

**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**Tesis para optar por el título de Máster en CAD/CAM**

**Título:** Evaluación experimental y numérica del comportamiento a fatiga de una unión soldada a tope de acero AISI 1015 y electrodo E6013 cubano

**Autor:** Ing. Pavel Michel Almaguer Zaldivar, P. Aux.

**Tutores:**

Dr.C. Roberto Estrada Cingualbres, P.T.

Dr.C. Juan A. Pozo Morejón, P.T.

Holguín, Octubre del 2014.

*“La mecánica es el paraíso de las ciencias matemáticas, porque a través de la mecánica alcanzamos los frutos de las matemáticas.”*

*Leonardo Da Vinci*

## DEDICATORIA

*A Jailary, mi bebé, por existir y mostrarme una lucecita en el camino.*

*A mis padres por enseñarme a andar.*

*A Lili, mi esposa por todo el amor y apoyo dado.*

*A mi abuela Nelsa, que siempre me señaló el futuro y que lo siga haciendo donde quiera que se encuentre.*

*A mi hermana y sobrino, por ser tan importantes en mi vida.*

*A mis familiares y amigos que me han dado su apoyo y que no enumero por temor a dejar alguno fuera.*

*En fin, a todos los que me quieren.*

## AGRADECIMIENTOS

*Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos los que han hecho posible la realización de esta tesis.*

*A Jailarcita, por las noches sin dormir, a mis padres, mi esposa, mi abuela, mi hermana, mi sobrino y demás familiares y amigos.*

*A mis suegros, por toda su ayuda.*

*De forma especial a mis tutores, los doctores Roberto Estrada Cingualbres y Juan Pozo Morejón, por guiarme en la realización de esta tesis. A todos los amigos del Centro de Estudios CAD/CAM y de las Disciplinas Mecánica Aplicada y Computación de la Universidad de Holguín.*

*A los profesores del Grupo de Integridad Estructural de la Universidad de Burgos, en España: Jesús Manuel Alegre Calderón, Iván Cuesta Segura, Héctor Barbachano, Pedro Miguel Bravo Diez.*

## **RESUMEN**

La resistencia a fatiga de las uniones soldadas a menudo determina la resistencia de toda la estructura. En esta tesis se presenta una metodología para evaluar el comportamiento a fatiga mediante métodos numéricos basada en los resultados experimentales de ensayos realizados a una unión soldada a tope de acero AISI 1015 y electrodo E6013 de fabricación cubana como material base y de aporte respectivamente.

La tesis está estructurada en introducción y tres capítulos.

En el primer capítulo se realiza una revisión bibliográfica para conocer el estado del conocimiento sobre el tema y justificar la necesidad de realizar la investigación. Partiendo de los estudios realizados se propone una nueva definición para la fatiga mecánica.

El segundo capítulo aborda la caracterización del material base y el de aporte, los cálculos tecnológicos de la soldadura y los ensayos destructivos y no destructivos que se le realizarán a la unión. Se utiliza una macro obtenida como parte de esta investigación para los cálculos de la soldadura. Los pasos de la metodología para realizar la simulación de la fatiga de la unión es presentada en este capítulo.

En el tercer capítulo se exponen y analizan los resultados de los diferentes ensayos realizados y de la simulación numérica de la unión sometida a cargas cíclicas. Se obtiene que el 64,3 % de las probetas simuladas se encuentran dentro de las bandas de confianza del 95 %.

## **ABSTRACT**

Welded joints are an important part in structures. In this thesis a methodology to evaluate the fatigue behavior by means of numerical methods based on in welded joint fatigue experimental results is exposed. A butt welded joint of AISI 1015 steel and Cuban manufacturing E6013 electrode is studied.

An introduction and three chapters are described in this paper.

In the first chapter a review to know the state of knowledge and justify the scientific problem are realized. According to the results of the research a new definition of the mechanical fatigue is proposed.

Second chapter deal about the base and contribution metal mechanical characterization, technological welding calculus, destructive and not destructive testing that are made to the joint. A macro to calculate the welding process parameters is utilized. Fatigue simulation methodology step are described also in this chapter.

In the third chapter the different test results and fatigue numerical simulation are presented and discussed. The 64,3 % of the simulated specimens are inside of the 95% confidence bands.

## ÍNDICE

	Página
Introducción.....	8
Capítulo 1. Fundamentación teórica de la investigación.....	11
1.1. Introducción al capítulo.....	11
1.2. Estructura de la unión soldada.....	11
1.2.1. Zonas y características de la unión soldada.....	12
1.3. Defectos en la unión soldada.....	14
1.3.1. Tipos y causas.....	15
1.3.2. Métodos para la identificación de defectos en la unión soldada.....	17
1.4. Fatiga en la unión soldada.....	18
1.4.1. Fundamentos de la fatiga.....	20
1.4.2. Enfoque local.....	24
1.5. Simulación de la fatiga en la unión soldada.....	25
1.5.1. Justificación de la elección del software <i>Simulation</i> 2013.....	25
1.5.2. Regla de Miner.....	29
Capítulo 2. Metodología para la evaluación numérica del comportamiento a fatiga de una unión soldada.....	32
2.1. Introducción al capítulo.....	32
2.2. Caracterización de los materiales para la construcción de la unión.....	32
2.2.1. Caracterización del material base.....	33
2.2.2. Caracterización del material de aporte.....	35
2.3. Definición de los ensayos a realizar.....	36
2.3.1. Probetas.....	36
2.3.1.1 Cálculo de la temperatura de precalentamiento.....	37
2.3.1.2. Cálculos tecnológicos de la soldadura.....	38
2.3.2. Ensayos a tracción.....	39
2.3.3. Ensayos no destructivos.....	41
2.3.4. Ensayos a fatiga.....	44
2.3.5. Microscopía.....	45
2.4. Metodología para la evaluación numérica del comportamiento a fatiga de una unión soldada basada en los resultados experimentales.....	46
2.4.1. Generación del modelo.....	46
2.4.2 Generación de defectos en la probeta.....	47

2.4.3. Estudio estático.....	50
2.4.4. Construcción de la curva de tiempo.....	50
2.4.5. Estudio de fatiga.....	51
2.4.6. Obtención del número de ciclos que resiste la probeta.....	51
Capítulo 3. Resultados de la aplicación de la metodología en una unión soldada a tope.....	53
3.1. Introducción al capítulo.....	53
3.2. Resultados del ensayo a tracción y de la simulación.....	53
3.3. Resultados del ensayo a fatiga.....	57
3.3.1. Análisis estadístico del ensayo a fatiga.....	59
3.3.2. Presentación de los resultados del ensayo a fatiga.....	63
3.3.3. Curva S-N de la unión ensayada.....	65
3.3.4. Análisis fractográfico.....	66
3.4. Simulación del ensayo a fatiga.....	67
3.4.1. Generación del modelo.....	68
3.4.2. Generación de defectos.....	68
3.4.3. Estudios estáticos.....	70
3.4.4. Construcción de la curva de tiempo.....	73
3.4.5. Estudios a fatiga.....	73
3.4.6. Obtención de los números de ciclos que resiste la probeta.....	76
4. Conclusiones.....	78
5. Recomendaciones.....	79
6. Referencias bibliográficas.....	80
Anexos.....	86



## **Introducción**

La humanidad ha sufrido fenómenos de destrucción de elementos de máquinas y estructurales que trajeron consigo grandes pérdidas materiales y humanas, sin poder determinar, en su momento, las verdaderas causas de dichos fenómenos.

Es inevitable que al diseñar o construir una máquina o estructura, los ingenieros y constructores se encuentren con la interrogante ¿cómo garantizar que no se produzca el fallo durante la vida útil del elemento?

El ingeniero moderno debe de utilizar todo el rigor de los métodos de cálculo científicamente argumentados para crear una estructura segura y tenaz, capaz de funcionar fiablemente y que sea ventajosa desde el punto de vista económico. (Almaguer, 2009). En los procesos mencionados en la oración anterior aparecen de forma ineludible uniones entre diferentes partes que se realizan de varias maneras. Una de ellas es la soldadura.

La soldadura y su avance tecnológico supusieron una mejora muy importante en las técnicas de construcción. Hasta 1890 el único modo conocido para unir o soldar dos piezas metálicas era la forja. Con posterioridad se fue usando el soplete, para soldar metales que no iban a estar sujetos a un esfuerzo excesivo; en algunos casos se aportaba material con una varilla del mismo metal para fortalecer la unión, este tipo de soldadura se llamó autógena. Tras cierto tiempo apareció la soldadura con arco.

En sus albores se realizaba con electrodos desprovistos de recubrimiento hasta alrededor del año 1909, cuando se creó el recubrimiento, que cual tiene gran importancia en este proceso tecnológico. Sin embargo, en esos momentos la soldadura tenía detractores debido a que numerosos elementos soldados que estaban sometidos a cargas variables fallaban de forma catastrófica durante el servicio. Esto provocaba que otras formas de unión como las remachadas fueran preferidas, pues no provocaban el desarrollo de las grietas que se producen en la soldadura y facilitaba la reparación.

Durante el proceso de soldadura se originan esfuerzos y deformaciones residuales debidas a dilataciones y contracciones que aparecen como producto del calentamiento local del material. Estas pueden afectar el futuro desempeño del elemento por lo tanto su conocimiento y control es indispensable para los explotadores de las máquinas o estructuras.

Los bruscos cambios de temperatura en regiones localizadas de la unión producen expansiones y contracciones térmicas, que a su vez provocan tensiones residuales en la soldadura y distorsión del ensamble soldado. Por lo tanto la propia configuración geométrica de la junta ya es un fuerte concentrador de esfuerzos.

Otra característica importante de las uniones soldadas es la heterogeneidad de sus componentes, debido a las diferencias metalúrgicas y químicas entre el material base y el de aporte. La zona de afectación térmica representa una entalla metalúrgica debido a la disminución en las propiedades del metal base.

### **Problema práctico**

En Cuba no existe el equipamiento necesario para realizar experimentos a fatiga. Además estos ensayos son caros debido a la complejidad de las máquinas y al tiempo necesario para realizarlos.

### **Problema científico**

No se cuenta con una metodología que permita evaluar mediante el método de los elementos finitos, el comportamiento a fatiga de uniones soldadas solicitadas por cargas cíclicas.

Como **Objeto de la investigación** se define a la unión soldada a tope de acero AISI 1015, empleando como material de aporte el electrodo E6013 de fabricación cubana, utilizada en la construcción de maquinaria agrícola.

El **Campo de la investigación** es el comportamiento a fatiga de las uniones soldadas sometidas a la acción de cargas variables en el tiempo.

### **Hipótesis**

Si se diseña y aplica una metodología que permita evaluar mediante el Método de los Elementos Finitos la respuesta de una unión soldada solicitada por cargas cíclicas; basada en los resultados experimentales del ensayo a fatiga, entonces será posible utilizar la simulación numérica en los cálculos a fatiga de la unión, disminuyendo los costos de la experimentación.

### **Objetivo general**

Elaborar una metodología para evaluar el comportamiento a fatiga de una unión soldada a tope de acero AISI 1015, empleando como material de aporte el electrodo E6013 de fabricación cubana; mediante la experimentación y la simulación por elementos finitos.

### **Objetivos específicos**

1. Determinar mediante ensayos convencionales la curva  $S - N$  de la unión.
2. Diseñar y aplicar una metodología para evaluar el comportamiento a fatiga de la unión estudiada.
3. Simular mediante códigos de elementos finitos el comportamiento a fatiga de la unión.

### **Aportes Prácticos**

1. En la tesis se expone la curva  $S-N$  de la unión soldada del acero estructural AISI 1015 y material de aporte el electrodo E6013 de fabricación cubana, empleado en la construcción de maquinarias agrícolas. Con la misma es posible estudiar el comportamiento de la unión bajo cargas variables.
2. Con la macro WeldParam y el software Grafat.exe, diseñados y desarrollados como parte de esta tesis es posible obtener los parámetros del proceso de soldadura para la unión soldada y la construcción de los gráficos de fatiga usando los datos experimentales respectivamente.

### **Métodos de investigación científica empleados**

1. Experimentales: para obtener las características mecánicas y la curva  $S - N$  de la unión soldada objeto de estudio, validando los resultados obtenidos en las simulaciones.
2. Computacionales (numéricos): para obtener, mediante simulación, el comportamiento a fatiga de la unión.
3. De análisis y síntesis: permiten, con el estudio de la literatura, conocer el estado de la temática para desarrollar la metodología que permita la caracterización de la unión estudiada.
4. Estadísticos: se emplean para el procesamiento de la información obtenida mediante la experimentación y la simulación.

## **Capítulo 1. Fundamentación teórica de la investigación.**

### **1.1. Introducción al capítulo.**

En este capítulo se realiza un análisis de los elementos teóricos que fundamentan esta tesis. En primer lugar es necesario conocer la estructura de la unión soldada y las características de cada zona, porque debido a la heterogeneidad de las distintas partes que la componen el comportamiento mecánico global de la junta puede ser difícil de predecir.

Debido a las características térmicas del proceso de soldadura y a las condiciones metalúrgicas y mecánicas de la unión pueden surgir defectos que afecten el funcionamiento correcto del conjunto. Otra causa de la aparición de defectos pueden ser tecnologías y procedimientos incorrectos. Se realiza una caracterización de los distintos defectos que pueden aparecer en las uniones soldadas.

El fenómeno de la fatiga mecánica siempre es objeto de interés de ingenieros e investigadores que centran sus esfuerzos en garantizar que no ocurre el fallo de las piezas por esta causa durante su vida útil. En el caso de las uniones soldadas, la presencia de tensiones residuales de origen térmico, la concentración de tensiones por la geometría de la junta y la variación de las propiedades mecánicas en la unión son factores que influyen en la respuesta de la junta solicitada por cargas cíclicas.

Como el comportamiento a fatiga de los materiales ingenieriles es un fenómeno multiparamétrico y probabilístico, los experimentos son complejos y costosos. De aquí que la simulación mediante métodos numéricos sea una buena opción para evaluar la fatiga mecánica. El software *SolidWorks* tiene incorporado el complemento *Simulation*, que entre sus módulos de cálculo permite realizar estudios de comprobación a fatiga.

### **1.2. Estructura de la unión soldada.**

La zona de la soldadura puede llegar a convertirse en uno de los puntos más débiles de la estructura, provocando el fallo prematuro de la misma. Para que esto no ocurra es necesario controlar adecuadamente los parámetros de soldeo y la calidad del cordón, así como conocer el comportamiento mecánico de la unión soldada.

En la unión soldada es posible encontrar cuatro zonas que son:

1. Zona fundida (ZF).

2. Zona de transición.
3. Zona de afectación térmica (ZAT).
4. Metal base (MB).

El ciclo térmico de soldeo determina en cada punto de la zona de afectación térmica un tratamiento térmico distinto, definidos cada uno de ellos por la máxima temperatura alcanzada y la velocidad de enfriamiento, por lo tanto las transformaciones que ocurren en esta zona dependen principalmente de estos dos factores (Rodríguez, 1983).

### 1.2.1. Zonas y características de la unión soldada

Por las causas explicadas en el último párrafo del epígrafe anterior la ZAT se divide en tres partes fundamentales, de acuerdo con tres isoterma principales, que son puntos de igual temperatura situados sobre una misma línea (Figura 1.1). En el caso de los aceros estas tres zonas se conocen como:

1. Zona de sobrecalentamiento: se encuentra entre la frontera de la zona fundida con el metal base (denominada zona de transición) y la isoterma de  $1100^{\circ}\text{C}$ . Se caracteriza por un crecimiento de grano apreciable.
2. Zona de recocido: definido entre las isoterma de  $1100^{\circ}\text{C}$  y la de  $900^{\circ}\text{C}$ .
3. Zona de la primera transformación: ubicada entre las isoterma de  $900^{\circ}\text{C}$  y la de  $700^{\circ}\text{C}$ . En esta pueden ocurrir fenómenos secundarios como la formación de carburos.

Después de la isoterma de  $700^{\circ}\text{C}$ , se encuentra el metal base calentado sin sufrir afectaciones térmicas.



**Figura 1.1.** Zonas en que se divide la zona de afectación térmica. Fuente: Rodríguez, 1983.

Como es obvio, cada una de las zonas que aparecen en la unión soldada posee un comportamiento mecánico diferente, por lo que resulta complejo predecir el comportamiento global de la unión frente a las diferentes solicitaciones a las que puede estar sometida.

Son numerosos los investigadores que han estudiado este fenómeno, tal es el

caso de Reina (1994) que estudió la variación cualitativa de las cargas de rotura y de la tenacidad en función de las temperaturas alcanzadas en la ZAT y en el MB en la soldadura de un acero normalizado y otro bonificado. Dentro de la ZAT se produce un crecimiento apreciable del grano en la zona adyacente a la línea de fusión.

En este sentido es posible entonces definir a la ZAT como una entalla metalúrgica, donde la disminución de la tenacidad puede ser la causa fundamental de que el fallo por fatiga de la unión soldada se produzca en esta zona. En el caso de las uniones realizadas mediante soldadura manual por arco eléctrico, al depender fuertemente del factor humano, las posibles discontinuidades que se producen en la línea de fusión, más específicamente en el cambio de sección, son concentradores de tensiones mecánicas y por lo tanto, en ellas pueden nuclear futuras grietas de fatiga.

Según Bejerano (2007) las concentraciones de esfuerzos debidas a discontinuidades geométricas son determinantes en el desempeño de la soldadura, basta que en un solo punto de la geometría de la unión se alcancen niveles de esfuerzo superiores al límite de fluencia para iniciar una grieta, no importa si el esfuerzo nominal es mucho menor que el esfuerzo de fluencia.

El calentamiento y enfriamiento rápidos en regiones localizadas de la unión producen expansiones y contracciones térmicas, que a su vez provocan tensiones residuales en la soldadura y distorsión del ensamble soldado. Dado que las regiones del MB alejadas del cordón han permanecido relativamente frías y sin cambios de dimensión, mientras que la gota de material fundido ha solidificado a temperaturas muy altas y después se ha contraído, las tensiones residuales permanecen en forma longitudinal en la gota de soldadura. El resultado de la superposición de estas tensiones residuales, en forma transversal y longitudinal, puede ser una deformación permanente en la unión.

Las tensiones residuales inducidas en forma térmica y la distorsión implícita son un problema potencial en los procesos de soldadura, e incluso en otros procesos con aportación de calor.

Las grietas son producidas por problemas de contracción en el enfriamiento o por la velocidad de aplicación.

O sea, la existencia de deformaciones y tensiones residuales en las uniones soldadas influenciadas por los parámetros del proceso de soldadura influyen

sobre el límite de resistencia a la fatiga de las uniones soldadas, provocando un estado deformacional y tensional previo a la aplicación de las cargas externas.

Por lo tanto, las uniones soldadas presentan una serie de problemas particulares debidos a la heterogeneidad de sus componentes, y a la presencia de tensiones residuales y de la ZAT, que promueven la aparición de fisuras. El crecimiento y fractura de estas fisuras está afectado por la diferencia en tenacidad y propiedades mecánicas de los componentes de la unión soldada. Por lo tanto, es importante conocer sus efectos a la hora de determinar la integridad de la estructura, ya que frecuentemente la resistencia a fractura de la unión soldada determina la resistencia a fractura de toda la estructura (Peñuelas).

Justel (2013) reconoce la importancia de prevenir las deformaciones y las tensiones residuales. Al mismo tiempo propone un grupo de medidas prácticas durante la fabricación de la unión, para disminuir los efectos nocivos de estas tensiones. También se encuentran algunas posibles soluciones para corregir defectos presentes en una junta debido a las contracciones que tienen lugar durante la soldadura.

### **1.3. Defectos en la unión soldada**

Los procedimientos de fabricación y reparación de piezas por soldadura deben estar dirigidos a lograr soldaduras libres de defectos y que garanticen los requerimientos de diseño, o sea que tengan una respuesta adecuada ante la acción de las cargas exteriores. Deben emplearse métodos que controlen las tensiones residuales. Sin embargo, en ocasiones, la dificultad de su medición y la compleja distribución de las mismas a lo largo de la unión dificultan esto.

La influencia que los defectos tienen en la resistencia de los elementos ya había sido reconocida por Leonardo Da Vinci en el siglo XVI. En experimentos realizados por este científico italiano observó discrepancias entre la resistencia teórica y la real de alambres de hierro. Llegó a la conclusión que la causa era la presencia de defectos en la estructura metalográfica que provocaban el aumento local de las tensiones (Anderson, 1990).

### 1.3.1. Tipos y causas

La presencia del ser humano en las tecnologías de soldadura manual por arco eléctrico implica una obligatoria mirada a los diversos defectos que se pueden inducir en la unión soldada debidos a factores humanos.

Cuando se diseñan uniones soldadas para fatiga se han de preferir en lo posible procesos automáticos ya sean robotizados o por arco sumergido. En caso contrario la operación manual en la aplicación del material de aporte normalmente presentará una variada gama de defectos que reducen la calidad de la soldadura.

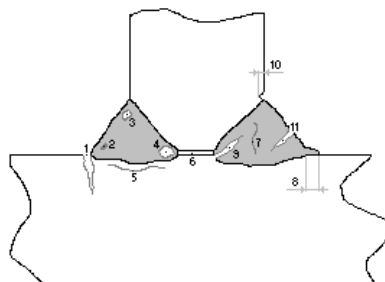
Numerosos investigadores han estudiado la presencia de los diferentes defectos en las uniones soldadas y las causas que los provocan con el propósito de erradicarlas para lograr uniones sanas.

El defecto más peligroso son las grietas, que no son más que roturas, las cuales en algunas ocasiones son pequeñas, pero que como resultado de ellas se obtiene una unión soldada con una resistencia mecánica distinta a la deseada en el diseño.

Para el estudio del agrietamiento de las uniones soldadas se enfoca el problema desde los mecanismos de formación hasta conocer las causas que provocan las distintas grietas, para posteriormente poder realizar recomendaciones que eviten su formación (Rodríguez, 1983).

En diferentes bibliografías se encuentran clasificaciones para los defectos en las uniones soldadas (Gutiérrez, 1980; Reina, 1994; Rodríguez, 1983, Shukla, 2004, González, 2010).

Una clasificación más abarcadora de los defectos que pueden presentarse en la unión la encontramos en el texto *Practical Fracture Mechanics in Design* (Shukla, 2004). La forma de estos defectos se muestra en la figura 1.2.



**Figura 1.2.** Defectos que pueden presentarse en una unión soldada. Fuente: Shukla, 2004.



Los defectos señalados en la figura 1.2 son:

1. Grieta en el pie.
2. Inclusión de escoria.
3. Bolsa de gas.
4. Porosidad.
5. Grieta bajo el cordón.
6. Falta de fusión.
7. Grieta por solidificación.
8. Solapamiento.
9. Grieta en la raíz.
10. Socavamiento.
11. Grieta en la garganta.

Como se aprecia en la figura anterior en la unión soldada se presentan numerosas grietas, estas son posibles definir las como discontinuidades que aparecen como una fractura tanto en el cordón de soldadura como también en el material base. Su existencia tendrá más o menos influencia de acuerdo con el funcionamiento del conjunto soldado. Provocan la disminución de la resistencia a la fatiga, bastando para que ocurra el fallo su crecimiento y propagación.

Las grietas longitudinales son paralelas al eje de la soldadura. En el caso de las soldaduras de arco sumergido, son comúnmente asociadas con altas velocidades y a veces están relacionadas con problemas de porosidad, que no se muestran en la superficie. Las fisuras longitudinales en pequeñas soldaduras entre grandes secciones, son frecuentemente el resultado de un alto grado de enfriamiento y de grandes restricciones.

A continuación se muestra el parachoques delantero de un automóvil de carga donde se aprecia la combinación de una grieta transversal con una longitudinal (Figura 1.3).



**Figura 1.3.** Combinación de una grieta longitudinal con una transversal.

Fuente: Elaboración propia.

Pinch y Burdekin (1992) realizaron el estudio experimental y numérico de los valores de tensiones residuales en diferentes uniones soldadas, considerando la presencia de defectos de diferentes dimensiones. Los defectos fueron ubicados en el pie de la soldadura. Este estudio mostró el hecho de que la presencia de los defectos y las tensiones residuales de tracción disminuían la resistencia a la fractura de la unión. No considerar la presencia de las tensiones residuales positivas en los defectos es un error que puede llevar al fallo de la estructura. Sin embargo, si el defecto se ubica en la zona de tensiones residuales negativas, estas conllevan al cierre de la grieta, aumentando la vida útil del elemento, especialmente si actúan cargas cíclicas. Se aprecia que esto provoca una disminución del factor de intensidad de tensiones producto a la acción de las cargas externas.

### **1.3.2. Métodos para la identificación de defectos en la unión soldada**

Las grietas son producidas por problemas de contracción en el enfriamiento o por la velocidad de aplicación del calor. Su presencia puede ser determinada mediante ensayos no destructivos tales como el ultrasonido, las partículas magnéticas y los rayos X.

También con un sencillo ensayo no destructivo de inspección visual pueden ser identificados algunos defectos. En el caso de resultar imperceptibles visualmente una inspección mediante líquidos penetrantes las revelará. Este es un método que tiene gran aceptación debido a su efectividad, confiabilidad y facilidad de aplicación.

La manera en que se efectúa la inspección mediante estos líquidos aparece descrita en la bibliografía (ASTM E 165 – 02, Norma ASTM E 1417 – 99, Líquidos Penetrantes. Nivel I y II. <ftp://fim.uclv.edu.cu>).

#### **1.4. Fatiga en la unión soldada**

La fatiga constituye uno de los fenómenos que más influye en la vida útil de los elementos de máquinas y estructuras solicitados por cargas variables. A estos efectos, se recomienda que, siempre que sea posible, los detalles constructivos que sean susceptibles a la rotura por fatiga sean accesibles con el fin de permitir su inspección (Ministerio de Fomento, 2011). Entre los factores a tener en cuenta a la hora de diseñar y construir las uniones soldadas para mejorar su vida a fatiga están la concentración de tensiones debidas a los cambios en la geometría de la unión y las tensiones residuales de tracción que se superponen con las provocadas por las cargas exteriores, conllevando al desarrollo de grietas de fatiga. Los fallos por fatiga de las uniones soldadas a menudo se deben a las tensiones residuales de tracción y a los efectos de concentración de tensiones.

Las tensiones residuales o remanentes; según Shigley (1990) pueden servir para mejorar el límite de resistencia a la fatiga, o bien para afectarlo negativamente. Por lo general, si el esfuerzo remanente en la superficie de un elemento es de compresión, se mejora el límite mencionado. Los fallos por fatiga resultan ser fallos por esfuerzos de tracción y, por consiguiente, todo lo que los reduzca también disminuirá la posibilidad de este tipo de fallos.

Está demostrado por trabajos experimentales que la vida de una unión soldada sometida a fatiga, en aleaciones de aluminio al magnesio, aumenta si disminuyen las tensiones residuales de tracción propias de dicho proceso, que actúan en el “modo I” de carga (según el enfoque de Mecánica de Fractura es el modo de apertura de grietas por tracción), ya que estas se suman durante el servicio a la tensión media del ciclo de cargas variables (Pozo, 2008).

Las tensiones residuales de compresión pueden inducir un aumento del límite de resistencia a la fatiga de las uniones soldadas, debido a que incitan el cierre de las grietas de fatiga. Una forma de mejorarlo es provocarlas a través de algún tratamiento mecánico.

Por otro lado, las tensiones residuales de tracción disminuyen la vida a fatiga ya que elevan los valores de los parámetros del ciclo de carga. Estas tensiones provocan la abertura de la fisura favoreciendo su desarrollo.

En la soldadura siempre tenemos una carga inicial de tensión mínima. Las cargas más perjudiciales para la integridad de la unión son aquellas que

implican esfuerzos de tracción ya que son estos los que aceleran el surgimiento, crecimiento y la posterior propagación de las grietas. Por lo demás se sigue la misma lógica de la teoría clásica de fatiga (Bejerano, 2007).

La influencia que las discontinuidades geométricas tienen sobre la resistencia a la fatiga de las uniones soldadas sobre su comportamiento en servicio bajo régimen de cargas variables es un hecho ampliamente reconocido. En la ZAT, la zona inmediata al metal de aportación puede ser donde nuclea las discontinuidades que en general son las iniciadoras de las grietas de fatiga en las uniones soldadas. La fisura por fatiga comienza en un defecto local de la estructura, ya sea interno o externo, de hecho la propia geometría del cordón ya constituye una discontinuidad geométrica, que resulta ser un concentrador de esfuerzos.

Una forma racional de encarar el problema de diseño a la fatiga de uniones soldadas puede sustentarse en la consideración del hecho que para cualquier unión soldada sujeta a cargas cíclicas, los puntos críticos a partir de los cuales las fisuras por fatiga son generadas, están usualmente localizados en la zona de transición entre la ZAT y el metal de aportación o en la propia línea de fusión.

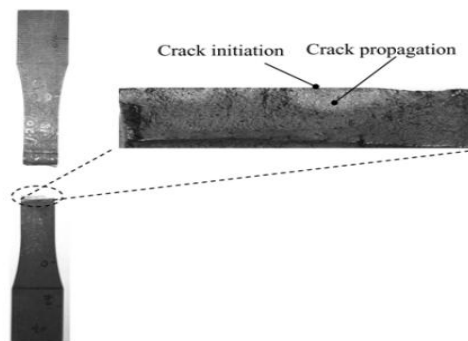
También es conocida la influencia del tratamiento térmico post soldadura sobre el valor de estas tensiones, lográndose con el mismo un relajamiento en el valor de las mismas y por lo tanto un incremento de la vida en fatiga de la junta soldada. Sin embargo, los estudios de (Nikitin and Besel, 2008), muestran que la relación existente entre la vida a fatiga de uniones soldadas y las tensiones residuales en el caso de aceros laminados AISI 304, así como el SAE 1045 no era significativa. Los ensayos a fatiga realizados por Barsoum (Barsoum, 2008) mostraron que el tratamiento térmico post soldadura a uniones de estructuras tubular no incrementaba la resistencia a la fatiga de la junta, al relajarse también las tensiones residuales de compresión.

Cheng(2009) plantea que la relajación de las tensiones residuales se produce con los ciclos de cargas de fatiga. Esa relajación depende de factores como los tipos y amplitud de la carga y el número de ciclos. Iida et al. (1997) mostraron que las tensiones residuales de soldadura se relajaban considerablemente con el primer ciclo de carga, y luego se iban relajando gradualmente con el incremento del número de ciclos a una misma amplitud, llegando a alcanzar el

46% del valor inicial con una cantidad de ciclos de 10 000. Blom (1995) planteó una relajación de las tensiones residuales del 50 % o más que ocurría alrededor del 8 % de la vida total de la probeta a niveles de tensión a la que era capaz de soportar 10 millones de ciclos. Lachmann et al. (2000) determinaron que estas tensiones en la costura de la soldadura se relajaban considerablemente después de los primeros ciclos de carga. La magnitud de la relajación de las tensiones residuales normalmente aumenta a altos niveles de tensión debido al incremento de las deformaciones plásticas (Cheng, 2009).

