

**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA DE  
LA ALEACIÓN DE ALUMINIO NOMINACIÓN AISI -SAE 6061-T6 SOMETIDA  
A UN PROCESO DE SOLDADURA GMAW (MIG)**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA.**

**PRESENTA:**

***ING. JULIO CESAR VERDUZCO JUÁREZ***

**ASESORES:**

***DR. GONZALO MARIANO DOMINGUEZ ALMARAZ.***

***DOCTOR EN ENERGÉTICA***

***DR. ERASMO CADENAS CALDERON.***

***DOCTOR EN CIENCIAS***

**MORELIA, MICH. OCTUBRE DEL 2013**



## AGRADECIMIENTOS.

*A DIOS, porque gracias a él estoy hoy aquí.*

*A mis padres José Abel Verduzco Guillen y María del Rosario Juárez Landín, por todo el apoyo, comprensión y motivación que me han brindado a lo largo de mis estudios.*

*A mis hermanos José Abel, Erick y Ulises, porque siempre estuvieron presentes en los momentos que más los necesite.*

*A mi sobrino Mateo, porque me dio una alegría más cuando llegó a mi vida.*

*A mi prometida y futura esposa Cinthia Cortes Sánchez, por la paciencia y motivación que me brindó durante toda esta investigación.*

*A mi asesor Dr. Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, porque en él he encontrado todo el apoyo, formación y consejos, por la confianza que ha depositado en mí tanto en los buenos como en los malos momentos, por su paciencia y por compartirme sus conocimientos, gracias.*

*Al M.C. Renato Gonzales Bernal y al Ing. Juan Jesús Villalón López, por todo el apoyo recibido durante estos dos largos años, gracias.*

*Por último y no menos importante a mis amigos que siempre me brindaron su amistad.*

## RESUMEN.

Se llevaron a cabo ensayos de fatiga en flexión rotativa en especímenes soldados (proceso GMAW “Gas Metal Arc Welding”) y no soldados en aleación de aluminio 6061-T6. Los ensayos experimentales permitieron determinar una importante reducción en la resistencia a la fatiga en especímenes soldados en comparación con los especímenes no soldados. Adicionalmente, la iniciación de fractura fue localizada frecuentemente en la zona parcial de fusión (ZPF), donde la modificación cristalográfica tuvo lugar, inducida por el calor de la soldadura para el alto y medio régimen de carga. Las Propiedades mecánicas tales como dureza, ductilidad y crecimiento de grieta fueron modificadas en la zona de fusión (ZF) y la zona afectada térmicamente (ZAT) en comparación con la zona no afectada térmicamente (ZNA). Se han observado superficies de fractura para identificar la iniciación de grietas en especímenes soldados y no soldados; estos resultados fueron analizados en conjunto con resultados de resistencia a la fatiga con la finalidad de enlistar conclusiones del presente trabajo.

## ABSTRACT.

Rotating bending fatigue tests are carried out on welded (process GMAW “Gas Metal Arc Welding”) and non-welded specimens of aluminum alloy 6061-T6. Experimental testing let to determine an important reduction on fatigue endurance of the GMAW welded specimens, in regard the non-welded specimens. Furthermore, crack initiation is localized frequently at the partial melting zone (PMZ), where crystallographic modification take place induced by heat welding, for the high and middle loading regime. Mechanical properties such as hardness, ductility and crack growth are modified in the fusion zone (FZ) and the heat affected zone (HAZ) in regard the non-affected zone (NAZ). Fracture surfaces have been observed to identify the crack initiation in welded and non-welded specimens; these results are analyzed together with the fatigue endurance results in order to list the conclusions of this work.

## ÍNDICE GENERAL.

RESUMEN. ....	3
ABSTRACT.....	4
ÍNDICE GENERAL.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS. ....	8
ÍNDICE DE TABLAS. ....	10
GLOSARIO.....	11
INTRODUCCION.....	13
ANTECEDENTES. ....	15
ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	15
ANTECEDENTES QUE PRECEDEN ESTA INVESTIGACIÓN. ....	20
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ....	22
OBJETIVO GENERAL.....	23
OBJETIVOS PARTICULARES. ....	23
JUSTIFICACIÓN. ....	24
HIPÓTESIS.....	25
METODOLOGÍA.....	26
CAPITULO 1.- MARCO CONCEPTUAL.....	27
1.1.- FATIGA MECÁNICA.....	27
1.2.- ETAPAS DE FALLA POR FATIGA.....	28
1.3.- SUPERFICIES DE FRACTURA EN LA FATIGA.....	30
1.4.- ENSAYO DE FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA.....	32
1.5.- GRAFICAS S-N.....	33
1.6.- INTRODUCCIÓN A LA SOLDADURA. ....	34
1.7.- BREVE RECUENTO HISTÓRICO DE LA SOLDADURA.....	35
1.8.- PROCESOS DE SOLDADURA.....	41
1.8.1.- SOLDADURA DE ARCO.....	44
1.8.2.- SOLDADURA A GAS. ....	45
1.8.3.- SOLDADURA POR RESISTENCIA.....	46
1.8.4.- SOLDADURA FUERTE.....	47

1.8.5.- SOLDADURA POR FICCIÓN. ....	47
1.8.6.- SOLDADURA CON RAYO LÁSER. ....	48
CAPITULO 2.- PROCESO DE SOLDADURA PARA ALEACIONES DE ALUMINIO. ....	49
2.1.- INTRODUCCIÓN.....	49
2.2.- SOLDADURA CON ARCO METÁLICO Y GAS (GMAW). ....	50
2.3.- MODOS DE TRANSFERENCIA DEL METAL ENTRE EL ELECTRODO Y EL CORDÓN. ....	52
2.4.- GASES DE PROTECCIÓN.....	53
2.5.- MATERIALES DE APORTE.....	55
2.5.1.- MATERIALES DE APORTE PARA LAS ALEACIONES DE ALUMINIO.....	57
2.5.2.- ¿QUÉ METAL DE APORTE USAR? .....	58
2.5.3.- RESISTENCIA A LA CORROSIÓN. ....	60
CAPITULO 3.- FABRICACIÓN DE LA PROBETA PARA ENSAYOS DE FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA PARA UNA ALEACION SOLDADA DE ALUMINIO NOMINACIÓN AIS-SAE 6061 T6. ....	61
3.1.- ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL.....	61
3.2.- PROBETA PARA ENSAYOS DE FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA. ....	62
3.3.- PROCESO DE SOLDADURA EN EL LABORATORIO. ....	63
3.3.1.- OBTENCIÓN DEL MATERIAL. ....	63
3.3.2.- MAQUINADO DEL MATERIAL.....	65
3.3.3.- PROCESO DE SOLDADURA.....	68
3.4.- CORTE DEL MATERIAL SOLDADO. ....	75
3.5.- MAQUINADO DE LAS PROBETAS DE ENSAYO. ....	76
3.6.- APLICACIÓN DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS, NO DESTRUCTIVOS Y DE DUREZA EN LA SOLDADURA. ....	79
3.7 LÍQUIDOS PENETRANTES.....	80
3.8.- ENSAYO DE TENSIÓN.....	83
3.9.- ENSAYOS DE DUREZA VICKES.....	87
CAPITULO 4.- ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	89
4.1. ENSAYO DE FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA DE LAS PROBETAS SOLDADAS Y SIN SOLDAR. ..	89
CAPÍTULO 5.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS. ....	93
5.1.- FATIGA Y CRECIMIENTO DE FISURA. ....	93
5.1.1.- FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA DE PROBETAS SOLDADAS Y SIN SOLDAR. ....	93
5.1.2.- CRECIMIENTO DE FISURA EN TRES DIFERENTES ZONAS DE LA SOLDADURA. ....	94

5.2.- SUPERFICIES DE FRACTURA.....	95
5.3.- CONCLUSIONES.....	100
BIBLIOGRAFÍA.....	102
ANEXOS .....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura1. 1Etapas en el proceso de falla por fatiga. ....	29
Figura1. 2.- Superficies de fractura por fatiga.....	31
Figura1. 3.- Esquema del ensayo de fatiga con el espécimen de flexión rotativa. ....	32
Figura1. 4.- Ensayo de fatiga en flexión rotativa. ....	33
Figura1. 5.- Grafica S-N típica.....	34
Figura1. 6.- Soldadura por arco soplado (Metodo Zerener).....	37
Figura1. 7.- Soldadura por arco con electrodos metálicos. ....	38
Figura1. 8.- Soldadura por arco con atmosfera de gas (Método Alexander).....	39
Figura1. 9.- Electrodo metálico con recubrimiento en plena acción.....	39
Figura1. 10.- Soldadura atómica con atmosfera de $H_2$ (Metodo Langmuir).....	40
Figura1. 11.- Esquema de un sistema de soldadura bajo gas protector.....	40
Figura1. 12.- Clasificación general de los procesos de soldadura.....	43
Figura1. 13.- Carta maestra de los procesos de soldadura (AWS).....	44
Figura2. 1.- Imagen del proceso GMAW.....	51
Figura2. 2.- Transferencia por corto circuito. ....	52
Figura2. 3.- Transferencia por rociado.....	52
Figura2. 4.- Transferencia globular.....	53
Figura2. 5.- Transferencia por arco pulsado.....	53
Figura2. 6.- Formas de penetración del metal con los distintos gases de protección.....	55
Figura2. 7.- Micro alambres.....	56
Figura3. 1.- Dimensiones (mm) de la probeta para los ensayos de fatiga en flexión rotativa.....	63
Figura3. 2.- Dimensiones de la solera A de aluminio. ....	64
Figura3. 3.- Dimensiones de la solera B de aluminio. ....	64
Figura3. 4.- Material comprado con un proveedor.....	65
Figura3. 5.- Especificaciones del biselado de la solera A. ....	65
Figura3. 6.- Vista lateral del biselado de la solera A. ....	66
Figura3. 7.- Especificaciones del tipo de junta. ....	66
Figura3. 8.- Especificaciones del maquinado de la solera B.....	67
Figura3. 9.- Vista real del maquinado en la solera B. ....	67
Figura3. 10.- Metal de aporte ER5356.....	69
Figura3. 11.- Unión de las soleras A y B. ....	70
Figura3. 12.- Dimensiones (mm) del brazo sujetador de la pistola.....	70
Figura3. 13.- Vista del montaje del brazo sujetador en el torno.....	71
Figura3. 14.- Fusión nula del material de aporte en la raíz. ....	72
Figura3. 15.- Penetración nula del material de aporte en la raíz.....	72

Figura3. 16.- Alúmina dentro del cordón de soldadura.....	73
Figura3. 17.- Penetración a) y fusión b) adecuados del metal de aporte y el metal base. ....	74
Figura3. 18.- Soldadura adecuada en las distintas placas.....	75
Figura3. 19.- Dimensiones de la probeta rectangular soldada.....	75
Figura3. 20.- Corte de la probeta rectangular.....	76
Figura3. 21.- Primer maquinado a la probeta en el torno de cuatro mordazas.....	76
Figura3. 22.- Segundo maquinado en el torno de tres mordazas.....	77
Figura3. 23.- Corte de las probetas cilíndricas a las dimensiones especificadas.....	77
Figura3. 24.- Pulido final de las probetas.....	78
Figura3. 25.- Maquinado final.....	78
Figura3. 26.- Proceso de maquinado.....	79
Figura3. 27.- Juego de líquidos penetrantes empleados.....	81
Figura3. 28.- Aplicación de líquidos penetrantes sobre las placas.....	82
Figura3. 29.- Inspección de las placas soldadas.....	82
Figura3. 30.- Aplicación del ensayo de líquidos penetrantes a las probetas finales.....	83
Figura3. 31.- Dimensiones de la probeta de tensión.....	84
Figura3. 32.- Máquina de ensayo de tensión Zw/ck Roell Z100.....	84
Figura3. 33.- Probetas para el ensayo de tensión.....	85
Figura3. 34.- Diagrama esfuerzo-deformación para una soldadura en Al 6061-T6.....	85
Figura3. 35.- Probetas de tensión fracturadas.....	86
Figura3. 36.- Diagrama esfuerzo deformación para las tres zonas de soldadura.....	87
Figura3. 37.- Perfil de micro-dureza Vickers, a) a lo largo del espécimen, b) zona de soldadura correspondiente.....	88
Figura4. 1Máquina de ensayos.....	90
Figura 5. 1.- Comparación de la resistencia a la fatiga en flexión rotativa de muestras soldadas y no soldadas de una aleación de aluminio 6061-T6.....	93
Figura 5. 2.- Zonas para el maquinado de probetas.....	94
Figura 5. 3.- Crecimiento de fisura en función del número de ciclos.....	95
Figura 5. 4.- Superficies de fractura para una carga del 22.6 % del esfuerzo de cedencia, a) zonas de fractura, b) vista lateral de la fractura.....	96
Figura 5. 5Superficies de fractura para una carga del 33.9 % del esfuerzo de cedencia, c) zonas de fractura, b) vista lateral de la fractura.....	97
Figura 5. 6.- Superficies de fractura para una caga del 45.2 % del esfuerzo de cedencia, e) zonas de fractura, f) vista lateral de la fractura.....	98
Figura 5. 7.- Superficies de fractura para una caga del 67.8 % del esfuerzo de cedencia, e) zonas de fractura, f) vista lateral de la fractura.....	99

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.- Gases de protección para una transferencia por spray GMAW. ....	55
Tabla 2.- Propiedades típicas de metales de aporte en aluminio. ....	58
Tabla 3.- Guía para la selección del metal de aporte. ....	59
Tabla 4.- Composición química de los metales de aporte. ....	59
Tabla 5.- Composición química de una aleación de aluminio 6061-T6. ....	61
Tabla 6.- Propiedades mecánicas del aluminio 6061-T6. ....	61
Tabla 7.- Comparativa de los materiales de aporte ER4043 Y ER5356. ....	69
Tabla 8.- Parámetros iniciales del proceso de soldadura. ....	71
Tabla 9.- Parámetros finales de la soldadura. ....	74
Tabla 10.- Resultados de la prueba de tensión. ....	86
Tabla 11.- Relación de cargas para las probetas. ....	89
Tabla 12.- Condiciones y distribuciones de las probetas. ....	90
Tabla 13.- Relación de cargas y numero de ciclos soportados durante los ensayos. ....	91
Tabla 14.- Promedio de ciclos para todas las cargas. ....	92

## GLOSARIO.

**Aleación:** Se denomina aleación a la sustancia que se obtiene mediante la fusión y posterior solidificación de una mezcla de dos o más elementos, siempre que el conjunto conserve las propiedades metálicas en estado sólido, en función de los elementos que las forman, podemos clasificar las aleaciones en metálicas, cuando todos los elementos son metales, y no metálicas, cuando alguno de los elementos es un no metal. [1]

**Carga:** Esfuerzo aplicado a un material durante un ensayo.[1]

**Curva S-N (también curva de Wöhler):** Grafica que muestra el esfuerzo en función de la cantidad de ciclos de falla por fatiga. [1]

**Ductilidad:** Capacidad de los materiales de ser estirados o doblados sin romperse. [1]

**Deformación elástica:** Deformación que desaparece totalmente cuando se elimina el esfuerzo que la produce. [1]

**Ensayo de flexión:** Aplicación de una fuerza al centro de una barra soportada en cada extremo, para determinar la resistencia del material hacia una carga estática o aplicada lentamente. [1]

**Ensayo de dureza:** Medida de la resistencia de un material a la penetración. [1]

**Ensayo de tensión:** Mide la respuesta de un material a una fuerza uniaxial aplicada lentamente. [1]

**Esfuerzo:** Fuerza por unidad de área transversal sobre la que actúa la fuerza. [1]

**Falla por fatiga:** Falla de un material debida a la carga y descarga repetida. [1]

**Fatiga:** Mide la resistencia de un material a la falla, cuando se aplica en forma repetitiva un esfuerzo menor que la resistencia de cedencia. [1]

**GMAW:** Soldadura con gas y arco metálico.[2]

**Límite de resistencia a la fatiga:** Es el esfuerzo bajo el cual un material no falla en un ensayo de fatiga. [1]

**Módulo de elasticidad:** Pendiente de la curva esfuerzo-deformación unitaria en la región elástica. También se llama módulo de Young. [1]

**Propiedades físicas:** Las que pueden referirse a una unidad de medición como el color (longitud de onda), la elasticidad, conductividad eléctrica o térmica, magnetismo, y el comportamiento óptico, que en general no están influidas en forma significativa por las fuerzas que actúan en un material. [1]

**Propiedades mecánicas:** Propiedades de un material, como la resistencia, que describen que tanto resiste las fuerzas aplicadas, incluyendo fuerzas de tensión o de compresión, de impacto, cíclicas o de fatiga, o las fuerzas a altas temperaturas. [1]

**Resistencia a la cedencia:** También punto de cedencia o esfuerzo de cedencia. Valor de la resistencia por arriba del cual un material comienza a mostrar deformación permanente (o plástica). [1]

**Resistencia a la fatiga:** Esfuerzo requerido para causar falla por fatiga en determinada cantidad de ciclos. [1]

**Soldadura:** Es una coalescencia localizada de metal, en donde esta conglutinación se produce por el calentamiento a temperaturas adecuadas, con o sin aplicación de presión y con o sin la utilización de metal de aporte. [2]

**Tenacidad:** Medida cualitativa de la energía necesaria para causar la ruptura de un material. [1]

**Vida de fatiga:** Cantidad de ciclos a un determinado esfuerzo para provocar que un material falle por fatiga. [1]

## INTRODUCCION.

AISI 6061 T-6 es una de las aleaciones de aluminio mayormente utilizada en aplicaciones industriales. Un buen balance entre resistencia, peso y precio lo hace popular para extensos y diversificados usos: aplicaciones arquitectónicas como secciones para ventanas, puertas y cortinas metálicas, construcción naval, coberturas en los pisos de camiones y remolques, instalaciones neumáticas, construcción para estructuras de aviación, tubos de irrigación, latas manufacturadas, estructura y frenos de bicicleta, escaleras y barandillas [3-6].

Esta aleación de aluminio es altamente soldable por el proceso GMAW, uno de los procesos más comunes y menos costosos para soldar este material [7,8]. Sin embargo, no todas las aleaciones de aluminio son apropiadas para soldarse por GMAW; por ejemplo, la aleación AISI 2014-T6 es soldada usando técnicas de soldadura por fricción [9], donde el diseño de herramientas fue el principal parámetro del proceso presentando la influencia estadística más alta en propiedades mecánicas.

Adicionalmente, una significativa reducción en la dureza y otras propiedades mecánicas es observada en aleaciones de aluminio tratadas térmicamente, sin importar el proceso de soldadura usado. La soldadura arco eléctrico con electrodo de tungsteno y gas (GTAW) y la soldadura con arco metálico y gas (GMAW) han sido aplicadas en aleaciones de aluminio AA7075 bajo corrientes continua y alterna, para investigar la resistencia a la fatiga de este material: un refinamiento de grano bajo el proceso de soldadura GMAW conduce a incrementar la resistencia al crecimiento de grieta y la vida en fatiga [10].

La aleación de aluminio 6061 desarrolla picaduras por corrosión en ambientes que contienen cloruros; esta condición conduce a una importante reducción en la resistencia a la fatiga [11, 12]. Concerniente a precipitados inter-metálicos, la fracción y tamaño de las partículas primarias de Mg<sub>2</sub>Si incrementa con el contenido de Mg, provocando un aumento de la dureza y el esfuerzo a la compresión; sin embargo, una menor resistencia a la corrosión con respecto a la aleación libre de Mg [13].

La aleación de aluminio 6063-T5 sujeta a un ataque controlado de corrosión con cloritos y bajo ensayos en flexión rotativa ha mostrado que la resistencia a la fatiga se reduce con el tiempo de pre-corrosión y esto particularmente en la zona de menor intensidad del esfuerzo aplicado, para especímenes pre-corroídos en relación a especímenes no corroídos [14].

Los métodos tradicionales de soldadura para aleaciones de aluminio 6061 han sido el proceso GTAW y el GMAW, donde uno de los principales cambios es la transferencia metálica (principalmente en el GMAW) afectando la micro-estructura, la porosidad y las propiedades de resistencia y fatiga [15, 16].

Más recientemente, los procesos de soldadura por fricción (“Friction Stir Welding”, FSW) han sido aplicados en aleaciones de aluminio con importantes mejoras en las propiedades mecánicas finales: desde un incremento de disipación de temperatura de unión en estado sólido y cizallamiento en caliente (no presentando fusión); además que la solidificación y licuación son altamente eliminadas.

Adicionalmente, la alta fricción y las fuerzas actuantes provocan una estructura de grano fino y diferentes aleación metálica puede ser exitosamente soldada [17, 18]. Otra técnica reciente de soldadura en aleaciones de aluminio es el rayo laser energético, presentando la mayor velocidad de soldado y menores distorsiones. Sin embargo, la alta reflectividad y conductividad térmica de la aleación de aluminio requiere una mayor irradiación de rayo láser comparado con la necesaria irradiación para soldadura en acero [19]. Por otra parte, la generación de porosidades ocasionadas por bajos puntos de vaporización (Mg, Zn), pueden ser ampliamente controladas por superficies preparadas y rayos laser duales de soldadura [20].

## ANTECEDENTES.

### ANTECEDENTES HISTÓRICOS.

La mecánica de fractura ha sido usada desde la época Neolítica cuando se implementó el diseño de las primeras herramientas sencillas de piedra y posteriormente más sofisticadas. Es dudoso que estos primeros ancestros del hombre moderno no hayan entendido los mecanismos de fractura. En cualquier caso, desarrollaron técnicas muy hábiles de cómo moldear y formar cuchillos, lanzas y otras herramientas de piedra. [21].

Las pruebas o ensayos llevaron a los científicos a aproximarse a los problemas de resistencia y fractura, siendo la punta de lanza de pioneros tales como Leonardo da Vinci (1452 – 1519) y Galileo Galilei (1564 - 1642). Leonardo da Vinci fue el primero en realizar experimentos para determinar la capacidad de carga de alambres de acero. Galileo Galilei fue el primero en formular que la carga de fractura de una barra en tensión es directamente proporcional al área de su sección transversal e independiente de su longitud. La gran mayoría de los siguientes investigadores han aceptado la noción de Galileo, asumiendo la resistencia como una propiedad intrínseca del material. [21]

El primer estudio de la fatiga de un metal se cree fue conducido alrededor del año 1829 por el ingeniero minero alemán W.A.J. Albert. El llevó a cabo pruebas de ensayo a cargas repetidas en las cadenas de las grúas mineras hechas de hierro. Una de las terminales de las cadenas fue cargada mientras la cadena fue sostenida en un disco de 360 cm. Los eslabones de la cadena fueron sometidos repetidamente al doblamiento, a una velocidad de 10 doblamientos por minuto hasta 100,000 doblamientos, por una manivela acoplada la cual osciló el disco a través de un arco. [22]

El interés en el estudio de la fatiga comenzó a expandirse con el aumento en el uso de las estructuras ferrosas, particularmente puentes en los sistemas ferroviarios. El primer esfuerzo de investigación en la fatiga de los metales fue iniciado en 1842 a consecuencia del accidente ferroviario cerca de Versalles, Francia que resultó en la pérdida de vidas humanas [23] (The Times de Londres, Mayo 11, 1842). La causa de este accidente fue localizado en una falla por fatiga originada en el eje frontal de la locomotora. En 1843, W.J.M. Rankine [24], un ingeniero ferroviario inglés quien más tarde llegó a ser famoso por sus contribuciones a la ingeniería mecánica, reconoció las distintas características de las fracturas por fatiga y observó los peligros de la concentración de esfuerzos en los componentes de máquina. La Institución de Ingenieros Mecánicos de Inglaterra también comenzó a explorar la llamada “Teoría de Cristalización” en la fatiga. Fue postulado que la debilidad de los materiales conducía a una eventual falla por fatiga causada por la cristalización de la microestructura subyacente. En 1849, el Gobierno Británico comisionó a E.A. Hodgkinson [25] a estudiar la fatiga en el hierro vaciado y de forja usando en los puentes ferroviarios. El reporte de esta comisión (Hodgkinson, 1849) describe experimentos de doblamiento alternativo en los rieles cuyos puntos medios fueron repetidamente deflectados por una leva rotatoria.

En este período de tiempo, la investigación sobre la fractura por fatiga fue documentada también en el trabajo de Braithwaite [26] (1854) quien empleó el término “fatiga” exclusivamente para denotar el agrietamiento de los metales bajo carga repetida. A Poncelet [27] (1839) se le otorga generalmente el crédito de introducir el término “fatiga” en conexión con la falla del metal, aunque éste ha sido usado anteriormente en el contexto de otro fenómeno.

A. Wöhler [28] llevó a cabo sistemáticas investigaciones de la falla por fatiga durante el período 1852-1869 en Berlín, donde estableció una estación de experimentación. Él observó que la resistencia de los ejes ferroviarios de acero sometidos a carga cíclica fue apreciablemente menor que su resistencia estática. Los estudios de Wöhler involucraron carga por doblamiento, carga por torsión y carga axial en las pruebas de fatiga para los ejes ferroviarios del Servicio Ferroviario Prusiano y en una amplia variedad de componentes estructurales usados en máquinas pequeñas. Su trabajo también condujo a la caracterización del comportamiento a la fatiga en términos de las curvas amplitud de esfuerzo-vida a la fatiga (S-N) y al concepto de “límite de resistencia” a la fatiga. La máquina rotatoria de doblamiento ampliamente usada hoy para metales a la resistencia cíclica es conceptualmente la misma a aquella diseñada por Wöhler. Aunque su aparato de doblamiento rotatorio tenía una velocidad máxima de solamente 72 revoluciones por minuto, uno de sus especímenes para el ensayo a la fatiga fue sometido a 132,250,000 ciclos de esfuerzo sin producir fractura.

Otro bien conocido investigador de la fatiga en esta época fue W. Fairbairn [29] quien llevó a cabo pruebas en vigas remachadas de acero forjado para el Consejo Británico de Comercio; en algunos casos, tanto como 3,100,000 ciclos de carga fueron aplicados. En base a sus experimentos, Fairbairn concluyó que las vigas de acero forjado sometidas a esfuerzos cíclicos con un máximo de únicamente un tercio del esfuerzo último a la tensión (UTS) podrían fallar. En 1874, el ingeniero alemán H. Gerber [30] comenzó el desarrollo de métodos para el diseño a la fatiga; su contribución incluyó el desarrollo de métodos para el cálculo de la vida a la fatiga para diferentes niveles promedio de esfuerzos cíclicos. Problemas similares fueron también dirigidos por Goodman [30] (1899).

La idea que el límite elástico de los metales en carga invertida puede ser diferente del observado en la deformación monotónica fue popularizado por Bauschinger [31] (1886). Su trabajo identificó esencialmente la presencia del ablandamiento cíclico y el endurecimiento por deformación cíclica. Bauschinger también confirmó muchos de los resultados anteriormente reportados por Wöhler. Al final del siglo diecinueve, unos 80 artículos referidos a la fatiga habían sido publicados en diversas áreas de aplicación como ejes ferroviarios, cigüeñales, cadenas, alambres y ejes propulsores marinos.

Las interpretaciones de los mecanismos de fatiga basados en la vieja teoría de la cristalización fueron refutados por los trabajos pioneros de Ewing & Rosenhain [32] (1900) y de Ewing & Humfrey [32] (1903). Estos investigadores enfocaron sus estudios en la fatiga del hierro sueco y publicaron micrografías ópticas del daño cíclico sobre la superficie del espécimen. Se mostró convincentemente el desarrollo de bandas de deslizamiento en muchos granos del material policristalino. Estas bandas de deslizamiento se ampliaron con

el progreso de la deformación por fatiga y condujo a la formación de grietas; la falla catastrófica del espécimen fue instigada por el crecimiento de un defecto dominante simple.

Ellos mostraron que las bandas de deslizamiento se cruzaron en la superficie pulida debido a los pasos por deslizamiento formando elevaciones y depresiones las cuales hoy son comúnmente referidas como “extrusiones” e “intrusiones”, respectivamente.

