Figura 2.19 Microestructura óptica de soldadura de acero HSLA (Bisplate 80) con 4mm buffer layer [34].	41
Figura 2.20 Microestructura óptica de soldadura de acero HSLA (Bisplate 80) con 10mm buffer layer [34].	42
Figura 2.21 Esquema de la representación de las orientaciones del láser respecto al campo de aplicación [36].	43
Figura 2.22 Resultados experimentales del crecimiento de grieta en función del incremento de intensidad de esfuerzo [36].	44
Figura 2.23 Resultados experimentales de fatiga vida de 56 cupones de soldadura láser [36].	45
Figura 2.24 Dimensionamiento de grieta a partir del número de ciclos, bajo diferentes valores de relación de esfuerzo [37].	46
Figura 2.25 Representación esquemática de láser peening [40].	47

Figura 2.26 Esquema del experimento realizado con recubrimiento de SLP [38] .....	47
Figura 2.27 Tasa de crecimiento de grieta en soldaduras EH36 con diferentes impactos LSP [38] .....	48
Figura 2.28 Cupón e soldadura láser en T [41] .....	48
Figura 2.29 Diagrama de distorsión angular en unión T por soldadura láser [41] .....	49
Figura 2.30 Macrográficas de unión en T soldada por proceso láser [41]. .....	49
Figura 2.31 Diagrama SN de las muestras de uniones soldadas en T [41] .....	50
Figura 2.32 Crecimiento de grieta $da/dN$ en función del incremento de esfuerzo [42].....	51
Figura 2.33 Crecimiento de grieta en función del número de ciclos [42].....	52
Figura 2.34 Zonas afectadas por acción de la fatiga del material [43] .....	53
Figura 2.35 Comparativa de vida en fatiga para metal base y soldadura [43] ...	54
Figura 2.36 Resultados experimentales. Ecuación de Walker (aleación 2324- T39) [44] .....	55
Figura 3.1 Esquema de aplicación de cargas en una prueba de crecimiento de grieta [12].....	57
Figura 3.2 Esquema de condiciones iniciales de prueba de fatiga .....	58
Figura 3.3 Caso de estudio representado de manera esquemática.....	59
Figura 3.4 Centros de gravedad .....	60
Figura 3.5 Gráfica del comportamiento del tamaño de grieta en función del número de ciclos.....	64
Figura 3.6 Comparativa de crecimientos de grieta con respecto al número de ciclos de distintos valores de carga en flexión .....	64

Figura 3.7 Grafica de crecimiento de grieta en función de los ciclos con respecto a incremento de la intensidad de esfuerzo para una carga de 1200 lbf in. ....66

Figura 3.8 Grafica comparativa de  $da/dN$  con respecto al incremento de intensidad de esfuerzo bajo la acción de distintas cargas de flexión .....67

Figura 3.9 Propagación de fractura para distintos valores de grieta inicial. ....70