También las diferencias en la estructura metalográfica en diferentes puntos de la unión soldada es de esperar que influyan en la respuesta a fatiga de la misma. En esta dirección las grietas de fatiga deben surgir en aquella zona que sea menos tenaz, que es la zona que alcanza mayor temperatura en la ZAT, o sea, en el material base cercano a los límites del cordón de soldadura, donde se presenta una zona de grano grueso, con un aumento de la dureza, menores propiedades mecánicas, incluyendo una disminución de la tenacidad en esa zona.

La figura 1.4 muestra una probeta soldada ensayada a fatiga. Se observa el lugar donde inició la grieta y la forma en que creció, siguiendo un frente semielíptico.



**Figura 1.4.** Grietas de fatiga en la sección transversal de una unión soldada a tope. Fuente: Peng, 2008.

#### **1.4.1. Fundamentos de la fatiga**

La fatiga mecánica es un fenómeno complejo, que está influenciado por numerosos factores, cada uno de ellos incidiendo sobre la respuesta de los elementos mecánicos y estructurales ante la acción de una carga cíclica. Son numerosos los autores que se han interesado en este fenómeno. Las primeras referencias al fenómeno aparecen en el siglo XIX (Timoschenko, 1953).

Para explicar el fenómeno se propusieron teorías que justificaban la pérdida de resistencia mecánica en la alteración de la estructura interna del acero por campos magnéticos o por el propio giro del eje. Por absurdas que puedan parecer estas teorías, hay que tener en cuenta que por entonces los conocimientos relativos a la estructura interna de los materiales eran muy limitados, aunque se sabía que el proceso de fabricación condicionaba la textura del material confiriéndole unas determinadas propiedades (Wikipedia, 2009).

Algunas investigaciones consideraban el hecho de que producto a la variación de las tensiones la estructura del metal cambiaba sus propiedades, se recrystalizaba, o sea, se fatigaba. De esta suposición errónea se nombró al fenómeno con su nombre actual: “fatiga”.

A. Wöhler (Timoschenko, 1953) en 1874 comenzó a realizar estudios sobre las propiedades mecánicas de los materiales, y un poco después sus famosas investigaciones sobre la resistencia a la fatiga de los metales. De sus ensayos obtuvo dos conclusiones importantes: una era que las fuerzas necesarias para provocar la rotura con cargas dinámicas eran muy inferiores a las necesarias en el caso estático, y la segunda, que existía un umbral por debajo del cual las probetas no se rompían.

Después de la segunda guerra mundial comenzó a cobrar auge la Mecánica de la Fractura para realizar estudios sobre la fatiga de los materiales ingenieriles.

En la actualidad no existe una metodología única para el cálculo a fatiga de los elementos. De igual manera, tampoco existe un concepto único para definir el fenómeno, aunque si hay similitud entre los existentes

La acumulación de transformaciones mecánicas irreversibles en el material al aplicar cargas cíclicas se denomina fatiga y la destrucción producto al desarrollo paulatino de las grietas, se denomina destrucción por fatiga (Stiopin, 1978).

Cuando se habla sobre la fatiga de materiales ingenieriles es necesario tener en cuenta un grupo de conceptos.

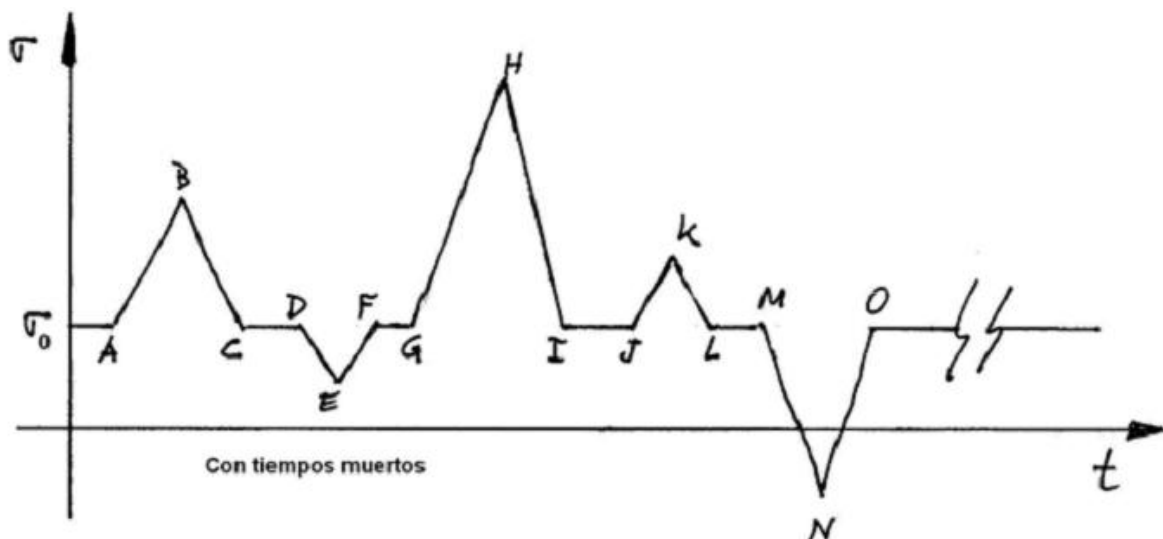
Tensión nominal: Tensión en un punto del elemento, contiguo a un punto de posible iniciación de una grieta de fatiga, calculada en régimen elástico por los métodos de la Resistencia de Materiales, sin considerar ningún efecto de

concentración de tensiones. La tensión puede ser de cualquier tipo, normal o tangencial, principal o no.

Tensión nominal modificada: Tensión nominal, multiplicada por un factor de concentración de tensiones. Se utiliza para tener en cuenta el efecto de discontinuidades.

Suceso de carga: Secuencia de cargas, tal como el paso de un vehículo, aplicadas a la estructura, que dan origen a un historial de tensiones. En general, se repite un cierto número de veces a lo largo de la vida útil de la estructura.

Historial de tensiones: En un punto de una pieza, ley que relaciona una determinada tensión en el punto, originada por un suceso de carga, con la variable tiempo (Figura 1.5).



**Figura 1.5.** Historial de tensiones. Fuente: (Ministerio de Fomento, 2011).

El historial de tensiones, en su forma más elemental puede ser representado según una expresión sinusoidal (Ecuación 1.1). En esa ecuación A, B y C son constantes que dependen de la condición y características de la carga (Tulio, 2004).

$$\sigma(t) = A \sin[Ct] + B \dots \dots \dots (1.1)$$

Ciclo o ciclo de tensión: Cada una de las partes elementales en que puede considerarse descompuesto un historial de tensiones.

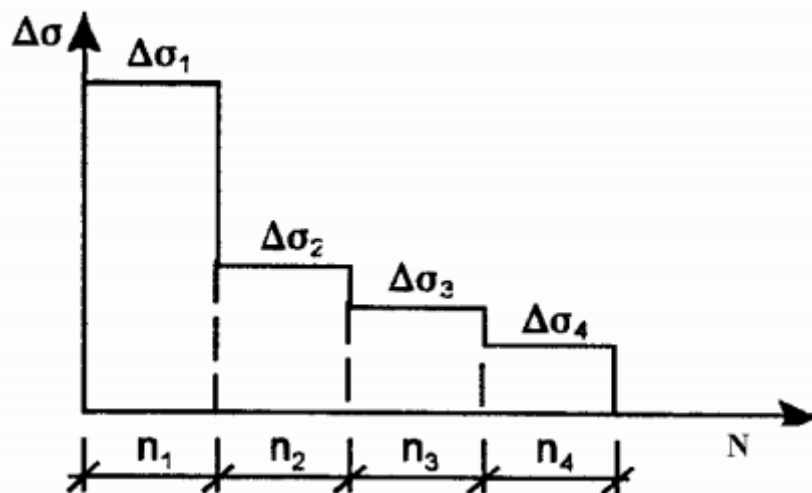
De forma general un ciclo de tensiones tiene las componentes siguientes (Stiopin, 1978; Fernández, 1981):

1. Tensión máxima  $\sigma_{max}$ .

2. Tensión mínima  $\sigma_{min}$ .
3. Tensión media.
4. Tensión amplitud.
5. Rango de tensión.
6. Relación de tensiones o coeficiente de asimetría.
7. Relación de amplitud: es la razón entre la tensión amplitud y la tensión media.

Espectro de rango de tensión: Histograma en el que se representa el número de ocurrencias de ciclos con diferentes rangos de tensión medidos o calculados para un determinado suceso de carga.

Espectro de cálculo: Suma de todos los rangos de tensión a lo largo de la vida útil de la estructura, relevantes a efectos del cálculo a fatiga. Está formado por  $n$  bloques, cada uno de ellos definido por su número  $n_i$  de ciclos de rango de tensión (Figura 1.6).



**Figura 1.6.** Espectro de cálculo. Fuente: (Ministerio de Fomento, 2011).

Las curvas S-N se basan en la vida a fatiga media o en una probabilidad de fallo dada. La generación de la curva S-N de un material requiere muchos ensayos para de una forma estadística variar las tensiones alternas, las tensiones medias (o ratio de tensión) y contar el número de ciclos. Para caracterizar un material se toma un conjunto de probetas y se las somete a sollicitaciones variables con diferentes niveles de tensión, contándose el número de ciclos que resiste hasta la rotura. Debido a la elevada dispersión estadística propia de la fatiga los resultados se agrupan en una banda de roturas. Una parte de esta dispersión puede atribuirse a errores del ensayo,



pero es una propiedad del fenómeno físico lo cual obliga a realizar un gran número de ensayos de probetas a fin de determinar la banda de fractura con suficiente precisión. Por tanto, caracterizar un material a fatiga supone un costo muy elevado, debido a la cantidad de probetas necesarias, la complejidad de las máquinas de ensayo y el tiempo necesario para realizar cada ensayo.

#### **1.4.2. Enfoque local**

En todo proceso de soldadura pueden aparecer defectos, debidos en ocasiones a los errores cometidos por los técnicos a la hora de efectuar el proceso; además que resulta difícil encontrar una unión soldada que esté sometida únicamente a cargas estáticas. El desarrollo de los procesos de soldadura en los últimos años ha permitido el empleo de las uniones soldadas solicitadas por cargas cíclicas, que pueden provocar el fallo por fatiga.

Lo mencionado en el párrafo anterior no significa que se utilice menos el proceso por soldadura o que este proceso no sea fiable, todo lo contrario, su alta fiabilidad, su bajo costo económico y otras ventajas que posee sobre otros procesos, hace emplear métodos donde las piezas o los conjuntos queden con el menor número de defectos posibles, realizar estudios de los defectos que se trata de analizar, cuál es el tipo de defecto, cuál será el daño que le ocasiona a la pieza o conjunto, si este crece en dimensión y que puede provocar esto, cuál será el tiempo que se puede explotar la pieza sin que esta falle o cuándo va a ocurrir el fallo.

En este sentido el enfoque local, que se basa en la ubicación de los denominados puntos calientes tiene gran significado. Según este enfoque, basta que en un punto cualquiera de la unión, existan valores de tensión iguales o superiores al límite de fluencia para que se inicie una grieta de fatiga. Al respecto Casanelli (Casanelli et al., 2002) plantean que una forma racional de encarar el problema de diseño ala fatiga de uniones soldadas puede sustentarse en la consideración del hecho que para cualquier unión soldada sujeta a cargas cíclicas, los puntos críticos a partir de los cuales las fisuras por fatiga son generadas, están usualmente localizados en el pie de la soldadura o en la raíz, razón por la cual estos puntos han sido bautizados comúnmente como “puntos calientes”(“*hot spots*”). El enfoque plantea que la resistencia a la fatiga de una unión soldada depende de los estados tensionales y deformacionales que tienen lugar en el punto caliente.

De esta manera la tensión que hay en el concentrador que se quiere evaluar va a tener varias componentes que fueron descritas por Casanelli et al. (2002). También es necesario tener en cuenta la presencia de tensiones térmicas. Estas quedan en la unión en forma de tensiones residuales y de su efecto perjudicial en la unión soldada. Sobre todo aquellas que actúan en el modo I de carga, pues favorecen la apertura y posterior crecimiento de grietas. Aunque se ha demostrado que estas tensiones se relajan (Iida, 1997), cuando esto ocurra, la grieta ya puede haber surgido y por lo tanto, si no se detiene su crecimiento, puede ocurrir el fallo por fatiga.

El enfoque local ha sido utilizado para estudiar el comportamiento del coeficiente de intensidad de tensiones en grietas longitudinales y transversales de uniones soldadas. (Almaguer, 2012) propuso una metodología para evaluar este coeficiente mediante el método de los elementos finitos. Los resultados arrojaron que en la punta de la grieta surgían elevados valores de tensiones, incluso superiores al límite de fluencia y que el valor del coeficiente de concentración de tensiones aumentaba con el aumento de las dimensiones del defecto. El mismo autor, en otro trabajo (Almaguer, 2013) utilizó este enfoque para evaluar el comportamiento a fatiga de las uniones mediante la simulación numérica y observó que en la punta de la grieta los valores de tensiones eran superiores al límite de fluencia y precisamente en esos puntos era donde comenzaba a crecer la grieta en probetas reales.

### **1.5. Simulación de la fatiga en la unión soldada**

Como se dijo en el epígrafe 1.4.1 los estudios experimentales del fenómeno de la fatiga son complejos y costosos por el equipamiento necesario y además por el tiempo que es necesario invertir en ellos. La simulación mediante los métodos numéricos es una buena opción cuando los investigadores se enfrentan a este fenómeno. Es necesario aclarar que la simulación nunca a va sustituir a los ensayos reales, pero sin embargo permite reducir considerablemente los costos de la experimentación, al permitir reducir la cantidad de probetas a ensayar. Para ello es posible construir modelos que sean capaces de reproducir los ensayos realizados a un grupo reducido de probetas. Si el investigador logra reproducir en las simulaciones los experimentos realizados en el laboratorio, entonces ha logrado el objetivo de realizar menos experimentos.

El fenómeno de la fatiga mecánica tiene una esencia multiparámica. Son numerosos los factores que pueden influir en los resultados de un experimento. De aquí que la información experimental que se obtiene puede tener grandes dispersiones. Sin embargo, los resultados de simulaciones pueden quedar incluidos dentro de las denominadas bandas de confianza, obtenidas mediante el análisis estadístico y la teoría de las probabilidades.

Numerosos investigadores han centrado su atención en la simulación de la fatiga mecánica en las uniones soldadas.

Wei y James (2002) presentaron el modelado mediante el método de los elementos finitos del cierre de grietas de fatiga inducidas por la plasticidad en grietas que se presentan inclinadas respecto al eje donde actúa la carga. Los resultados obtenidos con la modelación fueron ajustados mediante modelos de regresión con resultados experimentales, lo que mostró una buena concordancia entre ambos resultados. De esta manera se observó que era posible utilizar la simulación para el estudio de grietas de fatiga. La propagación estable de grietas en uniones soldadas de aluminio con láser fue investigada de forma experimental y numérica (Négre, 2003). Los experimentos fueron desarrollados con probetas compactas. Las grietas iniciales fueron asumidas en el MB y en la ZF. El método de los elementos finitos fue utilizado para determinar parámetros del modelo de daño de Gurson–Tvergaard–Needleman utilizado en las simulaciones. Numéricamente se observó que la grieta no se inició dentro de la primera fila de elementos finitos alrededor de la punta de la grieta, pero si dentro de la segunda. Esto provoca que haya que crear un túnel de grieta. Como este fenómeno no se observa de forma experimental, entonces existen diferencias entre el inicio de la grieta en los resultados experimentales y numéricos.

Las características de la propagación de grietas y la vida remanente a fatiga en los componentes estructurales soldados de barcos fue estudiado por (Sumi et al., 2004). Mediante la simulación pudieron predecir el camino de la grieta con bastante aproximación, que fue contrastado con la observación de grietas reales. El método propuesto ofrece una herramienta basada en la simulación, para el diseño de los detalles críticos, y de esta manera prevenir el fallo de la estructura.

El efecto de las tensiones residuales de soldadura en la propagación de grietas de fatiga bajo un régimen de carga cercano al rango del factor de intensidad de tensiones umbral fue investigado por Predan et al., (2010). De forma experimental estudiaron la propagación de la grieta utilizando probetas mecanizadas de planchas soldadas, mientras que utilizando la simulación mediante el método de los elementos finitos fue posible determinar las tensiones residuales y la intensidad de las tensiones en la grieta, lo que permitió evaluar el factor de intensidad de tensiones inducido por las tensiones térmicas.

Nagata et al., (2009) estudiaron mediante los métodos numéricos el rango del factor de intensidad de tensiones para predecir el inicio y la propagación de grietas de fatiga. Mediante la comparación del crecimiento de la grieta y de la curva *S-N* simulada con los resultados experimentales de uniones soldadas reforzadas obtuvieron coincidencia en sus análisis. Kanvinde et al., (2008) evaluaron un modelo basado en enfoques de la Mecánica de la Fractura para evaluar su efectividad en la predicción de la deformación en la fractura de estructuras soldadas a filete. Con el modelo de elementos finitos utilizado por estos autores, caracterizaron el estado tensional, deformacional y la integral *J* alrededor de la punta de la grieta en la unión soldada.

En la bibliografía (Peng, 2008) se propone un procedimiento para predecir la vida a fatiga según el método convencional basado en las deformaciones utilizando un modelo bidimensional y despreciando los cambios de fase que se producen durante el proceso de soldadura. Este autor determinó que las predicciones realizadas estaban dentro de las bandas de confianza del 95 % de la curva *S-N* obtenida de ensayos realizados a probetas soldadas.

En investigaciones realizadas y otras dirigidas por el autor de esta tesis se utiliza el método de los elementos finitos para estudiar la fatiga de las uniones soldadas.

La concentración de tensiones debido a los cambios en la geometría de las piezas es un factor determinante en el comportamiento a fatiga de las uniones soldadas. El cálculo de este coeficiente es un problema complejo que se realiza por los métodos de la teoría de la elasticidad, mediante métodos experimentales o numéricos. Una metodología basada en este último método fue presentada en el trabajo “Simulación numérica del coeficiente de

concentración de tensiones en grietas de uniones soldadas a tope” (Almaguer, 2012). Esta se presenta como una opción interesante a la hora de evaluar este coeficiente. En su trabajo de diploma (Martínez, 2012) realiza estudios a fatiga de una unión soldada a tope. Posteriormente se presenta una curva *S-N* simulada para una unión soldada por (Almaguer, 2013), quien modeló grietas observadas en uniones soldadas para obtener una relación entre la tensión máxima del ciclo de carga y la cantidad de ciclos que era capaz de soportar la probeta. Torres (2014) propone un modelo para evaluar la influencia de las tensiones residuales de soldadura en la fatiga de una unión soldada a tope. En ese trabajo se realiza la concatenación de estudios térmicos transitorios, estáticos por la acción de cargas térmicas y mecánicas y de fatiga que constituyen un primer intento en lograr la simulación de este fenómeno considerando esas condiciones. Almaguer y Estrada (2014) proponen una curva *S-N* simulada mediante el método de los elementos finitos. Para lograr esta curva utilizaron curvas de tempo que describían el comportamiento de la carga cíclica y generaban los modelos con defectos que habían sido caracterizados mediante microscopía óptica y electrónica de barrido. Se obtuvo que el 66% de los puntos obtenidos mediante la simulación se encontraban dentro de las bandas de confianza del 95% de una unión soldada de acero AISI 1015 ensayada a fatiga.

#### **1.5.1. Justificación de la elección del software *Simulation 2013***

El Método de Elementos Finitos (MEF) permite obtener una aproximación a las tensiones y deformaciones residuales, con el objetivo de prever posibles problemas de fabricación de piezas obtenidas mediante el proceso de soldadura. Mediante la aplicación del MEF es posible obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema dividiéndolo en un número elevado de subdominios no intersectantes entre sí, denominados “elementos finitos” (Bullón, 2007).

Los cálculos se realizan sobre una malla de puntos (llamados nodos), que sirven a su vez de base para la discretización del dominio en elementos finitos. El MEF es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos.

Existen numerosos programas para el cálculo mediante el MEF. Uno de ellos es el complemento *Simulation* que tiene incorporado el programa *SolidWorks*. Este es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico. Utiliza para la creación de los modelos el diseño paramétrico, que es, a nuestro criterio una tecnología de gran versatilidad y facilidad de aplicación, al permitir variar los diseños con solo modificar las dimensiones del mismo. Fue introducido en el mercado en 1995 para competir con otros programas CAD como *Pro/ENGINEER*, *NX*, *Solid Edge*, *CATIA*, y *Autodesk Mechanical Desktop*.

El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasvasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto (Wikipedia, 2011).

Con el análisis de fatiga se evalúan los efectos de las cargas cíclicas sobre el modelo.

Para los cálculos a fatiga en el complemento *Simulation* se definen estudios estáticos y luego mediante la definición de sucesos de fatiga se especifica la forma en que varía la carga cíclica.

Las herramientas Identificar Valores, Isosuperficies y Cortar disponibles durante la etapa de postprocesamiento en el complemento *Simulation* son muy importantes a la hora de evaluar los resultados de los análisis. En esta tesis se persigue evaluar los resultados de fatiga (daño y vida) en puntos determinados de los modelos, y las herramientas mencionadas permiten resolver ese problema.

Las interfases gráficas, tanto en el *SolidWorks*, como en el *Simulation* son amigables con el usuario y permiten una rápida interacción.

#### **1.5.2. Regla de Miner**

En el complemento *Simulation* del programa *SolidWorks* se utiliza la teoría del daño acumulado o Regla del daño lineal de Miner para los estudios a fatiga (Tutorial *Simulation*, 2013). En esta se supone que un ciclo de carga que provoque una tensión alterna superior al límite de resistencia a la fatiga del material causa un daño permanente que puede ser medido (Tutorial *Simulation*, 2013). Esta suposición está acorde con el enfoque local. También se considera

que el daño total causado por una cantidad de ciclos de tensión es igual a la suma de los daños causados por los ciclos de tensión individuales.

Atendiendo a que el fenómeno de la fatiga está asociado a la acumulación de daño en la estructura cristalográfica del material, y a que la mayoría de las sollicitaciones reales tienen una configuración compleja, es necesario establecer métodos de análisis para situaciones de carga.

Para un material determinado con una resistencia a la fatiga de bajos ciclos  $S'_L$  y de altos ciclos  $S'_e$  conocidos, ante un tipo de sollicitación  $S'_1 \in [S'_e, S'_L]$  existirá una cantidad determinable de ciclos hasta su rotura de  $N'_1$ . Pero si a la misma pieza ante la misma sollicitación  $S'_1$  durante un número de ciclos  $n'_1 < N'_1$ , no va a ocurrir la rotura, pero si aparece determinado daño. De igual manera ocurre si a otros niveles de tensión  $S'_2, S'_3, \dots$ , con ciclos de acción de  $n'_2 < N'_2, n'_3 < N'_3$ , etc. De esta manera se establece la regla de daño lineal o ley de Miner. Con ella se plantea que puede ocurrir el fallo por fatiga de la pieza si

$$\sum_{i=1}^Z \left( \frac{n'_i}{N'_i} \right) \geq 1 \quad (1.2)$$

Donde  $Z$  es el número de distintos niveles de carga.

Sin embargo esta ley aunque posee algunas limitaciones (la linealidad es una de ellas) es fácil de usar y de interpretar como para emplearla en cálculos estimativos (Tulio, 2004). Así pues si  $N'_1$  es el número de ciclos total hasta la falla, cuando existen patrones de ciclos diferentes se tiene:

$$\alpha_j = \frac{n'_j}{N'_T} \quad (1.3)$$

Despejando  $n'_j$  de (1.3) y sustituyendo en (1.2) se obtiene:

$$\sum_{i=1}^Z \left( \frac{\alpha_i}{N'_i} \right) \geq \frac{1}{N'_T} \quad (1.4)$$

De la curva  $S-N$  del material se obtiene la cantidad de ciclos  $N_1$  que provocan el fallo por fatiga del elemento a una tensión cíclica  $S_1$ . Esta regla plantea que cada ciclo causa un factor de daño  $D_1$  que consume  $\frac{1}{N_1}$  de la vida útil de la estructura. De esta manera, conociendo el factor de daño total, es posible también conocer la cantidad de ciclos de carga que puede soportar la estructura antes que se produzca la rotura (Tutorial *Simulation*, 2013). También es importante conocer que cuando se aplican diferentes ciclos  $n_i$  a diferentes valores de tensiones  $S_i$ , el daño total se puede determinar como:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \dots \dots \dots (1.5)$$

donde  $N_i$  es la cantidad de ciclos necesaria para causar un fallo por fatiga a una tensión  $S_i$ .

La regla de daño lineal no considera los efectos de la secuencia de carga. De esta manera, predice que el daño causado por el ciclo de tensión es independiente de donde se produce en el historial de carga (Tutorial *Simulation*, 2013). También supone que la tasa de acumulación de daño es independiente del nivel de tensión y que el daño ante cualquier sollicitación es directamente proporcional al número de ciclos (Tulio, 2004). Esto puede llevar a diferencias con los valores experimentales, porque como se conoce las grietas de fatiga se inician y desarrollan con comportamiento diferente a distintos niveles de tensión. Otra dificultad que se le puede observar a esta regla es que no considera las diferentes etapas del desarrollo de las grietas de fatiga. Este es un factor del que adolecen de forma general todos los enfoques clásicos de cálculo a fatiga. En este sentido la mecánica de la fractura ofrece mejores resultados.

La revisión de la bibliografía permitió identificar que no existe una metodología para realizar estudios de fatiga mediante la experimentación y la simulación numérica.



## **Capítulo 2. Metodología para la evaluación numérica del comportamiento a fatiga de una unión soldada.**

### **2.1. Introducción al capítulo.**

El acero que se utiliza para fabricar elementos de máquinas, estructuras de construcción y otras instalaciones debe poseer altas propiedades mecánicas. En las piezas que experimentan cargas alternativas, el metal debe poseer una gran resistencia a la fatiga. En otros casos se requiere una buena resistencia a la corrosión, a la fluencia y a otras acciones constantes (Guliaév, 1978).

Las uniones soldadas de estos aceros también deben garantizar el funcionamiento fiable de la estructura, de aquí se desprende que la correcta selección del material de aporte y de los parámetros del proceso de soldadura, para lograr esto sea de vital importancia. Usando el material de aportación correcto para cada unión y un proceso de soldadura, cuyas variables permitan obtener las propiedades mecánicas necesarias y una unión con la menor cantidad de defectos, es posible lograr que la unión soldada cumpla la función para la que fue diseñada.

Se caracteriza el material base y al material de aporte atendiendo a los datos que se encuentran en la bibliografía; se selecciona el material de aporte teniendo en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales presentes en la unión y en cuanto a criterios expuestos en la literatura especializada. Además se determinan los parámetros necesarios para realizar el proceso de soldadura. Se describen los diferentes ensayos que se le van a realizar a la junta.

En este capítulo también se exponen la metodología que se seguirá en la tesis para obtener la curva *S-N* de la unión soldada que se quiere estudiar, así como para realizar la simulación de la fatiga.

### **2.2. Caracterización de los materiales para la construcción de la unión**

En nuestro país se está utilizando el acero AISI 1015 en la construcción de diferentes implementos agrícolas. Entre las distintas partes que componen estos implementos aparecen uniones soldadas que durante su funcionamiento pueden verse solicitadas por cargas cíclicas.

El material de aporte utilizado para estas uniones puede ser el electrodo E6013 de fabricación cubana que se comercializa por la empresa ACINOX Camagüey.

En esta tesis se pretende evaluar de forma experimental y numérica el comportamiento a fatiga de la unión soldada a tope de acero AISI 1015 y el electrodo E6013 cubano.

Para que sea posible la evaluación experimental es necesaria la fabricación de probetas. Los ensayos a fatiga se van a realizar en una máquina universal MTS810 de fabricación estadounidense que se encuentra ubicada en el laboratorio de estructuras de la Escuela Politécnica Superior, en la Universidad de Burgos, España. En esa máquina es posible solicitar las probetas por cargas axiales variables en el tiempo.

En la revisión bibliográfica realizada no se encontró una norma referente a las dimensiones de las probetas soldadas para realizar este tipo de ensayo. Sin embargo, en investigaciones previas (Peng, 2008) experimentó con probetas soldadas con forma de “*dog bones*”(hueso de perro). También se encontró la norma cubana NC 04-72: Probeta para ensayos de tracción transversal en uniones soldadas a tope, donde se propone también ese tipo de probetas, aunque para ensayos estáticos. Por esas razones se decidió también utilizar esa configuración en la presente tesis de maestría.

### **2.2.1. Caracterización del material base**

El acero AISI 1015, es un acero de construcción con una buena soldabilidad metalúrgica, operatoria y constructiva (Guliaév, 1978).

En las tablas 2.1 y 2.2 se muestran la composición química y las propiedades físicas y mecánicas de este acero según la bibliografía consultada y las mediciones realizadas.

Para comprobar que el material utilizado en los experimentos fuera el acero AISI 1015 se realizó el análisis químico de una muestra cuadrada de 5 cm de lado y 4 mm de espesor extraída del material base. El análisis se realizó en el Cuantómetro ARL 3460 ubicado en el laboratorio instrumental de la Empresa ACINOX-Tunas. En la tabla 2.1 se muestran los resultados de este análisis para los principales elementos que permiten afirmar que el material utilizado es el acero en cuestión, mientras que en el anexo 1<sup>(1)</sup> se exponen los valores medidos para todos los elementos que conforman el material utilizado.

---

<sup>1</sup>En las mediciones mostradas en el Anexo 1 se corresponden con las del material de esta tesis las correspondientes a la muestra no. 1.

Atendiendo al porcentaje de cada elemento de aleación presente en la muestra es posible corroborar que se trata del acero AISI 1015.

**Tabla 2.1.** Composición química del acero AISI 1015. Fuente:

[www.matweb.com](http://www.matweb.com).

	Elementos				
Composición:	%C	%Mn	%Si	%S	%P
Típica	0,13- 0,18	0,30 – 0,60	0,17 – 0,37	≤0,05	≤0,04
Medida	0,16609	0,50421	0,02746	0,00578	0,01385

En la tabla 2.2 aparecen los valores de un grupo de propiedades físicas y mecánicas del acero en cuestión.

**Tabla 2.2.** Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI 1015. Fuente:

[www.matweb.com](http://www.matweb.com).

	Propiedades							
Propiedad	$\sigma_B$ (MPa)	$\sigma_f$ (MPa)	$\sigma_{-1}(2)$ (MPa)	$\mu$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (1/°C)	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)
Típica	420	315	230	0,29	7870	$119 \times 10^{-7}$	39	61
Medida	411	309						

La nomenclatura utilizada en la tabla 2.2 es la siguiente:

$\sigma_B$ : Límite de resistencia, límite de rotura.