En 1910, O.H. Basquin [33] propuso leyes empíricas para caracterizar las curvas S-N de los metales. El mostró que una gráfica log-log del esfuerzo contra el número de ciclos por fatiga resultaba en una relación lineal sobre un amplio rango de esfuerzos. Contribuciones significativas al temprano entendimiento del endurecimiento cíclico y el ablandamiento en los metales fueron hechas por Bairstow[34] (1910). Usando ensayos cíclicos de paso múltiple y mediciones del lazo de histéresis, Bairstow presentó resultados sobre la histéresis de deformación y su relación con la falla por fatiga. En Francia, Boudouard[35] (1911) condujo experimentos a la fatiga en barras de acero las cuales fueron sometidas a vibraciones por medio de un aparato electromagnético similar al diseñado anteriormente por Guillet[36] (1910). El efecto del tratamiento térmico sobre la resistencia a la fatiga de los aceros fue el tema del estudio de Boudouard.

Otras notables contribuciones en este período de tiempo incluyen aquellas de Smith[37] (1910), Bach[38] (1913), Haigh[39] (1915), Moore & Seeley (1915)[40], Smith & Wedgwood[41] (1915), Ludwik[42] (1919), Gough & Hanson[43] (1923), Jenkin[44] (1923), Masing[45] (1926) y Soderberg[46] (1939). En 1926, un libro titulado “La fatiga de los metales” fue publicado por H.J. Gough[47] en el Reino Unido. Un año después, un libro conteniendo el mismo título fue publicado por H.F. Moore [48] y J.B. Koppers en los Estados Unidos. En los años veintes y treinta del siglo pasado, la fatiga tuvo una evolución como el principal campo para la investigación científica. Las investigaciones en este período de tiempo también se enfocaron en la fatiga por corrosión de los metales (Haigh[49], 1917; McAdam[50], 1926; Gough[51], 1933), modelos de acumulación del daño para la falla por fatiga (Palmgren[52], 1924; Miner[53], 1945), efectos de las muescas en la deformación monotónica y cíclica (Neuber[54], 1946), fatiga de amplitud variable (Langer[55], 1937), y teorías estadísticas de la resistencia de los materiales (Weibull[56], 1939). Un investigador prolífico de este período fue Thum[57] (1939) quien junto con muchos colegas alemanes, reportaron resultados experimentales en muchos tópicos como límites de fatiga, efectos de la concentración de esfuerzos, endurecimiento superficial, fatiga por corrosión y esfuerzos residuales en numerosas publicaciones. Gassner[58] (1941) fue otro prominente investigador alemán quien estudió la fatiga de amplitud variable encontrando aplicaciones en la industria aérea alemana.

La aparición del fretting (desgaste-frotamiento) fue inicialmente documentado por Eden, Rose y Cunningham[59] (1911) quienes reportaron la formación de desechos de óxidos entre las agarraderas de acero y el espécimen de fatiga que estuvo en contacto con las agarraderas. Tomlinson[60] (1927) llevó a cabo los primeros experimentos sistemáticos en la fatiga por desgaste al inducir repetidos movimientos rotacionales de pequeña amplitud entre dos superficies en contacto e introducir el término “corrosión por desgaste” para denotar la oxidación debida a este repetido contacto. Los efectos dañinos del desgaste en las propiedades a la fatiga de los metales, reflejado en la formación de hoyos en la

superficie desgastada y en la marcada reducción en la resistencia a la fatiga, fue reportados por Warlow-Davies[61] (1941) y por McDowell[62] (1953).

La idea de que las deformaciones plásticas son responsables del daño cíclico fue establecida por Coffin[63] (1954) y por Manson[64] (1954). Trabajando independientemente en problemas asociados con la fatiga debido a la amplitud de carga a altos esfuerzos y de carácter térmicos, Coffin y Manson propusieron una relación empírica entre el número de cargas inversas a la falla por fatiga y la amplitud de deformación plástica. Esta así llamada relación Coffin-Manson se ha conservado como la aproximación más ampliamente usada para la caracterización de la deformación en el fenómeno de la fatiga.

Si bien la fatiga de los metales por el desarrollo de las bandas de deslizamiento y por el lento crecimiento de los defectos microestructurales ya había sido documentada en el trabajo de Ewing y Humprey en los inicios del siglo XIX, el marco matemático para la modelación cuantitativa de la falla por fatiga aún no estaba a disponible. Los análisis de esfuerzos de Inglis[65] (1913) y los conceptos de energía de Griffith[66] (1921) proporcionaron las herramientas matemáticas para el tratamiento cuantitativo de la fractura en sólidos frágiles. Sin embargo, estas ideas no pudieron emplearse directamente en la caracterización de la falla por fatiga de los materiales metálicos. El progreso en esta dirección llegó con los pioneros estudios de Irwin[67] (1957) quien mostró que la amplitud del esfuerzo delante de una grieta podía ser expresado en términos de una cantidad escalar conocida como “factor de intensidad de esfuerzos”,  $K$ .

Con la llegada de la llamada aproximación “mecánica de la fractura elástico-lineal”, fueron hechos intentos por caracterizar el crecimiento de las grietas por fatiga en términos del factor de intensidad de esfuerzos. Paris[68], Gomez & Anderson (1961) fueron los primeros en sugerir que el aumento en el avance de la grieta por fatiga por ciclo de esfuerzo,  $da/dN$ , podría relacionarse al rango del factor de intensidad de esfuerzos,  $\Delta K$ , durante el ciclo de carga a amplitud constante. Si bien su artículo original en este tópico no fue aceptado para su publicación por las revistas especializadas en este campo, su aproximación desde entonces ha sido ampliamente adaptada para la caracterización del crecimiento de las grietas por fatiga bajo condiciones de deformación plástica a pequeña escala en la punta de la grieta. El mayor atractivo de la aproximación “mecánica de la fractura elástico-lineal” es que el rango del factor de intensidad de esfuerzos, determinado de condiciones de cargado remoto y de las dimensiones geométricas del componente agrietado, únicamente caracteriza la propagación de las grietas por fatiga; este método no requiere un conocimiento detallado de los mecanismos de la fractura por fatiga (Paris, Gómez & Anderson, 1961; Paris[69] & Erdogan, 1963). Los efectos de los diversos factores mecánicos, microestructurales y ambientales en la deformación cíclica así como en el inicio de la grieta y su crecimiento en un vasto espectro de materiales ingenieriles han sido los tópicos de una considerable cantidad de investigación en las últimas cuatro décadas. En este período, se ha logrado un progreso sustancial en el entendimiento de la deformación cíclica y en los mecanismos de inicio de las grietas en la fatiga, gracias a los avances en la microscopía óptica y electrónica.

Notables entre estos desarrollos son los estudios que identifican las características microscópicas claves en la deformación por fatiga y la fractura por fatiga. Thompson[70], Wadsworth & Louat (1956) demostraron que en las bandas por deslizamiento, a lo largo de las cuales se concentra la deformación en los materiales fatigados, persistentemente reaparecieron en las mismas posiciones durante el ciclado continuo aún después de que una capa de material fue removida cerca de la superficie; ellos llamaron a estas marcas superficiales “bandas de deslizamiento persistentes”. Zappfe [71] & Worden (1951) documentaron sus observaciones de las marcas características tipo rizo u onda en las superficies fracturadas por fatiga las cuales ahora se conocen como “estrías por fatiga”. Las correlaciones del espaciamiento entre estrías adyacentes con la velocidad de crecimiento de la grieta por fatiga, primeramente publicado por Forsyth [72] & Ryder (1960), llegaron a ser tema central para el desarrollo de varias teorías para el crecimiento de la grieta por fatiga y para el análisis de las fallas por fatiga en las estructuras ingenieriles. Los estudios en esta área llevados a cabo por muchos investigadores proporcionaron información valiosa sobre los cambios subestructurales y microestructurales responsables del endurecimiento cíclico y sobre las características de ablandamiento de los materiales y en el rol de los mecanismos que influyen sobre la nucleación y crecimiento de las grietas por fatiga.

Con la aplicación de los conceptos de la mecánica de fractura a la falla por fatiga, mucha mayor atención fue prestada a los mecanismos del crecimiento subcrítico de la grieta. Modelos conceptuales y cuantitativos fueron desarrollados para racionalizar la resistencia al crecimiento de la grieta por fatiga experimentalmente observada en los materiales ingenieriles (Laird[73] & Smith, 1962; McClintock[74], 1963; Weertman[75], 1966; Laird[76], 1967; Rice[77], 1967; Neumann[78], 1969; Pelloux[79], 1969). Simultáneamente con esta investigación, se expandió el interés por entender los procesos por los cuáles el rango del factor de intensidad de esfuerzos podría ser alterado gracias al historial del avance de la grieta.

Una contribución importante en esta dirección llegó de los resultados experimentales de Elber[80],[81] (1970, 1971) quien mostró que las grietas por fatiga podían conservarse cerradas aun cuando estuviesen sometidas a cargas de tensión cíclicas. Su resultado también implicó que la velocidad de crecimiento de las grietas por fatiga ya no podía ser determinada por el valor nominal del rango del factor de intensidad de esfuerzo,  $\Delta K$ , sino que por un valor efectivo de  $\Delta K$  el cual daba razón de los detalles de la superficie fracturada en contacto inmediato con el avance de la punta de la grieta por fatiga. El trabajo de Elber se enfocó en la influencia de la deformación plástica previa al cierre de la grieta durante la fractura por fatiga. Aunque la conclusión de Elber con respecto al rol del cierre de la grieta en influenciar el crecimiento de la grieta por fatiga es controversial desde entonces, llego a ser evidente por los estudios de numerosos investigadores en los años 70 y principios de los 80 del siglo pasado que los argumentos de Elber con respecto al contacto prematuro entre las caras de las grietas (basados en los efectos de la plasticidad de la punta de la grieta) representaron justamente un mecanismo asociado con el fenómeno del cierre de la grieta por fatiga. A partir del análisis de la información publicada y en base de nuevos resultados obtenidos de las investigaciones de Ritchie[82], Suresh & Moss (1980), Suresh[83], Zamiski & Ritchie (1981) y Suresh[82] & Ritchie (1984a) se caracterizaron los varios tipos de cierre de grieta y se acuñó la expresión “cierre de grieta por plasticidad inducida” gracias al mecanismo de Elber de contacto de las caras de la grieta debido a la

deformación plástica previa. Posteriores contribuciones al cierre de la grieta surgieron de la oxidación de la superficie de fractura, ambientes viscosos atrapados dentro de las paredes de las grietas y transformaciones de fase inducidas por esfuerzo. Además, las deflexiones periódicas en la trayectoria de una grieta por fatiga puede causar reducciones en la fuerza motriz efectiva para la fractura por fatiga (Suresh[84],[85], 1983a, 1985a) por “tapar” parcialmente la punta de la grieta de los esfuerzos aplicados.

### **ANTECEDENTES QUE PRECEDEN ESTA INVESTIGACIÓN.**

El estudio de fatiga en flexión rotativa en una aleación de aluminio, comenzó con las investigaciones realizadas por el Ingeniero Víctor Hugo Mercado Lemus, con su tema titulado “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AISI-SAE 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”, este trabajo arrojó como conclusiones:

- La resistencia a la fatiga en flexión rotativa en las aleaciones de aluminio 6061-T6, se reduce considerablemente con la presencia de una picadura de corrosión y aún más dramático para dos picaduras de corrosión cercanas.
- Para aplicaciones industriales de aleaciones metálicas que sufren de ataque corrosivo y fatiga, la probabilidad de generarse dos o más picaduras de corrosión cercanas es alta; luego entonces la denominada fatiga-corrosión puede generar una alta concentración de esfuerzos inducidos por dos o más picaduras de corrosión cercanas.
- El concentrador de esfuerzos debido a la presencia de dos o más picaduras de corrosión cercanas se localiza en la pared común donde éstas se desarrollaron.
- El rango de frecuencia entre 25 y 100 Hz. no afecta la vida en fatiga obtenida de los tres tipos de ensayos que se realizaron.
- La vida en fatiga disminuye ligeramente cuando las dos picaduras de corrosión se encuentran en dirección longitudinal a la probeta, comparado con la dirección transversal en mismas condiciones y mismos diámetros.
- El máximo concentrador de esfuerzos debido a la presencia de dos picaduras en dirección longitudinal se encuentra en una dirección diametral que es perpendicular al eje longitudinal de la probeta.
- Es posible concluir también que el concentrador de esfuerzos presenta una evolución de tipo exponencial creciente en la medida que las 2 picaduras se aproximan.
- Este estudio permite concluir que materiales industriales sometidos a fatiga-corrosión pueden tener una vida en fatiga mucho más corta debido a la aparición de picaduras de corrosión y a su proximidad.

Posteriormente el estudio de fatiga en flexión rotativa continuó a cargo del Ingeniero Jorge Luis Ávila Ambriz, con el tema titulado “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO NOMINACIÓN AISI SAE 6063-T5 CON CORROSION ARTIFICIAL”, los resultados de esta investigación arrojaron como conclusiones:

- La resistencia a la fatiga en flexión rotativa decrece con el tiempo de ataque corrosivo en los especímenes corroídos.
- La diferencia de vida en fatiga se incrementa para las probetas corroídas, cuando la razón de carga decrece (60% y 70% del esfuerzo de cedencia del material).
- El tamaño de las picaduras por corrosión permanece aproximadamente sin cambio con el tiempo de corrosión, es posible concluir que la densidad superficial de las picaduras del espécimen se incrementa con el tiempo de ataque corrosivo.
- El diagrama Kitagawa - Takahashi fue construido para esta aleación de aluminio en una vida de fatiga cercana a  $N = 4 \times 10^6$  ciclos. Bajo esta condición, se encontró que el rango de esfuerzo para los especímenes no corroídos fue  $\sigma_{fat} = 174 MPa$  , y  $a_0 = 179 \mu m$  para una razón de carga  $R = -1$  .
- Análisis en superficies de fractura muestran que las picaduras por corrosión fueron los sitios de iniciación y propagación de la grieta. La grieta inicia en las picaduras y se propaga siguiendo el camino de picaduras cercanas. Algunas veces son observados caminos de propagación secundarios paralelos en la probeta; estos compiten con la trayectoria principal de fractura durante el ensayo.
- El análisis numérico muestra que el factor concentrador de esfuerzos aumenta considerablemente cuando existe una picadura de por medio; en este mismo respecto, la proximidad de dos picaduras contiguas afecta dicho factor en función de la separación diametral entre picaduras, siendo más grande el aumento del factor de concentración de esfuerzos  $K_t$  cuanto menor sea la distancia de separación diametral entre las mismas.
- Para el caso de 2 picaduras contiguas y de la misma talla, el factor concentrador de esfuerzos será aproximadamente el mismo que para el caso de una sola picadura, cuando la distancia de separación diametral sea mayor o igual a 2 veces el radio de de las picaduras.
- La simulación numérica pone de manifiesto que el eje de separación entre picadura y picadura aumenta dramáticamente el factor concentrador de esfuerzos, siendo mayor dicho factor cuando el eje de separación diametral es transversal al espécimen.
- Finalmente, la zona de mayor concentrador de esfuerzos en el caso de picaduras contiguas localizadas según el eje longitudinal, se encuentra en el centro radial de las mismas, mientras que en el caso de picaduras dispuestas en el eje transversal, la zona de mayor concentración de esfuerzos se encuentra en la frontera entre picadura y picadura.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

La aleación de aluminio AISI-SAE 6061-T6 es comúnmente empleada bajo condiciones de cargas mecánicas oscilantes y también en piezas soldadas. Entonces, resulta de particular interés determinar la resistencia a la fatiga en flexión rotativa de la aleación de aluminio AISI-SAE 6061-T6 en piezas soldadas mediante ensayos destructivos, para obtener su comportamiento en estas condiciones. Un propósito principal es obtener información del comportamiento en fatiga de esta aleación soldada; dicha información es limitada o inexistente en la actualidad.

## **OBJETIVO GENERAL.**

Investigar la resistencia a la fatiga mecánica de la aleación de aluminio AISI-SAE 6061-T6 sometida a un proceso de soldadura, así como llevar a cabo estudios en la superficie de fractura para establecer las posibles correlaciones entre las causas de falla por fatiga: las condiciones de carga, el tipo de soldadura, el proceso de soldado y los defectos mecánicos y micro-estructurales asociados

## **OBJETIVOS PARTICULARES.**

- Fabricar una probeta soldada de la aleación de aluminio AISI SAE 6061-T6, para los ensayos de fatiga en flexión rotativa.
- Obtener resultados de resistencia a la fatiga sobre la aleación soldada de aluminio nominación AISI-SAE 6061-T6, en condiciones de flexión rotativa.
- Llevar a cabo los estudios sobre la superficie de fractura para establecer causas probables de la falla en fatiga de este material.
- Analizar mediante microscopio óptico las superficies de fractura.
- Realizar posibles modelos de previsión de la vida en fatiga sobre este material, apoyados en los resultados experimentales y los análisis por microscopio sobre la superficie de fractura.

## JUSTIFICACIÓN.

La utilización cada vez más frecuente de las distintas aleaciones aluminio en fechas recientes ha tenido un crecimiento importante en un sinnúmero de industrias como son la industria aeronáutica, de transporte, la petroquímica y petrolera, la alimenticia, la energética, etc. Este material y sus distintas aleaciones presenta propiedades que superan a otros tipos de material, entre las que se puede mencionar; un volumen dado de aluminio tiene un peso cercano a 1/3 del mismo volumen de acero: debido a su elevada proporción resistencia-peso es muy útil para construir aviones, vagones ferroviarios y automóviles, y para otras aplicaciones en las que es importante la movilidad y la conservación de energía; por su adecuada conductividad térmica, el aluminio se emplea en pistones de motores de combustión interna.

Después de una búsqueda bibliográfica exhaustiva, la conclusión es que actualmente no se cuenta con suficiente información acerca de la vida en fatiga de una aleación soldada de aluminio nominación AISI-SAE 6061-T6. Esta tesis de maestría se encaminará a obtener resultados experimentales sobre la resistencia a la fatiga en flexión rotativa de esta aleación sometida a un proceso de soldadura GMAW.

Así, mediante los datos obtenidos experimentalmente se podrá conocer con mayor detalle las propiedades mecánicas de este tipo aleación que cuenta con un proceso de soldadura, en especial el límite de resistencia a la fatiga y el número de ciclos para predecir la vida en fatiga de este tipo de aleación de aluminio soldada.

## **HIPÓTESIS.**

La resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio AISI-SAE 6061-T6 sometida a un proceso de soldadura puede investigarse mediante el control de parámetros experimentales tales como: carga aplicada, tipo de soldadura, régimen de carga, proceso de soldado. También se puede determinar las causas de fractura mediante la visualización y el análisis de la superficie fracturada.

## METODOLOGÍA.

La metodología que se seguirá, comprende varias etapas en el desarrollo del proyecto:

En la primera etapa se contemplan las tareas siguientes:

**1.- *Búsqueda de información bibliográfica:*** en esta etapa se procederá a recabar información referente a la fatiga en flexión rotativa, cómo se llevan a cabo los ensayos y qué tipo de información proporcionan los mismos. También; se llevará a cabo la recopilación de información teniendo como fin conocer los procesos de soldadura empleados para soldar las distintas aleaciones de aluminio.

**2.- *Encontrar el proceso adecuado de soldadura al cual se someterán las probetas:*** En esta etapa se evaluarán los distintos procesos que existen para soldar aluminio, con el fin de identificar cuál es el más adecuado para soldar la aleación que estamos empleando.

***La siguiente etapa comprende la puesta en marcha de ensayos experimentales, análisis por microscopio de superficies de fractura, síntesis de resultados y redacción de la tesis de maestría, participación a congresos nacionales y/o internacionales para la difusión de resultado y publicación de resultados.***

El procedimiento que se siguió para la obtención de las probetas soldadas, fue el siguiente:

**1.- *Compra del material para la fabricación de las probetas de ensayos:*** en este punto se evaluó diferentes distribuidores para identificar cual proporciona el material más adecuado (placas, barras, soleras, etc...), con las características requeridas para la aleación que estamos empleando.

**2.- *Soldado del material:*** en esta etapa se procedió a poner en marcha el proceso de soldadura seleccionado para encontrar los parámetros adecuados (corriente, tipo de junta, flujo de gas, etc..), eso para lograr una buena soldadura.

**3.- *Corte del material:*** se cortó el material (en forma rectangular) a las dimensiones adecuadas mediante cierra cinta.

**4.- *Maquinado de las probetas:*** esta etapa se dividió en dos partes: en la primera se llevó a cabo un maquinado para obtener la forma redonda de la probeta rectangular obtenida del paso anterior mediante el torno manual; en la segunda parte se maquinó la probeta ya redondeada en el torno de control numérico para darle los cuellos y dimensiones especificados en la norma.

**5.- *Protección de las probetas:*** se protegen las probetas en recipientes para evitar se dañen al momento de ser transportadas al laboratorio donde se realizaron los ensayos.

## CAPITULO 1.- MARCO CONCEPTUAL.

### 1.1.- FATIGA MECÁNICA.

En ingeniería y en especial en Ciencia de Materiales, la fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce a cargas inferiores a las cargas estáticas que producirían la rotura. Un ejemplo de ello se tiene en un alambre: flexionándolo repetidamente se rompe con facilidad, pero la fuerza necesaria para fracturarlo en una sola aplicación de tensión es comparativamente superior.

La fatiga es una forma de rotura que ocurre en estructuras o elementos mecánicos sometidos a esfuerzos dinámicos y fluctuantes (puentes, automóviles, aviones, etc.). Un peligro principal es que puede ocurrir a un esfuerzo menor que la resistencia a tracción o el límite elástico para una carga estática, y aparecer sin previo aviso causando fallas catastróficas. Es un fenómeno de principal importancia, ya que es la primera causa de rotura de los materiales metálicos (aproximadamente el 90%), aunque también está presente en polímeros (plásticos, composites, etc.), y en cerámicas.

El proceso consiste en un inicio y posterior propagación de fisuras, que crecen desde un tamaño inicial microscópico hasta un tamaño macroscópico capaz de comprometer la integridad estructural del material. La superficie de fractura es perpendicular a la dirección del esfuerzo. Aunque es un fenómeno que, sin definición formal, era reconocido desde la antigüedad, este comportamiento no fue de interés hasta la Revolución Industrial, cuando a mediados del siglo XIX comenzaron a producirse roturas en los ejes de las ruedas de los trenes que se imponían, por aquel entonces, como medio de locomoción.[86]

La fractura aparentemente frágil de las piezas que fallaban por fatiga, en aquel tiempo se interpretó como una cristalización del metal durante el uso que lo volvía frágil como el vidrio y hacia que fracturara bajo cargas o impactos súbitos; pero gracias a las investigaciones de Wöhler, se aceptó que la fatiga no alteraba las propiedades del material, si no que era un proceso de agrietamiento paulatino producido por la acción de cargas repetitivas, introduciendo formalmente el concepto de fatiga .

Actualmente se sabe que la fatiga ocurre prácticamente en todos los materiales de la ingeniería, incluyendo los plásticos y algunos cerámicos. A pesar de los grandes avances en su estudio, la fatiga aún no es completamente entendida y muchas investigaciones son realizadas con el propósito de predecir la vida en fatiga, desarrollar materiales resistentes a ella y comprender mejor sus mecanismos.

Para que la fatiga ocurra es necesario que se cumplan las tres condiciones; si alguna de estas condiciones no se presenta, la fatiga no ocurre. Las tres condiciones son:

- Un esfuerzo de tensión, suficientemente alto pero menor que el esfuerzo de cedencia del material.

- Una variación o fluctuación del esfuerzo mayor a un valor dado llamado límite de fatiga.
- Un número suficiente de ciclos de carga.

Lo importante en la fatiga no es tanto si ésta ocurrirá o no, sino en cuanto tiempo o número de ciclos se presentara y si ese tiempo o número de ciclos es mayor que la vida esperado de servicio del componente.

Lo anterior hace que la fatiga sea evaluada en términos del tiempo o número de ciclos que tarda en ocurrir la fractura final, definiendo esta cantidad como la vida en fatiga. En ciertos casos, es probable que la fatiga ocurra después de algún tiempo, pero si la vida en fatiga es mayor que la vida esperada, entonces lo más probable es que el componente falle por algún otro mecanismo antes que por fatiga, esto limita la preocupación por evaluar la vida de componentes en los que la fatiga se presenta temprano en su vida útil o bien, que bajo ciertas condiciones se puede presentar de manera inesperada y rápida. Desafortunadamente, existen gran cantidad de componentes que son candidatos a la fatiga, algunos de los más importantes son:

- Partes estructurales de aviones.
- Partes de suspensión, dirección y frenos de vehículos terrestres.
- Toda clase de motores.
- Pistones y prensas hidráulicas.
- Estructuras de puentes y edificios.
- Partes de maquinaria.
- Grúas, elevadores y equipos de movimiento de materiales.
- Bombas.
- Turbinas.
- Tuberías.
- Reactores.
- Ruedas y rieles de ferrocarril, etcétera.

Dos de los primeros descubrimientos con relación a la naturaleza de la fatiga fueron: primero, que a mayor amplitud de esfuerzo, el número de ciclos de carga necesarios para producir la falla por fatiga, se reduce en una relación exponencial y segundo, que la presencia de entallas agudas, grietas y en general, cualquier concentrador de esfuerzos reduce drásticamente el número de ciclos de falla. [87]

## **1.2.- ETAPAS DE FALLA POR FATIGA.**

Una falla por fatiga puede presentar una apariencia similar a la fractura frágil, dado que las superficies de la fractura son planas y perpendiculares al eje del esfuerzo con ausencia de adelgazamientos. Sin embargo, las características de fractura de una falla por fatiga son muy diferentes a la fractura frágil estática y surgen a partir de tres etapas de desarrollo. [88]

*Etapa I (Iniciación):* Es el inicio de una o más microgrietas debido a la deformación plástica cíclica seguida de propagación cristalográfica que se extiende de dos a cinco granos alrededor del origen, normalmente, las grietas de la etapa I no pueden verse a simple vista.

*Etapa II (Propagación):* Las microgrietas se convierten en macrogrietas y forman superficies paralelas en forma de mesetas separadas por crestas longitudinales. Por lo general, las mesetas son suaves y normales a la dirección del esfuerzo máximo de tensión. Estas superficies pueden tener marcas oscuras y claras conocidas como marcas de playa, o marcas de concha. Durante las cargas cíclicas, estas superficies con grietas se abren y cierran, frotándose entre sí, y la aparición de las marcas de playa dependen de los cambios en el nivel de la frecuencia de carga y la naturaleza corrosiva del entorno.

*Etapa III (Fractura):* Ocurre durante el ciclo de esfuerzo final cuando el material restante no puede soportar las cargas, lo que resulta en una fractura súbita y rápida. Una fractura en la etapa III puede ser frágil, dúctil o una combinación de ambas. Con mucha frecuencia las marcas de playa, si existen, y los patrones posibles de fractura en la etapa III llamados líneas chevron, apuntan hacia los orígenes de las grietas iniciales.

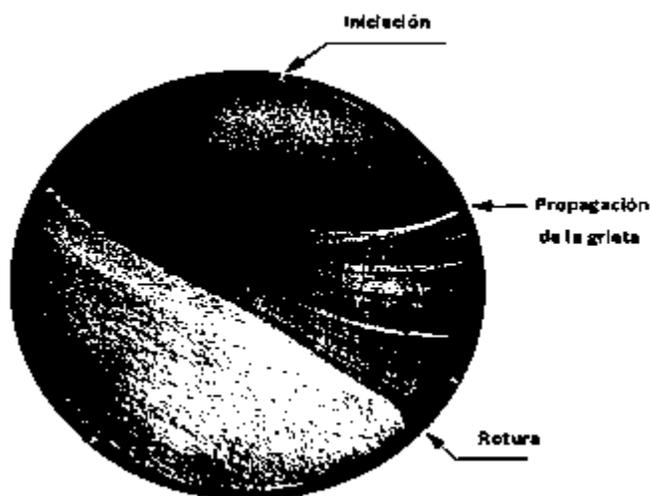


Figura1. 1Etapas en el proceso de falla por fatiga.

La falla por fatiga se debe a la formación y propagación de grietas. Por lo general, una grieta de fractura se inicia en una discontinuidad del material donde el esfuerzo cíclico es máximo. Las discontinuidades pueden surgir debido a:

- El diseño de cambios rápidos en la sección transversal, cuñeros orificios, etc., donde ocurren concentraciones de esfuerzo.

- Elementos que giran y/o se deslizan entre sí (cojinetes, engranes, levas, etc.) bajo presión alta constante, lo que desarrolla esfuerzos de contacto concentrados por debajo de la superficie, los cuales pueden causar picaduras o astilladuras después de muchos ciclos de carga.
- Falta de cuidado en las ubicaciones de estampados, marcas de herramientas, raspaduras y rebabas; diseño defectuoso de juntas; ensamble inapropiado; y otros errores de fabricación.
- La propia composición del material después de su proceso de laminado, forjado fundido, estirado, calentado etc. Surgen discontinuidades microscópicas y submicroscópicas en la superficie o por debajo de ella, así como inclusiones de material extraño, segregaciones de aleación, huecos, precipitaciones de partículas duras y discontinuidades cristalinas.

Entre las diferentes condiciones que pueden acelerar el inicio de la grieta se destacan las temperaturas elevadas, ciclos de temperaturas, un entorno corrosivo y ciclos de alta frecuencia. La velocidad y propagación de la grieta por fatiga está controlada en forma principal por esfuerzos localizados y por la estructura del material en donde se produjo la grieta. Sin embargo, como en la formación de la grieta, existen otros factores que pueden ejercer una influencia significativa, como el entorno, la temperatura y la frecuencia. Las grietas crecerán a lo largo de planos normales a los esfuerzos en tensión máximos. [88]

### 1.3.- SUPERFICIES DE FRACTURA EN LA FATIGA.

La fatiga es fácilmente identificable en una pieza ya fracturada, por la apariencia de la superficie de fractura. La superficie de fractura puede dividirse en tres zonas:

*Zona de inicio.* Las superficies de fractura por fatiga en su etapa de inicio no presentan rasgos sobresalientes, siendo estas superficies lisas, planas, brillantes y con muy pocas líneas, pudiendo notarse pequeños escalones en la zona de iniciación debido a la nucleación de varias grietas simultáneamente. Usualmente el límite de la zona de iniciación está bien definido por una línea de frente de propagación.

*Zona de propagación estable.* Es una superficie relativamente plana, orientada perpendicularmente a la dirección del esfuerzo principal máximo, brillante u opaca según el medio en que se encuentre la pieza. La principal característica de esta superficie es la presencia de marcas paralelas en forma de ondas o surcos paralelos entre sí, ligeramente curvos y cuyo centro parece converger hacia el punto de inicio. Estas marcas son conocidas como marcas de playa, por su semejanza con las ondas formadas en la arena de playa por efecto del viento y la marea. Estas marcas son formadas por el frente de propagación de la grieta cuando éste sufre alguna alteración por variación de la amplitud de carga, detención temporal, o cambio del ambiente y por lo mismo son muy valiosas en un análisis de fallas

para reconstruir la secuencia de la falla. La segunda característica sobresaliente de esta superficie son una serie de escalones o bordes radiales, paralelos a la dirección de propagación de la grieta y que se forman cuando la grieta se propaga en niveles ligeramente diferentes.

*Zona de fractura final.* Cuando la grieta está próxima a alcanzar su tamaño crítico, la alta concentración de esfuerzos provoca una transición a una fractura por corte y la superficie de fractura se hace más rugosa y comienza a inclinarse hasta un ángulo cercano a los 45°, formando un labio en la zona de desprendimiento final. Dependiendo de la ductilidad del material, puede presentarse una deformación severa e incluso un cuello en esta zona.

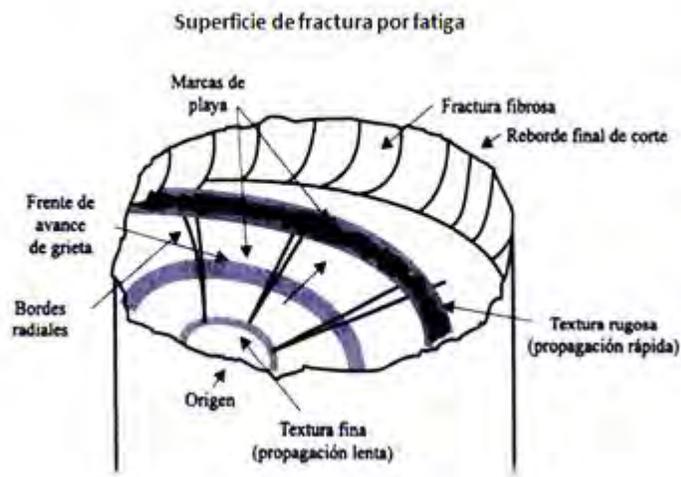


Figura 1. 2.- Superficies de fractura por fatiga.

Las grietas por fatiga inicia por lo general en una superficie y están asociadas a concentradores de esfuerzos; esto hace que macroscópicamente sea relativamente sencillo identificar la zona de inicio de una fractura por fatiga, pues esta se localizara cercana a una superficie libre y donde se encuentre un concentrador de esfuerzos, tal como una entalla, barreno, grieta, etc. Sólo en piezas con severos defectos internos (como piezas de fundición con rechupes) y materiales con partículas de forma agudas, las grietas por fatiga pueden nuclear en el interior. Las características macroscópicas de las zonas de inicio de fracturas internas por fatiga son básicamente similares a las observadas en fracturas iniciadas en la superficie. La extensión de cada zona de fractura por fatiga depende de la magnitud de la concentración de esfuerzos, la amplitud de carga y la tenacidad a la fractura del material. [87]

#### 1.4.- ENSAYO DE FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA.

Un método convencional y el más antiguo para medir la resistencia de un material a la fatiga es el ensayo de viga rotatoria en voladizo, figura 1.3. Un extremo de un espécimen cilíndrico, maquinado, se monta en unas mordazas accionadas por un motor. Del extremo opuesto se cuelga una masa. Al principio, el espécimen manifiesta una fuerza de tensión que actúa sobre la superficie superior, mientras que la superficie inferior está a compresión.

Después de que el espécimen gira  $90^\circ$ , los lugares que originalmente estaban en tensión, ahora están en compresión, y viceversa. Así, el esfuerzo en cualquier punto pasa por un ciclo senoidal completo, desde el esfuerzo máximo de tensión hasta el esfuerzo máximo de compresión. El esfuerzo máximo que actúa sobre estos especímenes es:

$$\pm\sigma = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (1)$$

En esta ecuación M es el momento de flexión en la sección transversal y d es el diámetro del espécimen. El momento flexionante es  $M = F \cdot \left(\frac{L}{2}\right)$  y, en consecuencia,

$$\pm\sigma = \frac{16FL}{\pi d^3} = 5.09 \frac{FL}{d^3} \quad (2)$$

Donde L es la distancia entre el punto de la fuerza de flexión y el soporte, F es la carga y d es el diámetro.

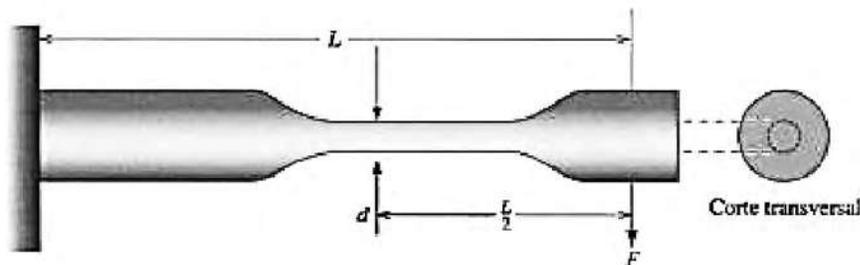
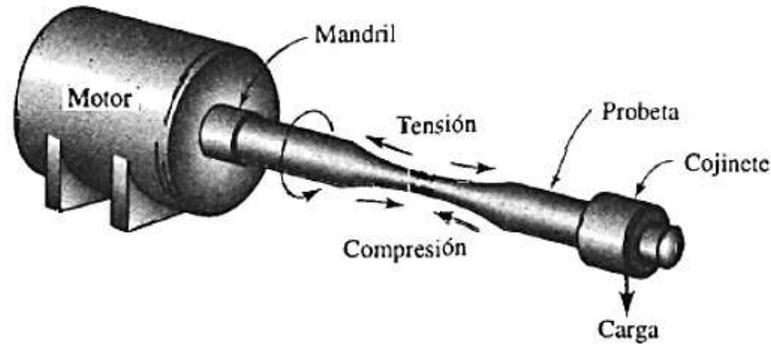


Figura1. 3.- Esquema del ensayo de fatiga con el espécimen de flexión rotativa.

Los nuevos aparatos para ensayos de fatiga se llaman máquinas de carga directa. En ellas, un sistema servohidráulico, un actuador y un sistema de control, todos ellos dirigidos por computadoras, aplica la fuerza, deflexión, desplazamiento o deformación que se desee. En algunas de esas máquinas, también se pueden controlar la temperatura y la atmosfera; es decir, el grado de humedad. [89]



Figural. 4.- Ensayo de fatiga en flexión rotativa.

## 1.5.- GRAFICAS S-N.

Para establecer la resistencia a la fatiga de un material, se necesita un número importante de ensayos debido a la naturaleza estadística de la fatiga. En el caso de ensayos en flexión rotativa, se aplica una carga constante de flexión y se registra el número de revoluciones (inversiones del esfuerzo) de la probeta hasta que se presente la falla. El primer ensayo se hace con un esfuerzo que es un poco menor que la resistencia ultima del material. El segundo ensayo se realiza a un esfuerzo que es menor que el primero. Este proceso se continua y los resultados se grafican como un diagrama S-N (figura 1.5).

El diagrama S-N (*Stress - Number of Cycles (N)*), o también conocido como grafica de Wöhler, es la forma fundamental de representar los datos de la duración de una probeta a la fatiga, esta gráfica ilustra la variación de vida media en fatiga con el esfuerzo, también indica la duración de la probeta expresada en números de ciclos hasta la fractura para el máximo esfuerzo aplicado. Representa en la ordenada (eje Y) los esfuerzos máximos que producen la fractura por fatiga; y en la abscisa (eje X), su duración en ciclos (suele representarse en escala logarítmica).

Cuando la curva S-N se acerca asintóticamente a la horizontal, el esfuerzo correspondiente se llama **límite de fatiga** (suele llamarse límite de aguante o duración o *endurance limit*  $S_e$ ), y la vida en fatiga a esfuerzos más bajos se presume ser infinita. Del

análisis de la curva surge que el número  $N$  de ciclos que soporta una probeta antes de fallar aumenta al disminuir el esfuerzo  $\sigma$  aplicado.[90]

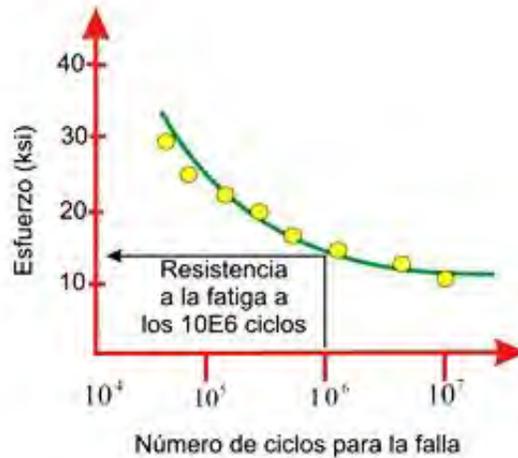


Figura1. 5.- Grafica S-N típica.

## 1.6.- INTRODUCCIÓN A LA SOLDADURA.

La forma puede adaptarse con mayor facilidad a la función mediante procesos de unión como soldadura, engargolado, soldadura suave, cementación y pegado, procesos que en la actualidad se emplean de manera extensa en la manufactura. Ya sea que las partes deban ensamblarse o fabricarse, por lo general existe una buena razón para considerar alguno de estos procesos para el trabajo de diseño preliminar. En particular, cuando las secciones que se unirán son delgadas, uno de estos métodos puede proporcionar ahorros significativos. La eliminación de sujetadores individuales, con sus respectivos agujeros, y los costos de ensamble representan un factor importante. Asimismo, algunos de los métodos permiten el ensamble rápido de la máquina, lo que incrementa su productividad en la fabricación [88].

Las uniones permanentes con remaches fueron populares como medio para sujetar perfiles de acero laminado entre sí a fin de formar una unión permanente. La fascinación que produce en los niños ver cómo un remache de color rojo cereza se lanza con tenazas a lo largo del esqueleto de un edificio, para ser atrapado sin error alguno por una persona que carga una canastilla cónica, para después martillarlos con un dispositivo neumático en su destino final, ya no existe. Dos avances técnicos relegaron el remachado a un lugar secundario. El primero fue el desarrollo de pernos de acero de alta resistencia, cuya precarga se podía controlar. El segundo consistió en el mejoramiento de la soldadura, lo cual la hizo competitiva tanto en costo como en libertad de la posible forma. [88]

La AWS (Sociedad Americana de Soldadura por sus siglas en inglés), define la soldadura como una coalescencia localizada de metal, en donde esa conglutinación se

produce por el calentamiento a temperaturas adecuadas, con o sin la aplicación de presión y con o sin la utilización del metal de aporte. El metal de aporte solo se puede emplear si éste y el metal base son compatibles (en términos de la estructura cristalina) y si existe un contacto átomo a átomo (que solo es posible si las superficies están limpias y libres de material extraño). Si los metales base no son compatibles, es necesario emplear un proceso en el cual no se fundan (como la soldadura fuerte) o un metal de aporte que sea diferente al metal base, pero que se fusione con este último. Siempre que se funde el metal base, se tiene una mezcla de los metales base y de aporte. También es posible que se produzca un efecto calorífico en la estructura o propiedades del metal base próxima a la soldadura. El metal base alterado de esta manera se llama zona alterada por el calor (HAZ heat-affected-zone). [91]

Los diversos trozos o piezas metálicas que se deseen fijar permanentemente entre sí, deben ser sometidas a algún proceso que proporcione uniones resultando lo más fuertes posibles. Para tal fin, los sistemas de soldadura juegan un papel primordial. El calor necesario para unir dos piezas metálicas puede obtenerse a través de distintos medios. Podemos definir dos grandes grupos. Los sistemas de calentamiento por combustión con oxígeno de diversos gases (denominados soldadura por gas), y los de calentamiento mediante energía eléctrica (por inducción, arco, punto, etc.). Las uniones logradas a través de una soldadura de cualquier tipo, se ejecutan mediante el empleo de una fuente de calor (una llama, un sistema de inducción, un arco eléctrico, etc.). Para rellenar las uniones entre las piezas o partes a soldar, se utilizan varillas de relleno, denominadas material de aporte o electrodos, realizadas con diferentes aleaciones, en función de los metales a unir. En la soldadura, las dos o más piezas metálicas son calentadas junto con el material de aporte a una temperatura correcta, entonces fluyen y se funden conjuntamente. Cuando se enfrían, forman una unión permanente. La soldadura así obtenida, resulta con mayor resistencia respecto al material original de las piezas, siempre y cuando la misma esté realizada correctamente. [86]

## 1.7.- BREVE RECUENTO HISTÓRICO DE LA SOLDADURA.

El origen de la soldadura como tecnología para la unión de materiales metálicos se remonta hasta la Edad de Bronce, donde se encuentran los primeros vestigios de procesos de soldadura utilizados para fines ornamentales. En la Edad de Hierro se han encontrado piezas de hierro forjado que habrían sido unidas calentándolas y martillándolas juntas, desarrollándose así la *soldadura por forjado*. En la Edad Media la soldadura en fase sólida se utilizaba para reducir el mineral de hierro a hierro metálico sin necesidad de fundirlo. Resulta difícil de determinar con exactitud en qué país y en qué momento se han desarrollado ciertas técnicas de soldadura en particular, ya que la experimentación ha sido simultánea y continúa en diversos lugares. Aunque los trabajos con metales han existido desde hace siglos, los métodos como los conocemos hoy, datan desde el principio del siglo XX. [92]

En 1801, el inglés Sir H. Davy descubrió que se podía generar y mantener un arco eléctrico entre dos terminales. En 1835, E. Davey, en Inglaterra, descubrió el gas acetileno,

pero para dicha época su fabricación resultaba muy costosa. Aunque 57 años después (1892), el canadiense T. L. Wilson descubrió un método económico de fabricación. El francés H. E. Chatelier, en 1895, descubrió la combustión del oxígeno con el acetileno, y en 1900, los también franceses E. Fouch y F. Picard desarrollaron el primer soplete de oxiacetileno.

En el año 1881, el francés De Meritens logró con éxito soldar diversas piezas metálicas empleando un arco eléctrico entre carbones, empleando como suministro de corriente acumuladores de plomo. Este fue el inicio de muchas experiencias para intentar reemplazar el caldeo en fragua por este nuevo sistema. La gran dificultad hallada para forjar materiales ferrosos con elevado contenido de carbono (aceros), motivó diversos trabajos de investigación de parte de los ingenieros rusos S. Olczewski y F. Bernardos, los que resultaron exitosos en el año 1885.

En dicho año se logró la unión en un punto definido de dos piezas metálicas por fusión. Se utilizó corriente continua, produciendo un arco desde la punta de una varilla de carbón (conectada al polo positivo) hacia las piezas a unir (conectadas al polo negativo). Dicho arco producía suficiente calor como para provocar la fusión de ambos metales en el plano de unión, que al enfriarse quedaban mecánicamente unidos. El operario comenzaba el trabajo de soldadura apoyando el electrodo de carbón, el que estaba provisto de un mango aislante, sobre la parte por soldar hasta producir chisporroteo, y alejándolo de la pieza hasta formar un arco eléctrico continuo.

Para lograr dicho efecto, se debía aplicar una diferencia de potencial suficiente para poder mantener el arco eléctrico a una distancia relativamente pequeña. Una vez lograda la fusión de los metales en el punto inicial de contacto, se comenzaba el movimiento de traslación del electrodo hacia el extremo opuesto, siguiendo el contorno de los metales por unir, a una velocidad de traslación uniforme y manteniendo constante la longitud del arco producido, lo que es equivalente a mantener fija la distancia entre el electrodo y la pieza.

Las experiencias que necesariamente se realizaron para determinar las condiciones óptimas de trabajo para lograr una unión metálica sin defectos, permitieron verificar desde aquel entonces que con el arco eléctrico se podía cortar metal o perforarlo en algún sitio deseado.

Los trabajos de soldadura efectuados no eran eficientes, ya que resultaba difícil gobernar el arco eléctrico, debido a que este se generaba en forma irregular. Continuando con los ensayos en función de obtener mejores resultados, se obtuvo un éxito concluyente al invertir la polaridad de los electrodos (pieza conectada al positivo), debido a que en estas condiciones el arco no se genera desde cualquier punto del electrodo de carbón, sino sólo desde la punta, es decir, en el mismo plano de la unión.

El comportamiento del arco, según la polaridad elegida, llevó en 1889 al físico alemán, el doctor H. Zerener, a ensayar un tipo de soldadura por generación de un arco eléctrico entre dos electrodos de carbón. Como bajo estas condiciones no se lograba buena

estabilidad en el arco producido, adicionó un electroimán, el cual actuaba sobre el mismo dirigiéndolo magnéticamente en el sentido deseado. Ello producía sobre el arco eléctrico un efecto de soplado. Por este motivo se denominó a este tipo de soldadura por arco soplado, encontrándose interesantes aplicaciones en procesos automáticos para chapas de poco espesor. El flujo del arco se regulaba con facilidad, variando la corriente de excitación del electroimán, y por ende variando el campo magnético producido (figura 1.6).

El arco eléctrico resultante era de gran estabilidad. Los dos electrodos de carbón (1) y el electroimán (2) eran parte de un solo conjunto portátil. El metal utilizado como aporte surgía de una tercer varilla metálica (3), la cual se ubicaba por debajo del arco, más cerca de la pieza. Con el calor producido, se fundía el metal de base (5) conjuntamente con el aporte de la varilla, generando la unión (4).

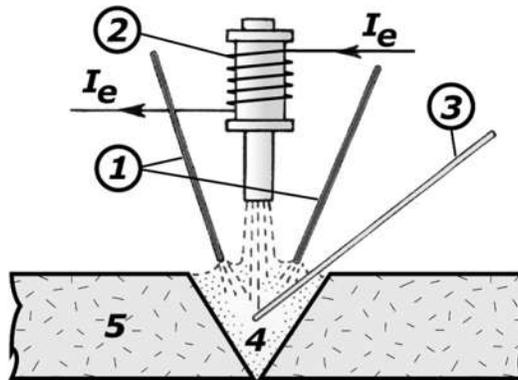


Figura1. 6.- Soldadura por arco soplado (Metodo Zerener).

Este sistema fue utilizado industrialmente por primera vez en el año 1899 por la firma Lloyd & Lloyd de Birmingham (Inglaterra), para soldar caños de hierro de 305 mm de diámetro, los que luego de soldados eran capaces de soportar una prueba hidráulica de 56 atmósferas. Se trabajaba empleando 3 dínamos de 550 Amperes cada uno y con un potencial de 150 Volts, los cuales cargaban una batería de 1.800 acumuladores Plantè, destinados a proveer una fuerte corriente en un breve lapso de tiempo. En los Estados Unidos, en 1902, la primera fábrica que comenzó a utilizar industrialmente la soldadura por arco con electrodo de carbón fue The Baldwin Locomotive Works.

El excesivo consumo de electrodos de carbón y el deseo de simplificar los equipos de soldadura, hicieron que en el año 1891, el ingeniero ruso N. Slavianoff sustituyera los electrodos de carbón por electrodos de metal (figura 1.7). Este cambio produjo mejoras en las uniones de los metales (a nivel metalográfico), al evitar la inclusión de partículas de carbón (aportadas por los mismos electrodos antes utilizados) dentro de la masa de metal fundido, y luego retenidas en la misma al solidificarse.

El método Slavianoff, con algunas mejoras técnicas implementadas en 1892 por el estadounidense C. L. Coffin (quien logró desarrollar el método de soldadura por puntos), ha sido usado hasta la fecha y es la soldadura por arco conocida en la actualidad. A partir de las determinaciones de Slavianoff se continuaron empleando indistintamente electrodos de carbón y/o metálicos.

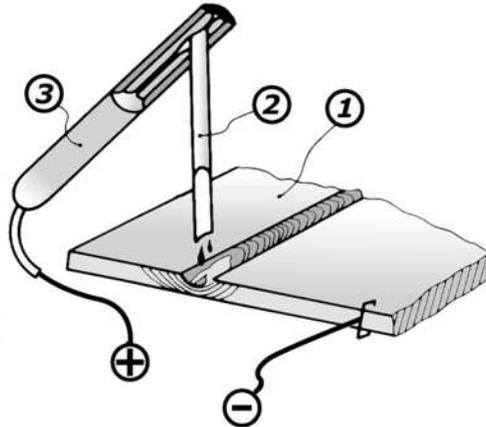


Figura 1. 7.- Soldadura por arco con electrodos metálicos.

En el año 1910 se abandonó definitivamente el electrodo de carbón. Se comenzaron a utilizar electrodos de hierro sin recubrir, pero se obtuvieron resultados deficientes debido a la poca resistencia a la tracción y a su reducida ductilidad. La nociva acción de la atmósfera (oxidación acelerada por el calentamiento) sobre los electrodos sin recubrir durante la formación del arco, llevó a los investigadores a tratar de solucionar dichos inconvenientes. Una de las primeras experiencias en busca de evitar dicho problema, se debió a los ensayos realizados por Alexander, quien pensó en eliminar la acción perniciosa del oxígeno que rodeaba al arco, haciendo que este último se produjera en una atmósfera de gas protector (figura 1.8), donde se observa el metal base a soldar (1), el porta-electrodo con el electrodo ubicado (2), y el abastecimiento de gas (3). Alexander ensayó con diversos gases, logrando buenos resultados con el metanol, pero este requería de un complejo equipamiento, que lo hacía poco viable. Retomando y modificando la idea original de Alexander, en 1907 O. Kjellberg, revistió los electrodos con material refractario aglomerado, rodeando el electrodo con una sustancia sólida que poseía idéntico punto de fusión que el metal de aporte. Al producirse el arco eléctrico, ambas se fundirían simultáneamente formando una cascarilla sobre el metal fundido brindando la adecuada protección contra el oxígeno del ambiente en la etapa de enfriamiento. En 1908, N. Bernardos desarrolló un sistema de electro-escoria que se volvió muy popular en su momento.

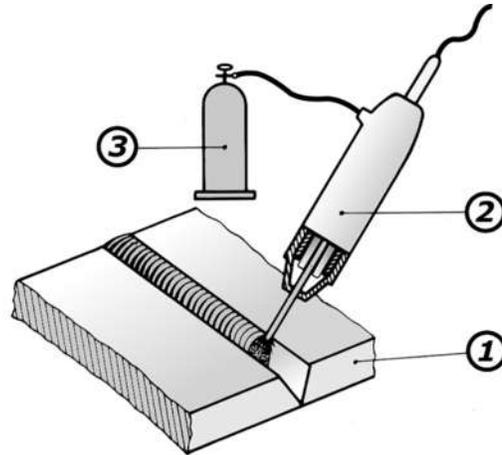


Figura1. 8.- Soldadura por arco con atmósfera de gas (Método Alexander).

Los electrodos fisionables, fueron mejorados nuevamente en 1914 por su creador, el sueco O. Kjellberg junto al inglés A. P. Strohmenger. Quedaron constituidos por una varilla de una aleación metálica (metal de aporte) y un recubrimiento especial a base de asbesto, tal como los que se utilizan en la actualidad (figura 1.9).

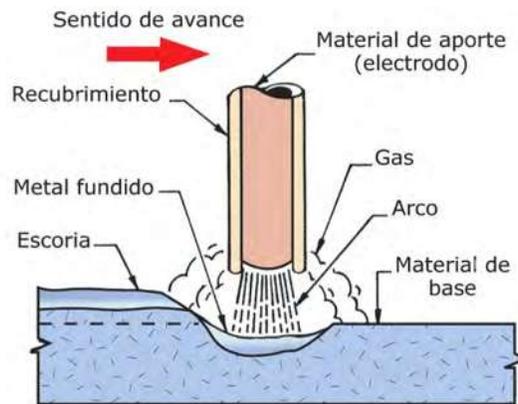


Figura1. 9.- Electrodo metálico con recubrimiento en plena acción.

En 1930, los estadounidenses H. M. Hobart y P. K. Devers desarrollaron el sistema de soldadura con gas inerte, y basado en ello, el doctor Orving Langmuir, ideó la soldadura atómica de hidrógeno. En ésta última, el arco se produce entre dos electrodos insolubles de tungsteno, en una atmósfera de hidrógeno soplando sobre el arco. En la (figura 1.10) se observa la fuente eléctrica (5), la provisión de hidrógeno a presión (4), los electrodos de tungsteno (3), el material de aporte (2) y el material a soldar (1). Por acción térmica, el hidrógeno molecular se descompone en hidrógeno atómico, el que vuelve a su estado primitivo una vez atravesado el arco, transfiriendo el calor de recombinación a las piezas por soldar. Este método se emplea en la actualidad para soldar chapas delgadas.

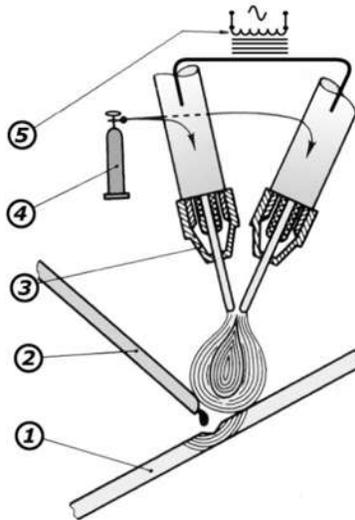


Figura1. 10.- Soldadura atómica con atmósfera de  $H_2$  (Metodo Langmuir).

Una variedad del sistema anterior, fue desarrollado en 1942 por el norteamericano R. Meredith (creador del soplete para TIG, “Gas tungsten arc welding”) y en 1948 por diversos ingenieros (desarrollo del sistema MIG, “Metal inert gas welding” ), incluyen las soldaduras por arco en atmósfera de helio o argón, ambos gases inertes que alejan el oxígeno de la zona por soldar. En estos casos, el gas rodea al electrodo de tungsteno, mientras un electrodo o varilla (en caso de ser necesario), provee el metal de aporte o de relleno (figura 1.11).