$\sigma_f$ : Límite de fluencia.

$\sigma_{-1}$ : Límite de resistencia a la fatiga.

$\mu$ : Coeficiente de Poisson.

$\rho$ : Densidad.

$\alpha$ : Coeficiente de dilatación térmica.

$\delta$ : Alargamiento relativo.

$\psi$ : Extricción.

Se determinó la dureza del material base mediante el ensayo Rockwell, empleando un durómetro TK-14-250, fabricado en la antigua Unión Soviética, en el año 1982. El mismo se encuentra ubicado en el laboratorio de metalografía de la Universidad de Holguín. Se realizaron tres mediciones que

---

<sup>2</sup> Todas las propiedades mostradas se obtuvieron de la base de datos [www.matweb.com](http://www.matweb.com), excepto el límite de resistencia a la fatiga, que se obtuvo de (Álvarez et al., 1985)

se promediaron para obtener la dureza del material. Los resultados de estas mediciones se muestran en la tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Dureza del material base.

Medición (HRB)			Promedio
1	2	3	
70,5	70,5	71	70,67

### 2.2.2. Caracterización del material de aporte

Al consultar catálogos sobre electrodos para soldadura manual por arco eléctrico (Catálogo UTP, 2002) se seleccionó para realizar la soldadura el electrodo UTP 610, o según la norma AWS A5.1, referida en esa misma fuente bibliográfica, es el E6013. En lo adelante nos referiremos a él empleando solo el segundo término. Este es un electrodo para soldar aceros de construcción.

Para realizar estas uniones soldadas se empleó el electrodo E6013 de fabricación cubana, por ser este el material de aporte que se está empleando en la construcción de elementos estructurales en nuestro país. En el anexo 2 se muestra una imagen con el envase de los electrodos usados, de donde se puede tomar las propiedades mecánicas del mismo, proporcionadas por el fabricante, en este caso la empresa ACINOX Camagüey.

Las tablas 2.4 y 2.5 muestran las propiedades mecánicas y la composición química del depósito. Las propiedades mecánicas mostradas se obtuvieron de los datos proporcionados por el fabricante en el envase de los electrodos. Como se aprecia en la primera de ellas, la resistencia mecánica de este material de aporte es algo superior que la del material base, referida en la tabla 3.1, por lo tanto la selección de este electrodo es posible.

Se eligió el diámetro del electrodo de 3,2 mm, y se realizará una sola pasada para cada cordón atendiendo a los criterios descritos en (Torres, 2003).

**Tabla 2.4.** Propiedades mecánicas del depósito. Fuente: Datos del fabricante.

Electrodo	Propiedades				
E6013	$\sigma_B$ (MPa)	$\sigma_f$ (MPa) 0,2%	$\delta$ (%)	$\psi$ (%)	Resiliencia mínima (MPa)
	431 – 510	392	20 - 28	35 - 60	0,92

**Tabla 2.5.** Composición química del depósito. Fuente Torres, 2003.

Electrodo	Elementos		
E6013	%C	%Mn	%Si
	0,07	0,5	0,35

### **2.3. Definición de los ensayos a realizar**

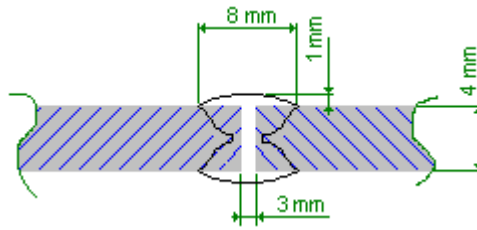
Para la evaluación experimental de la unión soldada objeto de estudio se realizaron los siguientes experimentos:

1. Análisis químico. Para corroborar que el material base utilizado sea el acero AISI 1015.
2. Ensayo de dureza. Con el propósito de obtener la dureza superficial del material base.
3. Ensayo de tracción. Para evaluar propiedades mecánicas del material base y de la unión soldada.
4. Ensayos no destructivos (Líquidos penetrantes): para identificar defectos en la unión soldada.
5. Ensayo a fatiga: con el objetivo de construir una curva S-N experimental para la unión soldada estudiada.
6. Microscopía óptica y electrónica de barrido. Con estas observaciones se pretende caracterizar los defectos que dieron origen a la rotura de las probetas, así como evaluar la forma de las roturas por fatiga.

Se quiere señalar que ya fueron presentados los resultados de los experimentos 1 (Tabla 2.1) y 2 (Tabla 2.3). Para el número 3, en la Tabla 2.2 se muestran los resultados de la tensión de fluencia y de rotura para el material base determinado del ensayo a tracción.

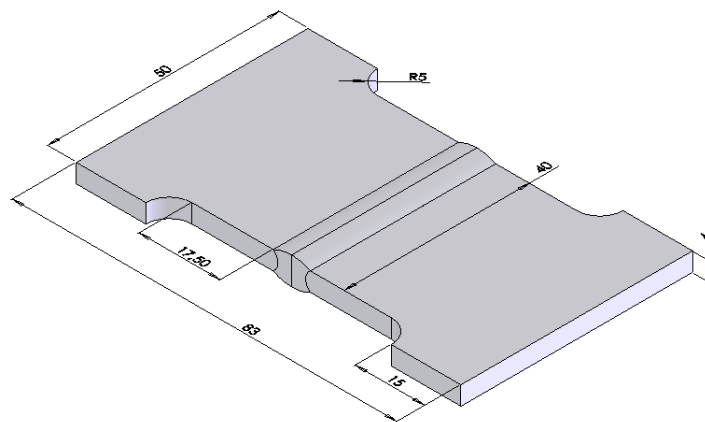
#### **2.3.1. Probetas**

El material base utilizado para la soldadura se tenía en una plancha de 500 mm x 600 mm x 4 mm. Como se describió en el epígrafe 2.2 las probetas a utilizar tienen forma de “*dog bones*”. La unión se realizará a tope sin preparación de bordes, con cordones a ambos lados atendiendo a las dimensiones propuestas en la figura 2.1. Para decidir esas dimensiones se consultó la norma cubana NC 08-06:82. “Costura de las uniones soldadas. Tipos y elementos del diseño.”



**Figura 2.1.** Geometría del cordón para construir la probeta soldada. Fuente: NC 08-06:82. (1982).

Las dimensiones de la probeta (Figura 2.2) se determinan de acuerdo a la norma cubana NC 04-72. “Probeta para ensayos de tracción transversal en uniones soldadas a tope.”



**Figura 2.2.** Dimensiones de la probeta soldada. Fuente: Elaboración propia.

Para la construcción de la unión tenemos que determinar los diferentes parámetros del régimen de soldadura. La metodología utilizada es la propuesta por (Rodríguez, 1983).

### 2.3.1.1 Cálculo de la temperatura de precalentamiento.

El precalentamiento del material a la hora de realizar una determinada unión soldada, es una de las alternativas más sencillas para atenuar los efectos negativos en la zona fundida y sus áreas adyacentes.

En general se puede plantear que la temperatura de precalentamiento siempre será directamente proporcional al carbono equivalente en la unión soldada. Dicho de otra manera la temperatura de precalentamiento será menor tanto mayor sea la soldabilidad metalúrgica del material.

Para calcular la temperatura de precalentamiento de un acero, es necesario conocer la composición química del mismo y con ella su porcentaje de carbono equivalente.

A los aceros de bajo contenido de carbono no es necesario precalentarlos debido a su buena soldabilidad.

### 2.3.1.2. Cálculos tecnológicos de la soldadura.

En este paso es necesario determinar el régimen de soldadura antes de ejecutar el soldeo. Este es el conjunto de parámetros fundamentales durante el proceso de soldadura garantizando la obtención de costuras con dimensiones, formas y calidad adecuada.

Para calcular el régimen del proceso de soldadura se elaboró una macro, denominada *WeldParam*, valiéndonos del Visual Basic para Aplicaciones que tiene incorporado el programa Microsoft Excel 2003. Con esta macro es posible calcular los carbonos equivalentes según diferentes criterios, la temperatura de precalentamiento, parámetros del proceso de soldadura, así como otros de índole energético. En el anexo 4 se muestra un Manual de usuario para el trabajo con la macro *WeldParam*, mientras que en la tabla 2.6 es posible ver los valores obtenidos de las diferentes magnitudes necesarias para realizar la soldadura. Se elaboraron 32 probetas para realizar todos los experimentos que cumplimentan esta investigación.

**Tabla 2.6.** Parámetros del proceso de soldadura.

Parámetro	Unidad de medida	Valor
Intensidad de corriente	A	90 – 120
Tensión	V	24 – 26
Número de cordones	-	2
Velocidad de soldadura	$\frac{mm}{min}$	59,57 – 79,42
Número de electrodos (*)	-	0,421
Número de electrodos (**)	-	$13,1472 \cong 14$
Tiempo total (*)	s	81,216 – 60,912
Tiempo total (**)	min	43,32 – 32,49
TRI-ARC 504. Rectificador con capacidad entre (70-500) A y (23 – 40) V .		

(\*)Para una probeta

(\*\*)Para treinta y dos probetas

En la figura 2.3 se muestran las probetas construidas según se ha explicado en los párrafos anteriores.



**Figura 2.3.** Muestra de las probetas fabricadas. Fuente: Elaboración propia.

### **2.3.2. Ensayos a tracción**

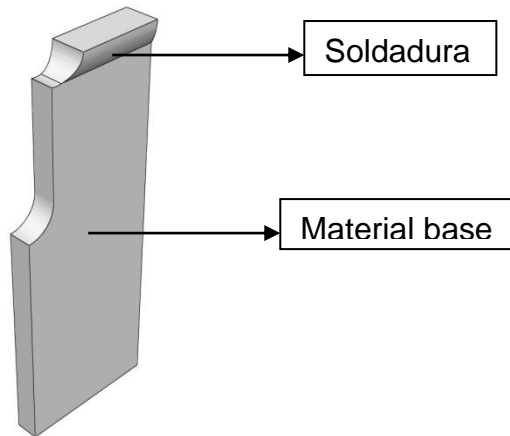
La unión soldada se ensayó a tracción estática. Las probetas para este ensayo se corresponden con las mostradas en el epígrafe anterior; construidas según la norma cubana NC 04-72 (1972). Para realizar los ensayos a tracción estática se consultó la “NC 04-01. Ensayos a tracción de metales” (1966), aún vigente en nuestro país.

Los ensayos fueron realizados en una máquina MTS810 de fabricación estadounidense que se encuentra en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos, en España. Esta máquina universal de ensayos tiene una capacidad máxima de 250 kN. La carga es aplicada mediante un cilindro hidráulico que se encuentra conectado a una estación central de bombeo, y a su vez puede suministrarle a otros puestos de trabajo. La máquina puede ser controlada de forma manual o automatizada mediante una computadora conectada con los sistemas de accionamiento, recopilación de datos y de control de la máquina de forma general (Anexo 5).

Los resultados obtenidos de estos ensayos serán comparados con la simulación numérica del ensayo a tracción realizada con el programa *ABAQUS*. Se escogió este programa para realizar esta simulación atendiendo a que es posible ubicar un desplazamiento como una restricción variable en el tiempo, de manera similar a como ocurre en el ensayo a tracción.

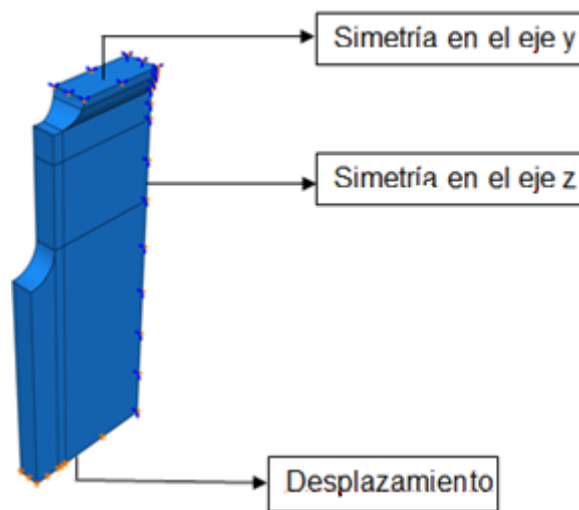
Se decidió simular primero un cuarto de probeta con simetrías para reducir el tiempo de cálculo del *ABAQUS*.





**Figura 2.4.**Diseño de un cuarto de la probeta para la simulación del ensayo a tracción. Fuente: Elaboración propia.

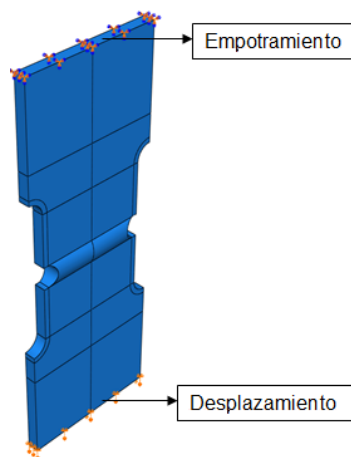
Se estimó un desplazamiento total de la probeta de 5mm, ubicado en una cara de la probeta y simetrías en las otras caras, como se muestra en la figura 2.5. Este estudio se realiza con el objetivo de evaluar el comportamiento a tracción de la probeta. Es importante señalar que se hace diferencia entre las propiedades del material base y del metal de aporte que quedaría ubicado en la zona fundida (denominado soldadura en la figura 2.4).



**Figura 2.5.**Restricciones en el cuarto de probeta. Fuente: Elaboración propia.

También se realizó el análisis de una probeta completa con el objetivo de que la simulación se semejara en la mayor medida al ensayo real a tracción, donde un extremo de la probeta queda empotrado mientras en el otro ocurre un desplazamiento debido a la acción de la carga (Figura 2.6).

El nuevo diseño quedaría de la forma siguiente:



**Figura 2.6.** Restricciones de la probeta para simular el ensayo a tracción.

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3.3. Ensayos no destructivos

La inspección por líquidos penetrantes es un procedimiento de inspección no destructivo de tipo físico - químico, diseñado para detectar y exponer discontinuidades en la superficie de los materiales. Mediante los líquidos penetrantes se pueden localizar discontinuidades superficiales, incluso en piezas de geometría complicada. Aunque con este ensayo sólo se detectan discontinuidades superficiales; es un método efectivo, confiable y fácil de realizar; que puede efectuarse a varios materiales y de costo relativamente bajo. Consiste en aplicar un líquido penetrante de un color determinado sobre la superficie de la pieza a inspeccionar. Después de un tiempo apropiado, que el líquido emplea para introducirse en las discontinuidades, se limpia la superficie para eliminar el exceso de líquido, procediendo luego a aplicar una sustancia reveladora, que absorbe el líquido penetrante que se introdujo en las discontinuidades, extrayéndolo hasta la superficie, mostrando una indicación de la discontinuidad.

La superficie a ensayar debe encontrarse seca y libre de cualquier elemento que pueda considerarse contaminante, o sea, que no pueden haber grasas, óxidos, polvos, pinturas, ya que esto puede dificultar la entrada del líquido en la discontinuidad o alterar el resultado.

Para ejecutar la inspección se siguieron los pasos descritos en (Líquidos Penetrantes. Nivel I y II. <ftp://fim.uclv.edu.cu>). El procedimiento descrito se realizó primero para una cara de las probetas y luego para la otra. Para realizar la inspección se contaba con un pote en aerosol de líquido penetrante de la

marca TURCO DY – CHECK (Anexo 6) pero se carecía de las sustancias limpiadora y reveladora. En este sentido se propuso la sustitución de las mismas. Para la sustitución de la primera se utilizó nafta, mientras que para la segunda el polvo de tiza <sup>(3)</sup>.

#### **Preparación de la superficie.**

Después de realizar la limpieza de la superficie de las probetas se verificó mediante la inspección visual de que no quedaran en la superficie de las mismas ningún resto de alguna sustancia que afectará los resultados. Se comprobó que no habían restos de escorias, óxidos, e incluso de la nafta y el fieltro utilizado para la limpieza de las probetas.

#### **Aplicación del penetrante.**

Con la superficie de las probetas listas para la aplicación del penetrante, se procedió entonces a atomizar el mismo sobre la zona fundida y la ZAT de las juntas, observando que la distribución de la capa de penetrante sobre toda la zona a inspeccionar fuera homogénea y cubriera toda la parte que es de interés para la inspección.

Siguiendo las recomendaciones del fabricante se mantuvo aplicado el penetrante durante 10 minutos sobre las superficies. Se revisó que durante todo ese tiempo existiera líquido sobre las superficies objeto de inspección, garantizando la penetración del líquido en los defectos que existieran en la junta.

#### **Remoción del exceso de penetrante.**

El penetrante excedente se retiró después de cumplido el tiempo de aplicación. Después de retirarlo se observó que no había penetrante sobre la junta.

#### **Aplicación del revelador.**

La sustancia reveladora se aplicó atomizándola sobre el metal de aportación y la ZAT de las uniones.

#### **Inspección.**

Se realizó después de cumplidos los 30 minutos de acción de la sustancia reveladora. Este tiempo se escogió de forma empírica, observando cada 5

---

<sup>3</sup> La validación del procedimiento seguido para realizar las sustituciones se realiza en el artículo “Variante para realizar la inspección con líquidos penetrantes” propuesto por el autor de esta tesis a la revista electrónica Ciencias Holguín. Se encuentra en proceso de revisión.

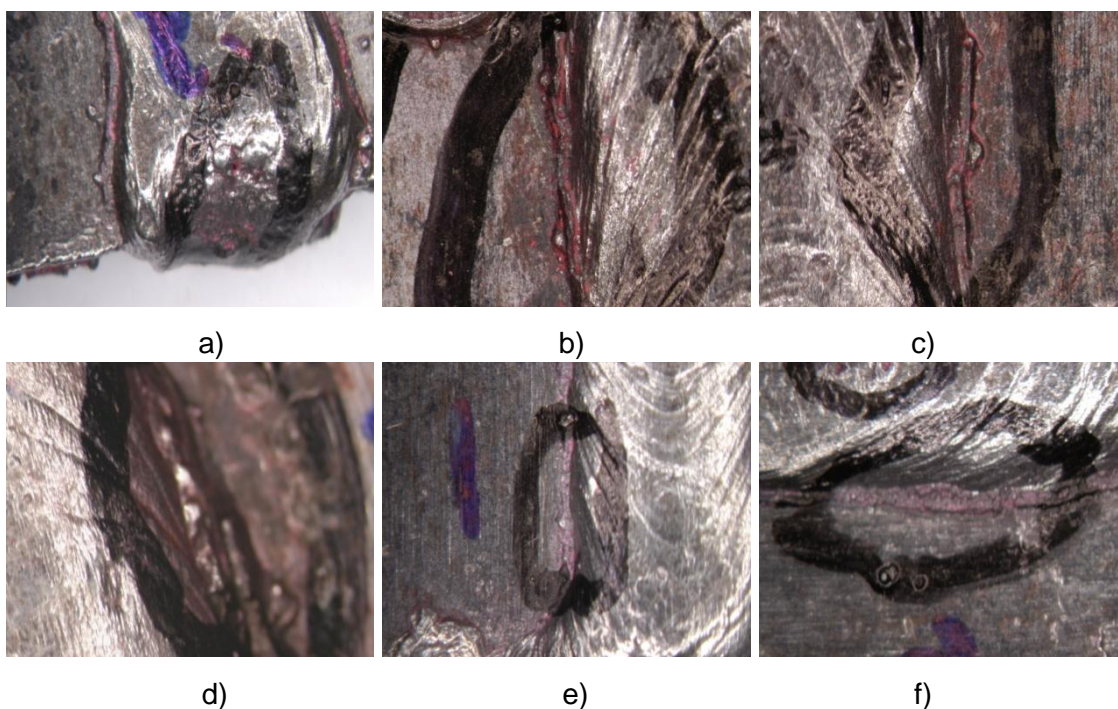
minutos la apariencia de las probetas.

Al realizar la sexta observación se apreció la similitud de defectos presentes en algunas probetas con los defectos descritos en (Böhler-Thyssen, 2010), lo que permitió decidir sobre pasar a la inspección.

Las probetas que revelaron defectos se detallan en la tabla 2.7, mientras que la forma de los defectos observados aparece en las figuras 2.7 de la a) hasta la f).

**Tabla 2.7.** Defectos encontrados mediante la inspección con líquidos penetrantes.

Probeta	Cara	Defecto	Figura
16	B	Poro	2.7 a
19	B	Socavadura	2.7 b
		Socavadura	2.7 c
20		Socavadura	2.7 d
21	B	Socavadura	2.7 e
		Solapamiento	2.7 f



**Figura 2.7.** Defectos encontrados mediante la inspección por líquidos penetrantes. Fuente: Elaboración propia.

### Limpieza final.

En este paso se retiró de las probetas la sustancia reveladora y el penetrante que extrajo la misma de los defectos.

### 2.3.4. Ensayos a fatiga

La fatiga de los materiales está influenciada por varios parámetros, cada uno de ellos influyendo de una manera distinta sobre el comportamiento del elemento sometido a la carga variable, de aquí que se aprecien gran dispersión en los resultados experimentales. Uno de los factores que más se tiene en cuenta es, sin duda alguna, la concentración de tensiones de manera local que tiene lugar en aquellos puntos donde existen cambios de sección propios de la geometría del elemento, o defectos que tengan lugar durante el proceso de fabricación.

El comportamiento a fatiga de la unión soldada es un fenómeno que interesa a todos los investigadores interesados en el tema. Estas uniones, debido a su geometría, son ya concentradores de tensiones, siendo el cambio de sección entre el metal base y el sobrecordón una discontinuidad importante, a lo que se suma la disminución de la tenacidad en la ZAT; que propiciarán el fallo de la unión ante las cargas variables.

La unión soldada objeto de estudio fue ensayada a fatiga, para ello fue necesario determinar los valores de los parámetros del ciclo de carga. El régimen de carga empleado fue a tracción asimétrica.

El primer parámetro determinado fue la tensión máxima  $\sigma_{\max}$  (2.1).

Considerando que el fallo de la unión debe producirse en la ZAT, se consideraron las propiedades del material base para calcular ese valor.

La tensión máxima del ciclo en un primer nivel de carga se tomó como dos terceras partes del límite de fluencia del acero AISI 1015.

$$\sigma_{\max} = \frac{2}{3} \sigma_f \dots\dots\dots(2.1)$$

El valor de la tensión máxima calculada mediante la expresión anterior es igual a  $\sigma_{\max} = 210$  MPa a la que corresponde una carga máxima  $P_{\max} = 33,60$  kN. Estos valores y el resto de los parámetros del ciclo de carga se encuentran en la tabla 2.8.

**Tabla 2.8.** Parámetros del ciclo de carga para el primer nivel al que se realizaron los ensayos a fatiga.

Tensiones (MPa)		Cargas (kN)	
$\sigma_{\max} = \frac{2}{3} \sigma_f$	210,00	$P_{\max} = \frac{2}{3} P_f$	33,60
$\sigma_{\min}$	21,00	$P_{\min}$	3,36
$\sigma_{med}$	115,50	$P_{med}$	18,48
$\sigma_a$	94,50	$P_a$	15,12
$\Delta\sigma$	189,00	$\Delta P$	30,24
$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$		0,1	

Los ensayos se van a realizar a diferentes niveles de carga. Los siguientes niveles de carga se determinan a medida que se avanza en la realización de los experimentos. Esto se debe a la gran dispersión que existe en los resultados de los ensayos a fatiga. La lógica que se sigue para determinar los siguientes niveles de carga es la siguiente: se va disminuyendo el valor de carga hasta que las probetas ensayadas igualen o superen el valor de 1 500 000 ciclos, para los que se corresponde el límite de resistencia a la fatiga en el caso de las uniones según la norma ASTM E 739 – 91 citada en la bibliografía. Para los ensayos se fijó la razón de asimetría del ciclo  $R = 0,1$ . La frecuencia de aplicación de la carga es de 14 Hz. Este valor de la frecuencia se seleccionó atendiendo al criterio del técnico de laboratorio donde se realizó el experimento debido a que con ese valor se garantizó la estabilidad de la máquina. Como criterio de fallo se utilizó el de fractura total. El ensayo se interrumpe cuando sean aplicados 1 500 000 ciclos de carga. La temperatura del laboratorio era de  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Los ensayos a fatiga se realizaron en la misma máquina universal MTS810 mencionada en el epígrafe 2.3.2.

### 2.3.5. Microscopía

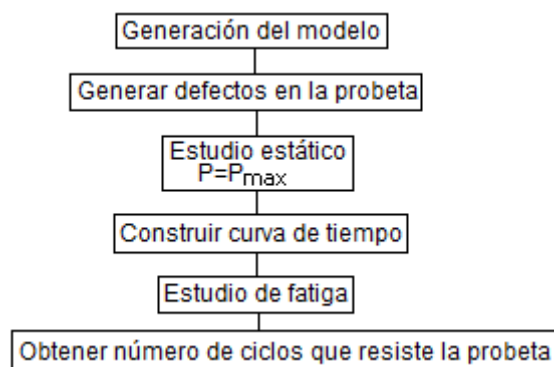
La microscopía es utilizada para la observación y caracterización de los defectos que inician el fallo por fatiga y de la zona donde se produce la rotura después de ocurrida esta.

En esta investigación se realizaron microscopía óptica (MO) y electrónica de barrido (SEM) con un estereomicroscopio ZeissStemi SV11 y un microscopio

electrónico de Barrido JEOL JSM-6460LV con sistema INCA de análisis elemental por Rayos X, respectivamente.

## 2.4. Metodología para la evaluación numérica del comportamiento a fatiga de una unión soldada basada en los resultados experimentales

Para efectuar las simulaciones se propone la metodología que aparece en la figura 2.8.



**Figura 2.8.** Metodología de cálculo utilizada para el cálculo a fatiga de la unión.

Fuente: Elaboración propia.

Esta metodología consta de varios pasos que se describen a continuación.

### 2.4.1. Generación del modelo

La modelación geométrica de la probeta se hizo en el programa *SolidWorks* 2013 y para las simulaciones el paquete de análisis por elementos finitos *Simulation*, que tiene incorporado el primero.

El modelo geométrico es el mismo que aparece en la Figura 2.2.

Para elaborar el modelo se dibujaron de forma separada las planchas y el cordón de soldadura y después se construyó un ensamble que permitió obtener el modelo final. Esto es importante porque permitió diferenciar entre las propiedades mecánicas asignadas a cada uno de estos elementos.

Se editaron dos bibliotecas de materiales. La primera de ellas se nombró “aisi 1015 modificado” y la segunda “e6013 cub” que contenían las propiedades mecánicas del material base y del de aporte, respectivamente.

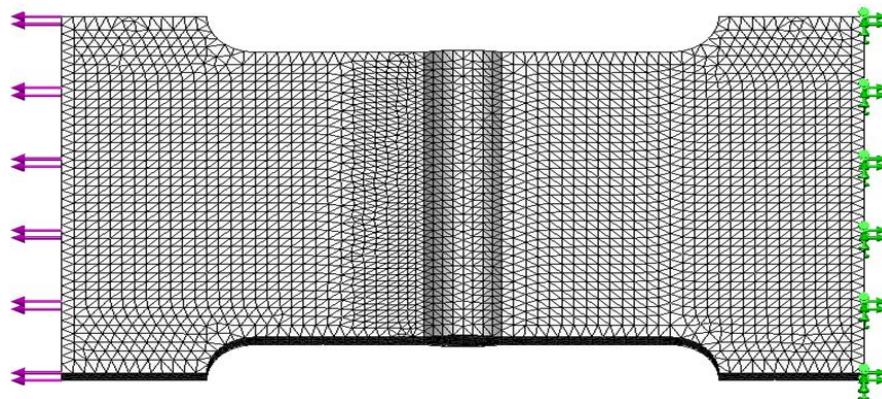
En la máquina de ensayos empleada para los estudios a fatiga se fijó (empotró) uno de los extremos de la probeta, mientras que en el otro se aplicó la carga variable. Atendiendo a estos criterios se aplican restricciones fijas a uno de los extremos de la probeta, mientras que en el otro se aplica una carga que se corresponde en cada estudio con el valor de carga aplicado en los diferentes niveles a los que se realicen los ensayos a fatiga.



La malla se generó de acuerdo a los valores sugeridos por el programa. Hay que señalar que para todos los modelos estudiados el tamaño de los elementos finitos no es el mismo. Esto obedece a la presencia de los defectos (se explican en el próximo paso de la metodología) que obliga al uso de controles de malla para obtener los mejores resultados, y en ocasiones es necesario refinar la malla para lograr la ejecución del estudio.

Los estudios realizados se basan en la utilización de un mallado sólido y un análisis estático primero y uno de fatiga después. Se utiliza además un modelo isotrópico elástico lineal, atendiendo a que se considera que en cada parte donde se define un material, este es constante, y que los valores de carga aplicada no superan la carga de fluencia, además de que atendiendo al enfoque local, cuando se supera el límite de fluencia en solo un punto de una pieza, ya es suficiente para que se inicie la grieta de fatiga. El tipo de elementos finitos utilizado fue cuadrático de alto orden que producen mejores aproximaciones matemáticas, teniendo 10 nodos por cada elemento, los cuales poseen tres grados de libertad, correspondiéndose cada uno con un desplazamiento en un eje coordenado.

Tipo de malla: Malla de sólido



**Figura 2.9.** Modelo mallado con elementos de tamaño de 1,233 mm y tolerancia de 0,024 mm. Fuente: Elaboración propia.

#### **2.4.2 Generación de defectos en la probeta**

El segundo punto de la metodología propone la creación de defectos. Esto se debe a que cuando se realizaron simulaciones en la probeta sin defectos, el programa mostraba que el fallo de la probeta ocurría en el cambio de sección de la probeta, o sea, en el material base, lo que no ocurre de esta manera en las uniones soldadas reales.

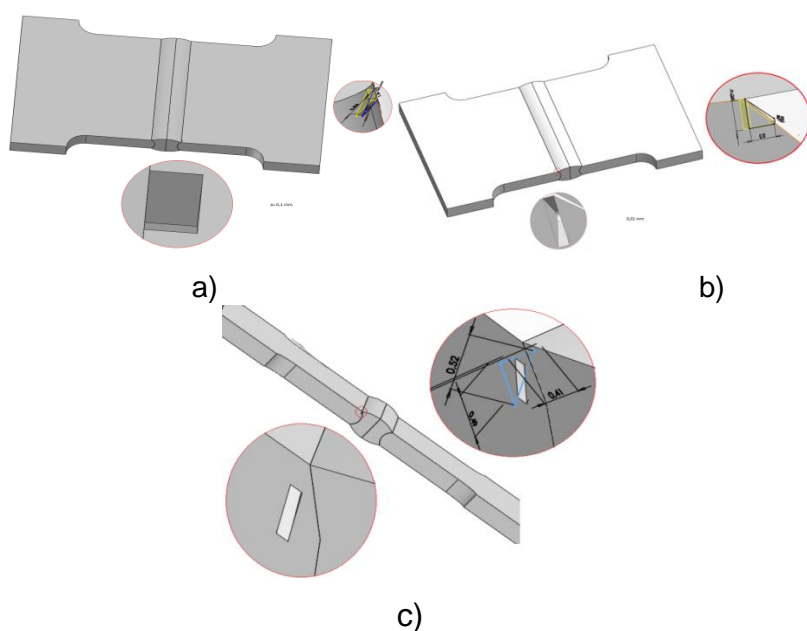


Para generar los defectos se tuvieron en cuenta diferentes criterios. Primero las formas que se muestran en el epígrafe 1.3.1 y segundo las observaciones realizadas mediante la microscopía óptica y electrónica a las probetas fracturadas.

Los diferentes defectos varían en su forma y dimensiones. Esto provoca que los tamaños de malla alrededor de ellos también cambien. Para crear la malla alrededor de los defectos se utilizan controles de mallado, que permitan refinar la malla. Con este proceder se logra ubicar una mayor cantidad de elementos finitos alrededor de la geometría del defecto estudiado para obtener mejores resultados de los valores de tensiones.

En el anexo 7 se muestran las dimensiones de los defectos. La forma y ubicación de los defectos está en las figuras 2.10 a la 2.14.

La figura 2.10 muestra defectos que se modelaron en la zona de afectación térmica de la unión. Cada defecto se nombra con la palabra “Tipo” seguida de un número romano. En la figura 2.10 a) está el defecto Tipo I, que es una grieta en la ZAT y se encuentra ubicada en la parte superior de la probeta. El defecto Tipo II es otra grieta en la ZAT, pero que se ubicó en un costado de la probeta (Figura 2.10 b); mientras que en la figura 2.10 c) está el defecto Tipo III, que también es una grieta en la zona de afectación térmica ubicada en un costado de la probeta, pero con forma y dimensiones diferentes a la anterior.



**Figura 2.10.**Defectos modelados. a) Tipo I. b) Tipo II. c) Tipo VII. Fuente: Elaboración propia.



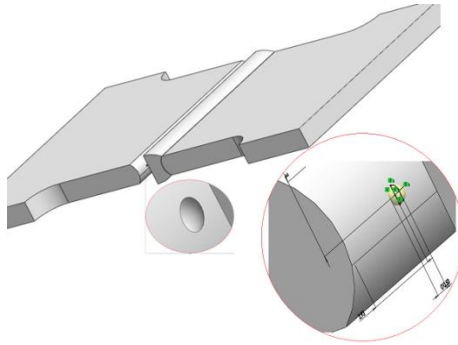
occasionalmente también pueden ser otro defecto presente en la unión



Las grietas pueden ser superficiales o encontrarse dentro del material. La



perces pueden cursar en cualquier parte de la unión. La figura 2.14 e



**Figura 2.14.** Defectos modelados. Tipo VII. Fuente: Elaboración propia.

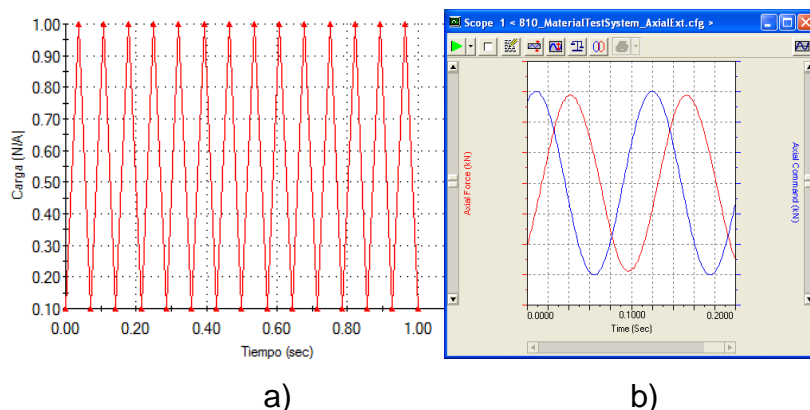
### 2.4.3. Estudio estático

A continuación se corre un estudio estático, considerando que la carga aplicada se corresponde con el valor de carga máxima del ciclo en cada nivel de carga. Este estudio permite conocer el estado tensional de la probeta, específicamente alrededor del defecto, que es la zona que interesa estudiar.

### 2.4.4. Construcción de la curva de tiempo

La curva de tiempo utilizada (Figura 2.15) modela la variación de la carga en el tiempo. Por el eje de las abscisas se ubica el tiempo, expresado en segundos, mientras que por las ordenadas se encuentra la fracción de la carga.

Para modelar la acción de la carga variable en el tiempo sobre las probetas solicitadas a tracción cíclica se ha tomado un segundo, y como la frecuencia de acción de la carga es 14 Hz, cada ciclo de carga se repetirá 14 veces en cada segundo. Considerando que la carga máxima que ocurre en cada ciclo es igual a 1, la carga mínima será 0,1 veces ese valor, de acuerdo al coeficiente de asimetría  $R$  que para los ensayos es igual a 0,1.



**Figura 2.15.**a) Curva de historial de carga. b) Curva de tiempo mostrada por la máquina de ensayo MTS810. Fuente: Elaboración propia.

#### **2.4.5. Estudio de fatiga**

Después que se genera la curva de carga se realiza un estudio de fatiga, del que es posible obtener el número de ciclos a los que debe fallar la probeta.

En este estudio es necesario definir las propiedades a fatiga del material del elemento estudiado. En investigaciones anteriores otros autores (Cassanelli et al., 2002; Neege et al., 2003; Sumi et al., 2004; Bejerano, 2007; Kanvinde et al., 2008; Nikitin y Besel, 2008; Peng, 2008; Nagata et al., 2009; González, 2010; Predan et al., 2010; Martínez, 2012; Almaguer, 2013; Torres, 2014; Almaguer y Estrada, 2014) han estudiado las propiedades de la unión soldada considerándola un material homogéneo. En esta tesis se está modelando una unión soldada, en la que existen diferencias entre las propiedades mecánicas de las distintas partes de la unión debido a la heterogeneidad de los componentes. Sin embargo se considera a la unión homogénea y se le asigna a las diferentes partes las mismas propiedades a fatiga, o sea, la misma curva S-N debido a la dificultad práctica de determinar los valores de las distintas propiedades en las diferentes zonas de la unión.

Para efectuar los estudios a fatiga en el *Simulation* hay que definir sucesos de fatiga. Para ello se relaciona el estudio estático explicado en el epígrafe 2.3.3 con una curva de tiempo, que describe como varían en el tiempo las tensiones provocadas por las solicitaciones aplicadas en ese estudio, o sea, se define la carga cíclica.

En ese momento ya es posible ejecutar el estudio a fatiga.

#### **2.4.6. Obtención del número de ciclos que resiste la probeta**

Entre los resultados que se pueden obtener con la simulación del fenómeno de la fatiga en el *Simulation* están el daño y la vida de la pieza expresada en bloques de carga. Un bloque de carga es el historial de carga completo de un suceso de amplitud variable (incluido el número de repeticiones) (Tutorial *Simulation*, 2013). Indica cuantas veces tiene que repetirse el suceso de la carga cíclica definida en el punto anterior; para que se produzca el fallo por fatiga de la pieza.

Cuando se explicó sobre la definición de las curvas de tiempo, se había planteado que cada ciclo de carga se repetía 14 veces en cada segundo y por esa razón se definía a cada curva como la variación de la carga cada segundo.

De acuerdo a esto se plantea que si se realiza la simulación de un segundo, se obtiene como resultado un número de bloques que multiplicado por 14 expresa el número de ciclos que resiste la pieza

## **Capítulo 3. Resultados de la aplicación de la metodología en una unión soldada a tope.**

### **3.1. Introducción al capítulo.**

Los resultados de los diferentes ensayos y de las simulaciones numéricas son descritos en este capítulo.

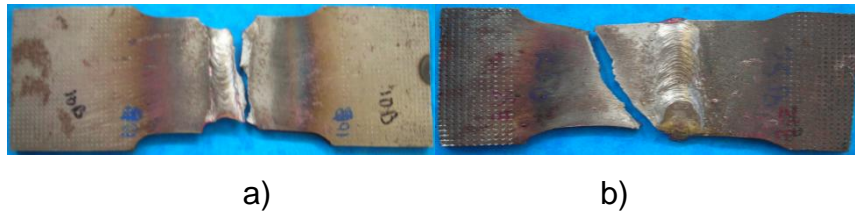
Con los ensayos mecánicos realizados se han obtenido las siguientes propiedades de la unión: límite de fluencia, límite de rotura, el módulo de elasticidad, las eficiencias a fluencia y a rotura, los parámetros de plasticidad de la ecuación de Hollomon y una curva *S-N* para un ciclo asimétrico. Mediante la microscopía óptica y electrónica de barrido es posible caracterizar los diferentes defectos en los que se inician las grietas de fatiga, además de la forma de las secciones donde ha ocurrido el fallo.

La simulación del comportamiento a fatiga de la unión mediante la metodología propuesta en esta tesis se presenta como una buena opción a la hora de evaluar elementos solicitados por cargas variables. Con los resultados de los ensayos realizados, ya sean reales o simulados se ha puesto de manifiesto una vez más el comportamiento probabilístico del fenómeno de la fatiga.

### **3.2. Resultados del ensayo a tracción y de la simulación**

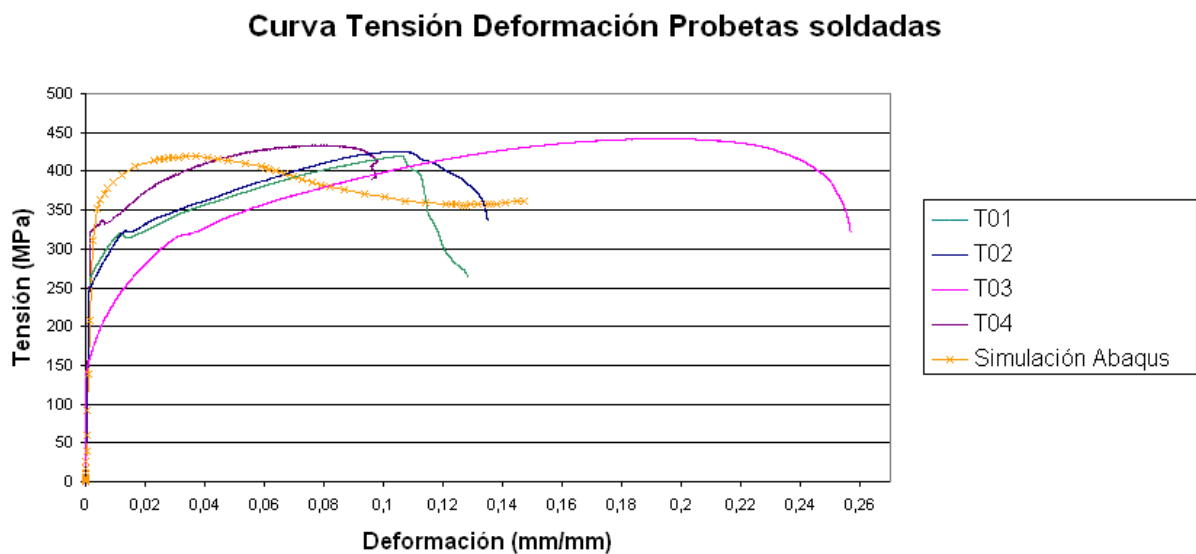
Se ensayaron a tracción 4 probetas soldadas con el propósito de conocer las propiedades mecánicas de la unión. También es posible determinar la calidad de la unión. Para ello debe cumplirse que el fallo de la probeta soldada debe ocurrir en la ZAT y no en la ZF, lo que demostraría que la unión soldada está bien construida.

Las figuras 3.1 y 3.2 a) y b) muestra la apariencia de la rotura de una probeta entallada y de otra sin entallar. Obsérvese la apariencia de una y otra rotura. A la probeta de la figura 3.1 a) se le había practicado una entalla, con el propósito de evaluar el comportamiento del material de aporte. Sin embargo la rotura ocurrió en la ZAT, contigua al cambio de sección entre el material de aporte y la zona de grano grueso de la ZAT. En la figura 3.2 b) la probeta no tiene entalla. La rotura comenzó en la zona de grano grueso de la ZAT y luego ocurrió un desgarre de la probeta que llegó hasta el material base. Ambos casos muestran que se cumple el objetivo de que la unión soldada no falle en el material de aporte, y si en el material base.



**Figura 3.1.** Forma de la rotura de probetas traccionadas. a) Con entalla. b) Sin entalla. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.2 se muestra los gráficos de tensión – deformación obtenidos de los ensayos realizados a las cuatro probetas, que se denotan como T01, T02, T03 y T04 respectivamente.



**Figura 3.2.** Curvas tensión deformación de las probetas soldadas. Fuente: Elaboración propia.

La tabla 3.1 muestra los valores de los diferentes parámetros determinados en los ensayos a tracción a las uniones soldadas.

La eficiencia se define como la razón entre la propiedad de la unión y la del material base, de esta manera las eficiencias a fluencia  $\eta_f$  y a rotura  $\eta_r$  se determinan de las expresiones 3.1 y 3.2 respectivamente. Los subíndices  $_{US}$  y  $_{MB}$  hacen alusión a la unión soldada y al material base, en ese orden.

$$\eta_f = \frac{\sigma_{f_{US}}}{\sigma_{f_{MB}}} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\eta_r = \frac{\sigma_{r_{US}}}{\sigma_{r_{MB}}} \dots\dots\dots(3.2)$$

En esa misma tabla, en la columna “Plasticidad” se refiere a los parámetros  $K$  y

$n$  de ajuste de la relación entre la tensión y la deformación a través de una ecuación del tipo Hollomon (Ecuación 3.3). Para ajustar este tramo de la curva se deben despreciar los valores cercanos al límite de fluencia y al de rotura.

$$\sigma = K\varepsilon^n \dots\dots\dots(3.3)$$

**Tabla 3.1.** Parámetros de las probetas soldadas ensayadas a tracción.

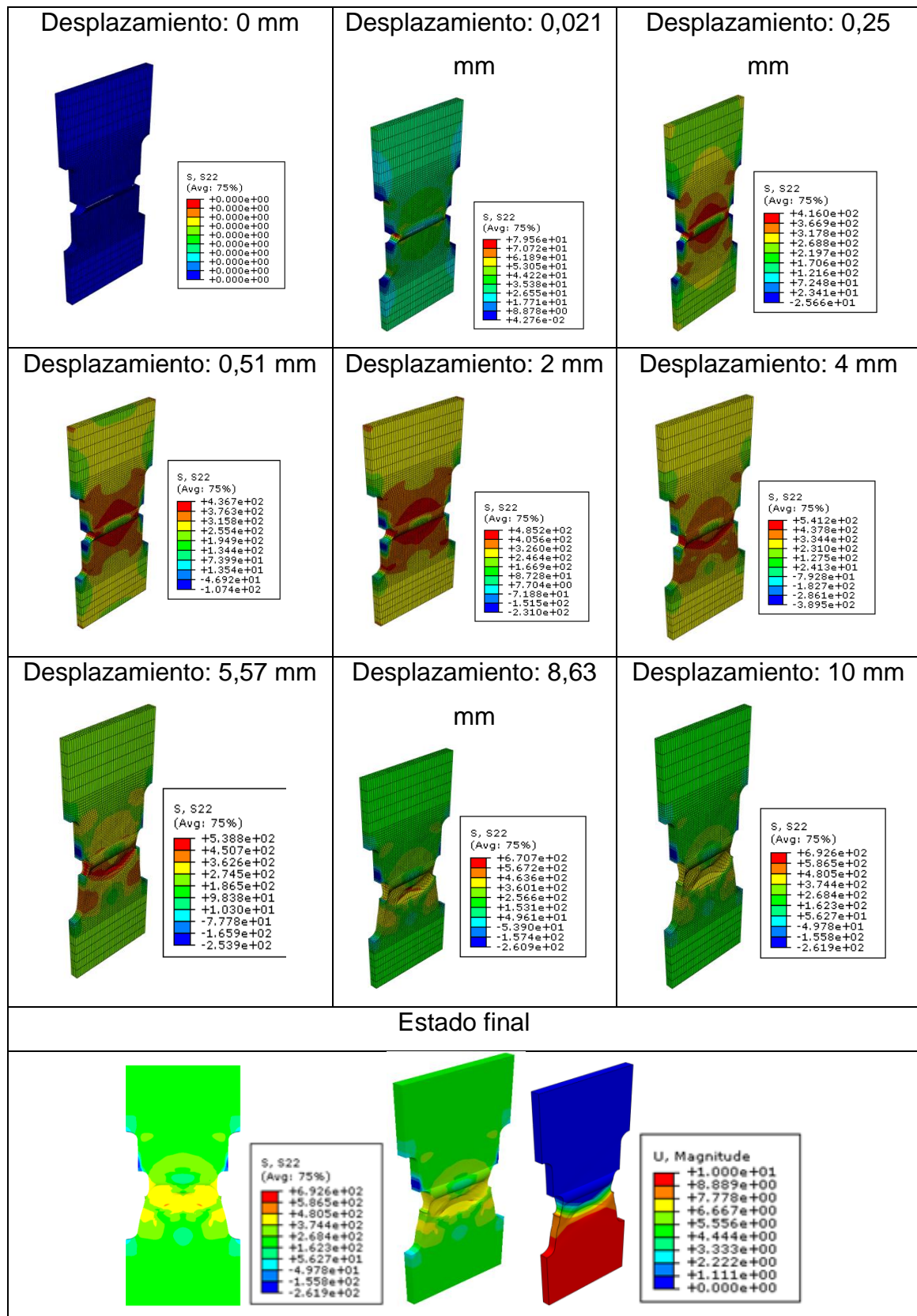
Probeta	Entalla	$\sigma_f$ (MPa)	$\sigma_r$ (MPa)	$E$ (MPa)	Eficiencia		Plasticidad	
					$\eta_f$	$\eta_r$	$K$	$n$
T01	Si	318	419	203165	1,000	0,907	601,17	0,161
T02	Si	322	426	203566	1,013	0,922	615,65	0,1633
T03	No	320	442	203502	1,006	0,957	657,43	0,2215
T04	No	319	433	204885	1,003	0,937	633,57	0,1354

En la figura 3.2 también se encuentra la curva de un ensayo a tracción simulado mediante el programa ABAQUS.

Para la simulación realizada a un cuarto de la probeta, considerando un desplazamiento de 5 mm se obtuvo que los mayores valores de las tensiones siempre tenían lugar en la ZAT de la unión. Las deformaciones plásticas comienzan a ocurrir al desplazamiento igual a 0,3 mm. El estado tensional final que se produjo en ese ensayo simulado mostró que las zonas con mayores tensiones se encuentran en la ZAT, precisamente en el área donde se produce la rotura de la probeta real. Del análisis de este estudio se deduce que se cumple el objetivo de la soldadura, que es que el fallo se produzca en el metal base y no en la soldadura.

Para la probeta entera simulada se estimó un desplazamiento final de 10 mm. Los estados tensionales que ocurren para la probeta a diferentes valores del desplazamiento están en la figura 3.3. Los resultados de este estudio también muestran que el fallo de la probeta se produce en la zona de afectación térmica. Esto, además de mostrar que la soldadura es correcta, pues la rotura no ocurre en la zona fundida, y si en el material base, también tiene concordancia con los resultados de los experimentos reales, donde el fallo de las probetas ocurrió en el metal base.





**Figura 3.3.** Estado tensional que se produce en la probeta soldada modelada en ABAQUS a diferentes valores del desplazamiento. Fuente: Elaboración propia.

### **Ensayo de doblado.**

En este epígrafe también se muestra el ensayo de doblado de la probeta. Este ensayo plantea que si la unión soldada está sana, no se producen grietas en la unión, excepto unas que se pueden formar al principio y al final de la unión y que son aceptables por normas, según la NC 04-62:84.

En el ensayo de doblado estático a una probeta no se apreciaron grietas en la superficie del cordón. El único defecto que se desarrolló fue el que se aprecia en la parte superior de la figura 3.5. Este se despreja debido a que ocurrió al final del cordón (Oficina Nacional de Normalización, 1984).

Este ensayo se realizó en la máquina universal y el método utilizado fue de doblado en tres puntos.



**Figura 3.4.** Probeta sometida al ensayo de doblado estático. Fuente:  
Elaboración propia.

### **3.3. Resultados del ensayo a fatiga.**

Los valores de los parámetros del ciclo de carga en el primer nivel para las probetas estudiadas se determinaron en el epígrafe 2.3.4 y se detallaron en la tabla 2.8.

En este nivel de carga existió una gran dispersión de los valores de los ciclos  $N$  a los que fallaron las probetas, de aquí que se ensayaron 6 probetas a este nivel con el propósito de ajustar en la mayor medida el valor medio de los ciclos. Los parámetros de los ciclos de carga para los niveles 2, 3 y 4 están en la tabla 3.2; mientras que los resultados de los valores del número de ciclos a los que fallaron las probetas en los diferentes niveles de carga se muestran en la tabla 3.3. En total se ensayaron 21 probetas.

**Tabla 3.2.** Parámetros del ciclo de carga para los niveles 2, 3 y 4a los que se realizaron los ensayos a fatiga.

Cargas (kN)				Tensiones (MPa)			
	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4		Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
$P_{\max}$	28,5	31,5	30,5	$\sigma_{\max}$	178,1	196,9	190,6
$P_{\min}$	2,85	3,15	3,05	$\sigma_{\min}$	17,81	19,69	19,06
$P_{med}$	15,675	17,325	16,775	$\sigma_{med}$	97,955	108,295	104,83
$P_a$	12,825	14,175	13,725	$\sigma_a$	80,145	88,605	85,77
$\Delta P$	25,65	28,35	27,45	$\Delta \sigma$	160,29	177,21	171,54
$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$				0,1			

**Tabla 3.3.** Número de ciclos de carga a que fallaron las probetas en los diferentes niveles de carga.

Nivel 1		Nivel 2		Nivel 3		Nivel 4	
Probeta	Ciclos	Probeta	Ciclos	Probeta	Ciclos	Probeta	Ciclos
1	290047	6	4671010	9	345930	17	240303
2	24624	7	2045073	10	298920	18	994490
3	602953	8	1575206	11	210595	19	214885
4	523170	14	5644514	12	485503	20	1607851
5	399580			13	389095	21	277211
15	284893			16	248862		

Para ensayar los siguientes niveles de carga se decidió variar la carga máxima a aplicar sobre la probeta y por ende, también la tensión máxima; manteniendo constante el coeficiente de asimetría del ciclo. A la máquina de ensayo empleada los datos que se le proporcionan son las cargas.

Para el segundo nivel de carga se considera  $P_{\max} = 28,5 \text{ kN}$ , por lo que la tensión es igual a  $\sigma_{\max} = 178,1 \text{ MPa}$ . Las tablas 3.2 y 3.3 muestran respectivamente los valores de los parámetros del ciclo de carga y el número de ciclos de carga a las que fueron sometidas las diferentes probetas a este nivel.

En la tabla 3.2 se ve que solo se ensayaron 4 probetas en el segundo nivel de carga. Para decidir esta cantidad de ensayos se consideró que las probetas

fallaron a una gran cantidad de ciclos, incluso algunas no fallaron y por lo tanto se plantean los valores de tensiones y cargas a este nivel para caracterizar al límite de resistencia a la fatiga de la unión ensayada.

Es necesario entonces determinar los valores intermedios para la construcción de la curva  $S-N$ .

El tercer nivel de carga se realiza con una carga máxima  $P_{\max} = 31,5 \text{ kN}$  que provoca una tensión máxima  $\sigma_{\max} = 196,9 \text{ MPa}$ . El resto de los parámetros del ciclo se exponen en la tabla 3.3, mientras que en la tabla 3.2 están plasmados los valores de los ciclos a los que se produjeron los fallos de las probetas.

Para el cuarto nivel de carga los parámetros  $P_{\max}$  y  $\sigma_{\max}$  son iguales a  $30,5 \text{ kN}$  y  $190,6 \text{ MPa}$  respectivamente. El resto de los parámetros del ciclo se encuentran también en la tabla 3.3.

### 3.3.1. Análisis estadístico del ensayo a fatiga

Para el tratamiento de los resultados de los ensayos a fatiga se aplicó en la presente tesis la norma ASTM E 739 – 91 “Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress - Life ( $S-N$ ) and Strain - Life ( $\varepsilon-N$ ) Fatigue Data” que rige el tratamiento estadístico de los mismos.

La distribución de vida de fatiga (en cualquier ensayo) es desconocida y de hecho puede ser bastante compleja en ciertas situaciones. Para los propósitos de simplificar el análisis (mientras se mantengan procedimientos estadísticos sensatos), se supone en la práctica que se describe en la norma ASTM E 739 – 91 que el logaritmo del número de ciclos a fatiga sigue una distribución normal, y que la varianza del logaritmo de la vida a fatiga es constante en todo el rango de la variable independiente (es decir, se asume que la dispersión en el logaritmo de  $N$  es la misma tanto a bajos como a altos niveles de tensión o deformación).

De manera general, es posible relacionar la vida a fatiga con la tensión del ciclo mediante la fórmula que sigue (ASTM International, 1999):

$$\log N = A + B(S) \dots\dots\dots(3.4)$$

Donde  $A$  y  $B$  son los coeficientes de ajuste de la ecuación.

El logaritmo de  $N$  se usa como la variable dependiente y se denota por  $Y$ ; mientras que la variable independiente se denota por  $X$  y puede ser la tensión

S, la deformación  $\varepsilon$ ,  $\log S$ , o  $\log \varepsilon$ . En este estudio se utiliza la tensión máxima del ciclo, que la llamaremos  $S_{max}$ . De acuerdo a lo planteado aquí la linealización de la ecuación de la dependencia entre  $N$  y  $S_{max}$  toma la forma:

$$Y = A + BX \dots\dots\dots(3.5)$$

El tamaño de la muestra  $k$ , de acuerdo a la misma Norma mencionada antes puede estar entre 12 y 24 para datos confiables. En esta investigación fue de 21 probetas ensayadas.

El porciento de replicación se determina como:

$$\% \text{ Re } plica = 100 \times \left[ 1 - \frac{TDNE}{TPE} \right] \dots\dots\dots(3.6)$$

En la ecuación anterior:  $TDNE = 4$  e indica el número total de diferentes niveles de tensión o deformación usado en el ensayo, mientras que  $TPE$  es el número total de probetas ensayadas, o sea 21.

$$\% \text{ Re } plica = 81\%$$

Se le debe prestar atención a que el porciento de replicación indica que porción de la cantidad de probetas ensayadas puede ser usada para obtener una estimación de la variabilidad de los ensayos replicados. En la bibliografía (ASTM International, 1999) plantean que debe estar entre 75 y 88 porciento como mínimo. El valor calculado en esta investigación corresponde a 17,01 probetas.

Los estimadores para los coeficientes de la ecuación (3.5) es posible determinarlos mediante las expresiones siguientes:

$$\hat{A} = \bar{Y} - \hat{B}\bar{X} \dots\dots\dots(3.7)$$

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \dots\dots\dots(3.8)$$

Los símbolos “casquete” ( $\hat{\phantom{x}}$ ) y “barra superior” ( $\bar{\phantom{x}}$ ) significan “estimador” y “valor medio” respectivamente.

Los valores de los estimadores así calculados son  $\hat{A} = 11,77571624$  y  $\hat{B} = -0,031058404$ . En el anexo 8 es posible encontrar una hoja de cálculo programada para realizar estos cálculos.

Sustituyendo estos valores en la expresión (3.4) se obtiene la ecuación que relaciona el número de ciclos  $N$  y la tensión máxima del ciclo  $S_{\max}$  :

$$\log N = 11,77571624 - 0,031058404 \times S_{\max} \dots\dots\dots(3.9)$$

La varianza del logaritmo del número de ciclos  $\log N$  puede ser determinada mediante la expresión (3.10)

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{k - 2} \dots\dots\dots(3.10)$$

El término  $\hat{Y}_i$  se obtiene de:

$$\hat{Y}_i = \hat{A} + \hat{B}X_i \dots\dots\dots(3.11)$$

mientras que la diferencia  $k - 2$  en el denominador se emplea en lugar de  $k$  para hacer del estimador de la varianza  $\hat{\sigma}^2$  un estimador imparcial de la varianza de la población normal  $\sigma^2$ .

Los valores así determinados son iguales a  $\hat{\sigma}^2 = 0,15522058$  y  $\hat{\sigma} = 0,39398043$ .

Los intervalos de confianza para los valores de  $A$  y  $B$  pueden ser establecidos usando la distribución  $t$  que aparece en la Tabla 1 de la norma ASTM E 739 – 91. Las expresiones (3.12) y (3.13) permiten estimar dichos intervalos de confianza para los parámetros  $A$  y  $B$  respectivamente.

$$\hat{A} \pm t_p \hat{\sigma} \left[ \frac{1}{k} + \frac{\bar{X}^2}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(3.12)$$

$$\hat{B} \pm t_p \hat{\sigma} \left[ \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(3.13)$$

El valor de  $t_p$  se determina a partir de la tabla 1, página 4 de la norma ASTM E 739 – 91, estableciendo el valor deseado de la probabilidad  $P$  del intervalo de confianza que en esta tesis se escoge como del 95 % y como valor de entrada el parámetro  $n$  que es igual al tamaño de muestra al que se le resta 2, o sea  $n = k - 2$ ;  $n = 19$ . Luego  $t_p = 2,0930$ .

Los intervalos de confianza así determinados son los siguientes:

- Para el estimador de  $A$ :  $[8,623104537; 14,92832793]$ .
- Para el estimador de  $B$ :  $[-0,04714894; -0,01496787]$ .

Las bandas de confianza para toda la curva  $S-N$  se van a calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\hat{A} + \hat{B}X \pm \sqrt{2F_p} \sigma \left[ \frac{1}{k} + \frac{(X - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(3.14)$$

El término  $F_p$  se toma de la tabla 2, página 5 de la norma ASTM E 739 – 91., determinando dos parámetros de entrada. El primero de ellos es  $n_1$  que al usar la expresión que aparece en el denominador de la ecuación (3.14) es igual a 2 y el segundo  $n_2 = k - 2 = 19$ . La tabla citada antes alcanza un valor máximo de  $n_2 = 15$ , por lo que es posible asumir ese valor. Con los parámetros de entrada y para una probabilidad del 95 % se obtiene que  $F_p = F_{0,95} = 3,6823$ . Los valores de las bandas de confianza determinados se encuentran en el anexo 8.

Ahora es necesario probar la certeza del uso del modelo lineal asumido (Ecuación 3.5). Si el ensayo es realizado de manera tal que sean observados más de un valor de  $Y$  para algunos valores de  $X_i$  ( $X_i$  son los niveles de carga e  $i \geq 3$ ) entonces es posible realizar una prueba estadística basada en la distribución  $F$  que aparece en la tabla citada en el párrafo anterior. El logaritmo de  $N$  en la  $j$ -ésima probeta ensayada en el  $i$ -ésimo nivel de  $X$  es denotado para este análisis como  $Y_{ij}$ .