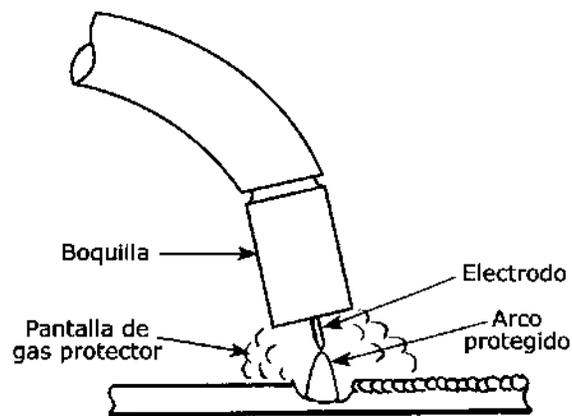


Figura1. 11.- Esquema de un sistema de soldadura bajo gas protector.

Este sistema se utiliza para soldar con éxito aleaciones de magnesio y algunas aleaciones livianas. Los progresos logrados en la industria electrónica, permitieron utilizar dichos adelantos para desarrollar así la soldadura por resistencia (a tope, continua y por puntos); la soldadura por inducción para materiales conductores del calor; la soldadura

dieléctrica para los no conductores y, finalmente, la aluminio-térmica, que resulta una combinación de un sistema de calentamiento con el procedimiento Slavianoff.

La variedad de aplicaciones industriales de los sistemas de soldadura han llegado a un grado tal que inclusive han sustituido en la mayoría de los casos al tradicional forjado y remachado. No solamente significaba una operación más sencilla y rápida, sino que la eliminación del remachado permitió reducir el peso de las construcciones metálicas, al simplificar sus estructuras. La soldadura asegura una reducción de costos apreciable con respecto a los métodos de construcción y reparación empleados antiguamente. Se han resuelto problemas de estanqueidad y rigidez, eliminándose las vibraciones (de difícil resolución en uniones remachadas).

La soldadura eléctrica usada en la actualidad, era desconocida a fines del siglo XIX. Muchas circunstancias influyeron en el extraordinario desarrollo adquirido por la misma. La carrera armamentista, potencializó el desarrollo en los centros de investigación científicos y técnicos, estudios que se cristalizaron en las novedades utilizadas por los distintos países durante la Segunda Guerra Mundial. [92]

## **1.8.- PROCESOS DE SOLDADURA.**

Una soldadura ideal es aquella que presenta una continuidad total entre las piezas unidas y en la que ninguna parte de la unión puede distinguirse del metal en que está hecha. Aunque en la práctica no se alcanza nunca este ideal, pueden hacerse por muchos sistemas soldaduras que presentan un servicio satisfactorio. No todos los procesos de soldadura son igualmente adecuados para un metal, tipo de unión y aplicación determinada, y una gran parte de la habilidad del ingeniero en soldadura consiste en determinar las condiciones esenciales que debe satisfacer una soldadura en particular y elegir el proceso adecuado para realizarla. [93]

Todo proceso de soldadura debe cumplir un cierto número de condiciones. La más importante es que debe suministrarse energía a la unión en alguna forma, generalmente calor, de tal modo que las piezas puedan unirse fundiéndose juntas. El calor puede producirse mediante una llama, un arco, la resistencia al paso de corriente eléctrica, energía radiante o por medios mecánicos. En algunos procesos tales como la soldadura por presión la unión se realiza sin fusión, pero la energía se consume presionando entre sí las piezas a unir y puede utilizarse calor para llevar la zona de la soldadura a una condición plástica. Generalmente se considera fusión como sinónimo de derretimiento, pero tratándose de soldadura es conveniente distinguir en seguida estas dos palabras. Comúnmente la palabra fusión implica el derretimiento y unión subsiguiente, y es posible que las partes de una unión se derritan, pero no se fundan entre sí. [93]

Dos superficies sólo pueden unirse satisfactoriamente si están libres de óxido u otros contaminantes. La limpieza de las superficies antes de la soldadura, aunque ayude, no es usualmente adecuada y una característica de cualquier proceso de soldadura es la disolución o dispersión de la película de impurezas de la superficie. Esto puede hacerse por

acción química de un fundente o por chisporroteo de un arco eléctrico o incluso por medios mecánicos tales como la rotura y frotamiento. Los contaminantes a eliminar de la superficie son de tres tipos: películas orgánicas, gases de adsorción y compuestos químicos del metal base, generalmente óxidos. El calor elimina eficazmente las películas orgánicas y gases de adsorción, de modo que en la mayoría de los procesos de soldadura en los que se emplea calor la película de óxido restante es la de mayor importancia. [93]

Una vez eliminadas, debe evitarse la formación de películas superficiales, especialmente de nitruros, durante el proceso de soldadura. Por esto en casi todos los procesos de soldadura hay algún sistema de excluir la atmosfera durante la ejecución. Si se utiliza un fundente para la limpieza de las superficies fundidas de la unión, éste lleva a cabo también la función de protección. Si no se emplea fundente la protección puede hacerse mediante un cojín de gas inerte, o gas que no forme compuestos refractarios con el metal base. La atmósfera puede excluirse mecánicamente, soldando con las superficies a unir en estrecho contacto, y lo último en protección contra la atmosfera se logra eliminándola totalmente soldándola en el vacío. Cuando la operación de la soldadura se realiza a gran velocidad y con un calentamiento tan limitado que no hay tiempo para una oxidación apreciable, puede ser necesaria la protección. En algunos procesos es posible, mediante adiciones de aleantes en el baño de soldadura, eliminar el metal fundido contaminado antes de completarse la unión o corregir las propiedades del metal de la soldadura. [93]

Otra condición importante es que la unión producida por el proceso debe tener unas propiedades metalúrgicas satisfactorias. En los métodos que implican la fusión de alguna parte de la unión es frecuentemente necesario añadir desoxidantes o aleantes, en forma análoga a como se hace en fundición. A menudo el material a soldar requiere una composición controlada. Algunas aleaciones, pocas afortunadamente, son insoldables por casi todos los procesos; pero otras muchas sólo son aptas para la soldadura si su composición está comprendida dentro de límites muy estrechos. [93]

Resumiendo, cualquier proceso de soldadura debe cumplir las cuatro condiciones siguiente:

- Un aporte de energía para crear la unión por fusión o presión.
- Un mecanismo para eliminar la contaminación de las superficies a unir.
- Protección contra la contaminación por la atmosfera o sus efectos.
- Control metalúrgico de la soldadura.

Los procesos de soldado pueden clasificarse según los sistemas utilizados para satisfacer las cuatro condiciones básicas, especialmente las tres primeras. La energía para la soldadura es casi siempre suministrada como calor, de modo que las divisiones pueden hacerse de acuerdo con los métodos por los cuales se genere el calor localmente. Estos métodos pueden definirse y agruparse de la forma siguiente:

- Mecánicos. El calor se genera por impacto o fricción o es liberado por deformación elástica o plástica del metal.
- Termoquímicos. Reacciones exotérmicas, llamas y arcos de plasma.
- Resistencia eléctrica. El calor es generado por el paso de una corriente eléctrica, introduciéndose directamente a través del metal a unir, o bien por una corriente inducida en el metal base.
- Arco eléctrico. Tanto arcos de corriente continua como de corriente alterna con electrodos consumibles o no.
- Energía radiante. Esta categoría se sugiere para cubrir los nuevos procesos tales como la soldadura por láser y por haz de electrones y otros que aún pueden desarrollarse. El hecho fundamental en los proceso de energía radiante consiste en que la energía se concentra sobre la pieza a trabajar y el calor se genera solamente donde se intercepta el haz enfocado.

En la figura 1.12 se muestra la clasificación general de los procesos de soldadura y en la figura 1.13 se muestra la carta maestra de los procesos de soldadura, esta clasificación y carta maestra fueron realizadas por la AWS.



Figura1. 12.- Clasificación general de los procesos de soldadura.



Figura1. 13.- Carta maestra de los procesos de soldadura (AWS).

### 1.8.1.- SOLDADURA DE ARCO.

La soldadura de arco o soldadura eléctrica es el proceso de más amplia aceptación como el mejor, el más económico, el más natural y el más práctico para unir metales. En el proceso de soldadura manual por arco que es de uso más común, el soldador obtiene un electrodo adecuado, sujeta el cable de tierra a la pieza de trabajo, y ajusta la corriente eléctrica para "hacer saltar el arco", es decir, para crear una corriente intensa que salte entre el electrodo y el metal. En seguida mueve el electrodo a lo largo de las líneas de unión del metal que ha de soldar, dando suficiente tiempo para que el calor del arco funda el metal. El metal fundido procedente del electrodo, o metal de aporte, se deposita en la junta y junto con el metal fundido de los bordes se solidifica para formar una junta sólida. El soldador selecciona el electrodo (metal de aporte) que ha de usar para producir el arco de acuerdo con las especificaciones del trabajo. [94]

Existen varios procedimientos de soldadura de arco. La soldadura por arco de carbón es la primera técnica moderna de soldadura. En este proceso se establece un arco entre un electrodo de carbón puro y la pieza de trabajo conectada a tierra, o entre dos electrodos de carbón que casi se unen cerca de la superficie por soldar. Los electrodos de carbón no se consumen en el proceso. Si se necesita metal de aporte para realizar la soldadura, deben usarse electrodos metálicos para soldar. En la actualidad, sin embargo, el

proceso del arco de carbón se aplica primordialmente para cortar o para generar ranuras en metales. [94]

Al proceso del arco de carbón le siguió rápidamente el desarrollo de la soldadura por arco metálico, en la cual se utiliza una varilla de metal consumible como electrodo. Al principio los electrodos eran varillas metálicas desnudas, y esto causaba problema significativo para la estabilización del arco. El desarrollo de los recubrimientos en los electrodos, conocidos comúnmente como fundente, resolvió en gran parte los problemas de estabilización del arco, y condujo a lo que se conoce como soldadura de arco metálico protegido, que es el proceso eléctrico de utilización más amplia. Al calentarse, el fundente se evapora, formando una barrera protectora en torno al arco y a la soldadura. El gas protector impide que el oxígeno y el nitrógeno del aire formen con el metal soldado óxidos y nitruros debilitadores. El desarrollo del proceso manual de arco metálico protegido pronto se aplicó a las máquinas soldadoras semiautomáticas y automáticas. [94]

El desarrollo posterior de los conceptos que respaldaban la soldadura de arco metálico protegido condujo a la soldadura de arco con atmósfera protectora de gas. Existen dos de estos procedimientos. En ambos, los gases protectores se obtienen de una fuente separada (un cilindro), y el arco se establece entre electrodos metálicos desnudos y la pieza de trabajo aterrizada o conectada a tierra. Los gases salen de un collarín protector enfrente del electrodo y en torno al mismo, para formar la atmósfera protectora. En la soldadura de arco de tungsteno con gas, los electrodos son de tungsteno no consumible. La atmósfera protectora se forma por medio de gases de aporte externo, y el metal de aporte necesario se suministra por medio de varillas de soldadura. En la soldadura de arco metálico con gas, el electrodo es un metal de aporte continuo, protegido por gases de aportación externa.

Existen otros varios procesos de soldadura de arco, tales como la soldadura de arco sumergido, la soldadura con hidrógeno atómico y la soldadura de arco con plasma, pero los mencionados anteriormente son los más empleados. [94]

### **1.8.2.- SOLDADURA A GAS.**

La soldadura a gas, o soldadura a la llama, utiliza una llama de intenso calor producida por la combinación de un gas combustible con aire u oxígeno. Los gases combustibles de uso más común son el acetileno, el gas natural, el propano y el butano. Muy a menudo, los combustibles se quemán con oxígeno, lo que permite obtener temperaturas de combustión mucho mayores.

La soldadura oxiacetilénica es el proceso más común de soldadura a gas. El oxígeno y el acetileno, combinados en una cámara de mezclado, arden en la boquilla del soplete produciendo la temperatura de llama más elevada (alrededor de 6000°F, la cual rebasa el punto de fusión de la mayoría de los metales). Por tanto, la operación de soldar puede realizarse con o sin metal de aporte. Las partes pueden fundirse y ponerse en contacto a medida que se va realizando la operación de fusión con el soplete; al retirar el soplete, las partes metálicas quedan unidas al enfriarse. Si se necesita metal de aporte para realizar una soldadura, se seleccionan las varillas de soldadura atendiendo las

especificaciones del trabajo, y se funden con el calor del soplete. La selección de las varillas de soldadura apropiadas, de las boquillas para el soplete, los ajustes del regulador para la alimentación del oxígeno y el acetileno y la posición para soldar, constituyen aspectos de la experiencia y el conocimiento aplicados al proceso.

Las desventajas de la soldadura con gas combustible giran en torno al hecho de que ciertos metales reaccionan desfavorablemente, y hasta violentamente, en presencia del carbono, el hidrógeno o el oxígeno, todos ellos presentes en el proceso de soldadura con gas combustible. La soldadura a gas es también más fría, más lenta y más deformante que la soldadura con arco. Sin embargo, para aplicar soldadura en lugares difíciles de alcanzar, o con metales que tienen puntos de fusión más bajos, tales como el plomo a metales en lámina delgada, la soldadura a gas es con frecuencia más eficaz que los demás procesos. En combinación con una corriente de oxígeno o de aire, el soplete oxiacetilénico es también un medio excelente para el corte y ranurado tipo gubia. [94]

### **18.3.- SOLDADURA POR RESISTENCIA.**

La soldadura por resistencia implica la generación de calor pasando corriente a través de la resistencia causada por el contacto entre dos o más superficies de metal. Se forman pequeños charcos de metal fundido en el área de soldadura a medida que la elevada corriente (1.000 a 100.000 A) pasa a través del metal. En general, los métodos de la soldadura por resistencia son eficientes y causan poca contaminación, pero sus aplicaciones son algo limitadas y el costo del equipo puede ser alto. La soldadura por puntos es un popular método de soldadura por resistencia usado para juntar hojas de metal solapadas de hasta 3 mm de grueso. Dos electrodos son usados simultáneamente para sujetar las hojas de metal juntas y para pasar corriente a través de las hojas. Las ventajas del método incluyen el uso eficiente de la energía, limitada deformación de la pieza de trabajo, altas velocidades de producción, fácil automatización, y el no requerimiento de materiales de relleno. La fuerza de la soldadura es perceptiblemente más baja que con otros métodos de soldadura, haciendo el proceso solamente conveniente para ciertas aplicaciones. Es usada extensivamente en la industria de automóviles. Los carros ordinarios pueden tener varios miles de puntos soldados hechos por robots industriales. Un proceso especializado, llamado soldadura de choque, puede ser usado para los puntos de soldadura del acero inoxidable.

Como la soldadura de punto, la soldadura de costura confía en dos electrodos para aplicar la presión y la corriente para juntar hojas de metal. Sin embargo, en vez de electrodos de punto, los electrodos con forma de rueda, ruedan a lo largo y a menudo alimentan la pieza de trabajo, haciendo posible las soldaduras continuas largas. En el pasado, este proceso fue usado en la fabricación de latas de bebidas, pero ahora sus usos son más limitados. Otros métodos de soldadura por resistencia incluyen la soldadura de destello, la soldadura de proyección, y la soldadura de volcado. [94]

#### 1.8.4.- SOLDADURA FUERTE.

La soldadura fuerte es otro de los grupos generales de procesos de soldadura que incluyen los procesos con soplete, con horno, por inducción, por inmersión, por la resistencia, de doble arco de carbón, de flujo y soldadura fuerte en bloque. Esta soldadura se puede emplear para unir casi todos los metales y combinaciones de metales desiguales, aunque no todas las combinaciones de metales desiguales resultan satisfactorias (como al soldar aluminio y magnesio o con otros metales). En la soldadura fuerte, la coalescencia se produce al calentar a más de  $840^{\circ}F$  ( $450^{\circ}C$ ) pero a menos de los puntos de fusión de los metales que se están uniendo.

El metal no ferroso de aporte que se utiliza tiene un punto de fusión inferior al metal base, y el metal de aporte se distribuye en las uniones estrechamente ajustadas a tope o sobre puestas por atracción capilar. La limpieza de las uniones es esencial para lograr una buena soldadura. Por lo general, es necesario emplear un fundente o determinada atmosfera para controlar la limpieza de las superficies. El metal de aporte se puede sostener y alimentar con la mano hacia la unión (alimentación de frente) o se puede colocar con anticipación en la forma de anillos, arandelas, calzas, trozos, etc.

Anteriormente, la soldadura fuerte con metales de aporte del tipo de aleación de plata se conocía como soldadura con plata o soldadura dura. De modo análogo la soldadura con zinc se le mencionaba como soldadura fuerte con zinc. Estos términos han caído en desuso ya que el de soldadura fuerte se refiere en forma adecuada a la que se realiza por el flujo del metal de aporte fundido, por atracción capilar. La soldadura fuerte no se debe confundir con la soldadura con latón. Esta última es un método para soldar con un metal de aporte que se funde a menos del punto de fusión del metal base, pero el metal de aporte no se distribuye en el metal por acción capilar. [91]

#### 1.8.5.- SOLDADURA POR FICCIÓN.

La soldadura por fricción, también llamada soldadura por inercia, es un procedimiento en que la energía cinética acumulada en una de las piezas se utiliza en la generación de calor necesario para conseguir la fusión. Las dos piezas a enlazar se disponen alineadas y con los bordes a una cierta distancia. Una permanece fija, sujeta en unas mordazas adecuadas, y la otra se monta sobre un plato giratorio.

El miembro giratorio se lleva hasta una cierta velocidad, de forma que adquiera suficiente energía cinética. Entonces se desembraga el mecanismo de accionamiento y se empuja una pieza contra la otra bajo una determinada presión axial. En este momento, la energía cinética de la pieza giratoria se convierte en calor como consecuencia del rozamiento. Las superficies a unir y sus inmediaciones adquieren un estado pastoso y bajo la acción de la presión se consigue una soldadura por forja.

La soldadura por fricción presenta diversas ventajas sobre los sistemas convencionales por chisporroteo y a tope. Permite obtener soldaduras más perfectas, a mayor velocidad y con menor costo. Requiere menos consumo de corriente y se eliminan las costosas mordazas de cobre necesarias en los sistemas convencionales de soldadura a tope. También es menor el acortamiento de las piezas y la formación de sobre espesores y rebarbas. Por último, la zona térmicamente afectada es mucho más reducida, con lo que apenas se afecta las características iniciales del metal base. El procedimiento puede aplicarse a muy diversos metales, tanto en uniones homogéneas como heterogéneas. La resistencia de la junta es, normalmente, igual a la de los metales base. [95]

#### **1.8.6.- SOLDADURA CON RAYO LÁSER.**

En la soldadura por rayo láser la fusión se consigue mediante la aplicación de un haz de luz muy intenso y concentrado sobre una zona de la pieza de diámetro aproximadamente igual al de un cabello. Este haz altamente concentrado genera, en el punto de focalización, una potencia de más de mil millones de volts por centímetro cuadrado. Gracias a la excelente localización y control de la aportación de calor, el rayo láser puede fundir metales de alto punto de fusión y soldar en las proximidades de alambres barnizados sin dañar las características aislantes del barniz. Puesto que la aportación de calor es extremadamente baja en comparación con otros procedimientos de soldeo, la amplitud de la zona térmicamente afectada y los efectos del calor sobre las zonas adyacentes a la junta se reduce al mínimo. De esta forma pueden soldarse aleaciones tratadas térmicamente sin modificar sus características iniciales. Normalmente la soldadura puede tocarse con la mano inmediatamente después de realizada.

El láser puede aplicarse a la obtención de uniones homogéneas o heterogéneas, sobre metales como el cobre, níquel, tungsteno, aluminio, acero inoxidable, titanio, coulomb, etc. Además, el láser puede pasar a través de sustancias transparentes sin afectarlas, lo que hace posible la soldadura de metales recubiertos de vidrio o plástico, sin afectar el revestimiento.

Normalmente, las principales aplicaciones de la soldadura con láser suelen encontrarse en las industrias electrónica y aeroespacial, en las que se requiere un severo control de las uniones. La principal limitación del procedimiento radica en su pequeño poder de penetración. En el soldado de metales los equipos disponibles en la actualidad no suelen aplicarse a espesores mayores de medio milímetro. [95]

## **CAPITULO 2.- PROCESO DE SOLDADURA PARA ALEACIONES DE ALUMINIO.**

### **2.1.- INTRODUCCIÓN.**

Una de las características del aluminio y sus aleaciones es que tienen una gran afinidad con el oxígeno. Los átomos del aluminio se combinan con el oxígeno del aire para formar en un punto alto de fundido un óxido que cubre la superficie del metal. Esta característica, no obstante, es la clave de la alta resistencia del aluminio a la corrosión. Es por esta resistencia que el aluminio puede ser utilizado en aplicaciones donde el acero se corroe rápidamente.

El aluminio puro se derrite a una temperatura de 1200 F (650 C). El óxido que protege el metal se derrite a una temperatura de 3700 F (2037 C). Esto quiere decir que debe limpiarse el óxido del metal antes de comenzar la soldadura. Cuando los procesos de soldadura GMA o GTA son utilizados, el chorro de gas inerte cubre el baño de fusión de la soldadura, lo que excluye todo el aire del área de soldadura. Esto evita la re-oxidación del aluminio derretido. Ninguno de estos procesos de soldadura requiere un fundente.

El aluminio tiene una alta conductividad térmica. El aluminio y sus aleaciones pueden conducir rápidamente el calor lejos del área de soldadura. Por esta razón, es necesario aplicar el calor mucho más rápido en el área soldada para conducir el aluminio a la temperatura de soldadura. El calor intenso del arco eléctrico convierte este método en el mejor para soldar aluminio. Cuando las soldaduras de aluminio se solidifican, se encogen en volumen en 6%. El estiramiento que resulta de este encogimiento puede crear una deformación excesiva en la junta a no ser que se tomen consideraciones antes de unir el metal. Pueden formarse grietas porque la contracción térmica es más o menos dos veces la del acero. El metal cercano calentado se expande cuando la soldadura tiene lugar. Esta expansión del metal que rodea el área soldada puede reducir la apertura de raíz en las juntas a tope durante el proceso. La contracción que resulta después de enfriarse, más el encogimiento del metal soldado, crea una tensión e incrementa las grietas.

La forma del baño de fusión de la soldadura y el número de cordones pueden afectar la cantidad de deformaciones. Se reduce la deformación con soldaduras cuadradas de tope de dos pasadas. Otros factores que tienen una influencia en la soldadura son la velocidad de soldadura, el uso apropiado de las ranuras para sujeciones y la utilización de enseres fijos para apoyar el aluminio mientras está siendo soldado y la realización de soldadura de puntos aislados para mantener las piezas alineadas. [96]

La contracción del aluminio durante su solidificación y su elevado coeficiente de expansión térmica provoca cambios en la forma de las piezas de aluminio durante el calentamiento o el enfriamiento que puede llevar consigo la aparición de grietas, deformaciones o tensiones residuales. Ello se ve compensado, sin embargo, por una temperatura en la soldadura relativamente menor. Siempre habrá que tener esto en cuenta a la hora de definir el proceso de soldado. Otro aspecto que diferencia al aluminio con el

acero, es que no cambia de color cuando cambia la temperatura, lo cual añade un punto de dificultad adicional.

Por último, es remarcable el hecho que el aluminio tiene una gran facilidad, en estado líquido, de reaccionar con el vapor de agua del ambiente absorbiendo hidrógeno, que producirá, tras la solidificación del metal, la aparición de poros. Éste es otro hecho que debe evitarse procurando efectuar la soldadura en ambientes secos, y empleando un proceso que proteja el baño de soldadura. [97]

## **2.2.- SOLDADURA CON ARCO METÁLICO Y GAS (GMAW).**

En la década de 1940 se otorgó una patente a un proceso que alimentaba electrodo de alambre en forma continua para realizar soldadura con arco protegido por gas. Este resultó el principio del proceso MIG (siglas del inglés de Metal Inert Gas), que ahora posee la nomenclatura AWS y CSA de soldadura con gas y arco metálico GMAW (siglas del inglés de Gas Metal Arc Welding). Este tipo de soldadura se ha perfeccionado desde sus comienzos. En algunos casos se utilizan electrodos desnudos y protección por gas, y en otros casos se utilizan electrodos recubiertos con fundentes, similares a los utilizados en los procesos de arco protegido convencionales. Existe como alternativa, electrodos huecos con núcleo de fundente. Para algunos procesos particulares, se pueden combinar el uso de electrodos con fundente (recubierto o hueco) juntamente con gas protector. En este sistema se reemplaza el Argón (utilizado en el proceso TIG) por Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>). El electrodo es alimentado en forma continua desde el centro de la pistola para soldadura. Actualmente este proceso de soldadura, a nivel industrial, es uno de los más importantes.

La principal ventaja de este sistema radica en la rapidez. Raramente con el sistema MIG resulta necesario detener el proceso de soldadura como ocurre con el sistema de arco protegido y TIG. Otras de las ventajas son: la limpieza lograda en la soldadura (la mayor de todos los sistemas de soldadura por arco), la alta velocidad de soldado y, en caso de trabajar con electrodo desnudo, la ausencia total de escoria. [93] El proceso GMAW es el más utilizado para la soldadura de aluminio en la actualidad. Se combina la velocidad con la versatilidad y la capacidad de hacer soldaduras de alta calidad. El proceso GMAW es aplicable a espesores más gruesos de aluminio. Es mucho más rápido que la soldadura por arco de tungsteno con gas.

Varios factores deben ser mencionados con respecto al proceso de soldado GMAW. El cable del electrodo debe estar limpio. Si se produce porosidad, es posible que provenga de la humedad absorbida en la capa de óxido del hilo del electrodo. Argón puro se usa normalmente para la soldadura de aluminio por GMAW. En ocasiones, las fugas en el sistema de gas, en la pistola o conjunto de cable, permitirá que el aire sea aspirado en el argón, que hará que aparezca la porosidad. El control de flujo de gas de purga y post-gas debe ser utilizado. El ángulo de la antorcha o pistola es crítico. Un ángulo de 30 grados es recomendable. La punta del alambre del electrodo debe ser de gran tamaño para el aluminio. El equipo de alimentación de alambre para la soldadura de aluminio debe de tener un buen ajuste para una alimentación de alambre eficiente. Forros de nylon se debe

utilizar en ensamblajes de cable. Rodillos de accionamiento apropiados deben ser seleccionados para el alambre de aluminio y por el tamaño del alambre de electrodo. La pistola de carrete se utiliza para los hilos de los electrodos de pequeño diámetro. La refrigeración por medio de agua en las pistolas son obligatorias a excepción de bajas corrientes en la soldadura.

En las dos técnicas, el gas sirve como una barrera que protege el arco del aire, principal causante de oxidación, la diferencia es que en MIG no reacciona con el metal ni influye en las propiedades del fundido, además por ser inerte es más estable, la soldadura tiene una menor penetración, mejor acabado, no causa deformaciones en las piezas delgadas y es especial para trabajos en materiales delicados. Se utiliza en la reparación de ejes, fabricación de tanques, carrocerías, rines de automóviles, embarcaciones y aeronaves. Gracias a sus dos formas de aplicación, la técnica G.M.A.W. se ha convertido en un proceso versátil, que permite soldar desde los espesores más finos hasta los más gruesos (a partir de 0.03mm) tanto en metales ferrosos como no ferrosos; específicamente el sistema MIG se emplea para unir piezas delgadas de aluminio, cobre, magnesio, inoxidable y titanio, mientras el MAG es ideal para la mayoría de aceros y hierros al carbono y bajo carbono, en todas las dimensiones. El proceso MIG opera en D.C. (corriente directa) usualmente con el alambre como electrodo positivo. Esto es conocido como "Polaridad Negativa" (reverse polarity), la "Polaridad Positiva" (straight polarity) es raramente usada por su poca transferencia de metal de aporte desde el alambre hacia la pieza de trabajo. Las corrientes de soldadura varían desde unos 50A hasta 600A en muchos casos en voltajes de 15V hasta 32V, un arco auto-estabilizado es obtenido con el uso de un sistema de fuente de poder de potencial constante (voltaje constante) y una alimentación constante del alambre.[98]

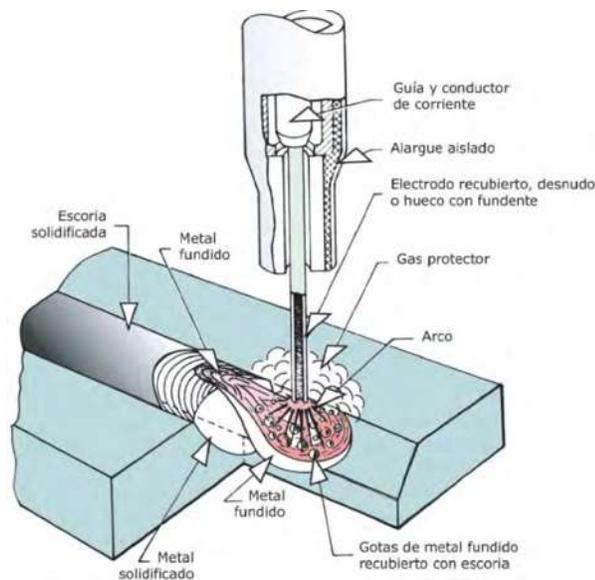


Figura2. 1.- Imagen del proceso GMAW.