En nuestro estudio los ensayos a fatiga se realizaron a  $l = 4$  diferentes niveles de carga y fueron observados diferentes valores  $m_i$  de  $Y$  en cada valor de  $X_i$ . Para cada nivel de carga  $X_i$  aparecen los diferentes valores observados de  $Y$  en la tabla 3.2. La hipótesis de linealidad expresada en la ecuación (3.5) es rechazada cuando el valor de  $F$  calculado usando la expresión (3.15) es mayor que  $F_p$  determinado de la tabla 2 de la norma ASTM E 739 – 91 para el nivel de significancia deseado. Para un nivel de significancia del 95 %  $F_p = 3,6823$ .

$$F = \frac{\sum_{i=1}^l m_i (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2}{(l-2)} \div \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{m_i} (\hat{Y}_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{(k-l)} \dots\dots\dots(3.15)$$

El parámetro  $F$  calculado tiene un valor de 3,4577 siendo menor que  $F_p$  por lo tanto se acepta la hipótesis de linealidad del modelo que se emplea para el estudio de los resultados del ensayo a fatiga de la unión soldada.

### 3.3.2. Presentación de los resultados del ensayo a fatiga

Después de realizado el análisis estadístico de los resultados de los ensayos a fatiga de la unión soldada, procedemos a la presentación de los mismos, según la norma ASTM E 468 – 90 “Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials”.

La norma citada guía los pasos a seguir para proporcionar todos los datos posibles sobre los ensayos realizados. Es necesario mostrar datos como las características del material base, procesos tecnológicos realizados, probetas utilizadas, máquina de ensayos utilizada, condiciones de los experimentos para que se le pueda dar a la información proporcionada la mayor utilidad posible.

Elemento: Unión soldada a tope.

Datos del material base.

Designación: Acero AISI 1015.

Presentación: Chapa de 500 mm x 600 mm x 4 mm.

Composición química: 0,99202  $Fe$  , 0,16609  $C$  , 0,50421  $Mn$  , 0,01385  $P$  , 0,00578  $S$  , 0,02746  $Si$  , 0,02333  $Cr$  .

Resistencia a la tracción: 420 MPa (60,9 ksi).

Límite de fluencia: 315 MPa (45,7 ksi).

Elongación: 39 % .

Extricción: 61 % .

Datos del material de aportación.

Designación: Electrodo E6013 (de fabricación cubana). Tipo de revestimiento: Rutílico.

Presentación: Cajas de 5kg de peso.

Composición química: 0,07  $C$  , 0,5  $Mn$  , 0,35  $Si$  .

Resistencia a la tracción: 431 – 510 MPa (62,5-73,9 ksi).



Límite de fluencia: 392 MPa (56,9 ksi).

Elongación: 20-28 % .

Extricción: 35-60 % .

Probetas para ensayo a fatiga.

Forma de elaboración: Las probetas se fabricaron mediante maquinado en una fresadora universal. Posteriormente se rectificaron en una rectificadora plana.

La unión soldada se logró mediante soldadura manual por arco eléctrico.

Forma y dimensiones. Ver figura (2.3 y 2.2).

Concentrador de tensiones: El cordón de soldadura.

Tratamiento térmico: Sin tratamiento.

Cantidad de probetas ensayadas: 21.

Máquina de ensayo: MTS-250, servohidráulica. Capacidad: 250 kN (5682 lbf).

Tipo de ensayo: Axial.

Número de máquinas empleadas: 1.

Frecuencia de los ensayos: 14 Hz.

Criterio de fallo: Fractura total.

Interrupción del ensayo. 1 500 000 ciclos.

Temperatura del laboratorio: 20° C  $\pm$  .2° C.

Una vez realizado el ensayo, las probetas fueron almacenadas en una caja, protegidas por papel higiénico. El sistema de sujeción en la máquina consiste en mordazas planas que se abrían y cerraban mediante sistemas hidráulicos conectados a ella, gobernados desde el panel de control de la máquina.

Los resultados de los diferentes ensayos aparecen en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Resultados del ensayo a fatiga.

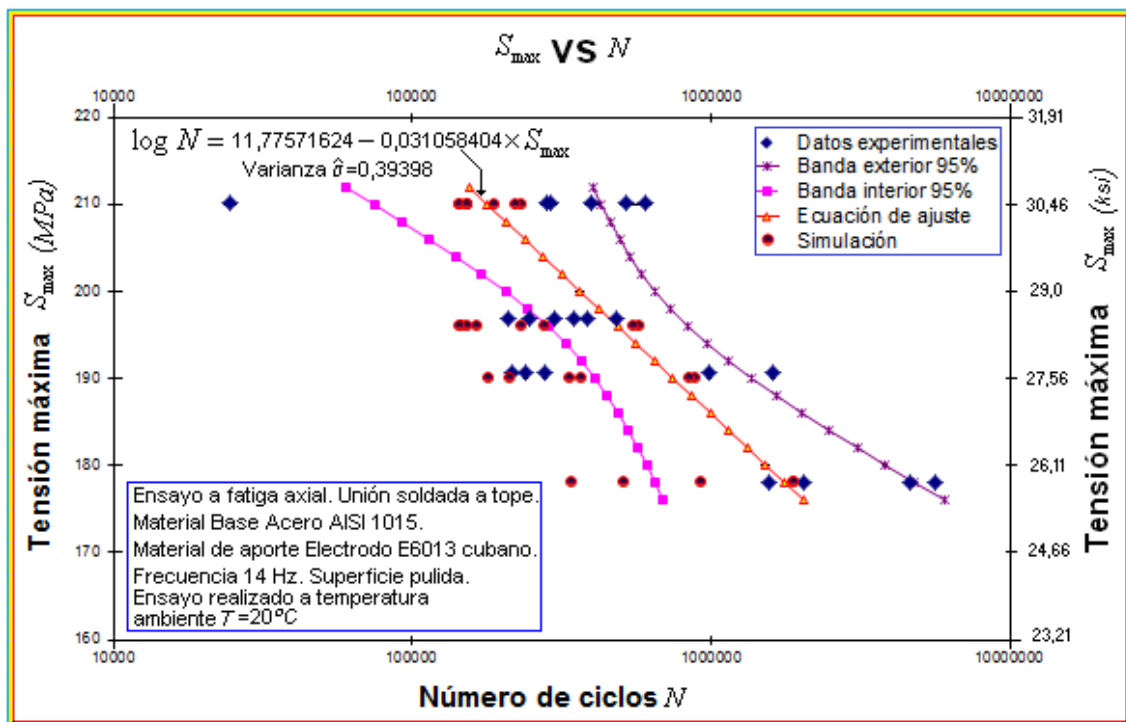
Probeta	$S_a$ (MPa/ksi)	$S_{max}$ (MPa/ksi)	Ciclos	Observaciones
1	94,5/13,71	210,2/30,5	290047	Falla.
2	94,5/13,71	210,2/30,5	24624	Falla. Falta de fusión.
3	94,5/13,71	210,2/30,5	602953	Falla.
4	94,5/13,71	210,2/30,5	523170	Falla MB
5	94,5/13,71	210,2/30,5	399580	Falla en la ZAT, y también en el MB, donde r= 5mm
6	62,5/9,1	178,1/25,8	4671010	No falla. Repetir ensayo de

				líquidos penetrantes.
7	62,5/9,1	178,1/25,8	2045073	Rompe al final de la ZAT. La grieta comienza en una gota de metal fundido.
8	62,5/9,1	178,1/25,8	1575206	No falla.
9	81,3/11,8	196,9/28,6	345930	Falla. Coalescencia de grietas, que comienzan a desarrollarse en planos diferentes.
10	81,3/11,8	196,9/28,6	298920	Falla en MB (desarrolló una grieta) y en ZAT.
11	81,3/11,8	196,9/28,6	210595	Falla.
12	81,3/11,8	196,9/28,6	485503	Falla.
13	81,3/11,8	196,9/28,6	389095	Falla.
14	62,5/9,1	178,1/25,8	5644514	No falla. Repetir ensayo de líquidos penetrantes.
15	94,5/13,71	210,2/30,5	284893	Falla.
16	81,3/11,8	196,9/28,6	248862	Falla.
17	75,0/10,9	190,6/27,6	240303	Falla. Coalescencia de grietas.
18	75,0/10,9	190,6/27,6	994490	Falla.
19	75,0/10,9	190,6/27,6	214885	Falla.
20	75,0/10,9	190,6/27,6	1607851	Falla. Empezó en detalle cara A (Figura 2.7 d).
21	75,0/10,9	190,6/27,6	277211	Falla. Empezó en detalle 2 cara B (Figura 2.7 e). Además tiene una grieta en el cordón, que empezó en un poro. Hay coalescencia de grietas, con una grieta pequeñita que empieza en Detalle 1. cara B (Figura 2.7 f)..

### 3.3.3. Curva S-N de la unión ensayada

A continuación se muestra en la figura 3.5 la curva S-N de la unión soldada ensayada en esta tesis. La curva se obtuvo a partir de los datos experimentales

procesados según la norma ASTM E 739 – 91 como se ha descrito en este epígrafe. La primera parte de la curva que ha sido ajustada mediante un modelo lineal muestra la ecuación de ajuste de la misma, mientras que el punto de corte se encuentra para un valor de tensión igual a 178 MPa y 2039093 ciclos. A partir de este punto la curva se representa mediante una línea recta horizontal en la que la tensión se mantiene constante y de igual valor al mencionado antes, que corresponde al límite de resistencia a la fatiga de la unión y que denotamos en esta tesis como  $S_f$ .



### 3.3.4. Análisis fractográfico.

En esta tesis se ha realizado un análisis fractográfico a todas las probetas que fallaron a fatiga mediante microscopía óptica (MO) y electrónica de barrido (SEM) utilizando un Estereomicroscopio ZeissStemi SV11 y un Microscopio electrónico de Barrido JEOL JSM-6460LV con sistema INCA de análisis elemental por Rayos X, respectivamente. Es de destacar que la forma de todas las roturas es similar. La grieta siempre se inicia en un defecto, que puede ser propio del material, de los procesos de mecanizado para la fabricación de las

probetas y los más importantes en este aspecto, los de la soldadura, pues fueron los que más influyeron en las fallas.

De forma general las grietas siempre se inician en el defecto y comienzan a desarrollarse con un frente de grieta semielíptico. La zona de rotura frágil, que ocurre producto a la sobrecarga estática de la probeta muestra una extricción propia de la rotura de elementos sometidos a tracción. En el anexo 9 se muestran las observaciones de un grupo de probetas que se han seleccionado pues presentan algunas características interesantes.

### **3.4. Simulación del ensayo a fatiga**

El ensayo a fatiga es uno de los experimentos más costosos en el estudio de las propiedades de los materiales. La complejidad de las máquinas necesarias, unido al tiempo necesario para obtener una curva de fatiga son la causa fundamental del encarecimiento de estos ensayos. En Cuba no existen en servicio estas máquinas de ensayo.

Entre los análisis posibles que se pueden realizar con el método de los elementos finitos está el estudio a fatiga.

Por estas razones se busca utilizar los métodos de simulación numérica para predecir el comportamiento a fatiga de elementos mecánicos.

Entre las características del fenómeno de fatiga están que son muchos los factores que influyen sobre este fenómeno. Esto provoca una baja repetitividad de los ensayos, o sea que es prácticamente imposible que se repitan los valores del número de ciclos a los que falla una probeta. Dicho de otra manera, es difícil replicar experimentos a fatiga y que se obtengan los mismos valores del ensayo original.

Para solucionar este problema se proponen las bandas de confianza del 95 % (Figura 3.6) o del 90 % (Norma ASTM E739 – 91, 2004). Estas bandas significan que otros estudios realizados, que se basen en esa curva deben quedar ubicados dentro de la zona definida entre ellas para que tengan una probabilidad igual a la escogida para construir la curva, de que la probeta o pieza analizada sigue el mismo comportamiento de las utilizadas en la obtención de la curva S-N. Por lo tanto es de esperar que las simulaciones realizadas por el método de los elementos finitos queden ubicadas dentro de estas bandas.

A continuación se exponen los resultados de la simulación del comportamiento a fatiga de la unión soldada a tope objeto de estudio. Para realizar la simulación se ha utilizado la metodología propuesta en el epígrafe 2.4.

#### **3.4.1. Generación del modelo**

El modelo geométrico de la unión se realizó de la manera que se explica en el epígrafe 2.4.1.

A un extremo de la probeta se le aplicaron restricciones fijas, mientras que en el otro se le aplicó una carga (Figura 2.9). Los valores de la carga aplicada fueron los mismos que la carga máxima a la que se solicitaron las diferentes probetas en los niveles de carga del ensayo real y que se exponen en las tablas 2.8 y 3.3.

La simulación de la carga variable se realiza luego mediante la curva de tiempo que se asocia a cada estudio estático para describir la variación de la carga en el tiempo, o sea, la carga cíclica.

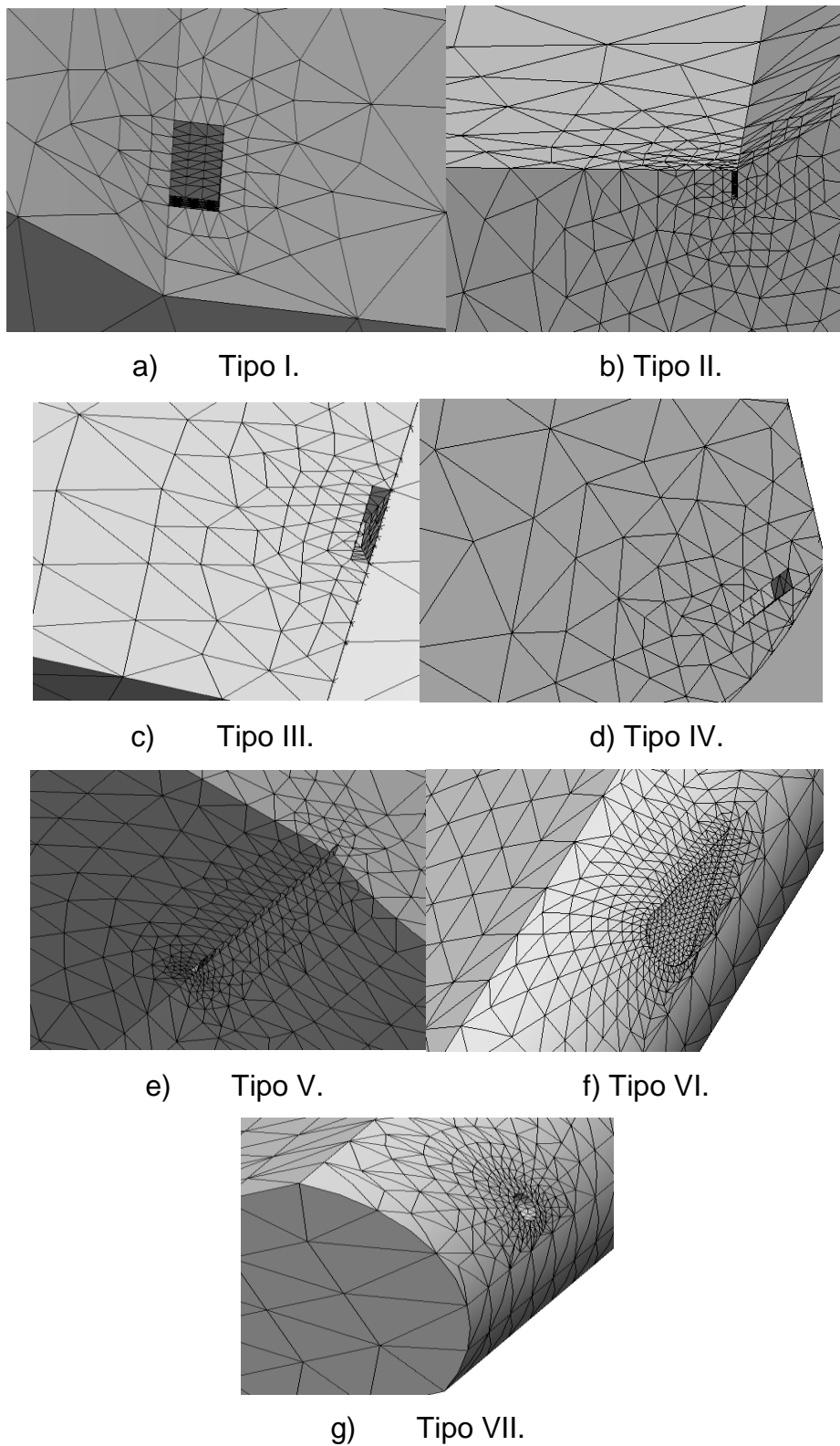
#### **3.4.2. Generación de defectos**

Los diferentes defectos que aparecen en la figura 2.10 fueron modelados en cada probeta. De acuerdo a las dimensiones de cada defecto se aplicó un control de malla que permitiera aumentar la cantidad de elementos alrededor del defecto y de esta manera obtener mejores valores de las tensiones, así como eliminar la singularidad que se produce en los vértices de las grietas.

**Tabla 3.5.** Valores del tamaño de elemento finito alrededor de los defectos modelados

No.	Defecto	Tamaño de malla (mm)
1	Tipo I. Grieta en la ZAT. Ubicada en la parte superior de la probeta.	0,10
2	Tipo II. Grieta en la ZAT. Ubicada en un costado de la probeta.	0,03
3	Tipo III. Grieta en la ZAT. Costado de la probeta.	0,05
4	Tipo IV. Grieta entre la ZAT y la ZF.	0,10
5	Tipo V. Socavadura.	0,02
6	Tipo VI. Grieta en el interior de la plancha.	0,10
7	Tipo VII. Poro entre la ZAT y la ZF.	0,05

La figura 3.6 muestra la distribución de la malla alrededor de los diferentes defectos.



**Figura 3.6.** Forma de la malla alrededor de los defectos. Fuente: Elaboración propia.

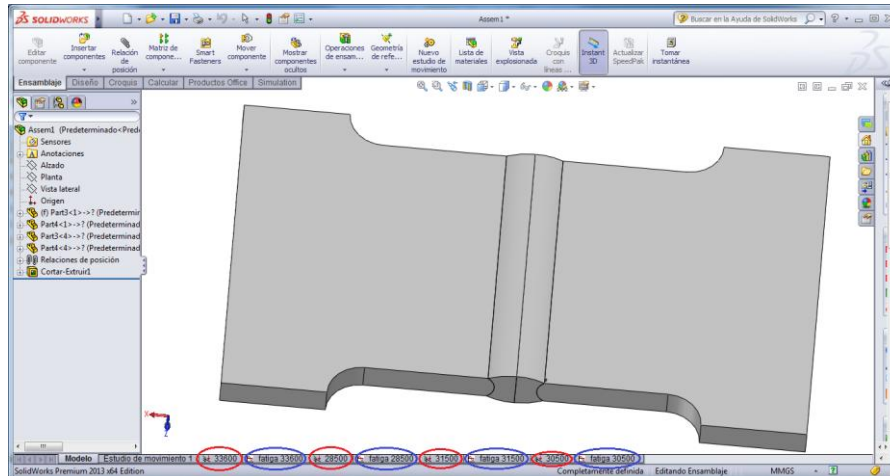
### 3.4.3. Estudios estáticos

Los estudios estáticos que preceden a los estudios de fatiga describen el comportamiento de un material solicitado por una carga cíclica en un instante de tiempo de la acción de la carga.

En esta tesis se ejecutaron 28 estudios estáticos. Cada uno de ellos describe el estado tensional que se produce en cada probeta modelada, o sea, se modelaron 28 probetas.

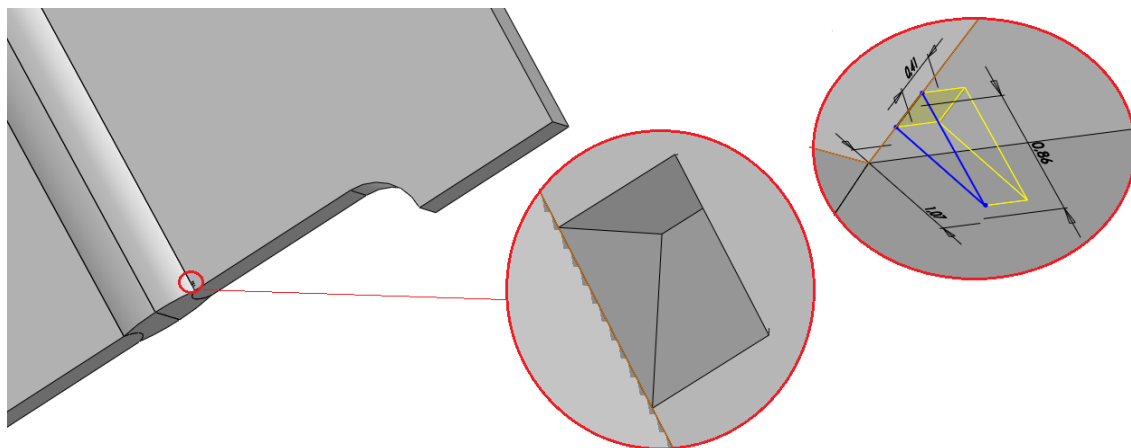
En los ensayos a fatiga se realizaron experimentos a cuatro niveles de carga. Los defectos generados fueron siete. Para organizar los ensayos mediante la simulación se procedió de la siguiente manera:

Al modelo geométrico construido, se le generaba el defecto que se quería estudiar. Después en el gestor del *Simulation* se creaban cuatro nuevos estudios estáticos, que se corresponden con cada uno de los niveles de carga a los que se ensayaron a fatiga las probetas reales. Los estudios estáticos se nombran con el valor de la carga máxima correspondiente al nivel de carga estudiado. En la figura 3.7 se encierran en un círculo rojo las pestañas que se corresponden con cada uno de los estudios estáticos.



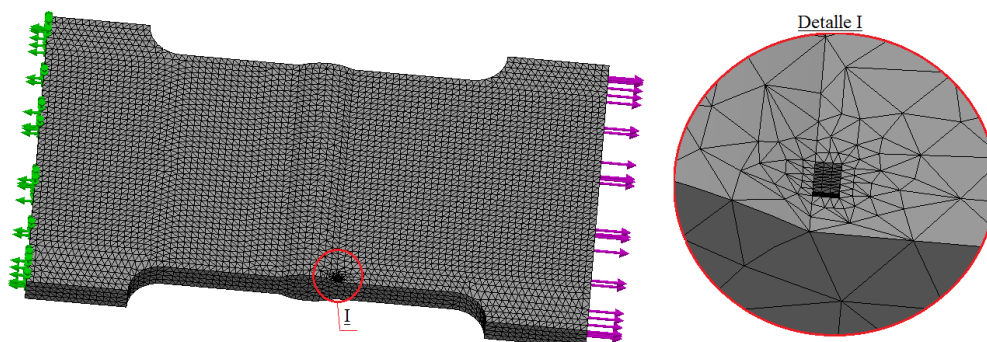
**Figura 3.7.** Ventana del programa *SolidWorks* con las pestañas que indican los diferentes estudios realizados a una probeta. Fuente: Elaboración propia.

Se van a mostrar como ejemplo de los resultados de los diferentes estudios estáticos los análisis de una probeta a la que se le generó una grieta en la ZAT, o sea, un defecto tipo I. (Figura 3.8).



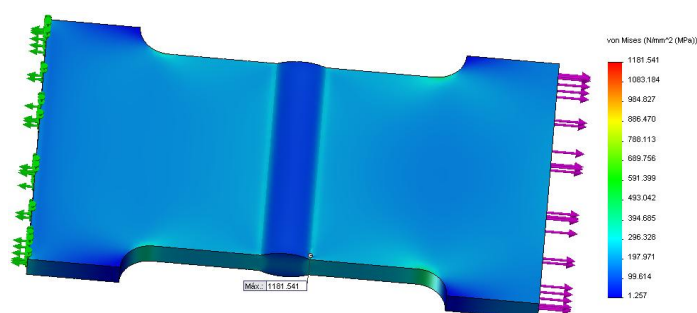
**Figura 3.8.** Dimensiones y ubicación del defecto en la probeta 9. Fuente:  
Elaboración propia.

La figura 3.9 muestra la probeta mallada, con la ubicación del defecto, las restricciones y la carga. En el detalle I de esa misma figura se encuentra una ampliación de la malla alrededor de la grieta. Para la probeta se usó un tamaño de elemento finito de 1 mm, mientras que en el defecto se aplicó un control de mallado con un tamaño de elemento de 0,1 mm. Este refinamiento de la malla en esa zona permite obtener mejores aproximaciones para los valores de las tensiones, así como eliminar las singularidades que se producen en los vértices de la grieta.



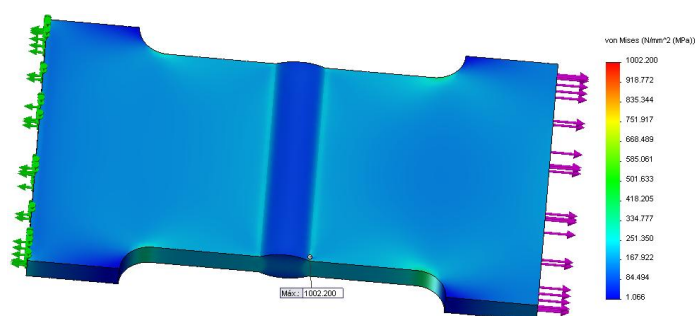
**Figura 3.9.** Mallado de la probeta.

En la figura 3.10 se muestra la distribución de las tensiones que se produce en cada uno de los diferentes estudios estáticos para la probeta analizada.

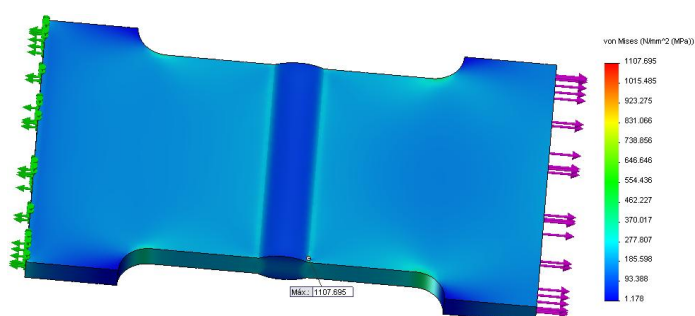




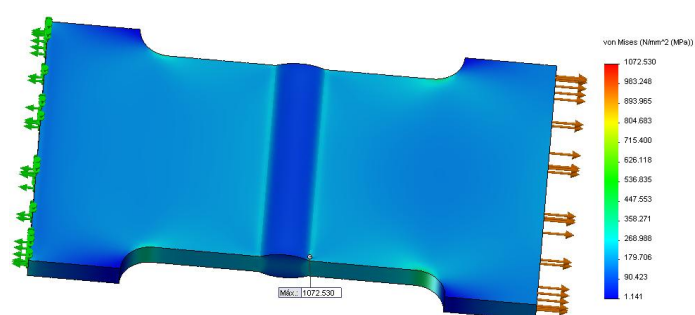
- a) Carga máxima: 33,6 kN. Tensión en la grieta: 1 151 MPa.



- b) Carga máxima: 28,5kN. Tensión en la grieta: 1 002 MPa.



- c) Carga máxima: 31,5 N. Tensión en la grieta: 1 107 MPa.



- d) Carga máxima: 30,5 N. Tensión en la grieta: 1 072 MPa.

**Figura 3.10.** Estado tensional en la probeta a diferentes valores de carga.

Fuente: Elaboración propia.

De los estudios estáticos se obtiene que en todas las probetas aparecen tensiones que sobrepasan el límite de fluencia del material de la unión soldada, incluso más de una vez. Esto siempre ocurre en el defecto, aunque sea de manera puntual en los vértices de la grieta <sup>(4)</sup>. Esta observación es muy importante teniendo en cuenta que, es precisamente en los vértices de estas grietas donde comienza a crecer la grieta de fatiga. También está de acuerdo con el enfoque local: es suficiente que en un solo punto del material, surjan

<sup>4</sup> Para identificar los valores máximos de tensión en el menú contextual Opciones de gráficos, se activa la opción: Mostrar anotación máxima. Siempre señaló que los máximos valores de tensión tienen lugar en el defecto.

tensiones iguales o superiores al límite de fluencia para que comience a nuclear una grieta de fatiga.

#### **3.4.4. Construcción de la curva de tiempo**

Las curvas de tiempo son utilizadas para describir el comportamiento de la carga variable en el tiempo. Se utilizan para relacionar los estudios estáticos que se corren en el epígrafe 3.4.5 con los estudios de fatiga. La curva de tiempo utilizada en la metodología que se propone en esta tesis fue descrita en el 2.4.4 (Figura 2.11). Es importante destacar que para generar esta curva se tomaron los valores de los diferentes parámetros de los ensayos a fatiga realizados en la máquina universal MTS810. Esta máquina, a medida que se está ensayando cada probeta muestra una interfase gráfica en la que se puede observar (entre otros aspectos del ensayo) como está variando la carga en el tiempo.

#### **3.4.5. Estudios de fatiga**

Los estudios de fatiga permiten evaluar el daño y la vida útil de los elementos de máquina y estructuras. En el caso que nos ocupa, de una unión soldada. Las uniones soldadas constituyen un componente fundamental en las máquinas y estructuras al permitir la unión de forma indesarmable de los diferentes elementos que las componen.

Para ejecutar los estudios de fatiga es necesario que previamente se hayan corrido estudios estáticos y contar con una curva de tiempo que describa el comportamiento de la carga variables.