### 2.3.- MODOS DE TRANSFERENCIA DEL METAL ENTRE EL ELECTRODO Y EL CORDÓN.

El proceso básico MIG incluye cuatro técnicas muy distintas para la transferencia de metal: Transferencia por "Corto Circuito", transferencia "Globular", la transferencia de "Arco Rociado (Spray Arc)" y la transferencia por "Arco Pulsado". Estas técnicas describen la manera en la cual el metal es transferido desde el alambre hasta la soldadura fundida. En la transferencia por corto circuito, también conocido como "Arco Corto", "Transferencia espesa" y "Micro Wire", la transferencia del metal ocurre cuando un corto circuito eléctrico es establecido, esto ocurre cuando el metal en la punta del alambre hace contacto con la soldadura fundida.

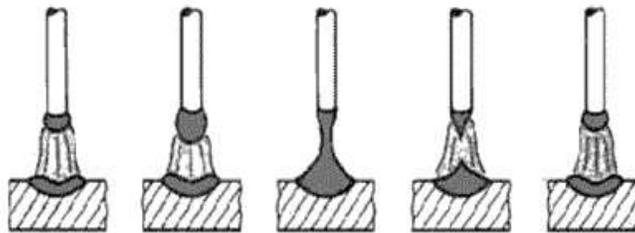


Figura2. 2.- Transferencia por corto circuito.

En la transferencia por rociado (spray arc) diminutas gotas de metal fundido llamadas "Moltens" son arrancadas de la punta del alambre y proyectadas por la fuerza electromagnética hacia la soldadura fundida.

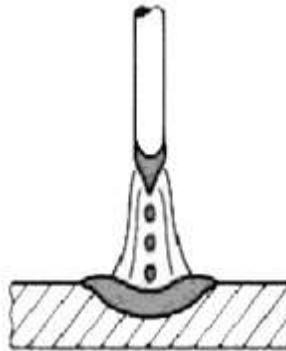


Figura2. 3.- Transferencia por rociado.

Mientras que en la transferencia globular el proceso ocurre cuando las gotas del metal fundido son lo suficientemente grandes para caer por la influencia de la fuerza de gravedad.

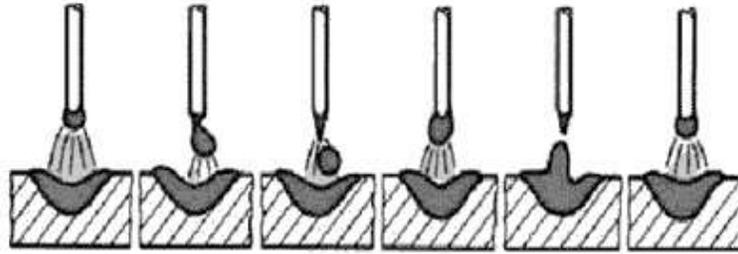


Figura2. 4.- Transferencia globular.

La transferencia por arco pulsado, consiste en superponerle a la corriente de base relativamente débil, aunque suficiente como para mantener el arco y que se mantiene en todo momento, pulsaciones de una corriente más intensa, denominada corriente de pico, que aseguran la transferencia del metal por proyección. De hecho la corriente de base sirve para precalentar y acondicionar el alambre que va avanzando continuamente, mientras que la corriente de pico hará que salte la gota.

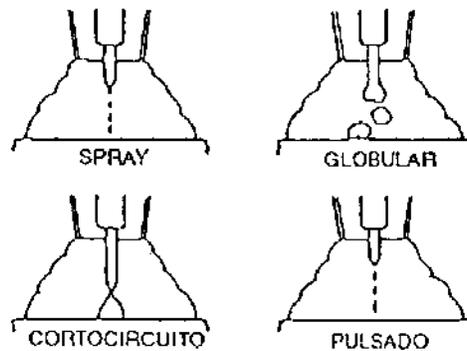


Figura2. 5.- Transferencia por arco pulsado.

Los factores que determinan la manera en que los metales son transferidos son la corriente de soldadura, el diámetro del alambre, la distancia del arco (voltaje), las características de la fuente de poder y el gas utilizado en el proceso.[99]

## 2.4.- GASES DE PROTECCIÓN.

La función primaria del gas de protección es proteger el arco y el baño de soldadura fundida a partir del oxígeno atmosférico y nitrógeno. Si no se protegen adecuadamente, forma óxidos y nitritos, y los resultados de la formación de estos se ven reflejados en las deficiencias de la soldadura tales como la porosidad, inclusión de escoria y la fragilidad de la soldadura. Muchos otros factores afectan a la elección del gas de

protección estos factores, no necesariamente por este orden, son: el material a soldar, modo de transferencia del material deseado, penetración y forma del cordón, velocidad de soldado y precio del gas.

Los gases de protección son materiales consumibles que se utilizan en los procesos de soldadura con arco de tungsteno y gas y de soldadura con arco metálico y gas. Aunque en teoría puede usarse cualquiera de los gases inertes, dióxido de carbono, helio, argón, neón, xenón o kriptón, los únicos que puede disponerse en volumen suficiente para los usos prácticos en la soldadura son el helio y el argón. Estos gases dan resultados satisfactorios de protección para los metales más reactivos, tales como el aluminio, el magnesio, el berilio, el coulomb (niobio), el tántalo, el titanio y el circonio.

Aunque los gases inertes puros protegen al metal a cualquier temperatura, contra su reacción con los elementos de la atmósfera (el aire), no son adecuados para todas las aplicaciones de soldadura.

Para el aluminio, los gases nobles (monoatómicos) Argón y Helio (solos o una mezcla de ambos) se han verificado como los más apropiados. Las diferencias principales entre ambos gases son el peso atómico ( $Ar=40$ ,  $He=4$ ) y el voltaje en el arco. La potencia del arco, la concentración de calor y con ello, la penetración y la fusión, son superiores con el Helio, para un valor de corriente igual que con argón; sin embargo, el arco producido con el Argón es siempre mucho más estable. Asimismo, y dada la baja densidad del Helio, requiere de un volumen del orden de 2.5 a 3 veces mayor que el Argón para obtener el mismo flujo y por consiguiente la misma protección. [96-99]

Además de lo anterior, el gas protector realiza una serie de funciones importantes, como son:

- Formar una campana de protección para el metal líquido contra la atmósfera.
- Estabilizar el arco.
- Afecta la forma de la columna de plasma y permite los diferentes modos de transferencia.

Así, el gas de protección y su velocidad de flujo, afectan al proceso de la siguiente manera:

- Los parámetros de soldadura; amperaje, voltaje y “stickout”.
- Modo de transferencia de metal; corto circuito, globular ó spray.
- Estabilidad del arco de soldadura.
- Apariencia del cordón; humectabilidad, perfil y penetración.
- Niveles de salpicadura.
- Generación de humos y vapores.
- Velocidad de avance/tasa de fusión del electrodo.
-

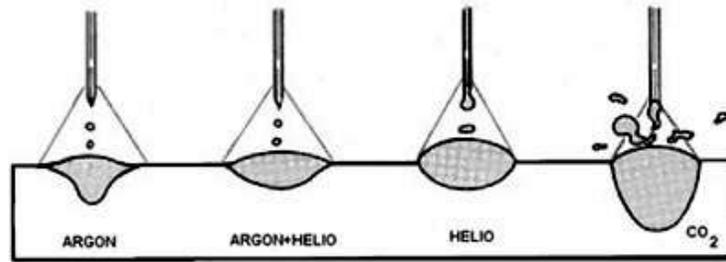


Figura2. 6.- Formas de penetración del metal con los distintos gases de protección.

Tabla 1.- Gases de protección para una transferencia por spray GMAW.

Metal	Gas de Protección	Espesor	Ventajas
Aluminio	100 % argón	0 a 25 mm	Mejor transferencia de metal y estabilidad del arco; menos salpicaduras
	35 % argón 65 % helio	25 a 76 mm	Calor más alto de entrada que el argón puro; mejora de las características de fusión un poco con la serie 5XXX de aleaciones Al-Mg.
	25 % argón 75 % helio	Arriba de 76 mm	Más alta entrada de calor, reduce al mínimo la porosidad.

## 2.5.- MATERIALES DE APORTE.

Los electrodos / alambres empleados son de pequeños diámetros y se suministran en bobinas para colocar directamente en los sistemas de alimentación. Para conseguir una alimentación suave y uniforme el alambre debe estar bobinado en capas perfectamente planas y es necesario que no esté tenso durante su suministro, sino que exista una cierta holgura entre la bobina y la vuelta que se está desenroscando. Al ser los alambres de pequeño diámetro y la intensidad de soldado bastante elevada, la velocidad de alimentación del electrodo suele ser elevada para la mayoría de metales, para compensar la elevada velocidad de fusión del electrodo. Para el aluminio, la velocidad de alimentación es de dos

a tres veces la del acero siempre superiores a los 10 m/min), dado su inferior punto de fusión.

En la soldadura MIG/MAG, el electrodo consiste en un hilo macizo o tubular continuo de diámetro que oscila entre 0,8 y 1,6 mm. Los diámetros comerciales son 0,8; 1,0; 1,2; y 1,6 mm, aunque no es extraño encontrarse en grandes empresas con el empleo de diámetros diferentes a estos, y que han sido fabricados a requerimiento expreso. En ciertos casos de soldado con fuerte intensidad, se emplea hilo de 2,4 mm de diámetro. Debido a sus pequeños diámetros la relación superficie/volumen es muy alta, por lo que pequeñas partículas de polvo, suciedad o grasa pueden suponer una importante cantidad en relación con el volumen aportado, de allí que sea muy importante la limpieza.

Debido a la potencia relativamente elevada empleada en la soldadura bajo gas protector, la penetración del material en el metal de base es también alta. La penetración está pues, en relación directa con el espesor del material de base y con el diámetro del hilo utilizado. El efecto de la elección de un diámetro de hilo muy grande, es decir, que exija para su fusión una potencia también elevada, producirá una penetración excesivamente grande, y por esta causa se puede llegar a atravesar o perforar la pieza a soldar. Por el contrario, un hilo de diámetro demasiado pequeño, que no admite más que una potencia limitada, dará una penetración poco profunda, y en muchos casos una resistencia mecánica insuficiente. El material de aportación es, en general, similar en composición química a la del metal base, variándose ligeramente para compensar las pérdidas producidas en los diferentes elementos durante el soldado, o mejorar alguna característica del metal de aportación. En otras ocasiones se requieren cambios apreciables o incluso la utilización de alambres de composición totalmente diferente.[99]



Figura2. 7.- Micro alambres.

### 2.5.1.- MATERIALES DE APORTE PARA LAS ALEACIONES DE ALUMINIO.

El uso final de la soldadura y el rendimiento deseado, son consideraciones importantes en la selección de un material de aporte para una aleación de aluminio. Muchas aleaciones de metal base y combinaciones de aleación se pueden unir utilizando cualquiera de varios metales de aporte existentes, pero sólo uno puede ser el óptimo para una aplicación específica. Los principales factores considerados comúnmente cuando se selecciona un metal de aporte para una aleación de aluminio, son:

- Ausencia de grietas.
- Resistencia a la tracción o al corte del metal de soldadura.
- Ductilidad en la soldadura.
- Temperatura de servicio.
- Resistencia a la corrosión.
- Color del cordón después de la anodización.

En general, las aleaciones de aluminio no tratadas térmicamente se pueden soldar con un metal de aporte de las mismas composiciones básicas como la aleación de base. Las aleaciones tratadas térmicamente son más complejas metalúrgicamente y más sensibles a "el calor por cortocircuito", esto mediante el agrietamiento durante el ciclo de enfriamiento de la soldadura.

También, un metal de aporte diferente que tiene una temperatura de fusión más baja y una fuerza similar o menor que el metal base se utiliza para las aleaciones tratadas térmicamente. Al permitir que los constituyentes de bajo punto de fusión del metal base adyacente a la soldadura se solidifiquen antes de que el metal de la soldadura, esto minimizan las tensiones en el metal base durante el enfriamiento y las grietas intergranulares tienden a ser reducidas.

Un contenido alto de silicio y de magnesio en las aleaciones de aluminio, son fáciles de soldar debido a su baja sensibilidad a la fisuración. Las aleaciones de la serie 6XXX son muy sensibles a la fisuración si la composición de metal de aporte en la soldadura se mantiene próxima a la composición de metal de base. Estos se pueden soldar fácilmente si se biselada para permitir un exceso de mezcla de metal de aporte con el metal base. Para la aleación 6061, el metal de aporte en la soldadura debe poseer por lo menos 50% de metal de aporte 4043 o 70% de aleación 5356 para el metal de aporte.

Las soldaduras de filete permiten esta mezcla con el metal de aporte de forma natural, siempre que el metal base no se encuentre derretido excesivamente. Los metales de aporte con un alto contenido de silicio (serie 4XXX) no debe ser utilizado para soldar aleaciones de alto contenido de magnesio serie 5XXX; una presencia excesiva de silicio-magnesio eutécticos en el desarrollo de la soldadura disminuye la ductilidad de la soldadura y aumenta la sensibilidad de grietas. Una mezcla de alto contenido de magnesio con aleaciones de alto contenido de cobre dan como resultados una alta sensibilidad de

grietas en la soldadura y una baja ductilidad en la soldadura. En muchos casos varios metales de aporte que están disponibles solo cumplen con las mínimas propiedades mecánicas en la soldadura. Algunas propiedades típicas de los metales de aporte para el aluminio en condición de soldadura se dan en la Tabla 2. La difusión de elementos de aleación en el metal base puede aumentar sus propiedades mecánicas con la soldadura. La resistencia al cizallamiento y resistencia a la tracción mínima de las soldaduras son altamente dependientes de la composición del metal de aporte como se muestra en la Tabla 2. Aleaciones de metal de aporte 5356, 5183 y 5556 proporcionan resistencia alta a la cizalladura en soldaduras estructurales con filete. Las aleaciones de la serie 1xxx y 5XXX con un metal de aporte producen soldaduras muy dúctiles y son preferibles cuando la soldadura se somete a la formación de las operaciones de soldadura o de post-operaciones de alisado.[99]

Tabla 2.- Propiedades típicas de metales de aporte en aluminio.

Aleación de Aporte	Resistencia Mínima al Corte (MPa)	Resistencia a la Tracción (MPa)
ER 4043	79	200
ER 5183	128	283
ER 5356	117	262
ER 5554	117	230
ER 5556	138	290
ER 5654	83	221

### 2.5.2.- ¿QUÉ METAL DE APORTE USAR? .

El papel del metal de aporte en la soldadura de aluminio es un punto crítico. Las aleaciones con un alto contenido de magnesio (5356, 5183 y 5556) ofrecen una soldadura más fuerte, permiten además soldaduras pequeñas con filete; esto a menudo resulta en ventajas financieras. Cualquiera metal de aporte 4043 o 5356 puede ser utilizado para soldar aluminio 6061. Para un requisito de resistencia a la cizalladura de 70 kg por milímetro lineal, un filete de 6 mm es suficiente con aleación de metal de aporte 5356; sin embargo, un filete de 9 mm se requerirá una aleación de metal de aporte 4043. Este último normalmente requiere tres pasadas de soldadura e implica tres veces más de tiempo en la realización de la soldadura, en comparación con el metal de aporte 5356. El filete más grande también puede dar lugar a un mayor encogimiento metal de soldadura. A medida que disminuye la temperatura, las aleaciones de aluminio y su soldadura aumentan su resistencia. Las aleaciones de aluminio no se vuelven frágiles pero aumentan o mantienen la ductilidad, esto con la disminución de las temperaturas por debajo del cero.

Las aleaciones de aluminio de alto contenido de magnesio, como la 5083, han mostrado propiedades criogénicas muy buenas, y, debido a su excelente soldabilidad, han

sido ampliamente utilizados para el almacenamiento de oxígeno líquido y de gas natural licuado.

Con las aleaciones de aluminio tratadas térmicamente, y con una junta biselada, en particular con la serie 6XXX, debe permitir el depósito de soldadura que consiste de un 50% o más de aleación del metal de aporte. Aleación 6061, incluso en espesores de hasta 2,3 mm, está biselada para permitir un mínimo de 50% de dilución en las juntas a tope cuando se utiliza un metal de aporte 4043. [99]

Tabla 3.- Guía para la selección del metal de aporte.

Metal base	6005, 6061, 6063, 6101, 6151, 6201, 6351, 6951	5086	5083
5083	ER 5356	ER 5356	ER 5183

Tabla 4.- Composición química de los metales de aporte.

Aleación de relleno	Elementos, Wt %							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
40403	4.5-6	0.8	0.30	0.05	0.05	-	0.10	0.20
4047	11.0-13.0	0.8	0.30	0.15	0.10	-	0.20	-
5183	0.40	0.40	0.10	0.50-1.0	4.3-5.2	0.05-0.25	0.25	0.15
5356	0.25	0.40	0.10	0.05-0.20	4.5-5.5	0.05-0.20	0.10	0.06-0.20
5554	0.25	0.40	0.10	0.50-1.0	2.4-3.0	0.05-0.20	0.25	0.05-0.20
5556	0.25	0.40	0.10	0.50-1.0	4.7-5.5	0.05-0.20	0.25	0.05-0.20
5654	Nota a	Nota a	0.05	0.01	3.1-3.9	0.15-0.35	0.20	0.05-0.15

Nota a: El silicón y el hierro no excederán el 0.45 por ciento.

### 2.5.3.- RESISTENCIA A LA CORROSIÓN.

Las aleaciones de los metales de aporte que contienen aluminio-magnesio son altamente resistentes a la corrosión generalmente cuando se utiliza con aleaciones a base de magnesio que tienen un contenido similar. Sin embargo, las aleaciones de metales de aporte de la serie 5XXX puede ser anódica a los metales de aleación de la serie 1xxx, 3xxx y 6xxx de bases con las que pudieran ser utilizados. En servicio inmerso, el metal de soldadura se pica y corroe para proteger el metal base, en diferentes tipos basados en la diferencia de potencial eléctrico de soldadura y el metal base. Así, un metal de aporte de aluminio-silicio, tal como aleación de 4043 o la aleación 4047, se prefiere para una mejor resistencia a la corrosión, en cambio se preferirá un metal de aporte de la aleación 5356 cuando el metal base sea una aleación 6061 para una aplicación de servicio inmerso. [99]

## CAPITULO 3.- FABRICACIÓN DE LA PROBETA PARA ENSAYOS DE FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA PARA UNA ALEACION SOLDADA DE ALUMINIO NOMINACIÓN AIS-SAE 6061 T6.

### 3.1.- ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL.

#### *Aleación de Aluminio 6061-T6.*

Cuando el metal contiene entre 99.5 y 99.79 % de aluminio este es llamado aluminio puro o aluminio comercial. El termino aleación se utiliza cuando se adicionan otros elementos al aluminio. La principal razón por la cual el aluminio es aleado es para obtener mayores propiedades físicas y mecánicas sin incrementar considerablemente el peso. Dependiendo del uso específico que se le asigne, se puede obtener mayor resistencia a la corrosión mejor soldabilidad, maquinabilidad o solamente una mejor apariencia. Los principales elementos químicos adicionados al aluminio para producir aleaciones específicas, son los siguientes: Silicio Magnesio, Manganeso, Cobre, Zinc, Cromo, Hierro. Las aleaciones 6xxx son tratables térmicamente y tienen una resistencia relativamente alta, adicionalmente con una excelente resistencia a la corrosión. Una propiedad particular es su capacidad de extrusión, por lo que es posible producir individualmente formas arquitectónicas relativamente complejas y también para diseñar perfiles en la mayoría del metales para reforzar la resistencia a la máxima tracción y compresión. La composición química en peso de la aleación de aluminio 6061 se presenta en la Tabla 5:

Tabla 5.- Composición química de una aleación de aluminio 6061-T6.

Composición Química en %

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros	Al
Min	0.40	-	0.15	-	0.80	0.04	-	-	-	-
Max	0.80	0.70	0.40	0.15	1.20	0.35	0.25	0.15	0.15	Resto

El aluminio 6061 –T6 tiene como principales propiedades mecánicas las mostradas en la tabla 6:

Tabla 6.- Propiedades mecánicas del aluminio 6061-T6.

Resistencia última a la tracción	310 MPa
Limite elástico	275 MPa
Límite de resistencia a la fatiga	95 MPa
Módulo de elasticidad	69 GPa
Dureza Brinel	95 (500 kg/10mm)
Densidad	2.7 $\text{gt/cm}^3$

Dúctil, ligera, con buena resistencia y excelentes características de acabado, la aleación de aluminio 6061-T6 es ideal para la elaboración de piezas maquinadas con calidad de excelencia y para trabajos que requieran buen acabado superficial.

#### *Tratamiento Térmico T6.*

Tratado térmicamente por solución y envejecido artificialmente, el cual se realiza a temperatura de 520-530 °C este tratamiento ayuda a la reducción de porosidad y a la mejora de la microestructura.

#### *Designación para los grupos de aleaciones de aluminio.*

Se ha diseñado un sistema numérico de cuatro dígitos para denominar las aleaciones de aluminio en este sistema, el aluminio de 99.00 % o más, es señalado como una aleación número 1xxx, en cambio otras aleaciones de aluminio son agrupadas por el mayor elemento de aleación:

- 1XXX-Al (99% o mas).
- 2XXX-Aleación Al-Cu.
- 3XXX-Aleación Al-Mn.
- 4XXX- Aleación Al-Si.
- 5XXX- Aleación Al-Mg.
- 6XXX- Aleación Al-Mg-Si.
- 8XXX-Al más otro elemento.
- 9XXX-Serie si usar.

El segundo dígito en el número de aleación indica los límites de impureza, si el dígito es cero no contiene impurezas, si el valor es de uno a nueve indica un control especial de una o más impurezas. Los últimos dos dígitos en la serie 1xxx expresan el valor en décimas y centésimas del porcentaje de aluminio. (Ejemplo: aleación 1060 =99.60 % de aluminio). En las series dos hasta nueve los segundos dos dígitos no tienen ningún significado en especial, solo sirven para identificar las diferentes aleaciones de aluminio en el grupo.

### **3.2.- PROBETA PARA ENSAYOS DE FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA.**

Para poder llevar a cabo los ensayos de fatiga en flexión rotativa es necesario obtener una probeta con una geometría y dimensiones determinadas las cuales aparecen en la figura 3.1, la geometría de la probeta es en forma de reloj de arena, esta geometría se aproxima a la especificada en la norma ISO 1143:2010 para llevar a cabo los ensayos de fatiga en flexión rotativa. Cabe mencionar que nuestra probeta de ensayos difiere

ligeramente respecto a la geometría mencionada en esta norma, esto debido a que la máquina para llevar a cabo los ensayos fue fabricada y patentada en la UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO, se ha determinado para trabajar en esta memoria de tesis a los valores de: entre el 10 y el 70 % aproximadamente del límite elástico del material de estudio. La norma ISO 1143:2010 especifica únicamente dimensiones de probeta para ensayos de flexión rotativa, sin mencionar algún proceso asociado de soldadura, como es el caso de este estudio. En esta norma mencionan los requerimientos necesarios para llevar a cabo un ensayo en fatiga en flexión rotativa cuyos resultados pueden ser comparables con otros ensayos en fatiga de la misma modalidad.

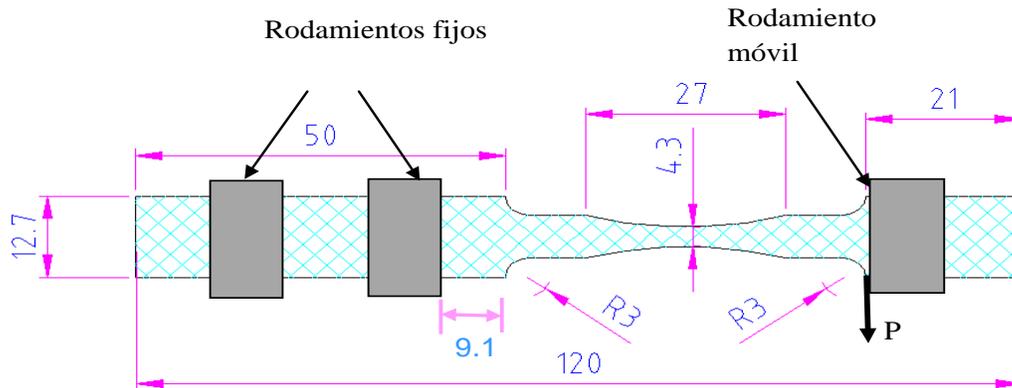


Figura3. 1.- Dimensiones (mm) de la probeta para los ensayos de fatiga en flexión rotativa.

### 3.3.- PROCESO DE SOLDADURA EN EL LABORATORIO.

Para el proceso de soldado de placas mediante el proceso GMAW, se maquinan dos placas con un biselado de entre 40 y 45 grados, como se establece en la AWS (American Welding Society) concerniente a aleaciones de aluminio. Este proceso se dividió en dos etapas, las cuales se resumen en:

- Obtención del material soldado mediante el proceso GMAW.
- Maquinado del material soldado.

#### 3.3.1.- OBTENCIÓN DEL MATERIAL.

La aleación de aluminio 6061-T6 fue obtenida en una empresa en la ciudad de Morelia. Esta empresa proporcionó el material en forma de solera con las siguientes dimensiones, solera A: 152.4 mm x 76.2 mm x 12.7 y solera B: 152.4 mm x 25.4 mm x 12.7 mm, como se muestran en la siguientes figuras.

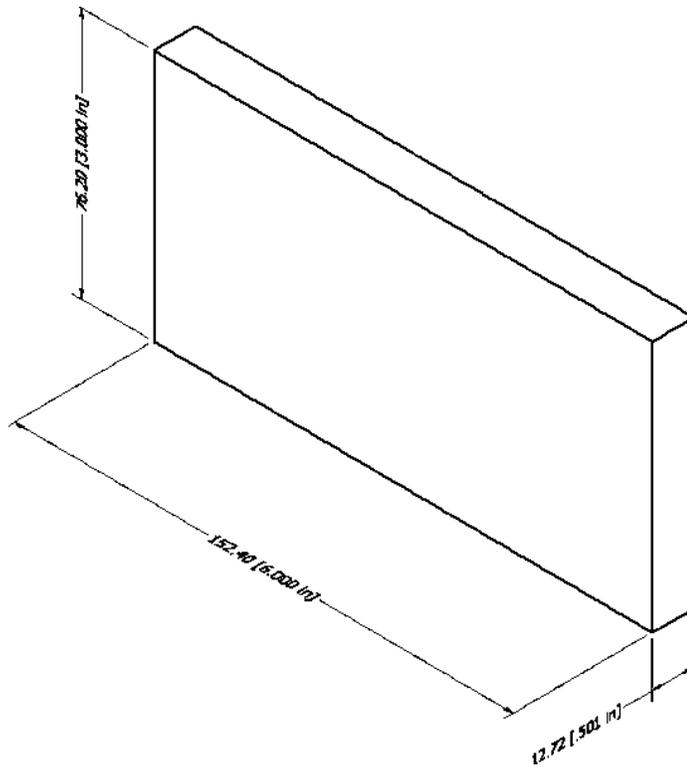


Figura3. 2.- Dimensiones de la solera A de aluminio.

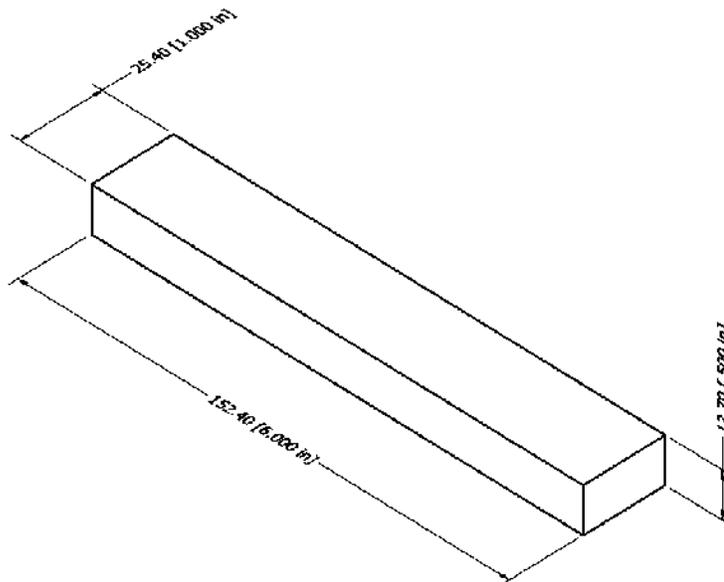


Figura3. 3.- Dimensiones de la solera B de aluminio.



Figura3. 4.- Material comprado con un proveedor.

### 3.3.2.- MAQUINADO DEL MATERIAL.

Después de comprar el material, se realizó un maquinado por arranque de viruta tanto a la solera A como a la solera B. Este maquinado se llevó a cabo mediante una fresadora. El biselado sobre la solera A se escogió en función del tipo de junta que se obtendría durante el proceso de soldado; la junta que se eligió para soldar las soleras fue a tope de ranura en V sencilla. Esta selección se eligió con referencia a la especificación contenida en la Sociedad Americana de Soldadura (AWS) para las juntas de uso común en aluminio. Las especificaciones de este tipo de juntas se muestran a continuación. Primero se realizó un biselado a  $45^\circ$  sobre las soleras del tipo A, dejando un talón de 3 mm, como se muestra en la figura 3.5 y 3.6; mientras que en la figura 3.7 se muestra el tipo de junta.

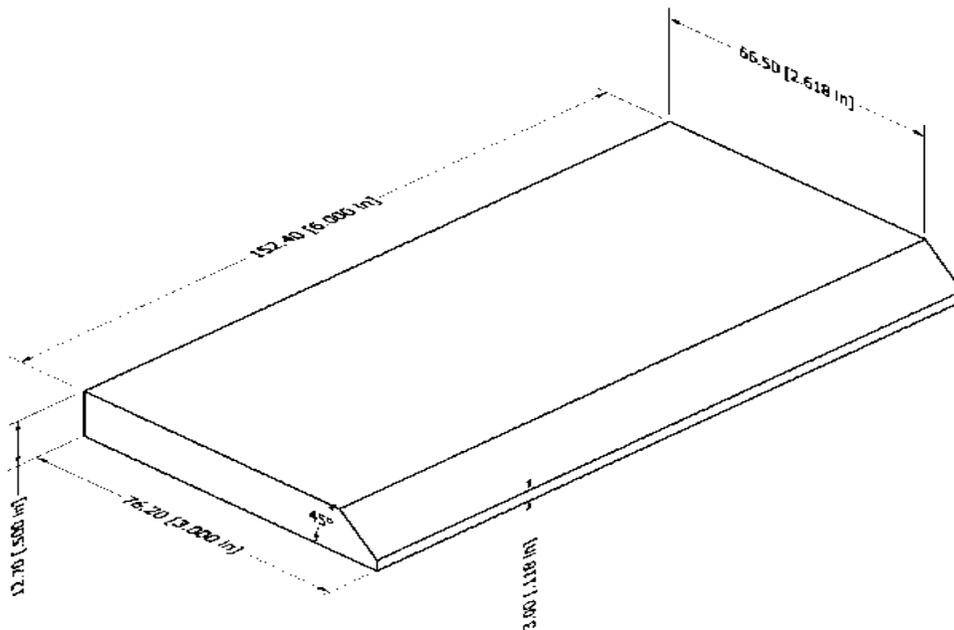


Figura3. 5.- Especificaciones del biselado de la solera A.



Figura3. 6.- Vista lateral del biselado de la solera A.

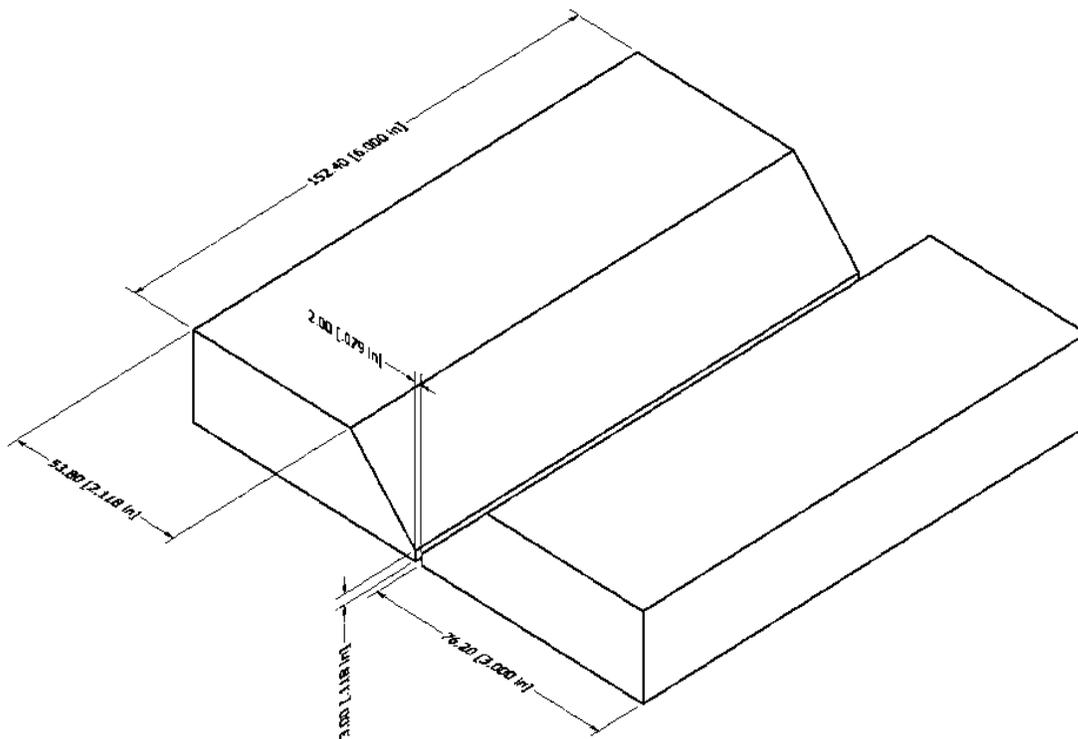


Figura3. 7.- Especificaciones del tipo de junta.

Posteriormente, se llevó a cabo un maquinado denominado saque a las soleras del tipo B; este maquinado fue necesario debido a que las soleras B servirán de apoyo a las soleras del tipo A para evitar que estas últimas se tuerzan o deformen de una manera notoria en el proceso de soldado. Lo anterior es causado por el calor generado durante el proceso de soldadura y es frecuente constatar que al finalizar la soldadura en las soleras

éstas presentaban un cambio en sus dimensiones y geometría. El procedimiento anterior garantiza que las partes tomadas de estas soleras sirvan para la fabricación de las probetas para los ensayos de fatiga en flexión rotativa. Las especificaciones de este maquinado se muestran a continuación en las figuras 3.8 y 3.9.

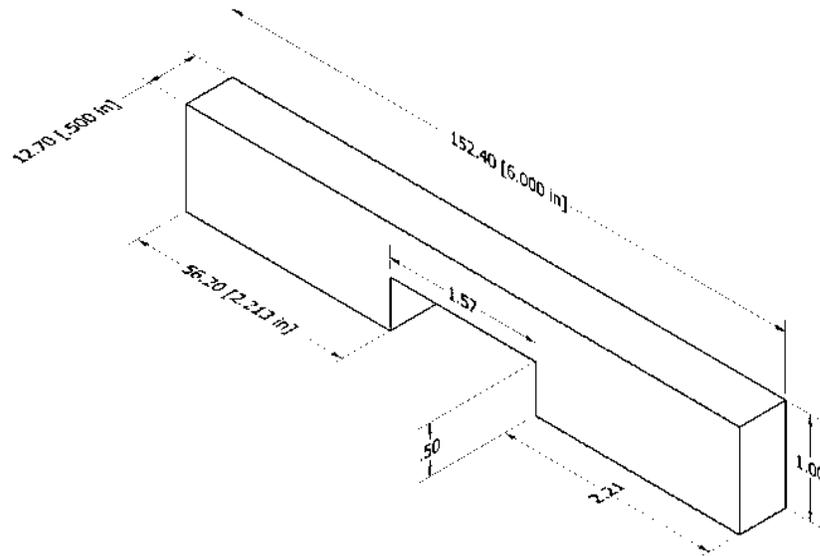


Figura3. 8.- Especificaciones del maquinado de la solera B.

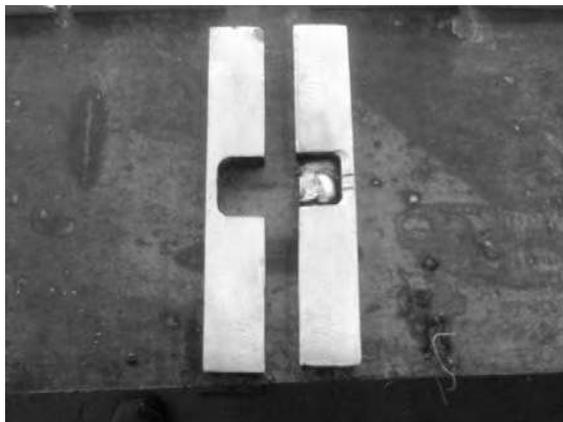


Figura3. 9.- Vista real del maquinado en la solera B.

### 3.3.3.- PROCESO DE SOLDADURA.

Como mencionado el capítulo 2, existen varios métodos de soldadura con los cuales podemos obtener la soldadura en aluminio. Del conjunto de procesos de soldadura para aluminio, el más frecuentemente empleado en la industria es el proceso GMAW. Este un motivo principal para la selección de dicho proceso y la puesta en marcha de ensayos de resistencia en fatiga en flexión rotativa de este material, desarrollados en esta memoria de tesis.

Una vez seleccionado el proceso de soldadura que será empleado, que en nuestro caso es el proceso MIG, se cuenta con la problemática de qué tipo de material de aporte (micro alambre) será utilizado; dentro de este proceso se cuenta con varios tipos de materiales de aporte. Para seleccionar el material de aporte más adecuado se cuentan con una serie de propiedades que determinarán la mejor elección de este material, basándose en el tipo de material base que vaya a ser soldado. Dentro de estas propiedades se tienen:

- Inexistencia de fisuras en caliente.
- Buena ductilidad del material de aporte.
- Que el metal de la soldadura sea resistente a la corrosión.
- Que el metal de aporte sea resistente al cortante en la zona de soldadura.
- Facilidad de soldadura.
- Facilidad de la alimentación del metal de aporte.
- Homogenización del color de soldadura con el metal base.

Como en este trabajo se emplea una aleación de aluminio 6061-T6 y basándonos en la teoría expuesta en el capítulo 2 y en las características que se deben tomar en cuenta para la selección del metal de aporte, se tiene que para soldar este tipo de aleación se cuenta con dos principales metales de aporte, los cuales son: ER-4043 y el ER-5356. En la tabla 7 se establece un comparativo entre estos dos materiales de aporte.

Tabla 7.- Comparativa de los materiales de aporte ER4043 Y ER5356.

ER-4043	ER-5356
Grano liso, buena humectación	Tizne negro, ondulaciones distintivas
Mala capacidad de alimentación	Buena capacidad de alimentación
Penetración superior	Baja penetración
Baja ductilidad	Ductilidad superior
Resistencia a la tensión baja	Resistencia a la tensión alta
Menos propenso a la porosidad	Más propenso a la porosidad
Anodizado de un gris oscuro	Anodizado de un color igual al material base
Menor resistencia al corte	Mayor resistencia al corte
Baja sensibilidad a grietas	Mayor sensibilidad a grietas
Bajo punto de fusión	Alto punto de fusión

Tomando referencia en la información disponible sobre las distintas propiedades que presentan los dos metales de aporte, se optó por utilizar el ER-5356. Esta elección responde al hecho que cuenta con elementos de aleación similares al metal base, presenta buena soldabilidad con la aleación de aluminio 6061-T6, tiene mejores propiedades mecánicas y el anodizado (cordón de soldadura) presenta un color igual al metal base.

El material de aporte fue proporcionado por una empresa mexicana especializada en esta actividad, en forma de bobina con un peso de 5.900 Kg y un diámetro de hilo de 1.2 mm.



Figura3. 10.- Metal de aporte ER5356

*Nota: La designación que tiene esta empresa para el metal de aporte es ME 5356 G, la cual corresponde a la misma designada por la AWS que es: AWS ER-5356.*

Habiendo definido el material de aporte que será empleado, se continuó con la unión de las soleras tipo A y las soleras del tipo B, dejando una separación entre soleras de 2 mm. Esta unión se realizó por medio de varios puntos de soldadura en los extremos de ambas soleras, como se muestra en la figura 3.11.

Con el fin de obtener estos puntos de soldadura y los cordones, se adaptó un torno de control manual mediante la incorporación de un brazo a la torreta porta herramientas, en el cual se montó la pistola de la soldadora. Esta adaptación se llevó a cabo por la dificultad que representa mantener una velocidad constante y una separación adecuada entre el metal base y el material de aporte durante todo el cordón de soldadura. Una mala velocidad y una separación inadecuada durante una parte del cordón traerían como consecuencias que los materiales soldados sean deficientes para los propósitos que se tenían destinados; particularmente en el proceso de maquinado de las probetas. Las dimensiones de este brazo se muestran en la figura 3.12 y el montaje de este brazo se muestra en la figura 3.13.

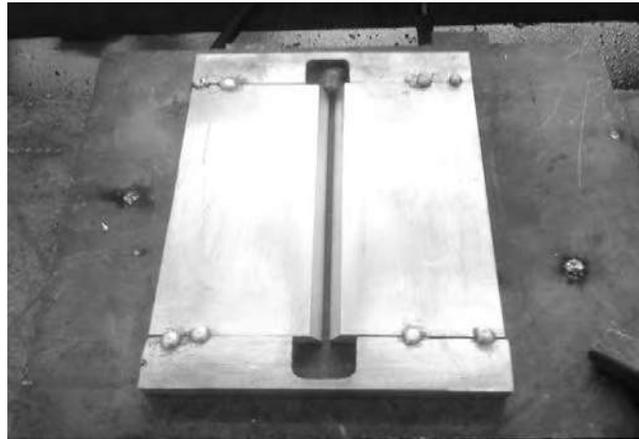


Figura3. 11.- Unión de las soleras A y B.

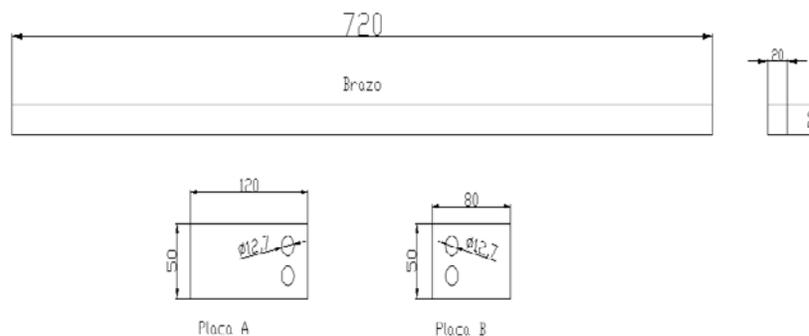


Figura3. 12.- Dimensiones (mm) del brazo sujetador de la pistola.



Figura3. 13.- Vista del montaje del brazo sujetador en el torno.

Una vez unidas las soleras se procedió al ajuste de los primeros parámetros del equipo de soldadura; cabe mencionar que para los puntos de soldadura no es necesario ningún tipo de ajuste específico en el equipo. Los parámetros de ajuste que juegan un papel importante para la obtención de un buen cordón de soldadura son: la corriente, voltaje, velocidad de alimentación del hilo, velocidad de desplazamiento, flujo del gas de protección, temperatura de precalentamiento, distancia entre la longitud libre del hilo y el metal base (“Stick out” en inglés) y limpieza del material base.

En un primer intento por obtener una soldadura entre las soleras se ajustó la máquina con los siguientes parámetros de operación que se muestran en la tabla 8.

Tabla 8.- Parámetros iniciales del proceso de soldadura.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad de alimentación de alambre (m/min)	Diámetro del alambre (mm)	Stick Out (mm)	Velocidad de desplazamiento (m/min)	Angulo de la antorcha (grados)	Flujo de gas (L/min)
26	160	6-7	1.2	8	0.3	70	15

Con estos parámetros de soldadura se obtuvo un resultado deficiente en el cordón de soldadura correspondiente entre las soleras del tipo A; debido a una fusión y penetración deficientes ocasionados por la aparición del óxido de aluminio (alúmina) durante el proceso de soldadura. Dicho óxido de aluminio al permanecer durante el depósito de material entre las soleras, impide que haya fusión entre ambas superficies. Este fenómeno obedece a que el óxido de aluminio tiene un punto de fusión de 2072 °C, más de tres veces el punto de fusión del aluminio puro 650 °C . Este elevado punto de fusión, impide que el calor

generado durante la soldadura llegue al metal base y lo funda en conjunto con el material de aporte: al aparecer el óxido de aluminio durante el proceso de soldadura provoca que solo el material de aporte se deposite por encima del metal base sin que haya interacción entre estos dos, generando con esto una soldadura quebradiza y de muy baja calidad. En la figura 3.14 se puede apreciar este fenómeno de aparición de alúmina, observando que entre ambas soleras no hubo fusión porque no se alcanza a apreciar la zona afectada térmicamente en las dos zonas señaladas y porque el cordón de soldadura tiene una tonalidad ligeramente diferente al metal base cuando este debería presentar un color similar en tonos de gris al metal base. En la figura 3.15 se aprecia en las zonas señaladas que no hubo penetración del metal de aporte y que solo se depositó por encima. Por último, en la figura 3.16 se aprecia el óxido de aluminio en forma de una suciedad aparentemente perteneciente al material.

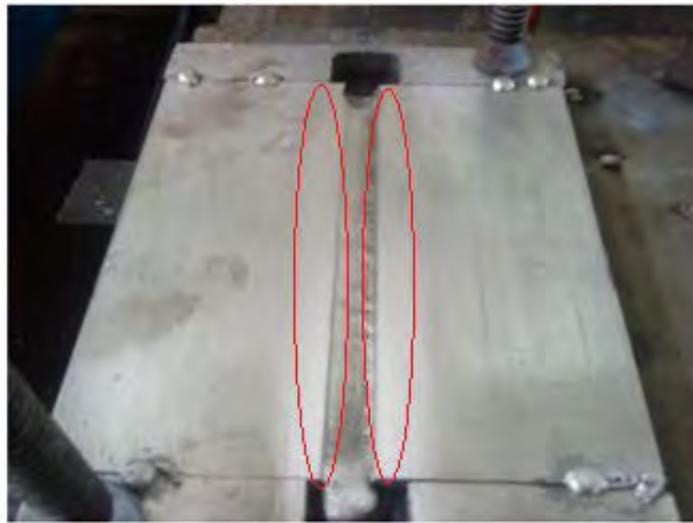


Figura3. 14.- Fusión nula del material de aporte en la raíz.



Figura3. 15.- Penetración nula del material de aporte en la raíz

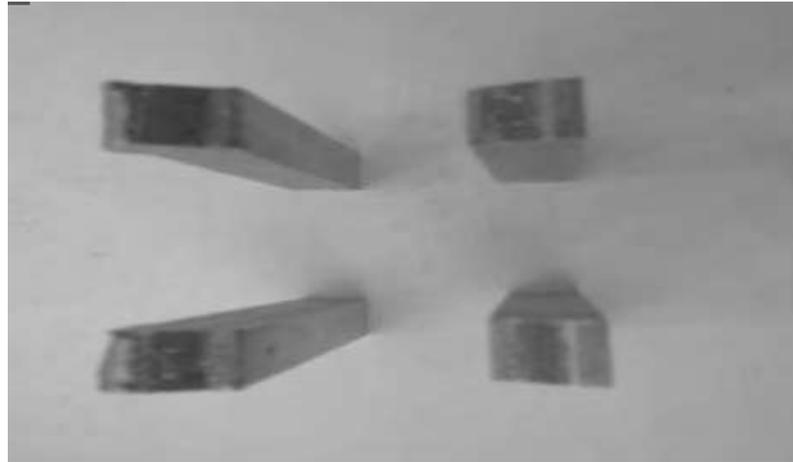


Figura3. 16.- Alúmina dentro del cordón de soldadura.

Para definir los parámetros adecuados que proporcionen buenos resultados en el cordón de soldadura, se tuvieron que realizar varias pruebas variando los valores de los parámetros. Al ajuste de estos parámetros se incorporó un precalentamiento inicial a las soleras y una limpieza mecánica en las superficies por medio de un disco de alambre (carda) y un cepillo de acero inoxidable, estas series de pruebas arrojaron al final unos cordones de soldadura de buena calidad, los cuales presentaban fusión y penetración adecuados entre las soleras y el metal de aporte y una ausencia de alúmina en gran parte proceso de soldadura: se requirió llevar a cabo tres cordones de soldadura en el material debido a la alimentación de hilo seleccionado y por el tipo de junta en V.

Cabe mencionar que entre cada cordón de soldadura aplicado fue necesario limpiar inicialmente con esmeril y posteriormente con cerdas las superficies a soldar, con el propósito de evitar la aparición de alúmina. Los parámetros finales con los cuales se obtuvieron buenos resultados se presentan en la tabla 9, y el aspecto de un cordón de soldadura con buenas características se puede observar en las figuras 3.16, 3.17.

En la figura 3.16 a) se aprecia una buena penetración que hubo por la parte de abajo del metal base y el material de aporte mientras que en la figura 3.16 b) se observa que hubo una buena fusión entre el metal de aporte y el metal base; lo anterior se deduce porque es posible distinguir las zonas afectas térmicamente durante el proceso de soldadura: estas zonas se aprecian como pequeñas rugosidades a los costados del cordón de soldadura y el cordón presenta un color igual al metal base.

En la figura 3.17 se muestran tres distintas placas soldadas en diferentes momentos donde se aprecia de igual manera la buena fusión de los materiales y su buena penetración.

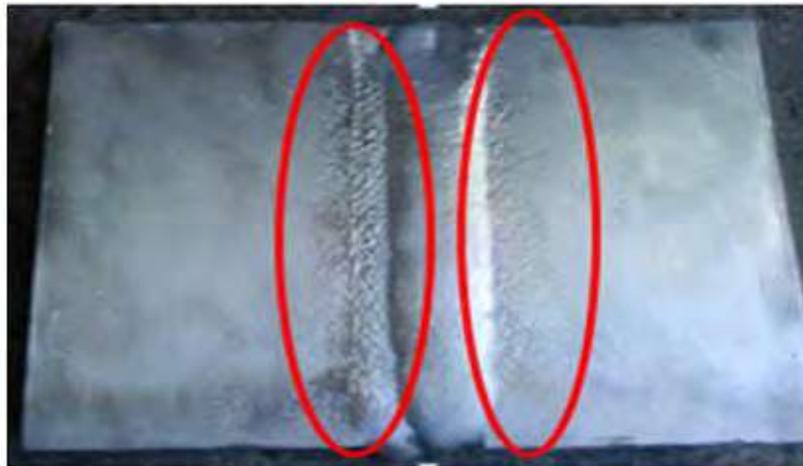
Tabla 9.- Parámetros finales de la soldadura.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad de alimentación de alambre (m/min)	Diámetro del alambre (mm)	Stick Out (mm)	Velocidad de desplazamiento (m/min)	Angulo de la antorcha (grados)	Flujo de gas (L/min)
24	200	6-7	1.2	12	0.2	70	20

\*Pre calentamiento de 120 °C a las soleras antes de ser soldadas.



(a)



(b)

Figura3. 17.- Penetración a) y fusión b) adecuados del metal de aporte y el metal base.



Figura3. 18.- Soldadura adecuada en las distintas placas.

### 3.4.- CORTE DEL MATERIAL SOLDADO.

Una vez obtenidas las soleras con una buena fusión y penetración del metal de aporte y el metal base, se procedió a cortar el material por medio de la sierra cinta para así obtener unas probetas de forma rectangular; estas probetas se cortaron con las siguientes dimensiones 152.4 mm x 15 mm x 12.7 mm, las cuales se muestran en la figura 3.18. La dimensiones en el corte de esta probeta permiten obtener un maquinado de una probeta cilíndrica con un diámetro de 12.7 mm.

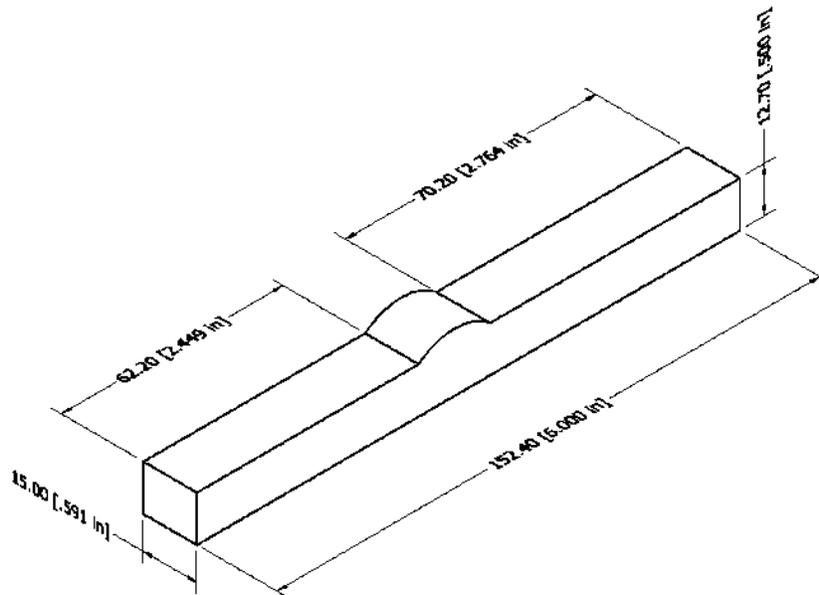


Figura3. 19.- Dimensiones de la probeta rectangular soldada.



Figura3. 20.- Corte de la probeta rectangular.

### 3.5.- MAQUINADO DE LAS PROBETAS DE ENSAYO.

Una vez obtenidas las probetas soldadas en una forma rectangular, se procedió a redondearlas para que tomen una forma cilíndrica, este redondeo se obtendrá mediante el siguiente proceso:

I.- La probeta rectangular ya soldada se monta en un torno de cuatro mordazas con el cual se obtiene una forma cilíndrica a la mitad de la probeta con un diámetro de 12.7 mm, figura 3.20.



Figura3. 21.- Primer maquinado a la probeta en el torno de cuatro mordazas.

II.- Habiendo obtenido una forma cilíndrica de la mitad de la probeta en el torno de cuatro mordazas, se monta enseguida en un torno de tres mordazas, en el cual el lado de forma cilíndrica se sujetara en el chuck para terminar de maquinarse la forma cilíndrica a toda la probeta. La probeta cilíndrica después de maquinado final presenta un diámetro de 12.7 mm, figura 3.21.

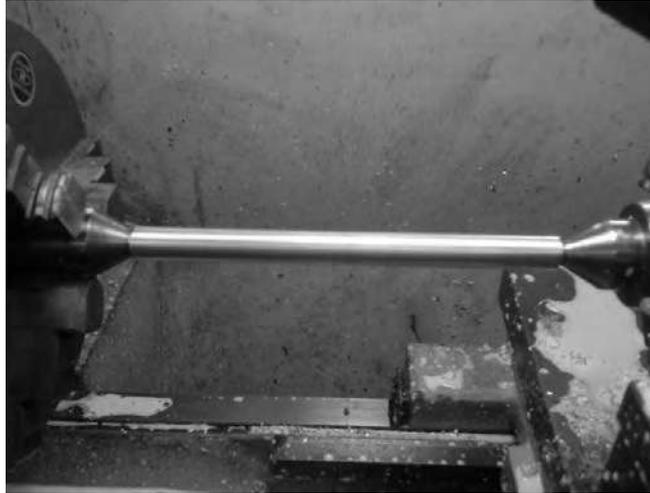


Figura3. 22.- Segundo maquinado en el torno de tres mordazas.