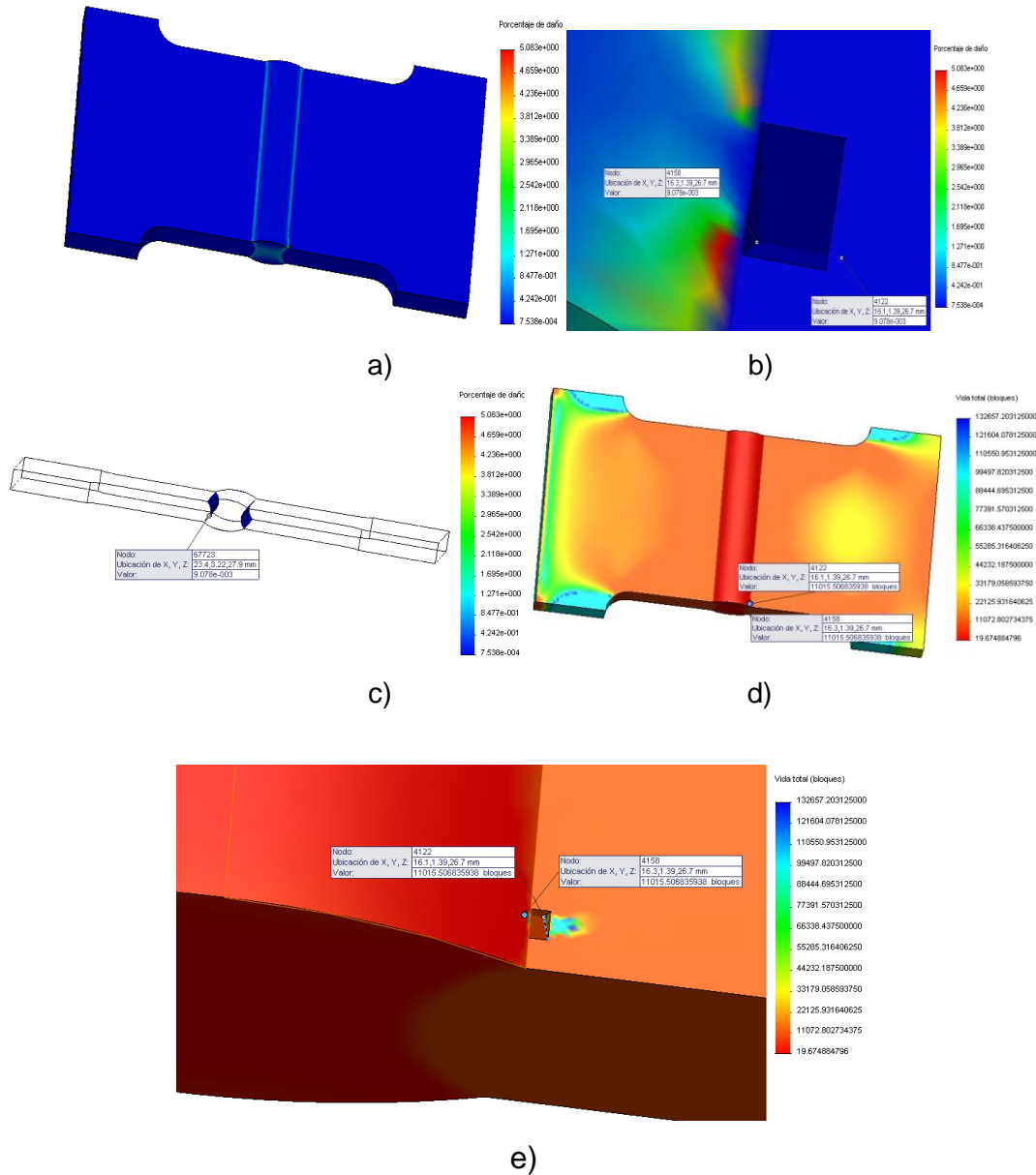
Después es necesario relacionar el(los) estudio(s) estático(s) correspondiente(s) con el estudio a fatiga que se corresponde y asignarle la curva de carga. Esta indica como varían en el tiempo las cargas que se le aplican al modelo y que le dan solución al problema estático.

Para lograr esto se escoge en el gestor del *Simulation*, en el estudio de fatiga la opción Carga, agregar suceso. Entonces se le asignan al estudio de fatiga el estudio estático y a su vez la curva de carga al primero.

Los estudios de fatiga se organizaron igual que los estáticos. Se crearon 4 estudios y a cada uno se le dio el nombre compuesto de la palabra fatiga, más el valor de la carga máxima que ocurre en la probeta. En la figura 3.8 se señalan con un círculo azul los estudios de fatiga.

Después es necesario asignarle a los materiales que conforman la probeta las propiedades mecánicas necesarias para realizar los estudios. En este caso, se le asigna tanto al material base como al material de aporte una curva *S-N* que se corresponde con la curva de ajuste obtenida de los resultados experimentales. No se hace diferencia para asignar las propiedades de fatiga entre las partes que componen la unión soldada debido a que no se cuentan con esos datos, además de existir otras dos razones, que son que la unión trabaja como un todo y que es difícil en la práctica obtener probetas que permitieran evaluar el material de aportación.

Los resultados obtenidos de los estudios de fatiga para la probeta 9 son expuestos a continuación en la figura 3.11.



a) **Figura 3.11.** Resultados de los estudios a fatiga para la probeta 9. a) Trazado de daño en la probeta completa. b) Trazado de daño alrededor de la grieta. c) Trazado de daño en la zona de transición. d) Trazado de la vida a fatiga en la probeta completa. Bloques de carga en la grieta: 11 015.e) Distribución de la vida a fatiga alrededor de la grieta. Bloques de carga en la grieta: 11 015.Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la figura 3.11 a) el daño máximo ocurre en zonas cercanas a la grieta cerca del cordón de soldadura. Otros lugares donde ocurre un daño considerable es en el cambio de sección entre el cordón y el material base. Esto se debe a que en esa zona ocurre el fenómeno de la concentración de tensiones. En probetas reales el fallo puede ocurrir en esta zona atendiendo a la presencia de esta concentración y además de la disminución de la tenacidad que tiene lugar. Cuando se hace un acercamiento a la zona de la grieta (Figura 3.11 b) se aprecia que el daño máximo tiene lugar en la zona del cordón, sin embargo se toman los valores presentes en la punta de la grieta. La causa de esto es que los experimentos demuestran que es allí donde comienza a nuclear la grieta de fatiga, o sea, donde ocurre el fallo de la probeta.

En la figura 3.11 c) se ha realizado un trazado de isosuperficie en la zona de transición, y se observa que existe una zona con los mismos valores de daño que se corresponde precisamente con el cambio del cordón hacia el material base. Esta es una zona de interés porque en uniones reales pueden nuclear grietas de fatiga en ella, se encuentra contigua a la zona de grano grueso de la ZAT, y por lo tanto es propensa al crecimiento de grietas de fatiga.

En la figura 3.11 d) se muestra la distribución de la vida en la probeta. Se señala que los valores mínimos no son en la grieta, pero si en regiones cercanas a ella, como en el cordón de soldadura. Esto puede ser debido a los fenómenos de concentración de tensiones que ya se analizaron.

Para evaluar la vida a fatiga de la probeta, se seleccionan los valores de los bloques de carga en los vértices de la grieta, de acuerdo al mismo criterio mencionado antes.

#### **3.4.6. Obtención de los números de ciclos que resiste la probeta**

Después de obtenidos los bloques de carga que resiste cada probeta mediante la simulación, se procede a calcular el número de ciclos que resiste cada probeta. Para ello hay que multiplicar los bloques de carga por 14, que es la

cantidad de veces que se repite el ciclo en cada bloque, según se explicó en el epígrafe 2.4.4.

Los valores de la cantidad de ciclos que resiste cada probeta están en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6.** Resultados de la simulación de ensayos a fatiga.

No	Tensión nominal (MPa)	Número de ciclos	No	Tensión nominal (MPa)	Número de ciclos
1	210	144998	15	190	337652
2	196	147896	16	210	154210
3	210	144998	17	178	341348
4	196	146972	18	196	165914
5	210	233394	19	190	211792
6	178	1903146	20	210	223860
7	196	580272	21	178	1903146
8	190	890176	22	196	556542
9	210	154210	23	190	855652
10	196	154210	24	196	145040
11	190	180810	25	210	154504
12	210	187908	26	178	926744
13	178	515158	27	196	232932
14	196	277270	28	190	370356

La figura 3.6 muestra la curva S-N obtenida de forma experimental y los valores obtenidos mediante la simulación. Como se aprecia en esa figura, de las 28 probetas ensayadas mediante la simulación 18 están ubicadas dentro de las bandas de confianza. Este resultado representa el 64,3 % del total, lo que indica que es posible realizar la simulación del ensayo a fatiga para el estudio de estas uniones soldadas.

Peng (2008) planteó que un modelo basado en la teoría de fatiga uniaxial no podía predecir el comportamiento de la unión por la gran diferencia entre sus resultados experimentales y numéricos. Para mejorar los resultados propuso utilizar un modelo basado en la deformación principal máxima. En el modelo

propuesto por Almaguer y Estrada (2014) el 66 % de los puntos simulados se encontraba en las bandas de confianza del 95 %.

#### 4. Conclusiones

1. Con los ensayos realizados a la unión soldada objeto de estudio se construyó una curva  $S-N$ . La expresión que relaciona las tensiones y el número de ciclos es  $\log N = 11,77571624 - 0,031058404 \times S_{\max}$ , que fue ajustada según un modelo lineal de acuerdo al procedimiento que se describe en la bibliografía (ASTM E 739 – 91). El coeficiente de asimetría utilizado en los ensayos fue de 0,1. De acuerdo al ajuste realizado a la ecuación se obtuvo que se puede considerar la tensión máxima de 178,1 MPa como el límite de resistencia a la fatiga de la unión soldada, para un punto de corte de 2 039 093 ciclos.
2. Existe dispersión en los datos experimentales, incluso en niveles inferiores de carga se aprecia que algunas probetas fallan a valores de ciclos menores que en el nivel superior. La causa principal de esto se debe al proceso de soldeo empleado que fue de soldadura manual por arco eléctrico. Como es sabido este proceso depende en gran medida del operario y por lo tanto aumenta la probabilidad de que aparezcan diferencias entre una unión y otra, lo que no sucede en los procesos automatizados.
3. Aunque con los resultados obtenidos en la simulación se encuentran algunos puntos ubicados dentro de las bandas de confianza del 95 %, incluso sobre la ecuación de ajuste, con varios no ocurre esto. En primer lugar, es posible atribuir esto a la esencia propia del fenómeno de fatiga, donde siempre existe gran dispersión en los resultados experimentales y en segundo lugar al enfoque de la teoría clásica de fatiga que utiliza el *Simulation*.

## **5. Recomendaciones**

1. Aplicar esta metodología en otras uniones.
2. Realizar los estudios utilizando otros programas de cálculo mediante el método de los elementos finitos.
3. Utilizar los métodos de la Mecánica de la Fractura en las simulaciones.



## 6. Referencias bibliográficas

1. Almaguer, P. Estrada, R. (2014). Experimental and numerical evaluation of the fatigue behaviour in a welded joint. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 65 012013. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/65/1/012013>
2. Almaguer-Zaldivar, P. (2013). Simulación numérica de la curva S-N de una unión soldada a tope. VIII Conferencia Científica de la Universidad de Holguín. Guardalavaca, Holguín. Memorias en CD ISBN: 978-959-16-2138-2.
3. Almaguer-Zaldivar, P. (2012). Simulación numérica del coeficiente de concentración de tensiones en grietas de uniones soldadas a tope. Ingeniería Mecánica. Vol. 15. No. 3, septiembre-diciembre, p. 176-190 ISSN 1815-5944
4. Almaguer-Zaldivar, P.; Santiago-Cuenca, H.; Pérez-Vallejo, L. (2009) Determinación de coeficientes que influyen sobre el límite de resistencia a la fatiga. Diseño del software Fatiga 1.0. Revista de Ingeniería Mecánica, vol. 12, núm. 3, septiembre-diciembre, pp. 75-85. ISSN: 1815-5944. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=225114976010>.
5. Álvarez-Sánchez, J. Gregori-Pérez, S. Rivero-Llerena, G. González-Rodríguez, R. (1985) Elementos de máquinas. Manual Complementario. Editora: ENPES. Impreso en: ISPJAE. 371 páginas
6. Anderson, T. L. (2005). Fracture Mechanics. Fundamentals and applications. Third edition. Boca Ratón, Florida. USA: Editorial CRC Press. ISBN 10:0-8493-1656-1
7. ASTM International. (1999). Norma ASTM E 1417 – 99. Standard Practice for Liquid Penetrant Examination. Estados Unidos.
8. ASTM International. (2002). Norma ASTM E 165 – 02. Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination. Estados Unidos.
9. ASTM International. ASTM E 468 – 90. (2004). Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials. Estados Unidos.
10. ASTM International. ASTM E 739 – 91. (2004). Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life ( $\epsilon$ -N) Fatigue Data. Estados Unidos.

11. Barsoum, Z. Lundbäck, A. (2009). Simplified FE welding simulation of fillet welds – 3D effects on the formation residual stresses. Engineering Failure Analysis No. 16. p. 2281- 2289. 2009.
12. Bejerano U., J. Alberto. (2007). Consideraciones de diseño y factores que afectan el desempeño de las uniones soldadas bajo carga cíclica. Memorias del 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. 2007.
13. Blom, A.F. (1995). Spectrum Fatigue Behaviour of Welded Joints. International Journal of Fatigue, Vol. 17, no. 7, pp. 485-491.
14. Böhler-Thyssen. (2010). Tintes penetrantes. [http://www.bohlerperu.com/files/tintes\\_pentrantes.pdf](http://www.bohlerperu.com/files/tintes_pentrantes.pdf). Consultado el 26 de enero del 2011.
15. Bullón, C. W. (2007). Simulación de un proceso de soldadura mediante un modelo termo - mecánico considerando el efecto de esfuerzos residuales utilizando el método de los elementos finitos. Memorias del 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cuzco. Ecuador.
16. Cassanelli, A. Márquez, A. Lombera, G. De Vedia. (2002) Modelado Numérico del Socavado Lateral en Procesos de Soldadura. Materials Research, Vol. 6, No. 1, 91-95.
17. Facultad de Ingeniería Mecánica. (2008). Líquidos Penetrantes. Nivel I y II. <ftp://fim.uclv.edu.cu>. Consultado 27/05/2009)
18. Fernández Levy, Gilda. (1981) Resistencia de Materiales. 2 tomos. Ciudad de La Habana; Editorial Pueblo y Educación.
19. González Morales, Guillermo. (2010) Estudio sobre el comportamiento a fatiga de uniones soldadas a tope de acero 20 a las que se le realizan agujeros de alivios de tensiones. Tesis para optar por el título de ingeniero mecánico. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Holguín. 78 p.
20. Guliáev, A. P. (1978). Metalografía. Tomo 2, Ed. Mir, Moscú, URSS.
21. Gutiérrez, R. (1980). Construcciones soldadas. Editorial Científico – Técnica, La Habana. Cuba.】
22. Iida, K., Yamamoto, S. and Takanashi, M. (1997). Residual Stress Relaxation by Reversed Loading. Welding in the World, Vol. 39, no. 3, pp. 138-144.

23. Justel-Ramos, M. (2012). Soldadura. Manual para operarios y técnicos. La Habana, Cuba. Instituto Cubano del Libro. Editorial Científico-Técnica. ISBN: 978-959-05-0654-3.
24. Kanvinde, A.M. Fell, B.V. Gomez, I.R. Roberts, M. (2008). Predicting fracture in structural fillet welds using traditional and micromechanical fracture models. Engineering Structures. No. 30. p. 3325-3335. doi:10.1016/j.engstruct.2008.05.014
25. Lachmann, C., Nitschke-Pagel, Th. Wohlfahrt, H. (2000). Characterisation of Residual Stress Relaxation in Fatigue Loaded Welded Joints by X-Ray Diffraction and Barkhausen Noise Method. Material Science Forum, Vol. 347-349, pp. 374-381.
26. Martínez-Rosales, J. (2012). Simulación numérica del comportamiento a fatiga de la unión soldada a tope de acero AISI 1015. Tesis para optar por el título de ingeniero mecánico. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Holguín. 92 p.
27. MatWeb, Your Source for Materials Information. [www.matweb.com](http://www.matweb.com), Consultado en enero del 2010.
28. Megson, T. H. G. (1983). Strength of materials for civil engineers. Londres; Editorial Edward Arnold. 245 p
29. Ministerio de Fomento. (2011) Instrucción de Acero Estructural (EAE). Capítulo XI. Estado límite de fatiga. España. <https://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/FF5ACDD8-B520-426C-9EC0-8123F658F04B/103558/12.pdf>. Consultado el 3 de septiembre de 2014.
30. Nagata, Y. Gotoh, K. Toyosada, M. (2009). Numerical simulations of fatigue crack initiation and propagation based on re-tensile plastic zone generating load criterion for in-plane gusset welded joints J Mar Sci. Technol. No. 14. p. 104–114. doi 10.1007/s00773-009-0044-7
31. Neegre, P. Steglich, D. Brocks, W. Kocak, M. (2003). Numerical simulation of crack extension in aluminium welds. Computational Materials Science. No. 28 p. 723–731 Computational Materials Science 28 (2003) 723–731 doi:10.1016/j.commatsci.2003.08.026
32. Nikitin, I. Besel, M. (2008) Correlation between Residual Stress and Plastic Strain Amplitude during Low Cycle Fatigue of Mechanically Surface

Treated Austenitic Stainless Steel AISI 304 and Ferritic-Pearlitic Steel SAE 1045. Materials Science and Engineering A. Volumen: 491, p. 297-303.

33. Oficina Nacional de Normalización. Cuba. (1966). Ensayos de tracción de metales. NC 041-01. La Habana. Cuba. Oficina Nacional de Normalización.

34. Oficina Nacional de Normalización. Cuba. (1972). Probeta para ensayos de tracción transversal en uniones soldadas a tope. NC 04-72. La Habana. Cuba: Oficina Nacional de Normalización.

35. Oficina Nacional de Normalización. Cuba. (1982). Costura de las uniones soldadas. Tipos y elementos del diseño. NC 08-06:82. La Habana. Cuba. Oficina Nacional de Normalización.

36. Oficina Nacional de Normalización. Cuba. (1984). Uniones soldadas a tope. Prueba de doblado estático. NC 04-62:84. La Habana. Cuba. Oficina Nacional de Normalización.

37. Pei-Yuan, C. (2009) Influence of Residual Stress and Heat Affected Zone on Fatigue Failure of Welded Piping Joints. PhD thesis. North Carolina State University: ProQuest, UMI Dissertation Publishing. 20011. ISBN 10: 1243587814.

38. Peng-Hsiang, Chang. Tso-Liang, Teng. (2008). Numerical and experimental investigations on the fatigue evaluation of butt-welded joints. Metals and Materials International. Volume. 14, No. 3, p 361-372. 2008.

39. Peñuelas, I. Antuña, M. Rodríguez, C. Lezcano, R. Betegón, C. () Estudio numérico y experimental de la propagación dúctil en uniones soldadas agrietadas.

40. Pinch, D. M. Burdekin, F. M. (1992). Effects of welding residual stresses on significance of defects in various types of welded joint. Pergamon Press plc. Printed in Great Britain. Engineering Fracture Mechanics. Vol. 41, No. 5, pp. 721-735.

41. Pozo-Morejón, J. A. (2008). Metodología para el establecimiento de procedimientos de soldadura en aleaciones de aluminio al magnesio mediante la modelación por elementos finitos. Tesis en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. UCLV. 147 p. 2008.

42. Predan, J. Pippan, R. Gubeljak, N. (2010). Fatigue crack propagation in threshold regime under residual stresses. Int J Fatigue. doi:10.1016/j.ijfatigue.2009.12.006

43. Reina-Gómez, M. (1994) Soldadura de los aceros. Aplicaciones. 3ra edición. Madrid, España: Gráficas Lormo. ISBN 84-605-14-75-7.
44. Rodríguez, H. (1983) Metalurgia de la soldadura, La Habana, Cuba: Ed. Pueblo y Educación.
45. Shigley J. E. (1990). Diseño en Ingeniería Mecánica. Editorial Mc Graw Hill. México.
46. Shukla, A. (2004) Practical Fracture Mechanics in Design. New York, Estados Unidos: Marcel Dekker. ISBN 978-0-8247-5885-1.
47. Stiopin, P. A. Resistencia de Materiales./P. A. Stiopin.-- 6ta ed.—Moscú; Editorial Mir, 1976.-- 371 p.
48. Sumi, Y. Mohri, M. Kawamura, Y. (2004). Computational prediction of fatigue crack paths in ship structural details. Fatigue Fract Engng Mater Struct. Blackwell Publishing Ltd. No. 28. p.107–115. doi: 10.1111/j.1460-2695.2004.00850.x
49. Tamayo, R. (2012). Simulación de la estructura metalográfica de una unión soldada. Tesis para optar por el título de ingeniero mecánico. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Holguín. 92 p.
50. Timoshenko, Stephen. P. (1953). History of strength of materials. Nueva York; McGraw Hill Inc. 452 p.
51. Torres Alpízar, Eduardo. (2003). Determinación de tecnologías de soldadura por arco eléctrico. Universidad de Matanzas. Facultad de ingenierías química y mecánica. Matanzas. Cuba.
52. Torres-Caballero, L. (2014). Modelo para evaluar la influencia de las tensiones térmicas en la respuesta a fatiga de uniones soldadas. Tesis para optar por el título de ingeniero mecánico. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Holguín. 65 p.
53. Tulio Piovan, M. (2004). Tensiones y deformaciones. Revisión de principios físicos. Teorías de Falla Dinámica Análisis de Falla por Fatiga. UTN-FRBB Cátedra: Elementos de Máquinas.
54. UTP Catálogo de Electrodo. (2002) México. D. F.: Ediciones Académicas Clavería S.A de C.V.
55. Wei, L. W. James, M.N. (2002). Fatigue crack closure for inclined and kinked cracks. International Journal of Fracture. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. No. 116. p 25–50

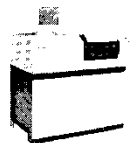
56. Wikipedia, La enciclopedia libre. Fatiga de materiales. [http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Fatiga\\_de\\_materiales](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Fatiga_de_materiales). Consultado en diciembre del 2009.
57. Wikipedia, La enciclopedia libre. <http://es.wikipedia.org>. Consultado en marzo del 2011.

# Anexos

## Anexo 1. Resultados del análisis químico realizado al material base <sup>(5)</sup>.



Laboratorio Instrumental.



### REPORTE DE ENSAYO DE COMPOSICION QUIMICA

Página 1 de 1

No de orden de ejecución: \_\_\_\_\_ Cliente: CAI Majibacoa -Las Tunas  
 Determinación de Composición Química por  
 Especificación del ensayo: Espectrometría de Emisión Óptica Cantidad de Muestras: 5  
 Norma utilizada: ASTM E 415-99a (2005) Equipo utilizado: Cuantómetro de Emisión Óptica  
 Modelo: ARL- 3460 Marca: ARL N° de Serie: 843

Identificación de la muestra	Composición Química en % m/m										
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Sn
Muestra 1	0.16609	0.50421	0.01385	0.00578	0.02746	0.00803	0.02333	0.00447	0.004	0.02339	0.00045
Muestra 2	0.19525	0.50039	0.02684	0.01629	0.07536	0.03859	0.01811	0.00739	0.051	0.04162	0.00113
Muestra 3	0.12312	0.73533	0.01647	0.00820	0.02969	0.01040	0.02791	0.00622	0.026	0.05377	0.01776
Muestra 4	0.26773	0.84716	0.01149	0.00605	0.97866	0.04917	0.8731	0.00985	0.083	0.00866	0.0074
Muestra 5	0.05904	0.38256	0.02016	0.01669	0.1338	0.00788	0.04489	0.00494	0.015	0.00285	0.00057
Incertidumbre (U) k=2 (%)	± 10	± 2	± 20	± 20	± 7	± 4	± 4	± 5	± 4	± 9	± 12

Observaciones:

Realizado por: Ing. Yucel Borges Escobas 12/05/2010  
 Esp. Principal del Laboratorio Instrumental Firma Fecha

Aprobado por: Ing. Osmany Gallardo Herreras 12/05/2010  
 Jefe del dpto. de Laboratorios Firma Fecha

El Laboratorio no emite interpretaciones ni opiniones de los resultados de ensayos.  
 El cliente tiene derecho a revisar la documentación del Sistema de Gestión relacionada con los ensayos solicitados y a observar la realización de los mismos.  
 Los resultados solo están relacionados con los ítems de ensayo.

<sup>5</sup>Los resultados de la muestra 1 son los que se corresponden con el material base empleado en esta tesis.



[illegible]

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
[www.uho.edu.cu](http://www.uho.edu.cu)

## Anexo 2. Propiedades y composición química del acero AISI-1015 encontradas en la bibliografía. Fuente: [www.matweb.com](http://www.matweb.com) (2011).

### AISI 1015 Steel, as rolled

**Categories:** [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Carbon Steel](#); [AISI 1000 Series Steel](#); [Low Carbon Steel](#)


**Material Notes:** Better machinability and carburizing. Can be strengthened by cold working or surface hardened by carburizing or cyaniding. Hot rolled sheet has excellent weldability.


**Key Words:** UNS G10150, AMS 5060, ASTM A29, ASTM A108, ASTM A510, ASTM A545, ASTM A549, ASTM A575, ASTM A576, ASTM A659, FED QQ-S-698 (C1015), MIL SPEC MIL-S-16974, SAE J403, JIS S 17 C, JIS S 15 CK, SS14 1370 (Sweden), SAE J412, SAE J414, DIN 1.1141, AFNOR XC 15 (Fr), AFNOR XC 18 (Fr), JIS S 15 C

**Vendors:** No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.87 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>	Typical for steel

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	126	126	
Hardness, Knoop	145	145	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Rockwell B	71	71	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Vickers	131	131	Converted from Brinell hardness.
Tensile Strength, Ultimate	420 MPa	60900 psi	
Tensile Strength, Yield	315 MPa	45700 psi	
Elongation at Break	39.0 %	39.0 %	in 50 mm
Reduction of Area	61.0 %	61.0 %	
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi	Typical for steel
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi	Typical for steel
Poissons Ratio	0.290	0.290	Typical For Steel
Izod Impact	110 J	81.1 ft-lb	
Machinability	60 %	60 %	Based on 100% machinability for AISI 1212 steel.
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi	Typical for steel

Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.000159 ohm-cm	0.000159 ohm-cm	annealed condition; 0°C (32°F)
	0.000219 ohm-cm @Temperature 100 °C	0.000219 ohm-cm @Temperature 212 °F	annealed condition
	0.000292 ohm-cm @Temperature 200 °C	0.000292 ohm-cm @Temperature 392 °F	annealed condition

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 	11.9 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 100 °C	6.61 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 212 °F	
	12.4 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 200 °C	6.89 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 392 °F	
	13.0 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 300 °C	7.22 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 572 °F	
	13.5 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 400 °C	7.50 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 752 °F	
	14.2 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 500 °C	7.89 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 932 °F	
Specific Heat Capacity	0.486 J/g-°C	0.116 BTU/lb-°F	annealed; 50-100°C (122-212°F)
Thermal Conductivity	51.9 W/m-K	360 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	estimated based on similar materials

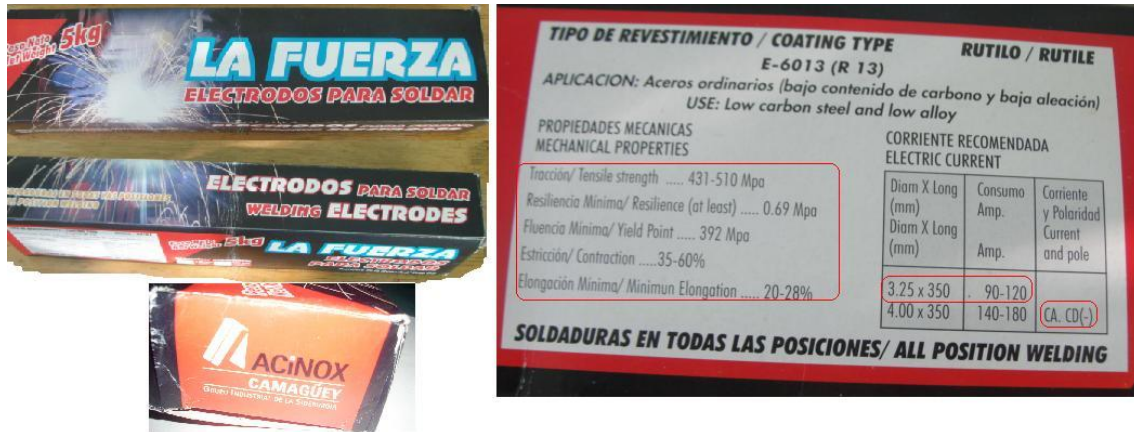
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.13 - 0.18 %	0.13 - 0.18 %	
Iron, Fe	99.13 - 99.57 %	99.13 - 99.57 %	As remainder
Manganese, Mn	0.30 - 0.60 %	0.30 - 0.60 %	
Phosphorous, P	<= 0.040 %	<= 0.040 %	
Sulfur, S	<= 0.050 %	<= 0.050 %	

[References](#) for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
[www.uho.edu.cu](http://www.uho.edu.cu)

### Anexo 3. Propiedades mecánicas del material de aporte. Fuente: Datos del fabricante (2010).



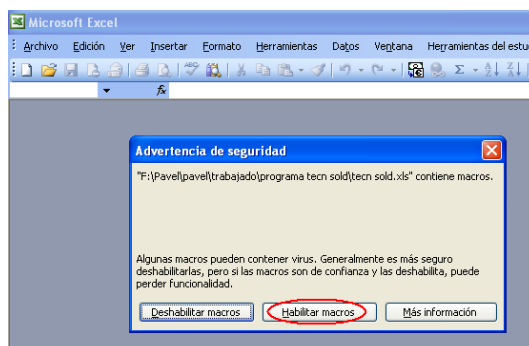
#### **Anexo 4. Manual de usuario de la macro *WeldParam* para realizar los cálculos de los parámetros del proceso de soldadura.**

*WeldParam* es una macro programada sobre el Visual Basic para Aplicaciones del programa Microsoft Excel 2003. Se ejecuta haciendo doble clic en el nombre del archivo *tecn sold.xls*. En la misma carpeta donde se copia el archivo, deben copiarse los siguientes ficheros que son usados por el programa:

- logo.jpg
- geometría.bmp
- 1.bmp
- 2.bmp
- 3.bmp
- 4.bmp

Antes de ejecutar la macro es necesario chequear el nivel de seguridad que tiene la configuración de Microsoft Excel con la que estamos trabajando. Para ello al ejecutar el mismo debe ir al menú Herramientas, submenú Macro, Seguridad y cuando se muestre la ventana Seguridad, en la pestaña Nivel de seguridad, escoger la opción Medio.

Cuando se ejecute el fichero *tecn sold.xls*, Microsoft Excel muestra una Advertencia de Seguridad (Figura A4.1), avisando que el libro que estamos ejecutando contiene macros y las posibles acciones a realizar. Se debe hacer clic sobre el botón de comando Habilitar macros, encerrado en un círculo rojo en la figura en cuestión.



**Figura A4.1.** Advertencia de seguridad referida a la macro *WeldParam* en el fichero *tecn sold.xls*.

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

Posteriormente se muestra la ventana inicial de la macro (Figura A4.2), donde el usuario puede continuar presionando cualquier tecla, como se dice en la parte inferior de la misma.



**Figura A4.2.** Ventana inicial de la macro.

El libro tiene tres hojas de cálculo, nombradas CE (Figura A4.3), Parámetros (Figura A4.4) y Calor (Figura A4.8).

En la primera de ellas se muestra una leyenda con los colores empleados en el programa. La función de estos colores se explica a continuación:

- Amarillo: son los rótulos o etiquetas que indican el nombre del parámetro al que se hace referencia. El usuario no puede modificar las celdas que tienen este color.
- Turquesa: dicen que en estas celdas el usuario debe realizar las entradas de datos necesarios para el buen funcionamiento de la macro.
- Lavanda: por estas celdas se realiza la salida de los cálculos realizados por la macro.
- Verde: indican una información que brinda el programa.