III.- Teniendo la probeta totalmente cilíndrica, se procede a cortarla nuevamente con las dimensiones especificadas para los ensayos de fatiga en flexión rotativa. Se recorta 30 mm del lado derecho y 4 mm del lado izquierdo, quedando una probeta cilíndrica con una longitud de 120 mm; en la cual la zona de soldadura queda localizada en la parte central de la probeta, figura 3.22.



Figura3. 23.- Corte de las probetas cilíndricas a las dimensiones especificadas.

IV.- Una vez contadas la probetas cilíndricas, se procede a un pulido final antes de realizarles el ultimo maquinado, figura3.23.



Figura3. 24.- Pulido final de las probetas.

V.- Por último, una vez que las probetas son ajustadas a las dimensiones requeridas se procede a colocarlas en el torno de control numérico donde se maquinan los cuellos especificados para tales probetas, figura 3.24.

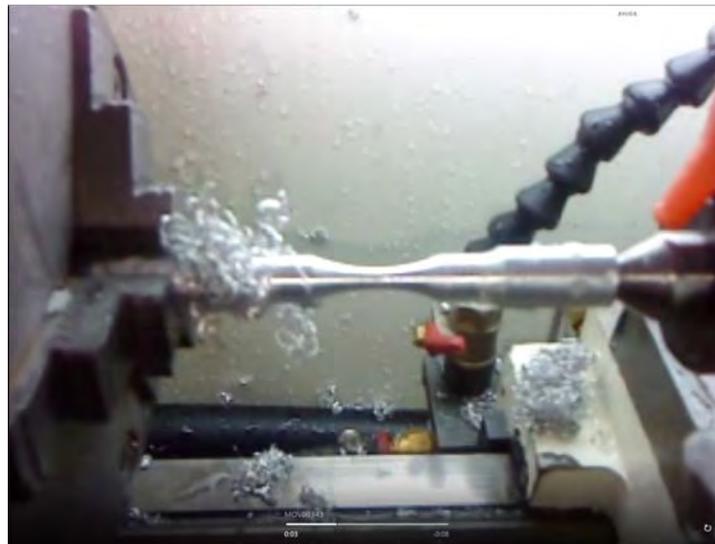


Figura3. 25.- Maquinado final.

Cada resultado obtenido en el proceso de maquinado de las probetas se muestra en la figura 3.25; cuya finalidad es obtener el perfil mostrado en la última etapa, y utilizado en los ensayos para al estudio de la fatiga en flexión rotativa.



Figura3. 26.- Proceso de maquinado.

### **3.6.- APLICACIÓN DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS, NO DESTRUCTIVOS Y DE DUREZA EN LA SOLDADURA.**

Cuando se lleva a cabo un proceso de soldadura en cualquier tipo de material es necesario efectuar pruebas mecánicas sobre el material soldado para validar la resistencia del material soldado y en consecuencia la calidad en el proceso de soldadura. Estas pruebas mecánicas se llevan a cabo mediante distintos ensayos aplicados a la soldadura que tienen como función principal detectar dentro de la soldadura algún tipo de imperfección, como: grietas, porosidades, disminución de la resistencia a la tracción, velocidad de crecimiento de grietas, etc. Estos ensayos se dividen en dos grandes grupos:

- Ensayos no destructivos.
- Ensayos destructivos.

Los ensayos no destructivos consisten en detectar discontinuidades superficiales e internas en materiales, soldaduras, componentes o partes fabricadas, si alterar su forma, propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Dentro de estos ensayos existen varios tipos; entre estos se encuentran: ensayo de líquidos penetrantes, de partículas magnéticas, radiografiado y ultrasonido. En este trabajo de investigación se dispuso de la

prueba por líquidos penetrantes. Este ensayo no destructivo presenta facilidad de llevarlo a cabo y para interpretar los resultados

Por otro lado, los ensayos destructivos son aquellos que se aplican a un material mediante el uso de herramientas y máquinas, las cuales producen una alteración irreversible de su composición química o geometría dimensional. Estos ensayos son utilizados principalmente para conocer las propiedades físicas y mecánicas de un material. Dentro de estos ensayos podemos encontrar los siguientes: dureza, tensión, compresión, torsión, flexión, fatiga, etc. Los ensayos destructivos que se llevaron a cabo en la soldadura de aluminio obtenida, corresponden a ensayos de tensión, dureza y de fatiga en flexión rotativa y de crecimiento de grieta.

### 3.7 LÍQUIDOS PENETRANTES.

La simplicidad del método de líquidos penetrantes y la rapidez con la cual se obtiene el resultado del análisis lo convierte en un método muy eficaz para determinar el estado de cualquier pieza sometida a inspección. Dentro de estas piezas podemos encontrar ejes de equipos rotativos, impulsores de bombas, elementos de transmisión, rotores y estructuras y elementos Obtenidos por soldadura

El análisis no destructivo de los elementos de máquinas por el método de los líquidos penetrantes trata principalmente de poner de manifiesto todas aquellas discontinuidades superficiales que se encuentran en el material; dentro de estas discontinuidades es posible encontrar fisuras, grietas, poros o cualquier discontinuidad localizada en la superficie. Esta técnica está basada en la capacidad que determinados líquidos poseen para penetrar por capilaridad en las discontinuidades superficiales de los sólidos y permanecer en ellas. La tensión superficial del líquido en contacto con el material sólido produce ese efecto de capilaridad que permite al fluido penetrar por esas discontinuidades aún en contra de otros efectos como puedan ser la gravedad o el movimiento del líquido por vasos comunicantes.

El proceso que se sigue para llevar a cabo este ensayo es el siguiente:

- *Limpieza de la superficie a analizar:* esta limpieza se efectúa por medio de un disolvente para eliminar cualquier suciedad que pudiera impedir el paso del líquido penetrante, este disolvente se retirara de la superficie por medio de un trapo y se deja unos minutos en reposo antes de aplicar el líquido penetrante.
- *Aplicación del líquido penetrante:* se aplica el líquido penetrante en la superficie a analizar y se deja que actué un tiempo determinado para permitir que el líquido penetrante se introduzca por capilaridad en las discontinuidades.
- *Limpieza del líquido penetrante:* se retirara el excedente de líquido penetrante que quedo en la superficie mediante un trapo humedecido con un poco de disolvente, evitando extraer el que se encuentra dentro de las fallas.

- *Aplicación del revelador:* con la superficie ya totalmente limpia y libre de líquido penetrante, se procederá a aplicar el revelador en forma seca o finamente pulverizada en una suspensión acuosa o alcohólica, que una vez evaporada deja una fina capa de polvo.
- *Inspección y evaluación:* esta fina capa de polvo revelador absorberá el líquido penetrante retenido en las discontinuidades, llevándolo a la superficie para hacerlo visible, ya sea por contraste o fluorescencia y de esta manera hacer la evaluación pertinente.

Para la aplicación de este ensayo se sometieron 6 secciones tomadas en diferentes puntos de las distintas placas que se soldaron, para corroborar que ninguna de las placas que fueron soldadas presentaba alguna discontinuidad importante. Para nuestros fines de fabricación de una probeta que es sometida a flexión rotativa, serían grietas y fisuras en el cordón de soldadura. En la figura 3.26 se muestran los líquidos penetrantes empleados para realizar el ensayo. En la figura 3.27 se muestra la aplicación del líquido penetrante de contraste a las 6 placas. Antes de la aplicación del penetrante las placas fueron limpiadas con un solvente para que quedaran libre de cualquier tipo de suciedad, el penetrante actuó sobre las placas por un lapso de 15 minutos.



Figura3. 27.- Juego de líquidos penetrantes empleados.

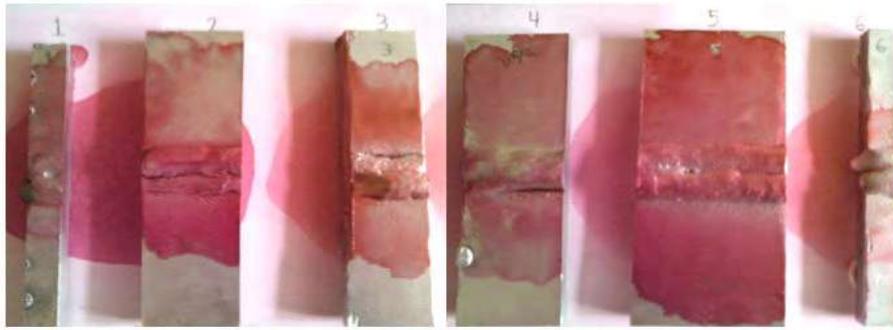


Figura3. 28.- Aplicación de líquidos penetrantes sobre las placas.

Después del tiempo de actuación del penetrante, se continúa con la limpieza del excedente de este, por medio de un solvente aplicado a un paño. Una vez limpia la superficie del líquido penetrante, fue aplicado el líquido revelador (en la figura 3.28 se puede apreciar que la soldadura no presentaba algún tipo de grieta o fisura en su superficie), solo se aprecia que hubo porosidades en el cordón de soldadura. Las porosidades son discontinuidades que no se consideran de alto riesgo si su talla no sobrepasa cierto valor; la aparición de dichas porosidades resulta casi imposible de evitar mediante un ambiente de soldadura libre de contaminantes ambientales: corrientes de aire o humedad y libres de oxígeno o nitrógeno.



Figura3. 29.- Inspección de las placas soldadas.

Este primer ensayo de líquidos penetrantes en las placas corroboró que los resultados de soldadura no presentan imperfecciones notorias que impidiera usarlas para la fabricación de probetas. Lo anterior teniendo en cuenta que estas placas pasarían por una serie de maquinados antes de obtener una probeta final para los ensayos de fatiga en flexión rotativa. Puesto que debe practicarse una reducción en el diámetro de las probetas de 12.7 mm a 4.3 mm, se puso en práctica nuevamente el ensayo de líquidos penetrantes sobre las probetas finales antes del ensayo en flexión rotativa. Este nuevo ensayo proporciona

resultados adecuados sobre la calidad de la soldadura que se encuentra en la parte central de la probeta, donde se generan los mayores esfuerzos y donde es necesario que esta zona se encuentre libre imperfecciones. La aparición de imperfecciones en esta zona invalidaría los ensayos en fatiga en flexión rotativa.

En las figuras 3.29 se observan dos conjuntos de 10 probetas terminadas y disponibles para ensayarse. Del total de probetas maquinadas, el 80% no presenta defectos superficiales notorios después del examen de líquidos penetrantes. Cada conjunto de probetas analizado fue conformado por al menos una probeta tomada de las distintas placas soldadas.



Figura3. 30.- Aplicación del ensayo de líquidos penetrantes a las probetas finales.

### 3.8.- ENSAYO DE TENSIÓN.

Este ensayo destructivo practicado a la soldadura de aluminio es relativamente sencillo, consiste en aplicar por medio de una máquina dotada de dos cabezales, uno encima del otro, ambos provistos de quijadas para sujetar firmemente la pieza a prueba. Se aplica una separación lenta y uniforme, a fin de tensar la pieza en forma de estiramiento hasta que esta se rompa. Con esto se mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente; la puesta en marcha de este ensayo interesa para obtener el diagrama de esfuerzo-deformación del material y para conocer este comportamiento en el material sometido a soldadura.

En la figura 3.30 y 3.31 se muestran las dimensiones de la probeta utilizada para los ensayos y la maquina empleada respectivamente.





Figura3. 33.- Probetas para el ensayo de tensión.

El ensayo de tensión se llevó a cabo con una velocidad de tensión de 6 mm por minuto, las probetas fueron designadas con T-1, T-2 Y T-3, obteniendo los siguientes resultados que se muestran en la tabla10 y en la figura 3.35.

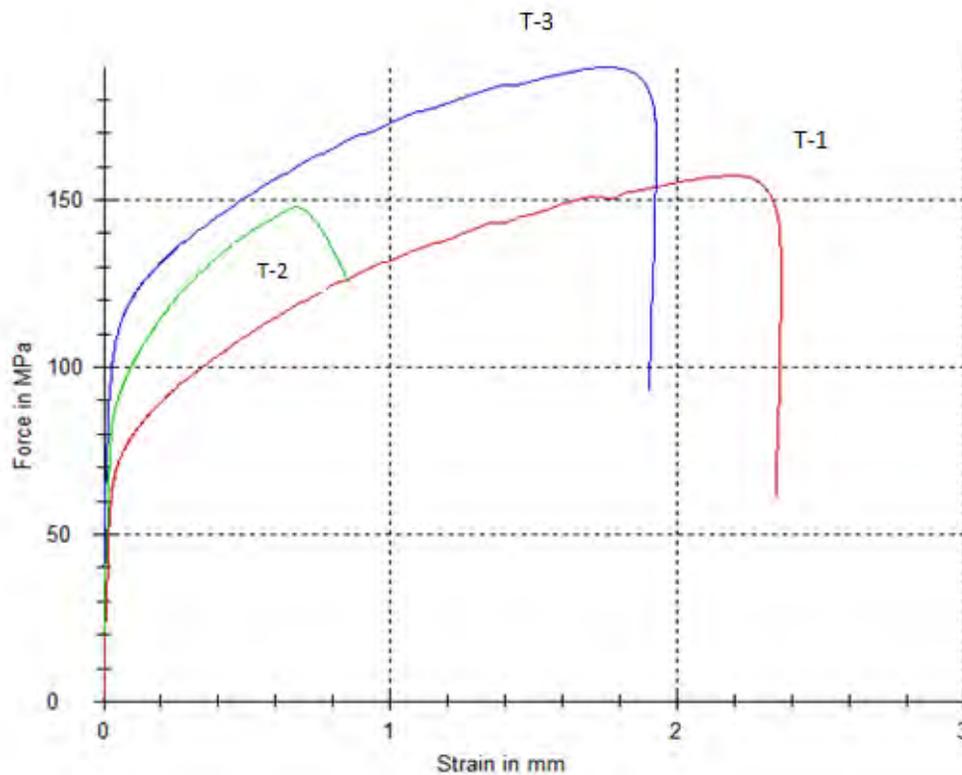


Figura3. 34.- Diagrama esfuerzo-deformación para una soldadura en Al 6061-T6.

Tabla 10.- Resultados de la prueba de tensión.

	$E_{mod}$	F at 0.2% plastic strain	$F_{max}$	dL at break	$d1_u$	$d2_u$	Z	$d_0$	$S_0$
Nr	GPa	MPa	MPa	%	mm	mm	%	mm	mm <sup>2</sup>
T-1	30.8	80.0	157	9.4	3.42	4.25	63	6.3	30.78
T-2	29.6	82.2	128	3.4	6.3	6.3	0	6.3	31.17
T-3	28.2	81.9	150	7.6	3.9	4.27	58	6.3	31.17

Aunque la resistencia a la tensión de las probetas soldadas es inferior a la probeta sin soldar, el ensayo anterior sirve de referencia para la puesta en marcha de ensayos de fatiga en flexión rotativa sobre las probetas soldadas.

Adicionalmente en las pruebas de tensión se observó que las probetas T-1 y T-3 fracturaron en el metal base y no en la soldadura y ambas teniendo una fuerza máxima de 150 Mpa que es lo requerido para soldaduras en aluminio (ASTM E-8). Por otro lado, la probeta T-2 se fracturó en la zona con soldadura, esto ocurrió debido a la aparición de alúmina, provocando una disminución considerable en las propiedades de tensión; en efecto, la aparición de este óxido implica un detrimento considerable en las propiedades mecánicas de los materiales sometidos a soldadura.

En figura 3.36 se aprecia que las fracturas de las probetas T-1 y T-3 ocurrieron en los extremos de éstas; mientras que la fractura de la probeta T-2 ocurrió en la parte central, donde se encuentra la soldadura.



Figura3. 35.- Probetas de tensión fracturadas.

Adicionalmente, se llevaron ensayos de tracción sobre probetas obtenidas en cada una de las tres zonas consideradas como se muestra en la figura 5.2. Es de interés resaltar que los resultados correspondientes a las zonas ZF (zona de fusión) y ZAT (zona afectada térmicamente), resultan muy similares a los obtenidos en la figura 3.33. Los resultados de esfuerzo deformación correspondiente a probetas no soldadas se muestran en la figura 3.35, identificando el punto de inflexión con un valor cercano a los 275 MPa que corresponden al esfuerzo de cedencia del material. Esta última curva resulta superior a las anteriores debido a que no ha sufrido el efecto térmico de soldadura y los defectos asociados.

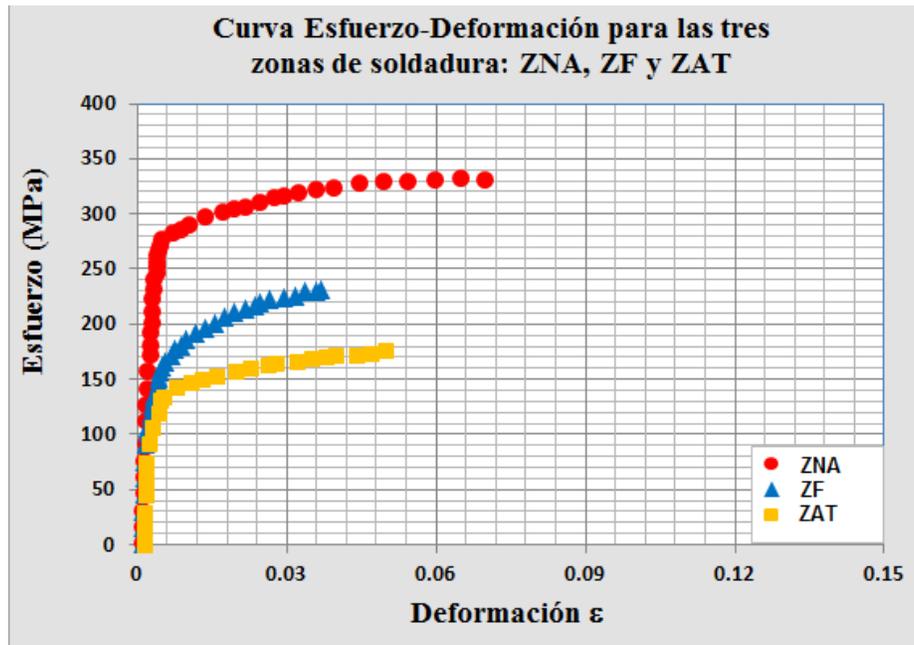


Figura3. 36.- Diagrama esfuerzo deformación para las tres zonas de soldadura.

### 3.9.- ENSAYOS DE DUREZA VICKES.

Se entiende por dureza la resistencia a la penetración superficial de un material. En presencia de esfuerzos de contacto locales inferidos por otro cuerpo, más duro, el cual no sufre deformaciones residuales (indentador ó penetrador), de determinada forma y dimensiones. Esta propiedad es de particular importancia en los procesos de soldadura en materiales, debido al calor generado durante la soldadura puede cambiar a causa de las posibles transformaciones cristalográficas, la dureza del metal base y del metal de aporte.

Las mediciones de micro dureza en la zona de fusión (ZF), la zona afectada por el calor (ZAT) y la zona no afectada (ZNA) se llevaron a cabo con el fin de obtener el efecto térmico en el material de soldadura. La velocidad de solidificación en un baño de soldadura, dependen de la velocidad de desplazamiento y el proceso de soldadura, es

generalmente más rápido que en un lingote. La interface sólido / líquido en la soldadura cambia gradualmente en función de la fuente de calor y el movimiento del metal líquido, en este caso, es más alta debido a la fuerzas de Lorentz (creación de turbulencia), en comparación con la solidificación del lingote. En la figura. 5a se representan la medida de micro-dureza Vickers10 a lo largo de las tres zonas características de la muestra de soldadura para ambos: el material de base 6061-T6 y el alambre de relleno ER5356. La Figura 5b muestra la muestra las zonas correspondientes de la soldadura: ZF, ZAT y ZNA: la zona de fusión comprende la región central con una extensión de alrededor de 28 mm, mientras que la zona afectada por el calor es contiguo a la anterior y con una extensión de cerca de 16 mm. La zona no afectada se localiza después de la zona afectada por el calor de la línea de fusión central, en ambos lados de la línea central.

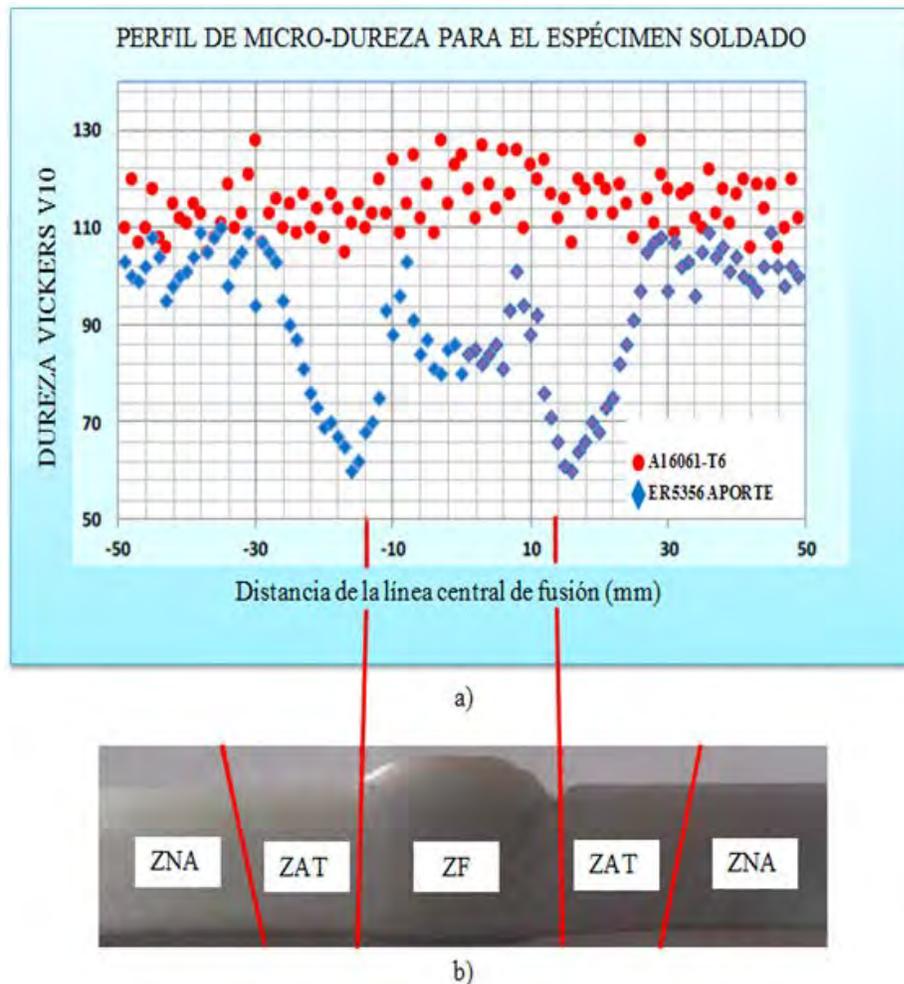


Figura3. 37.- Perfil de micro-dureza Vickers, a) a lo largo del espécimen, b) zona de soldadura correspondiente.

## CAPITULO 4.- ENSAYOS EXPERIMENTALES.

### 4.1. ENSAYO DE FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA DE LAS PROBETAS SOLDADAS Y SIN SOLDAR.

Los ensayos de fatiga en condiciones de flexión rotativa de una aleación soldada de aluminio nominación AISI SAE 6061-T6, se llevaron a cabo bajo cargas comprendidas entre: 5% y el 70 % aproximadamente respecto del esfuerzo de cedencia del material y a una frecuencia de 50 HZ, como se muestra en la tabla 11. Todas las probetas a ensayar fueron soldadas con los mismos parámetros de soldadura que se obtuvieron en el laboratorio en la etapa de obtención de la misma. Los ensayos se llevaron a cabo sin control de la temperatura ambiente y de la humedad existente; los maquinados realizados en todas las probetas se efectuaron bajo las mismas condiciones de velocidad. En el torno de cuatro mordazas se manejó una velocidad de 450 rpm y en el torno de tres mordazas una velocidad inicial de 800 rpm y una velocidad final de 1000 rpm; estos maquinados se llevaron a cabo de manera sistemática, lo que produjo una rugosidad superficial sin grandes variaciones (parámetro característico de rugosidad Ra entre 15 y 30 micrones).

Tabla 11.- Relación de cargas para las probetas.

CARGA (Kg)	$\sigma_Y$ %	VON MISES (MPa)	Frecuencia (HZ)
0.25	5.65	15.05	50
0.5	11.3	30.1	50
0.75	16.95	45.15	50
1	22.6	60.2	50
1.5	33.9	90.3	50
2	45.2	120.4	50
2.5	56.5	150.5	50
3	67.8	180.6	50

La máquina empleada para la puesta en marcha de ensayos se muestra en la figura 4.1. En esta máquina uno de los extremos de la probeta maquinada se fija al eje del motor y en el extremo opuesto se aplica la carga. Debido a la condición de flexión rotativa, la probeta tiene un esfuerzo inducido en tensión actuando sobre la superficie superior, en tanto que la superficie inferior está sometida a compresión; consecuentemente, la relación de carga para todos los ensayos fue  $R=-1$ .



Figura4. 1Máquina de ensayos.

El total de probetas obtenidas para los ensayos fue de 60; aunque no todas las probetas presentaron condiciones suficientes para poder ser sometidas a los ensayos de fatiga. De este total, únicamente 40 estuvieron en condiciones para los ensayos. En la tabla 12 se muestra la distribución de las probetas maquinadas y las causas por las cuales se descartaron algunas de ellas.

Tabla 12.- Condiciones y distribuciones de las probetas.

Numero de Probeta	Condición	Observaciones
1 a 40	Adecuadas para ensayos	No se encontraron en la superficie poros, grietas o rugosidad excesiva
41, 42, 43	No aptas para ensayos	Poros notorios en la superficie
44, 45, 46	No aptas para ensayos	Grietas en la superficie
47 a 52	No aptas para ensayos	Se sometieron a ensayos, pero fallaron a los pocos segundos de realizar este por la aparición de alúmina
53 a 57	No aptas para ensayos	Se fracturaron durante el proceso de maquinado final
58 a 60	Ensayo de tensión	Se maquinaron con dimensiones para el ensayo de tensión

Las probetas de la 41 a 46 no se sometieron a los ensayos debido a los poros y grietas que presentaban; estos defectos eran visibles a simple vista sin necesidad de algún

método para detectarlos. Las probetas de la 47 a 52 fueron sometidas a ensayos toda vez que no presentaron alguna discontinuidad severa en la superficie, aunque no fueron registradas como ensayos válidos por el poco tiempo que soportaron la carga aplicada: el tiempo de ensayo de estas probetas fue en promedio de 4 segundos (este tiempo reducido de ensayo se debió a la aparición de alúmina). Las probetas de la 53 a 57 fallaron al momento de efectuar el maquinado final, al no soportar la fuerza aplicada por la herramienta de corte. Por último, las probetas de la 58 a 60 fueron destinadas para realizar los ensayos de tensión.

La tabla 13 presenta los tiempos de ensayo y el número de ciclos de vida para cada probeta soldada y sometida a ensayos en fatiga en flexión rotativa.

Tabla 13.- Relación de cargas y numero de ciclos soportados durante los ensayos.