En la hoja de cálculo CE (Figura A4.3) se determina el carbono equivalente del material base y la temperatura de precalentamiento a que ha de ser sometida la unión. Los datos necesarios son la composición química del material base y el espesor de las planchas a unir.

Microsoft Excel - tecn sold.xls

Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana Herramientas del

E24

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2	<b>Elemento</b>	<b>Por ciento</b>			<b>Leyenda</b>		
3	Carbono	0,166090	%		Rótulos		
4	Silicio	0,027460	%		Datos		
5	Manganeso	0,504210	%		Resultados		
6	Cromo	0,023330	%		Información		
7	Níquel	0,006030	%				
8	Molibdeno	0,004470	%				
9	Cobre	0,004000	%				
10	Vanadio	0,000730	%				
11	Titanio	0,002520	%				
12	Niobio	0,000000	%				
13	Boro	0,000000	%				
14	Nitrógeno	0,000000	%				
15	Fósforo	0,013850	%				
16	Azufre	0,005780	%				
17							
18	Espesor	4,00	mm				
19							
20	<b>Carbono Equivalente</b>						
21	CE(IIV)	0,25663					
22	CE (Seferián)	0,17155					
23	CET	0,21853					
24	CEN	0,23494					
25	Pcm	0,20075					
26	CE Espesor	0,00336					
27							
28	<b>Temperatura Pre calentamiento</b>						
29	T <sub>pCE(IIV)</sub>	No es necesario.	°C				
30	T <sub>pCE(Seferián)</sub>	No es necesario.	°C				
31	T <sub>pCET</sub>	No es necesario.	°C				
32	T <sub>pCEN</sub>	No es necesario.	°C				
33							
34							
35							

CE Parametros Color

Listo

**Figura A4.3.** Hoja de cálculo CE.

Luego, se hace clic sobre la etiqueta Parametros <sup>(7)</sup>, que hace referencia a la siguiente hoja de cálculo de igual nombre (Figura A4.4). En esta son necesarios los siguientes datos:

- Material del que se va a construir la unión.
- Electrodo para realizar la soldadura.
- Longitud y diámetro del electrodo.
- Intensidad de la corriente, en caso de ser valores específicos recomendados por el fabricante. De no conocerse los valores de intensidad que propone el fabricante, debe teclearse "0" (cero) en las celdas correspondientes a los valores máximo (E10) y mínimo (C10), al lado de la segunda etiqueta

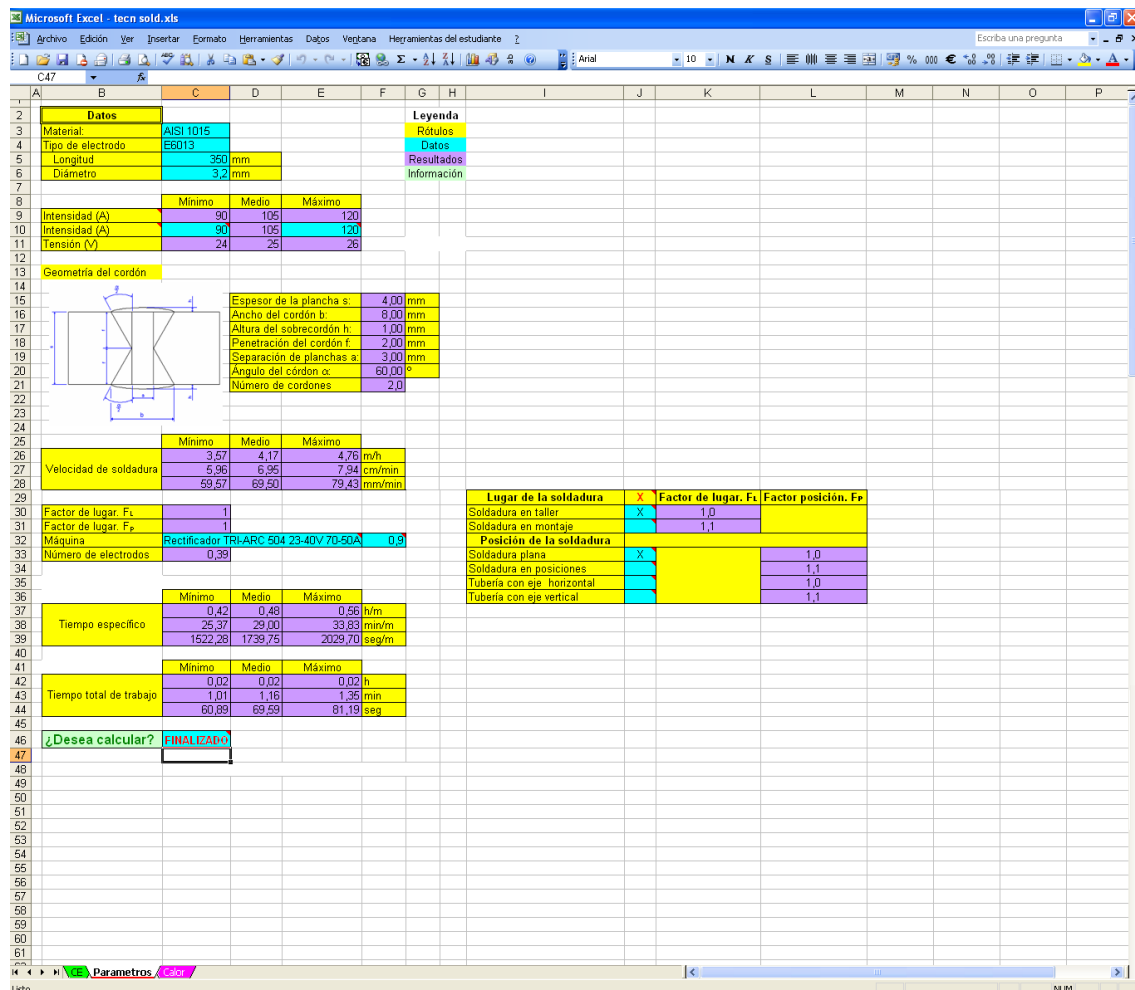
<sup>7</sup>La tilde de "Parametros" falta de forma intencional para evitar errores en la programación cuando se hace referencia a ella.

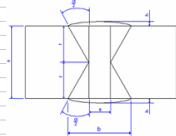
Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
 www.uho.edu.cu

“Intensidad de la corriente”. Esas celdas se encuentran comentadas y desplegando el comentario, mediante un clic sobre el triángulo rojo en el borde superior derecho de la celda se puede ver la explicación al respecto. Igual sucede con todas las celdas comentadas en el programa.

- Máquina que se va a emplear para realizar la soldadura.
- Eficiencia de la máquina definida antes.
- Factor de lugar y posición en que se realiza la soldadura. Solo es posible seleccionar mediante una “X” un solo valor de cada uno de estos factores. De seleccionar dos, el programa detecta un error y pide al usuario lo rectifique.

Una vez proporcionados todos los datos; para realizar los cálculos el usuario debe teclear la palabra “Si” en la celda C46.



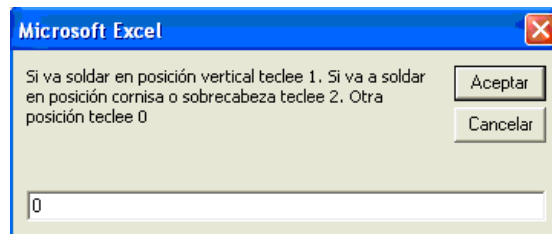
Datos				Leyenda				
Material:	AISI 1015			Robulos				
Tipo de electrodo:	E6013			Datos				
Longitud:	360 mm			Resultados				
Diámetro:	3.2 mm			Información				
	Minimo	Medio	Maximo					
Intensidad (A)	90	105	120					
Intensidad (A)	90	105	120					
Tensión (V)	24	25	26					
Geometría del cordón								
				Espesor de la plancha s:				4.00 mm
				Ancho del cordón b:				8.00 mm
				Altura del sobrecordón h:				1.00 mm
				Penetración del cordón f:				2.00 mm
				Separación de planchas a:				3.00 mm
				Angulo del cordón α:				60.00 °
				Numero de cordones:				2.0
	Minimo	Medio	Maximo					
Velocidad de soldadura	3.57	4.17	4.76 m/h					
	5.96	6.96	7.94 cm/min					
	69.67	69.50	79.43 mm/min					
Factor de lugar, F <sub>L</sub>	1							
Factor de lugar, F <sub>P</sub>	1							
Máquina	Rectificador TRIARC 504 23-40V 70-50A			0.9				
Numero de electrodos	0.39							
	Minimo	Medio	Maximo					
Tiempo especifico	0.42	0.48	0.56 h/m					
	25.37	29.00	33.89 min/m					
	1522.28	1739.75	2029.70 seg/m					
	Minimo	Medio	Maximo					
Tiempo total de trabajo	0.02	0.02	0.02 h					
	1.01	1.16	1.35 min					
	60.89	69.59	81.19 seg					
¿Desea calcular?				FINALIZAR				

**Figura A4.4.** Hoja de cálculo Parametros.

Cuando el programa comprueba que debe realizar los cálculos pregunta por otros datos necesarios, mediante ventanas de diálogo. En la figura A4.5 se muestra uno de estos diálogos donde debe especificarse mediante un código numérico la posición en que se va a soldar.

Los códigos son:

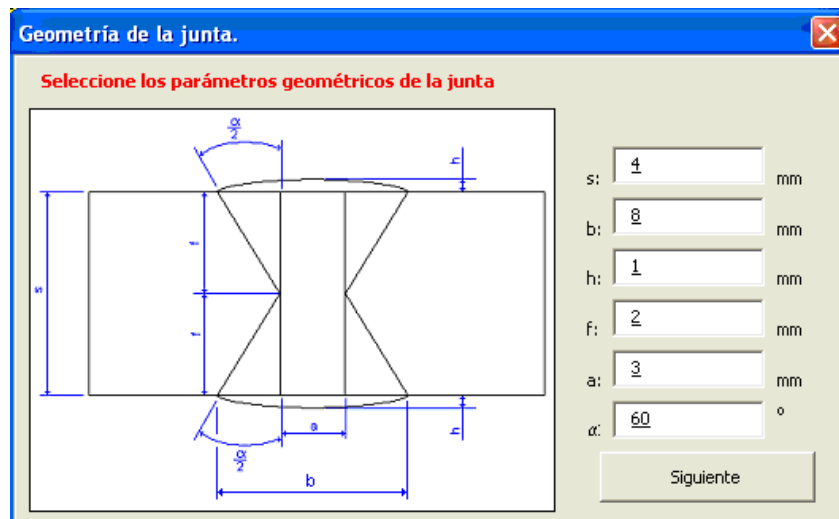
- 0: Una posición diferente a los dos siguientes.
- 1: Posición vertical.
- 2: Posición cornisa o sobrecabeza.



**Figura A4.5.** Diálogo sobre la posición de soldadura.

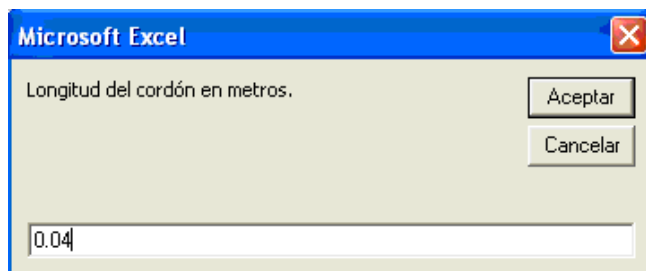
El siguiente diálogo (Figura A4.6) se refiere a las dimensiones de la junta, se proporcionan los valores siguientes:

- s: Espesor de la plancha (mm).
- b: ancho del cordón (mm).
- h: sobreespesor del cordón (mm).
- f: espesor del cordón (mm).
- a: separación entre planchas (mm).
- $\alpha$ : ángulo del cordón ( $^{\circ}$ ).





**Figura A4.6.** Parámetros geométricos de la unión.



**Figura A4.7.** Longitud del cordón.

En la figura A4.7 se muestra la otra ventana de diálogo, donde se proporciona la longitud del cordón expresada en metros.

Los resultados que se obtienen en esta hoja de cálculo son <sup>(8)</sup>:

- Intensidad de la corriente (A).
- Tensión eléctrica (V).
- Número de cordones.
- Velocidad de soldadura (m/h, cm/min y mm/min).
- Número de electrodos.
- Tiempo específico (h/m, min/m y seg/m).
- Tiempo total de trabajo (h, min y seg <sup>(9)</sup>).

En la figura A4.8 está la hoja de cálculo Calor, donde se calculan parámetros térmicos de la unión en cuestión. Como primer dato debe proporcionarse la efectividad térmica del ciclo de soldeo empleado. Luego el programa genera una matriz con los posibles valores que alcanza el calor añadido (HI, por sus siglas en inglés: Heat Input, expresado en kJ/mm) a la unión mediante la soldadura. Para crear esta matriz se tienen en cuenta los valores mínimo, medio y máximo de los factores que influyen sobre el calor añadido.

Otros datos necesarios son:

- Conductividad térmica del material con el que se construye la unión (W/cm°C).
- Calor específico del material con el que se construye la junta (J/g°C).

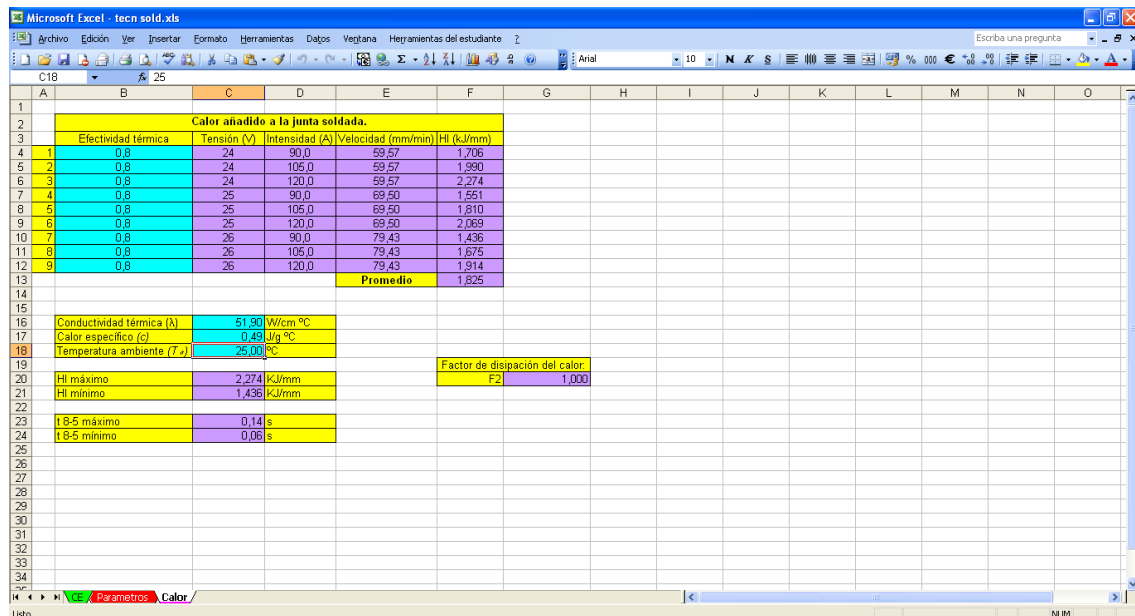
---

<sup>8</sup>En todos los resultados obtenidos, excepto el número de cordones y el de electrodos, se obtiene un valor mínimo, otro medio y otro máximo.

<sup>9</sup>La unidad de tiempo segundo, tiene como siglas "seg" para diferenciarla del espesor de las planchas.

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
 www.uho.edu.cu

- Temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ). En caso de que se precaliente la unión, este valor corresponde al de la temperatura de precalentamiento.



Calor añadido a la junta soldada.					
	Efectividad térmica	Tensión (V)	Intensidad (A)	Velocidad (mm/min)	HI (kJ/mm)
1	0.8	24	90.0	59.57	1.706
2	0.8	24	105.0	59.57	1.990
3	0.8	24	120.0	59.57	2.274
4	0.8	25	90.0	69.50	1.551
5	0.8	25	105.0	69.50	1.810
6	0.8	25	120.0	69.50	2.069
7	0.8	26	90.0	79.43	1.436
8	0.8	26	105.0	79.43	1.675
9	0.8	26	120.0	79.43	1.914
Promedio					1.825

Conductividad térmica (K)	51.90	W/cm $^{\circ}\text{C}$
Calor específico (C)	0.49	J/g $^{\circ}\text{C}$
Temperatura ambiente (T <sub>a</sub> )	25.00	$^{\circ}\text{C}$

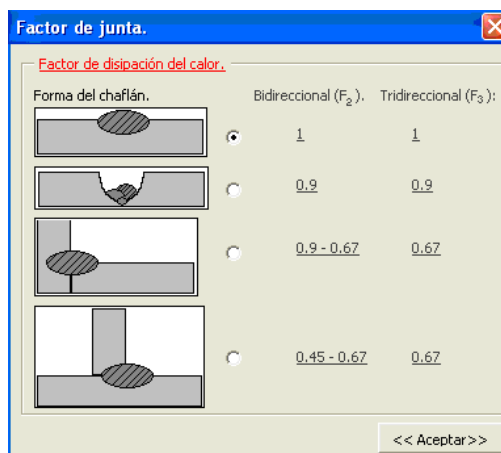
HI máximo	2.274	kJ/mm
HI mínimo	1.436	kJ/mm
tB-5 máximo	0.14	s
tB-5 mínimo	0.06	s

Factor de disipación del calor:	F2	1.000
---------------------------------	----	-------

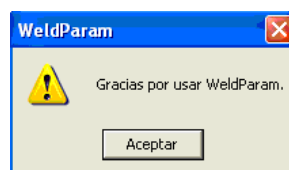
**Figura A4.8.** Hoja de cálculo Calor.

El programa además determina los valores máximo, mínimo y promedio del calor añadido y los  $t_5^8$  igual máximo y mínimo. Para esto último solicita la forma de junta (Figura A4.9), para determinar el factor de disipación del calor.



Forma del chaflán.	Bidireccional (F <sub>2</sub> )	Tridireccional (F <sub>3</sub> )
	1	1
	0.9	0.9
	0.9 - 0.67	0.67
	0.45 - 0.67	0.67

**Figura A4.9.** Ventana Factor de junta.



**Figura A4.5.** Salida de *WeldParam*.

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
[www.uho.edu.cu](http://www.uho.edu.cu)

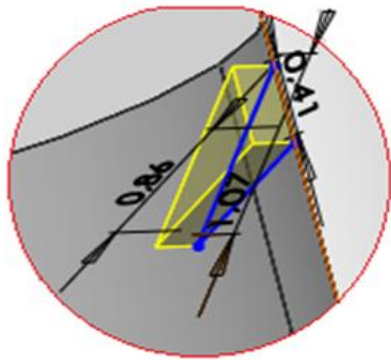
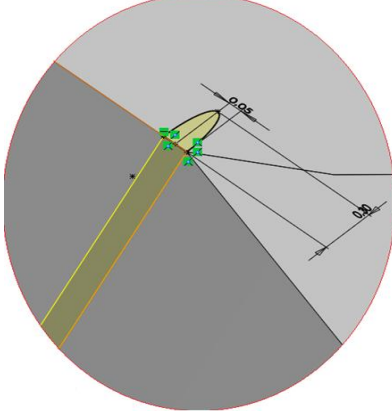
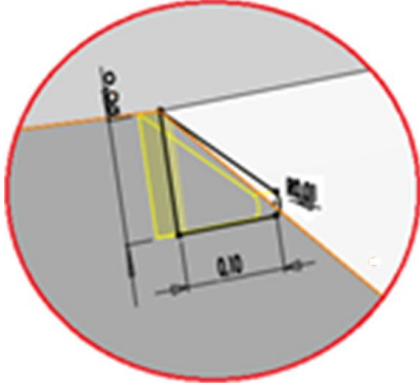
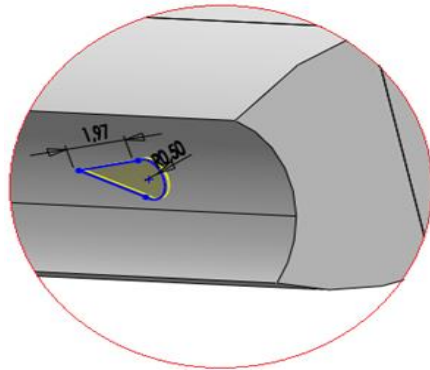
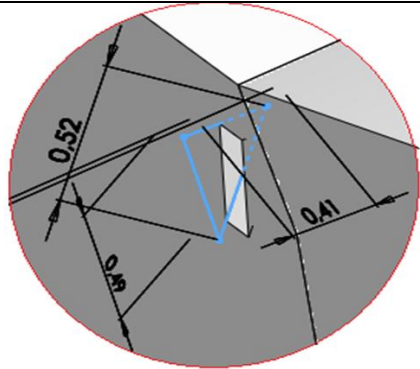
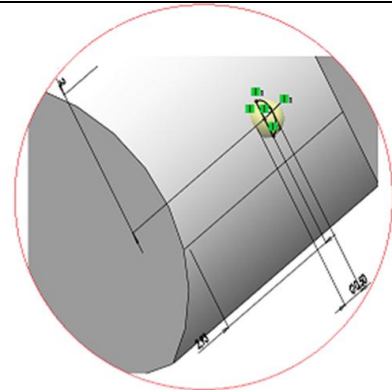
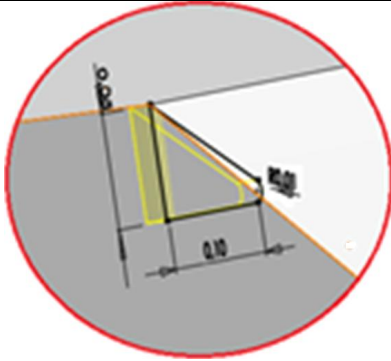
### Anexo 5. Máquina de ensayos MTS810



### Anexo 6. Frasco de líquidos penetrantes TURCO Dy-Chek



**Anexo 7. Dimensiones de los defectos modelados.**

Tipo	Dimensiones (mm)	Tipo	Dimensiones (mm)
I		V	
II		VI	
III		VII	
IV			

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380 [www.uho.edu.cu](http://www.uho.edu.cu)

### Anexo 8. Análisis estadístico de los resultados del ensayo a fatiga.

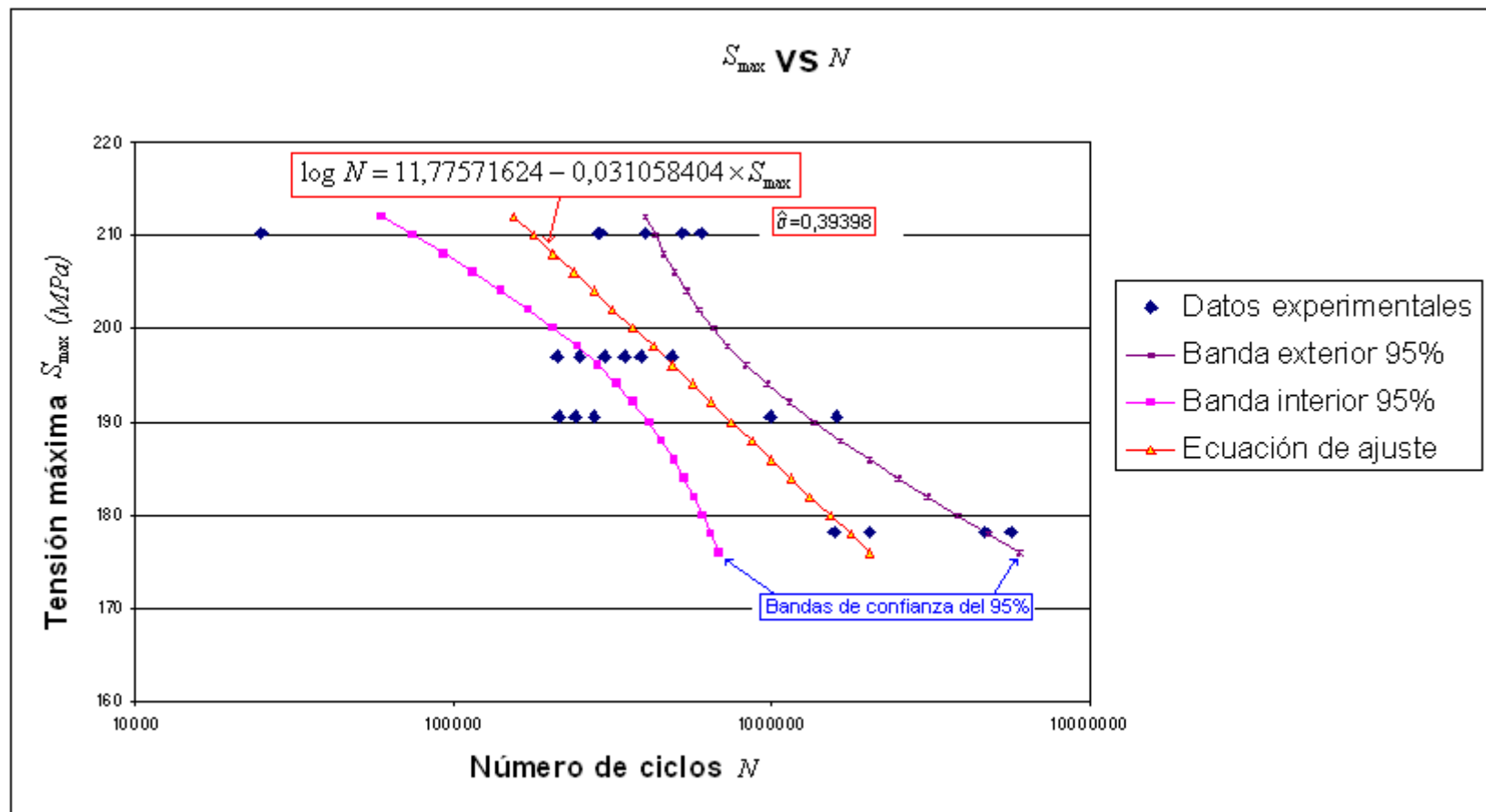
Probeta	$x = S_{\max}$	$X_i - X_{med}$	$(X_i - X_{med})^2$	Ciclos $N$	$Y_i = \log N$	$y_i - Y_{med}$	$(X_i - X_{med})(Y_i - Y_{med})$	$\hat{Y}_i$	$(Y_i - \hat{Y}_i)^2$
1	210,15625	14,54613095	211,589926	290047	5,46246838	-0,2379098	-3,460667083	5,24859857	0,045740296
2	210,15625	14,54613095	211,589926	24624	4,3913586	-1,30901957	-19,04117014	5,24859857	0,734860358
3	210,15625	14,54613095	211,589926	602953	5,78028346	0,07990528	1,162312725	5,24859857	0,282688825
4	210,15625	14,54613095	211,589926	523170	5,71864283	0,01826466	0,265680079	5,24859857	0,220941611
5	210,15625	14,54613095	211,589926	399580	5,60160374	-0,09877443	-1,436785848	5,24859857	0,124612653
6	178,125	-17,48511905	305,729388	4671010	6,6694108	0,96903262	-16,94365073	6,24343806	0,18145277
7	178,125	-17,48511905	305,729388	2045073	6,31070881	0,61033064	-10,67170388	6,24343806	0,004525354
8	178,125	-17,48511905	305,729388	1575206	6,19733736	0,49695918	-8,689390443	6,24343806	0,002125275
9	196,875	1,264880952	1,59992382	345930	5,53898823	-0,16138995	-0,204139073	5,66109299	0,014909574
10	196,875	1,264880952	1,59992382	298920	5,47555497	-0,2248232	-0,284374587	5,66109299	0,034424357
11	196,875	1,264880952	1,59992382	210595	5,32344806	-0,37693012	-0,47677173	5,66109299	0,114004104
12	196,875	1,264880952	1,59992382	485503	5,68619192	-0,01418626	-0,017943928	5,66109299	0,000629956
13	196,875	1,264880952	1,59992382	389095	5,59005565	-0,11032253	-0,139544862	5,66109299	0,005046304
14	178,125	-17,48511905	305,729388	5644514	6,75162655	1,05124838	-18,38120304	6,24343806	0,258255542
15	210,15625	14,54613095	211,589926	284893	5,45468178	-0,2456964	-3,573931977	5,24859857	0,04247029
16	196,875	1,264880952	1,59992382	248862	5,39595859	-0,30441959	-0,38505454	5,66109299	0,070296253
17	190,625	-4,985119048	24,8514119	240303	5,38075919	-0,31961898	1,593338683	5,85520802	0,225101686
18	190,625	-4,985119048	24,8514119	994490	5,99760042	0,29722224	-1,481688271	5,85520802	0,020275597
19	190,625	-4,985119048	24,8514119	214885	5,3322061	-0,36817208	1,835381627	5,85520802	0,273531004
20	190,625	-4,985119048	24,8514119	1607851	6,2062458	0,50586762	-2,521810327	5,85520802	0,123227525
21	190,625	-4,985119048	24,8514119	277211	5,44281046	-0,25756772	1,284005731	5,85520802	0,170071745
Valor medio	195,610119				5,70037818				
Sumatoria			2626,31371				-81,56911162		2,949191078
Estimadores	$\hat{A}$	11,77571624					Varianza $\hat{\sigma}^2$	0,155220583	
	$\hat{B}$	-0,031058404					Varianza $\hat{\sigma}$	0,393980435	

Intervalos de confianza (95%)				
$\hat{A} +$	14,92832793		$\hat{B} +$	-0,01496787
$\hat{A} -$	8,623104537		$\hat{B} -$	-0,04714894

Bandas de confianza				
$S_{\max}$	$\log N_{\text{mayor}}$	$\log N_{\text{menor}}$	$N_{\text{mayor}}$	$N_{\text{menor}}$
176	6,780413285	5,83846106	6031332,695	689383,776
178	6,682541349	5,81209938	4814390,891	648782,878
180	6,585825843	5,78458127	3853238,074	608949,489
182	6,490593527	5,75557997	3094521,664	569613,103
184	6,397282821	5,72465706	2496219,785	530465,4
186	6,306478846	5,69122742	2025250,957	491165,012
188	6,21894708	5,65452557	1655568,216	451362,602
190	6,135645083	5,61359395	1366611,539	410765,495
192	6,057671808	5,56733361	1142015	369261,147
194	5,986105084	5,51466672	968512,173	327089,591
196	5,921724194	5,454814	835072,5221	284979,749
198	5,864733801	5,38757078	732375,4895	244101,684
200	5,814680846	5,31339012	652650,7566	205773,818
202	5,770632582	5,23320477	589701,9744	171082,176
204	5,731475202	5,14812853	538859,0764	140646,371
206	5,696152656	5,05921746	496766,9062	114608,667
208	5,663780817	4,96735568	461084,8124	92758,9203
210	5,633667799	4,87323509	430197,4174	74685,2928
212	5,605290029	4,77737924	402986,0652	59893,4379

$t_p$	2,093
$1/k$	0,04761905
$F_p$	3,6823
$\sqrt{2F_p} \hat{\sigma}$	1,06917609

Ecuación de ajuste	
$\log N$	$N$
6,309437172	2039093,65
6,247320364	1767341,05
6,185203557	1531805,26
6,123086749	1327659,63
6,060969942	1150720,74
5,998853134	997362,727
5,936736326	864442,93
5,874619519	749237,522
5,812502711	649385,686
5,750385904	562841,23
5,688269096	487830,665
5,626152289	422816,852
5,564035481	366467,513
5,501918674	317627,922
5,439801866	275297,246
5,377685059	238608,032
5,315568251	206808,436
5,253451443	179246,813
5,191334636	155358,363



**Figura A8.1.** Ajuste entre el número de ciclos  $N$  y la tensión  $S_{\max}$ .

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380 [www.uho.edu.cu](http://www.uho.edu.cu)

### Anexo 8.1. Prueba de linealidad.

Prueba de linealidad	
$k - l$	17
$l - 2$	2

$\hat{A}$	11,77571624
$\hat{B}$	-0,031058404

1 nivel	
$X$	$Y$
210,2	290047
210,2	24624
210,2	602953
210,2	523170
210,2	399580
210,2	284893

2 nivel	
$X$	$Y$
178,1	4671010
178,1	2045073
178,1	1575206
178,1	5644514

3 nivel	
$X$	$Y$
196,9	345930
196,9	298920
196,9	210595
196,9	485503
196,9	389095
196,9	248862

4 nivel	
$X$	$Y$
190,625	240303
190,625	994490
190,625	214885
190,625	1607851
190,625	277211

Valor medio

354211,1667

3483950,75

329817,5

666948



Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380 [www.uho.edu.cu](http://www.uho.edu.cu)

Estimado	$Y$	$\log Y$	$Y$	$\log Y$	$Y$	$\log Y$	$Y$	$\log Y$
	5,24859857	177255,0299	6,243438064	1751612,613	5,66109299	458239,996	5,85520802	716486,5078

Nivel	$m_i$	$\hat{Y}_i$	$\bar{Y}_i$	$m_i(\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2$
1	6	5,248598568	5,549262248	0,542391893
2	4	6,243438064	6,542072007	0,356728928
3	6	5,661092993	5,518273695	0,122384111
4	5	5,855208017	5,824091975	0,00484104
Sumatoria				1,026345972
				0,513172986

1 nivel $(Y_{ij} - \bar{Y})^2$	
5,46246838	0,00753318
4,3913586	1,34074085
5,78028346	0,0533708
5,71864283	0,02868978
5,60160374	0,00273963
5,45468178	0,00894547
Sumatoria	1,44201971

2 nivel $(Y_{ij} - \bar{Y})^2$	
6,6694108	0,016215167
6,31070881	0,053528927
6,19733736	0,118841979
6,75162655	0,043913108

0,232499181

3 nivel $(Y_{ij} - \bar{Y})^2$	
5,53898823	0,00042909
5,47555497	0,00182489
5,32344806	0,03795703
5,68619192	0,02819653
5,59005565	0,00515265
5,39595859	0,01496099
	0,08852118

4 nivel $(Y_{ij} - \bar{Y})^2$	
5,38075919	0,19654396
5,99760042	0,03010518
5,3322061	0,24195171
6,2062458	0,14604155
5,44281046	0,14537559

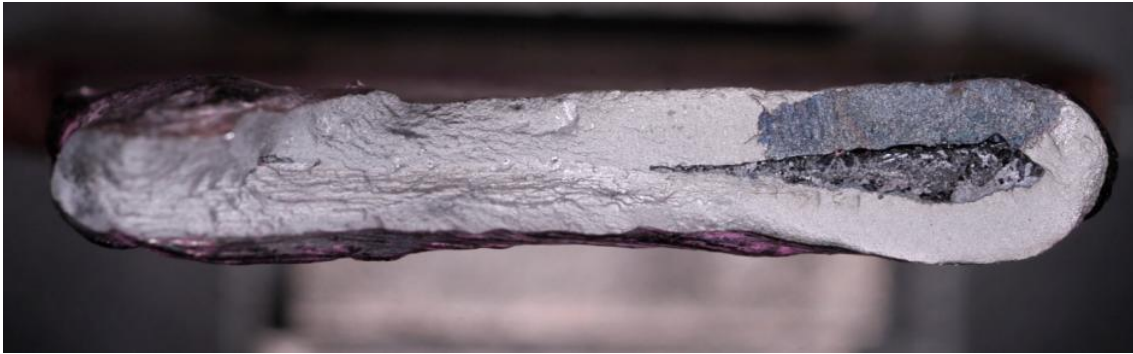
0,76001799

Suma	2,523058055
Suma/ $(k - l)$	0,14841518
$F$	3,4577
$F_p$	3,6823
Aceptar prueba de linealidad	

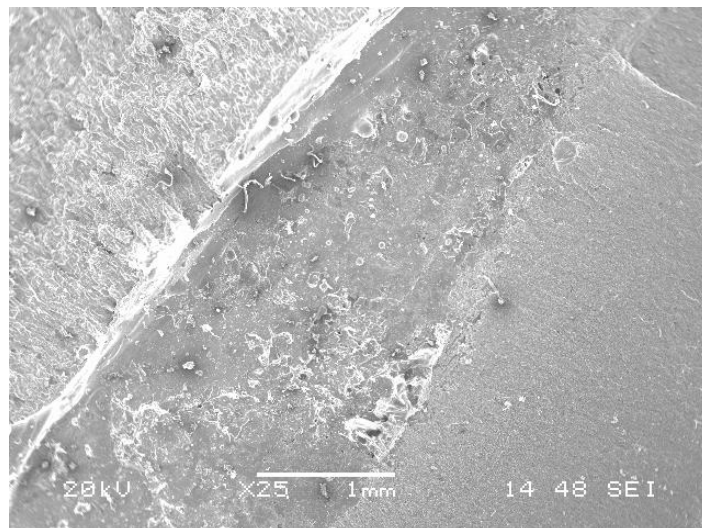
### **Anexo 9. Análisis fractográfico.**

Las probetas seleccionadas son: 2, 4, 5, 7, 10, 20, 21.

Probeta 2: El análisis de esta probeta mostró que había una zona donde faltó fusión entre el material base y el material de aportación. Esto provocó que la sección transversal en la zona del cordón se encontrara debilitada y el fallo de la probeta se produce precisamente en la ZF y es de todas la que resistió el menor número de ciclos, solo 24624. El fallo común de las probetas soldadas se produce en la ZAT, sin embargo en este caso no ocurrió esto por la causa mencionada. Como se aprecia en las figuras A8.1 y A8.2 la grieta se va desarrollando a partir del defecto provocado por la falta de fusión.



**Figura A8.1** Observación mediante MO de la zona de rotura por fatiga de la probeta 2.



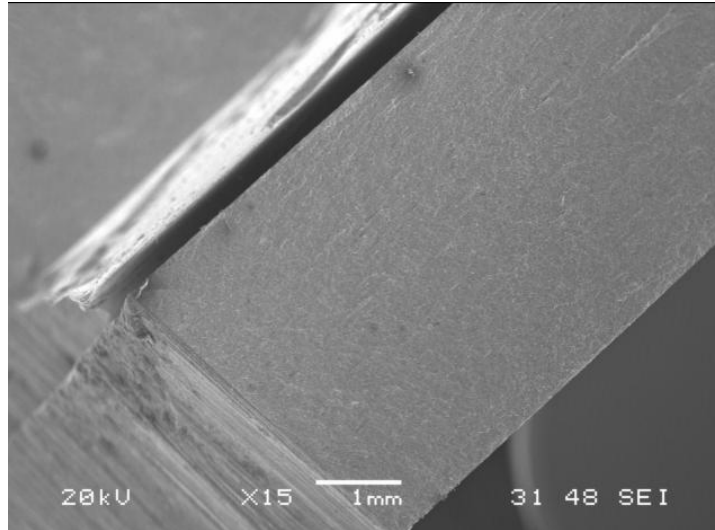
**Figura A8.2.** Observación mediante SEM de la zona de rotura por fatiga de la probeta 2, específicamente de la zona con falta de fusión.

Probeta 4: En esta probeta el fallo ocurre en el MB, iniciándose la grieta en un defecto de la superficie de la probeta en el cambio de sección del radio  $r=5\text{ mm}$  como se observa en la figura A8.3 donde el punto de inicio aparece señalado mediante una flecha roja. La grieta se desarrolla a partir de este punto, propagándose de forma semielíptica con el eje mayor orientado hacia el ancho de la probeta y el menor hacia el espesor. En la parte derecha de la probeta se aprecia la zona de rotura dúctil, donde se va propagando la grieta, hasta que se produce la sobrecarga estática y con ella la rotura final de la probeta solicitada a tracción. La parte izquierda de la figura A8.3 muestra la reducción del área en la zona de rotura frágil.



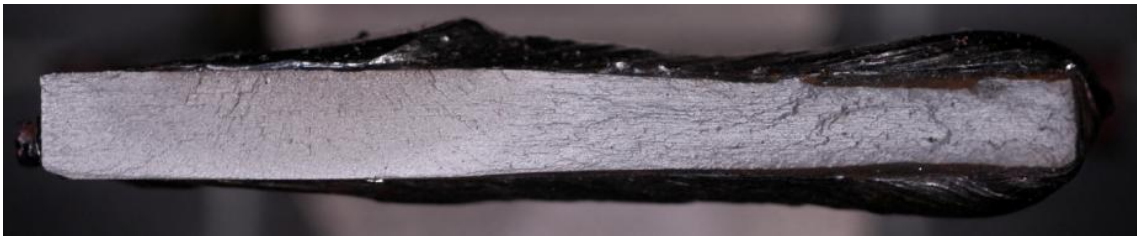
**Figura A8.3.** Observación mediante MO de la zona de rotura por fatiga de la probeta 4.

En la siguiente figura se observa el punto de inicio de la grieta, en un defecto provocado en el mecanizado de la probeta, de dimensiones iniciales del defecto aproximadas de 0,28125 mm en su lado mayor, por 0,09375 mm en el lado menor. En esta misma imagen se aprecia la presencia de una inclusión en el MB.



**Figura A8.4.** Observación mediante SEM del defecto donde se inicia la grieta de rotura por fatiga de la probeta 4.

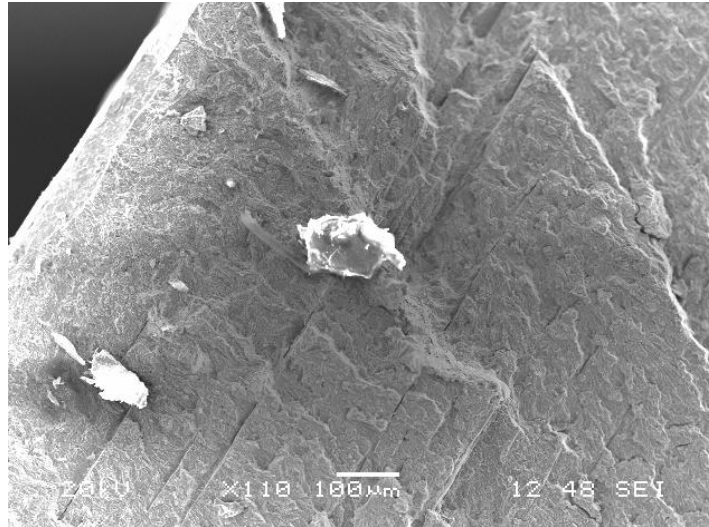
Probeta 5: Esta probeta falló en la ZAT, pero también desarrolló una grieta en el MB que no alcanzó valores que provocarían la rotura de la probeta en esta área.



**Figura A8.5.** Observación mediante MO de la zona de rotura por fatiga de la probeta 5.

En la figura anterior se observa la grieta de fatiga, en la que el punto de inicio ocurrió en un defecto del cambio de sección entre el cordón y la ZAT. La grieta creció siguiendo un frente con forma elíptica. También es posible apreciar la reducción del área en la zona de rotura final, así como la textura de la superficie que indica una rotura frágil.

En la siguiente figura (A8.6) se muestra una imagen obtenida mediante SEM de la zona del punto de inicio de la grieta. En la misma se observan algunas inclusiones no metálicas (puntos brillantes), así como diferencias en superficies a diferente nivel que se corresponden con los planos de deslizamiento.



**Figura A8.6.** Observación mediante SEM del defecto donde se inicia la grieta de rotura por fatiga de la probeta 5.

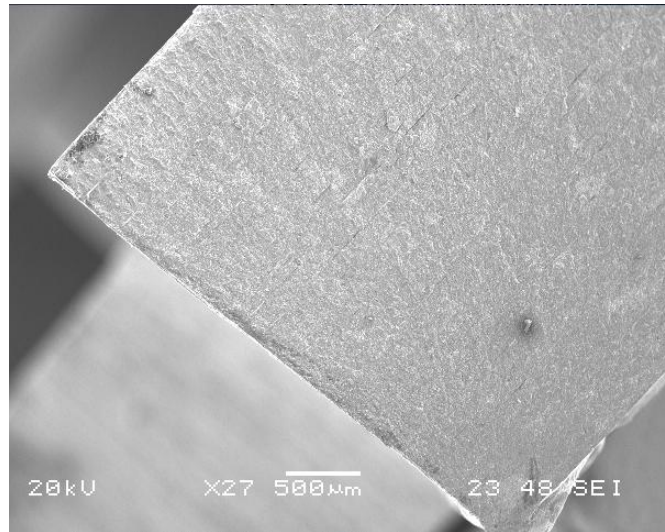
Probeta 7: La probeta falló al final de la ZAT. La grieta comenzó a desarrollarse en una gota de metal fundido. El punto de inicio está señalado con una flecha roja en la figura A8.7 Igual que en imágenes anteriores se observa la zona de crecimiento de la grieta y bien diferenciada por la textura y por la extricción que ocurre la zona donde se produce el fallo por sobrecarga estática a tracción.



**Figura A8.7.** Observación mediante MO de la zona de rotura por fatiga de la probeta 7.

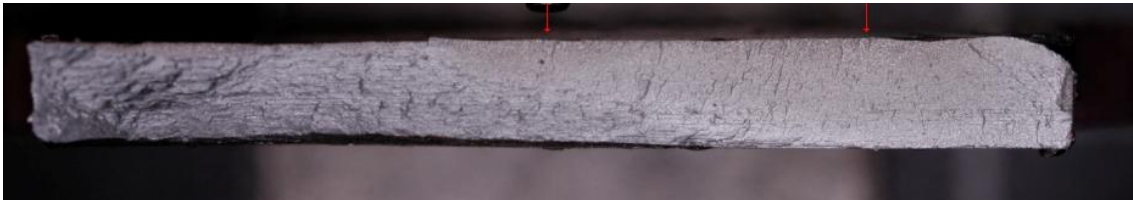
La zona donde se encuentra el punto de inicio de la grieta, observada mediante SEM se muestra en la figura que aparece a continuación de este párrafo. La grieta comienza a crecer a partir de un punto donde había quedado una pequeña gota de metal de aportación, la que al caer en este lugar y solidificarse provocó una discontinuidad geométrica que fue suficiente para generar la grieta de fatiga que se desarrolló luego al ser aplicada las cargas variables en el tiempo.





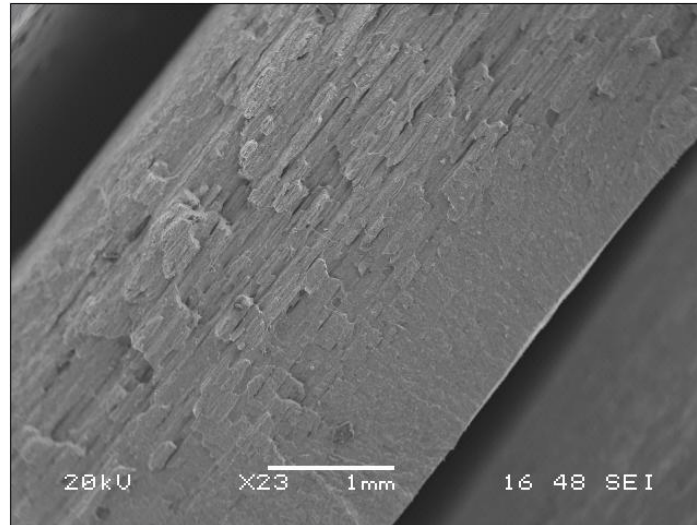
**Figura A8.9.** Observación mediante SEM del defecto donde se inicia la grieta de rotura por fatiga de la probeta 7.

Probeta 9: La probeta falla en la ZAT. Se observa coalescencia entre dos grietas de diferente tamaño que empezaron en planos distintos, con aproximadamente medio milímetro de diferencia entre ellos. Los puntos de inicio de las grietas se ubican prácticamente en la línea de fusión y se señalan con flechas rojas en la siguiente figura.

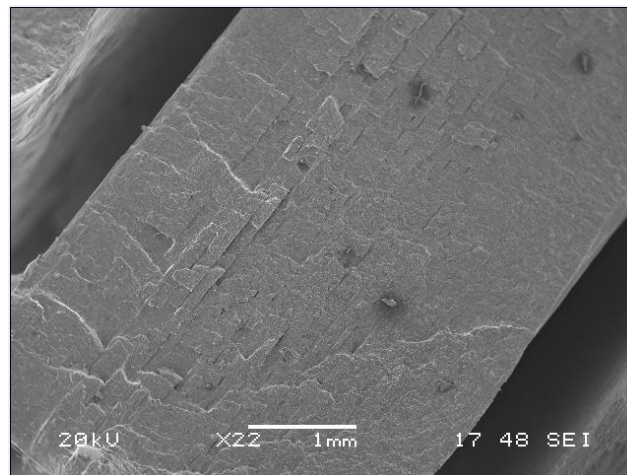


**Figura A8.10.** Observación mediante MO de la zona de rotura por fatiga de la probeta 9.

Las figuras A8.11 y A8.12 muestran las observaciones mediante SEM de los puntos de inicio de las dos grietas que fueron la causa de la rotura de la probeta 9.



**Figura A8.11.** Observación mediante SEM del defecto donde se inicia la grieta menor de rotura por fatiga de la probeta 9.



**Figura A8.12.** Observación mediante SEM del defecto donde se inicia la grieta mayor de rotura por fatiga de la probeta 9.

Probeta 10: En este caso el fallo se produce en la ZAT. La próxima figura muestra la sección donde se produce el fallo. En ella se aprecia claramente la forma final de la grieta, que se inicia en un defecto presente entre la ZAT y la línea de fusión y con la aplicación de la carga cíclica va creciendo con un frente de grieta elipsoidal, hasta que se produce la rotura por la sobrecarga estática. En la zona de rotura frágil se aprecia claramente la diferencia en la textura de la superficie debido a la rotura por la sobrecarga estática, así como la extricción que se produce en el fallo por tracción. También se desarrolló una grieta en el

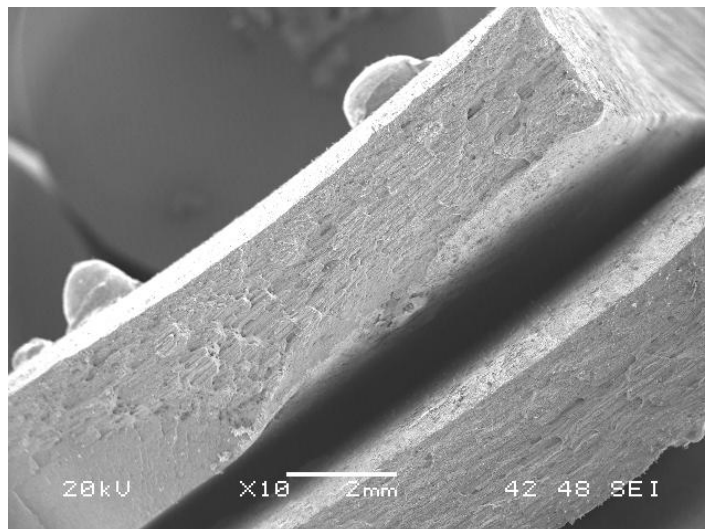
Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380  
www.uho.edu.cu

material base, que no se muestra debido a que era de pequeñas dimensiones y no fue la causante de la falla de la probeta.



**Figura A8.13.** Observación mediante MO de la zona de rotura por fatiga de la probeta 10.

La imagen superior de la próxima figura muestra la observación haciendo uso de SEM de la zona de rotura frágil y de parte de la grieta de la misma probeta. Se aprecia la textura fibrosa en la rotura frágil, mientras que en la grieta es posible observar el frente de grieta, la textura de la superficie que aparece más pulida y los planos donde ocurre el deslizamiento.



**Figura A8.14.** Observación mediante SEM de la grieta de fatiga y de la zona de rotura frágil de la probeta 10.

Probeta 17: Se produce el fallo que tiene como particularidad en esta probeta el crecimiento de 3 grietas. Una de ellas más pequeña y se aprecia en la parte izquierda de la imagen de la figura A8.15. Las dos restantes presentan coalescencia; comienzan a desarrollarse en defectos que tienen lugar en la

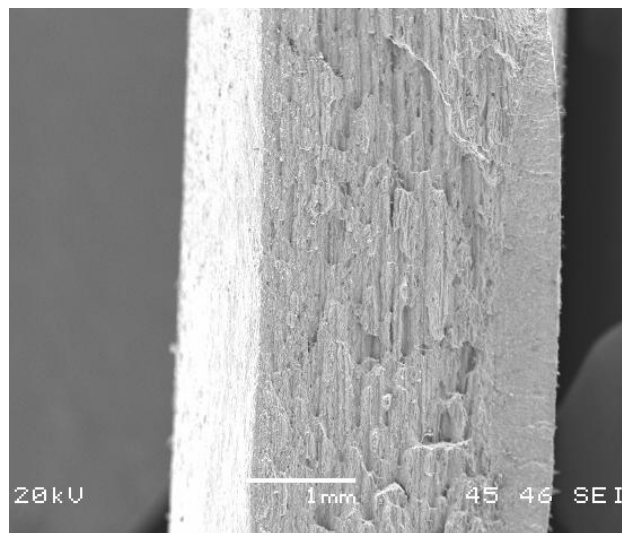


superficie de la probeta y crecen de forma independiente hasta que se encuentran y siguen creciendo con un frente común.

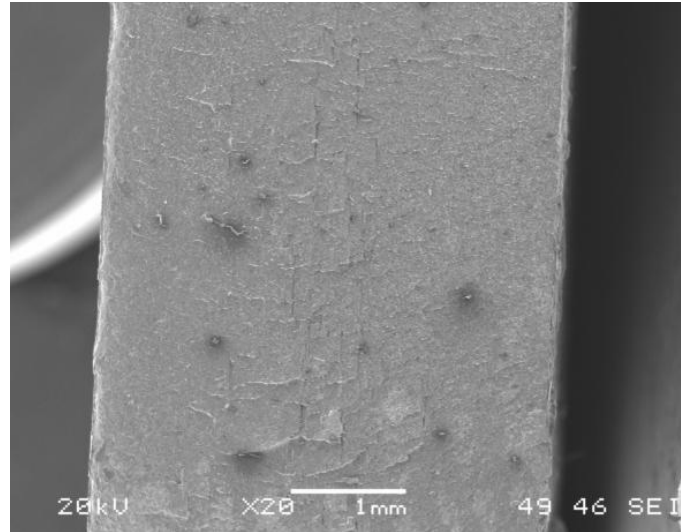


**Figura A8.15.** Observación mediante MO de la zona de rotura por fatiga de la probeta 17.

De las observaciones realizadas mediante SEM se muestran en las figuras A8.16 y A8.17 la grieta más pequeña y la zona donde se desarrolló la grieta mayor, respectivamente. En la primera de ellas se ve el frente de grieta y también parte de la zona de rotura frágil, típica de la rotura por fatiga cuando ocurre el fallo por la sobrecarga estática; mientras que en la segunda se ve la zona donde comenzó el desarrollo de la grieta y la textura de la superficie. Obsérvese la diferencia de la textura entre esta y la zona de rotura frágil mencionada antes. Se diferencian bien las dos zonas fundamentales que caracterizan el fallo producido por las cargas cíclicas.



**Figura A8.16.** Observación mediante SEM de la grieta pequeña en la probeta 17 (19X).

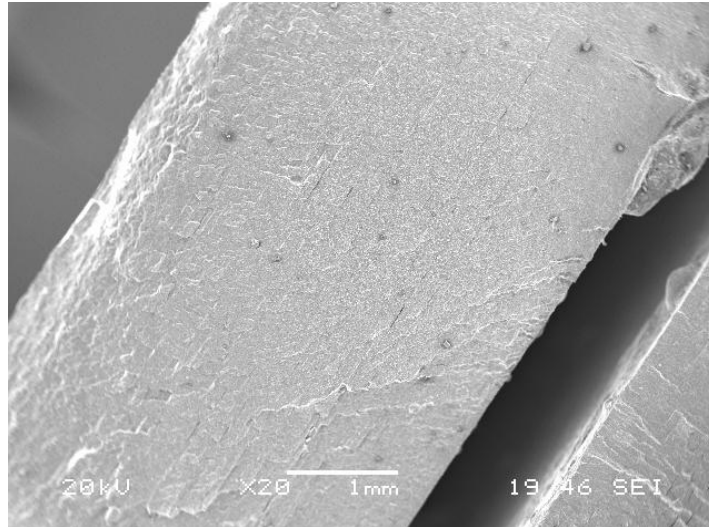


**Figura A8.17.** Observación mediante SEM de la zona de inicio de la grieta mayor en la probeta 17.

Probeta 20: La probeta falla en la ZAT. La grieta se origina en el detalle señalado en la figura 2.7 d que fue identificado mediante los líquidos penetrantes. A partir de este punto se comenzó a desarrollar la grieta que fue creciendo mediante el conocido frente semielíptico hasta alcanzar el tamaño de grieta que provoca el fallo de la probeta. Una observación mediante microscopía electrónica de barrido de la zona donde se encuentra este defecto la vemos en la figura A8.19. En ella se aprecia el defecto, que tiene una forma inicial alargada con una longitud de estimada de 0,6923 mm y un ancho aproximado de 0,0385 mm.

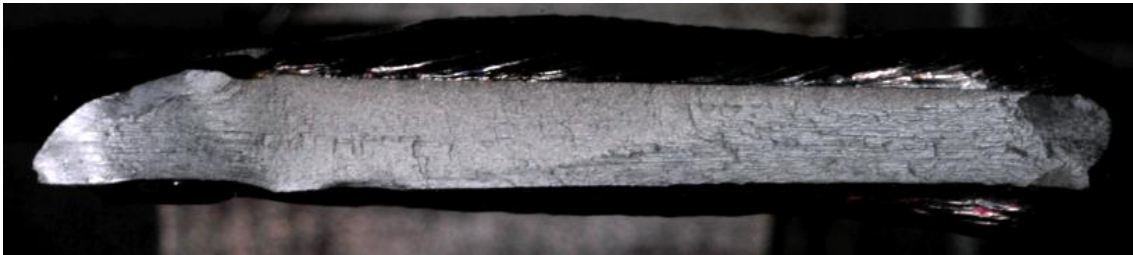


**Figura A8.18.** Observación mediante MO de la zona de rotura por fatiga de la probeta 20.



**Figura A8.19.** Observación mediante SEM de la zona de inicio de la grieta en la probeta 20.

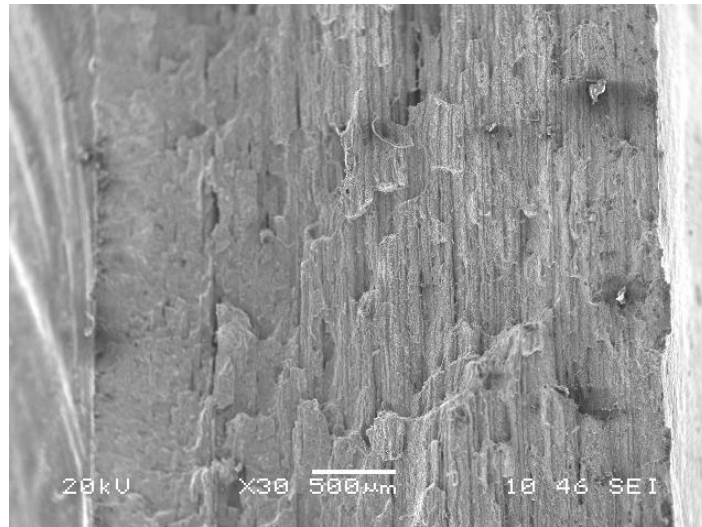
Probeta 21: El fallo ocurre entre la ZAT y la línea de fusión. La grieta mayor comienza a crecer a partir del detalle identificado como 2 en la figura A8.20. Esta grieta presentó coalescencia con otra más pequeña que comenzó en el detalle 1 de la misma figura. También creció otra grieta que se originó en un poro en la zona fundida.



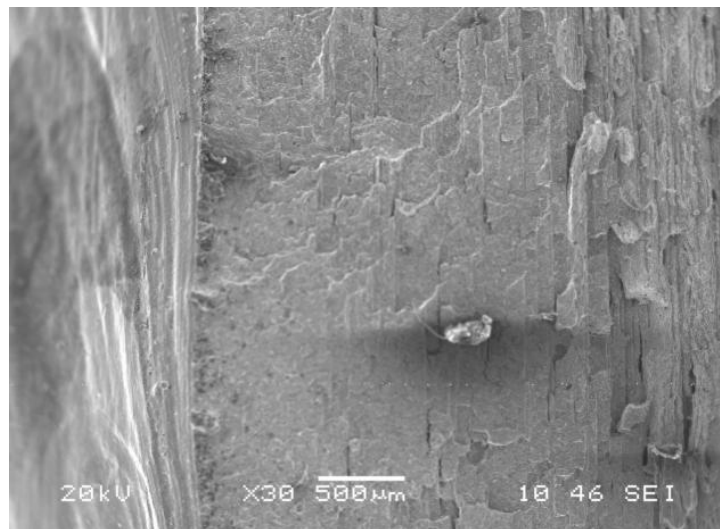
**Figura A8.20.** Observación mediante MO de la zona de rotura por fatiga de la probeta 21.



**Figura A8.22.** Observación mediante MO de la grieta desarrollada en la zona fundida de la probeta 21.



**Figura A8.23.** Observación mediante SEM de la zona donde se origina la grieta pequeña en la probeta 21.



**Figura A8.24.** Observación mediante SEM de la zona donde creció una grieta en la zona fundida en la probeta 21.

De forma general es posible decir que en todas las probetas que se produjo el fallo ante la acción de las cargas cíclicas ocurrió una grieta que se inició en un defecto y fue creciendo con un frente semielíptico hasta que se rompía la probeta ensayada. Se apreciaba claramente la zona donde se desarrollaba la grieta y la zona de rotura frágil, donde tenía lugar una extricción debida a la sobrecarga estática.