PROBETA	CARGA (Kg)	%	VON MISES (MPa)	TIEMPO(H:M:S)	Numero de ciclos
1	0.5 kg	11.3	30.1	320:0:25	57601250
2	0.5 kg	11.3	30.1	293:0:29	52741450
3	1 kg	22.6	60.2	4:52:05	876025
4	1 kg	22.6	60.2	0:18:14	54700
5	1 kg	22.6	60.2	2:47:23	502150
6	1 kg	22.6	60.2	2:41:27	484350
7	1 kg	22.6	60.2	20:50:49	3752450
8	1 kg	22.6	60.2	17:53:34	3220700
9	1 kg	22.6	60.2	22:12:34	3997700
10	1 kg	22.6	60.2	18:48:2	3384100
11	1 kg	22.6	60.2	20:54:13	3762650
12	1 kg	22.6	60.2	18:13:38	3280900
13	1.5 kg	33.9	90.3	1:36:50	290500
14	1.5 kg	33.9	90.3	2:35:29	466450
15	1.5 kg	33.9	90.3	3:23:49	611450
16	1.5 kg	33.9	90.3	1:13:34	220700
17	1.5 kg	33.9	90.3	1:27:49	263450
18	1.5 kg	33.9	90.3	2:40:11	480550
19	1.5 kg	33.9	90.3	0:28:30	85500
20	1.5 kg	33.9	90.3	1:22:12	246600
21	2 kg	45.2	120.4	0:3:11	9550
22	2 kg	45.2	120.4	0:7:47	23350
23	2 kg	45.2	120.4	0:4:07	12035
24	2 kg	45.2	120.4	0:3:12	9600
25	2 kg	45.2	120.4	0:27:44	83200
26	2 kg	45.2	120.4	0:37:51	113550
27	2 kg	45.2	120.4	0:27:57	83850
28	2 kg	45.2	120.4	0:29:25	88250

**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO  
NOMINACIÓN AISI -SAE 6061-T6 SOMETIDA A UN PROCESO DE SOLDADURA GMAW (MIG)**

29	2 kg	45.2	120.4	0:23:08	69040
30	2 kg	45.2	120.4	0:20:22	61100
31	2.5 kg	56.5	150.5	0:2:06	6030
32	2.5 kg	56.5	150.5	0:3:12	9600
33	2.5 kg	56.5	150.5	0:3:39	10950
34	2.5 kg	56.5	150.5	0:2:01	6005
35	2.5 kg	56.5	150.5	0:3:20	10000
36	2.5 kg	56.5	150.5	0:4:23	13150
37	2.5 kg	56.5	150.5	0:3:38	10900
38	3 kg	67.8	180.6	0:1:2	3100
39	3 kg	67.8	180.6	0:1:10	3500
40	3 kg	67.8	180.6	0:0:52	2600

Con la totalidad de ensayos obtenidos, se puede observar el comportamiento en una gráfica S-N; estos resultados se discutirán con más detalle en el capítulo 5. En la tabla 14 se muestran los promedio de los ciclos de todos los ensayos realizados a un mismo nivel de carga (renglones de un mismo color de la tabla 14).

Tabla 14.- Promedio de ciclos para todas las cargas.

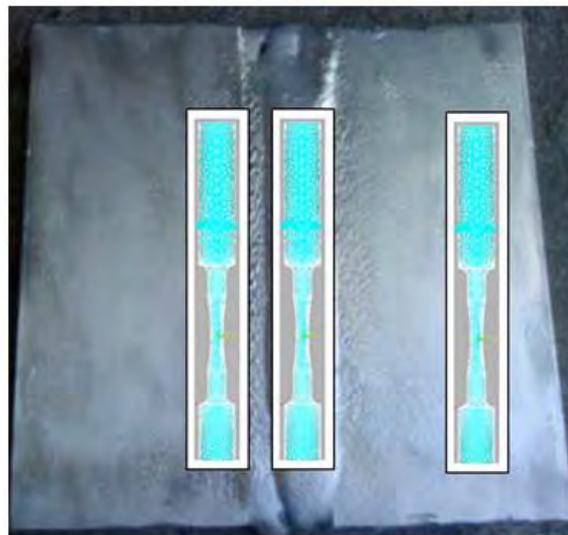
CARGA (kg)	%	Von Mises (MPa)	Promedio de ciclos
0.5 kg	11.3	30.1	55171350
1 kg	22.6	60.2	2331572.5
1.5 kg	33.9	90.3	333150
2 kg	45.2	120.4	55352.5
2.5 kg	56.5	150.5	9519.28571
3 kg	67.8	180.6	3066.66667



La gráfica anterior muestra una importante disminución de la vida en fatiga de los especímenes soldados en comparación a los especímenes que no han sido sometidos a un proceso de soldadura. Además, se puede apreciar que los especímenes que no han sido soldados se encuentran aproximadamente en los 250000 ciclos de vida con una carga de 238 MPa, mientras que en una probeta soldada se observa una vida en fatiga cercana a los 350000 ciclos con una carga de 90 MPa. En el extremo de vida en fatiga podemos observar que una probeta sin soldar presenta 80000000 de ciclos aproximadamente con una carga de 100 MPa; para obtener esta misma vida en fatiga para una probeta soldada, es necesario reducir la carga a 30 MPa como se aprecia en la figura 5.1. Finalmente, a un mismo nivel de carga de 150 MPa las probetas sin soldar presentan una vida en fatiga de 8000000 de ciclos aproximadamente, mientras que las probetas soldadas a este nivel de carga a penas de 8000 ciclos aproximadamente.

### 5.1.2.- CRECIMIENTO DE FISURA EN TRES DIFERENTES ZONAS DE LA SOLDADURA.

Para llevar a cabo ensayos de crecimiento de fisura se maquinaron probetas en las tres zonas descritas en la figura 5.2.



ZAT ZF ZNA  
Figura 5. 2.- Zonas para el maquinado de probetas.

Los resultados de crecimiento de fisura se muestran en la figura 5.3. Como puede apreciarse en el eje vertical se grafica la longitud de la fisura medida en milímetros, mientras que el eje vertical presenta el número de ciclos de ensayo.

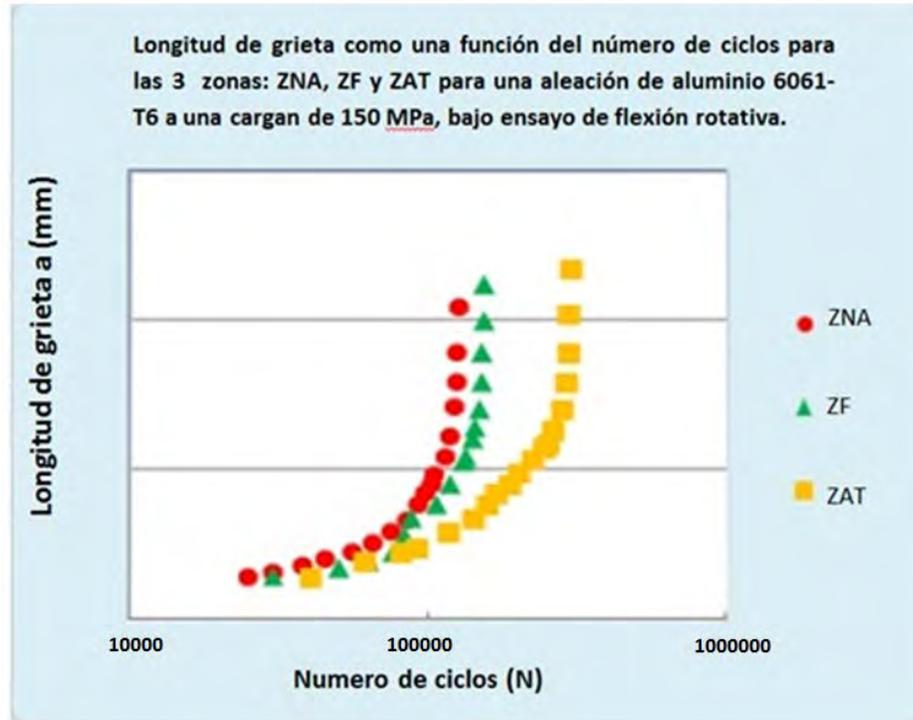


Figura 5. 3.- Crecimiento de fisura en función del número de ciclos.

Adicionalmente, para un número determinado de ciclos el crecimiento de fisura mayor se presentó en la zona no afectada térmicamente seguida de la zona de fusión y finalmente la zona afectada térmicamente. Lo anterior resulta congruente puesto que el aumento de las propiedades de ductilidad provocadas por el efecto térmico en el proceso de soldado en las dos últimas zonas provocan una mayor capacidad de absorción de energía plástica de deformación y consecuentemente un retardo en el crecimiento de fisura.

Cabe mencionar que el proceso de soldado mediante el proceso MIG implica en paralelo un tratamiento térmico al material, provocando que las propiedades mecánicas máximas para la aleación 6061 T-6 se vean modificadas: la resistencia a la tensión disminuye así como la dureza, aunque otras propiedades aumentan como la ductilidad provocando esta última mayor capacidad de absorción de deformación plástica y consecuentemente menor velocidad en el crecimiento de la fisura.

## 5.2.- SUPERFICIES DE FRACTURA.

Las superficies de fractura muestran que a mayor carga en la probeta se puede apreciar una mayor deformación plástica debido a que el material presenta una fractura dúctil caracterizándose por una lenta propagación de la grieta, y la aparición también de la coalescencia de los micro-poros. Trabajando en flexión rotativa, el gradiente de esfuerzos

se presenta en forma radial: mayor en la superficie y cero en el centro de la probeta. Entonces, para todos los niveles de carga, las deformaciones plásticas mayores están localizadas en la periferia de la superficie de fractura. A continuación se muestran diferentes superficies de fractura que aparecen en algunos ensayos.

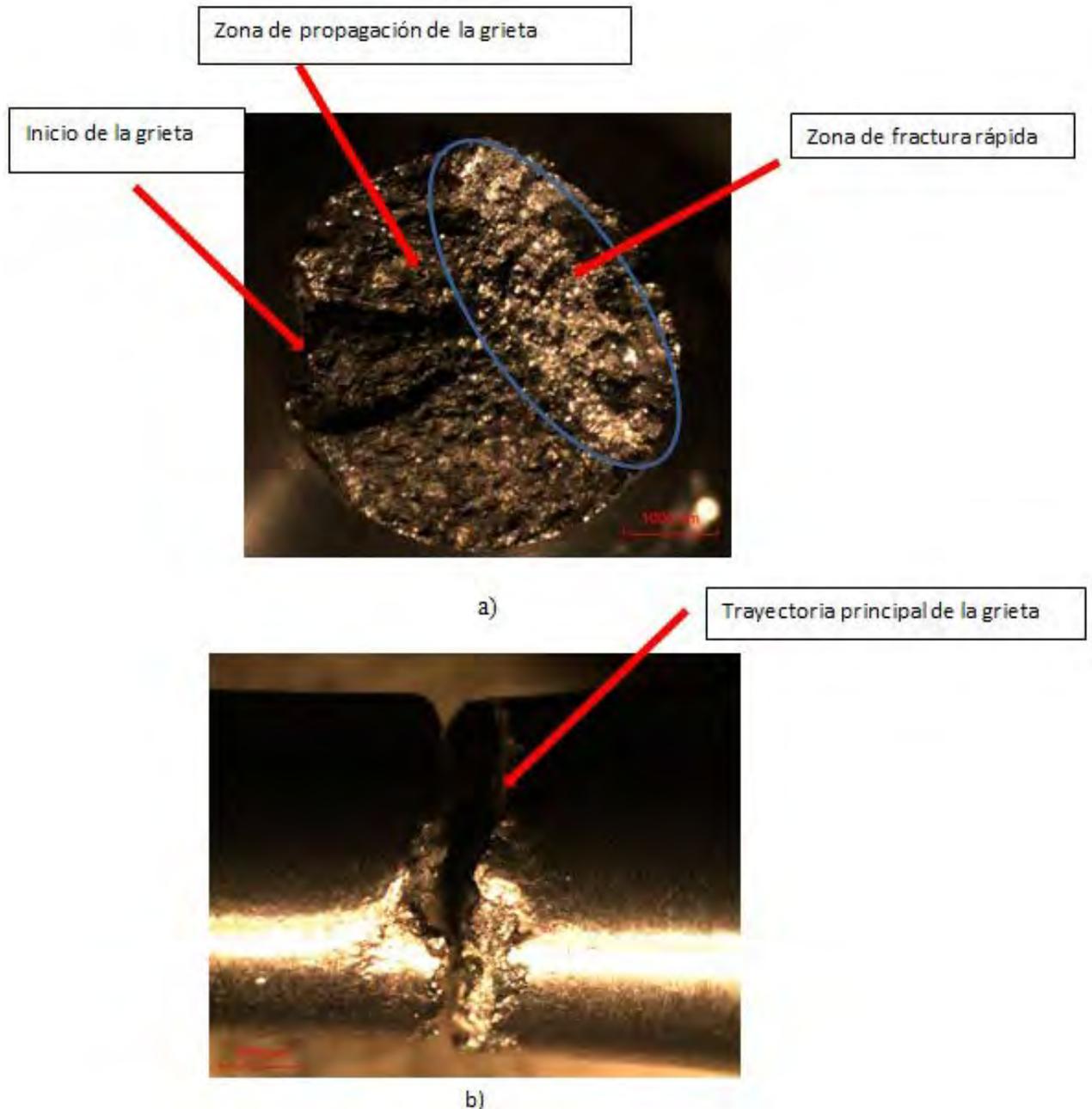


Figura 5. 4.- Superficies de fractura para una carga del 22.6 % del esfuerzo de cedencia, a) zonas de fractura, b) vista lateral de la fractura.

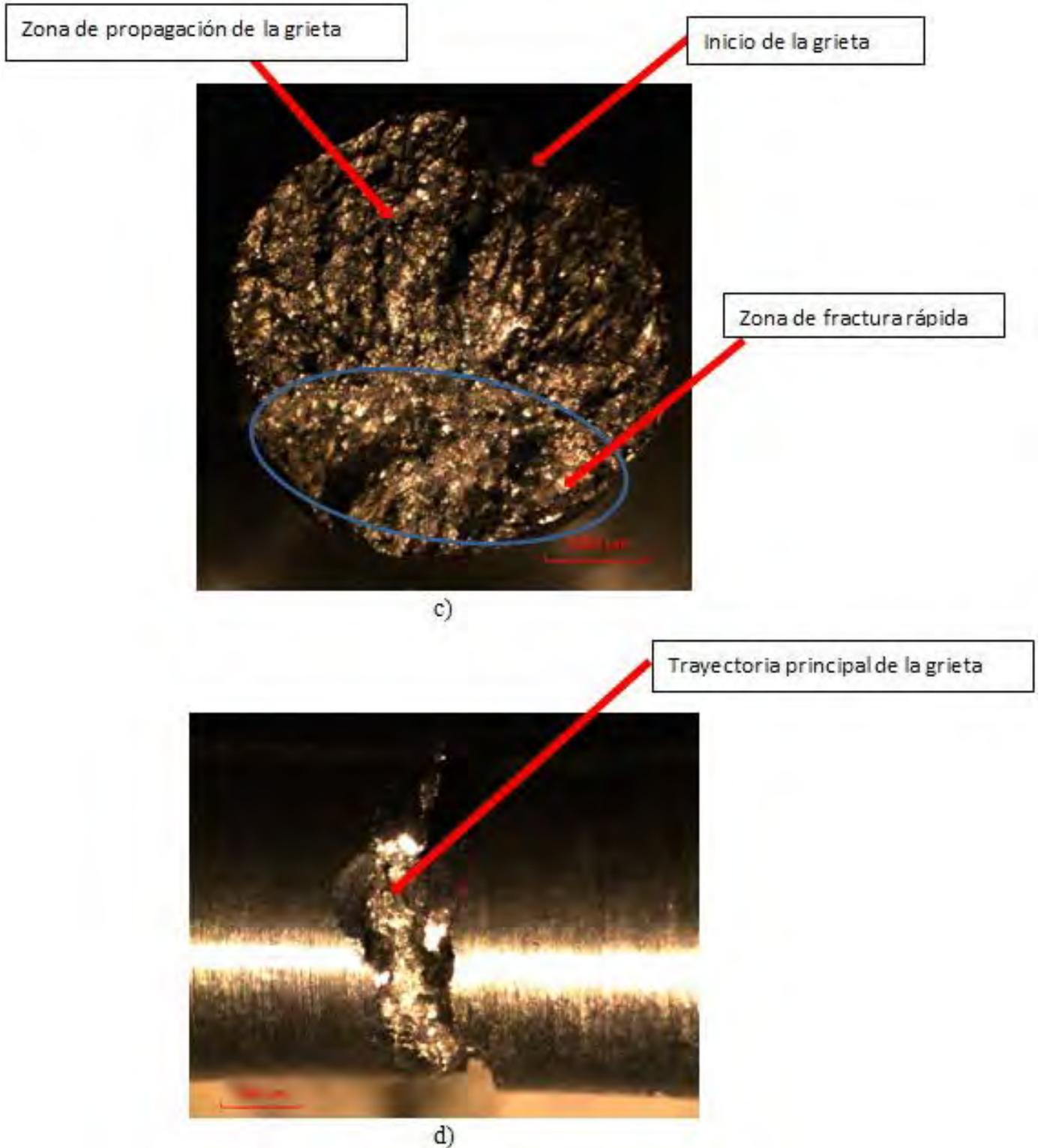


Figura 5. 5 Superficies de fractura para una carga del 33.9 % del esfuerzo de cedencia, c) zonas de fractura, b) vista lateral de la fractura.

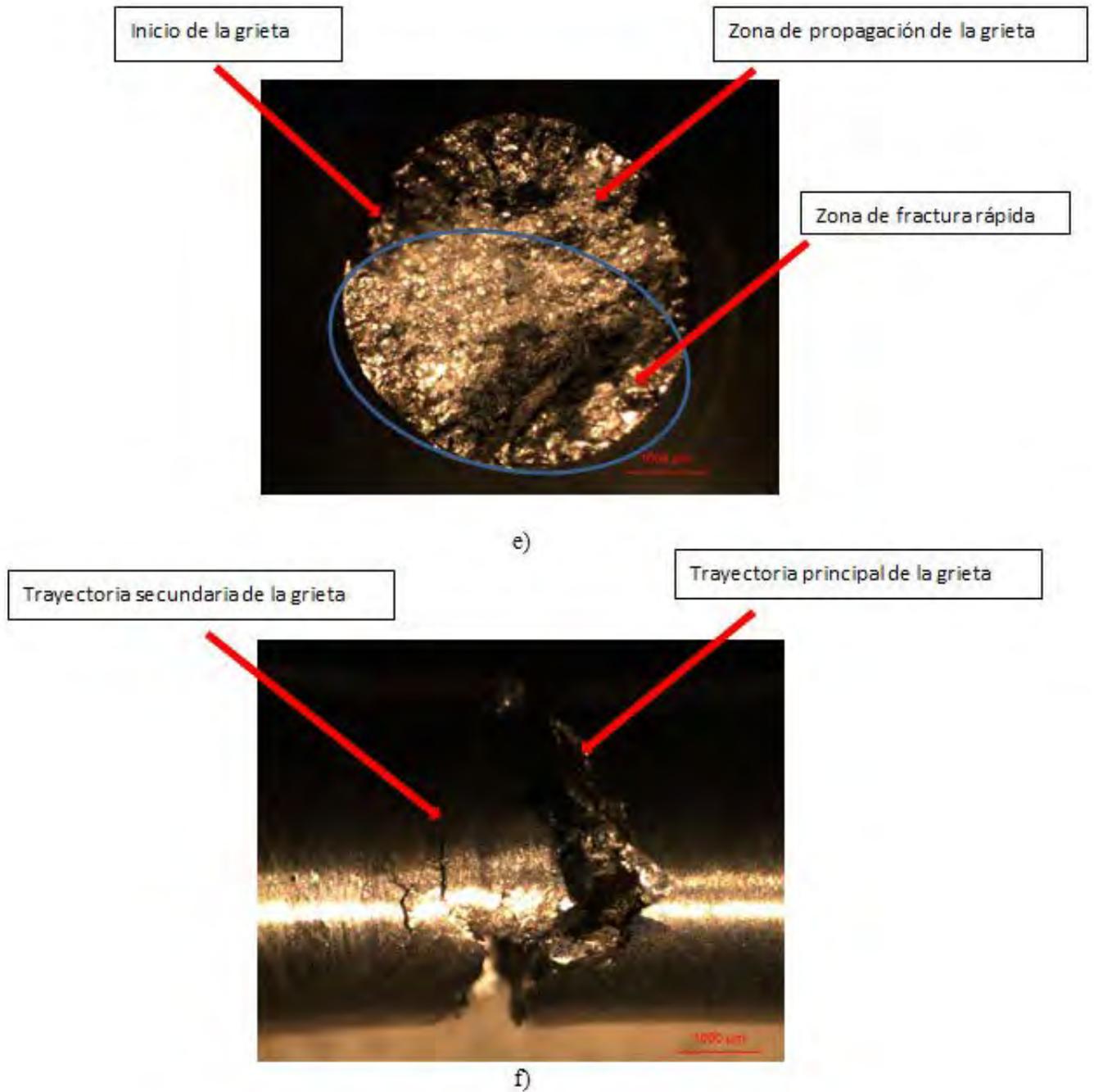


Figura 5. 6.- Superficies de fractura para una caga del 45.2 % del esfuerzo de cedencia, e) zonas de fractura, f) vista lateral de la fractura.

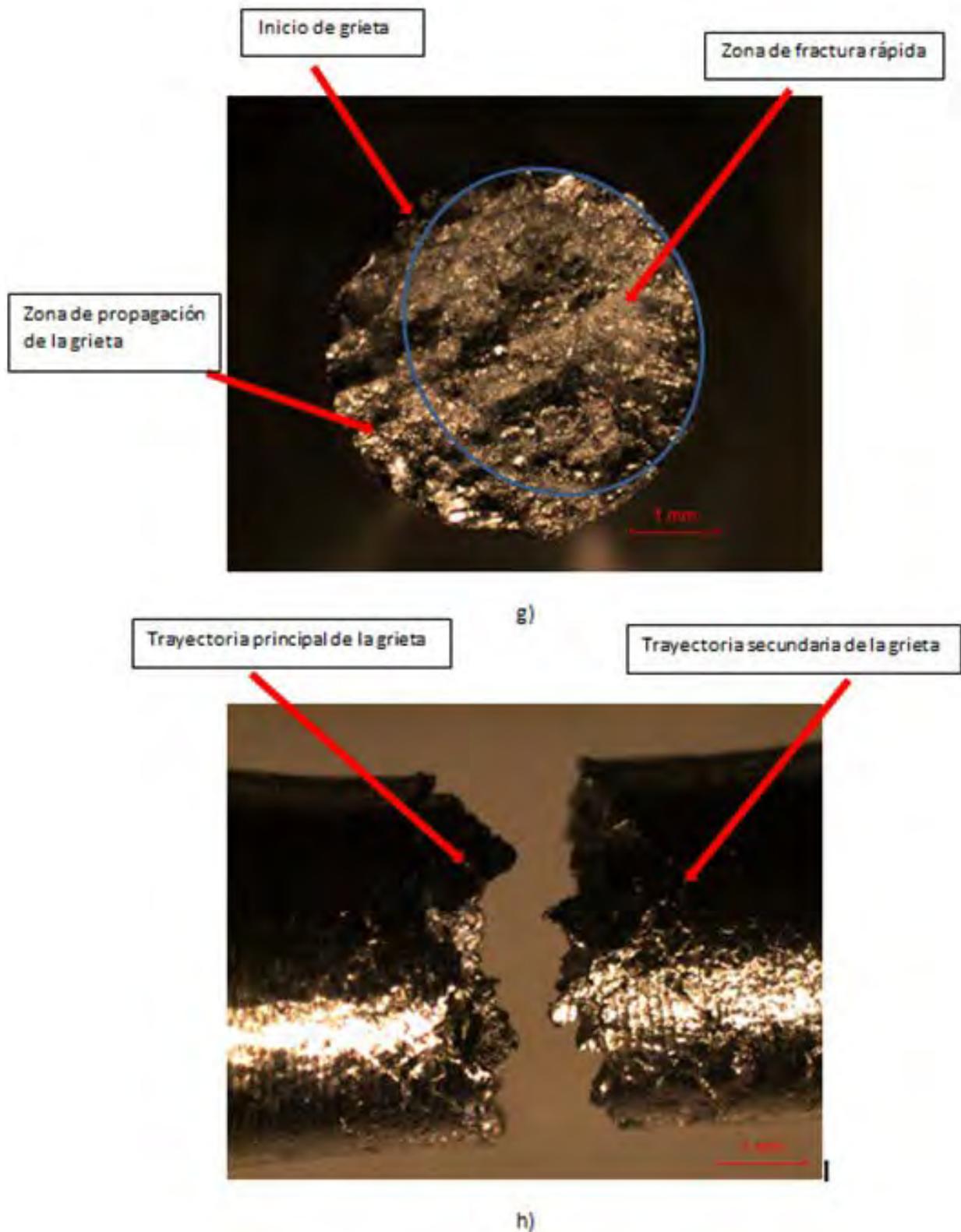


Figura 5. 7.- Superficies de fractura para una carga del 67.8 % del esfuerzo de cedencia, e) zonas de fractura, f) vista lateral de la fractura.

Las superficies de fracturas presentes en las figuras anteriores revelan 2 zonas distintas de fractura características de las cargas que fueron aplicadas. Para niveles de carga pequeños, que en nuestro caso de análisis fueron del 22.6% y 33.9% del límite de cedencia, se puede apreciar una zona de propagación de grieta extensa asociada con la deformación plástica y el crecimiento lento de fisura, y una zona de fractura rápida granular comparativamente menor y asociada con el crecimiento rápido de fisura (deformación plástica prácticamente nula), figuras 5.4 y 5.5. Respecto a las imágenes de las dos figuras anteriores presentando la trayectoria de fisura (5.4 b) y (5.5 b), se puede apreciar una trayectoria irregular de crecimiento de fisura sobre la zona de fusión que se propaga según defectos asociados al proceso de soldadura tales como: micro porosidades, presencia de alúmina y concentración de esfuerzos por el efecto térmico del proceso de soldadura. Para niveles de carga superiores comprendidos entre el 45.2% y 67.8 % del límite de cedencia, se puede apreciar que la zona de fractura lenta asociada con la deformación plástica fue menor a la zona de crecimiento de fractura rápida (zona granular o de nula deformación plástica), figuras 5.6 y 5.7. Respecto a las trayectorias de fisura (5.6 b) y (5.7 b), un comportamiento similar se observa al caso anterior; es decir, la propagación de fisura también es irregular asociada a los defectos mencionados en el proceso de soldadura. Adicionalmente, en estas dos últimas figuras se observan varias trayectorias paralelas del crecimiento de fisura que compiten con la principal; lo anterior resulta del alto nivel de carga que provoca varios sitios de iniciación de fisura simultáneamente, aunque la fractura se lleva a cabo asociado con un solo sitio de iniciación de fisura.

### 5.3.- CONCLUSIONES.

- La resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio 6061 T-6 disminuye considerablemente con la aplicación del proceso de soldadura GMAW, en comparación con las probetas de este mismo material no soldadas, para todos los niveles de carga.
- La variación en la resistencia a la fatiga comparando muestras soldadas y no soldadas, para un número de ciclos dados, disminuye cuando el número de ciclos aumenta (o cuando la aplicación de carga disminuye).
- La ZF en las muestras de soldadura presenta una longitud de 28 mm, mientras que la ZAT es aproximadamente de 16 mm de longitud en ambos lados de la línea de fusión del centro.
- La dureza más baja que se registra después del proceso de soldadura y se localiza en el alambre de relleno ER5356, alcanzando un valor de 58 HV. Esta dureza inferior se registra en la inter-zona ZF-ZAT y se asocia con la degradación de la fase  $\beta''$  (caracterizando la alta resistencia de la aleación de aluminio) por precipitado de la fase  $\beta'$ , causada por el calor generado en la soldadura.

- La curva de esfuerzo-deformación para la ZAT y la ZF decaen drásticamente a causa del efecto de reblandecimiento (aumento de la ductilidad) provocado por el calor en el proceso de soldadura.
- El crecimiento de la grieta inferior se observa en la ZAT, como consecuencia del incremento en la ductilidad asociado al efecto térmico en el proceso de soldadura, dando como resultado una mayor capacidad de absorción de energía por deformación plástica.
- Las superficies de fractura de los especímenes soldados no muestran un inicio de grieta múltiple en la periferia de la superficie del espécimen en la dirección radial para los bajos niveles de carga; en este caso se observa un único inicio de fisura asociado a una imperfección superficial causada por el proceso de soldadura. Por otro lado, para las probetas soldadas y altos niveles de carga se constataron múltiples sitios de inicio de fisura. Para todas las probetas soldadas, las superficies de fractura presentan una zona granular característica del crecimiento rápido de fisura, que aumenta al aumentar el nivel de carga.
- La grieta inicia con frecuencia en la inter-zona ZAT y la ZF, para cargas medias y altas de especímenes soldados, donde los compuestos eutécticos e inter-metálicos generan fronteras de grano grueso y facilitan el inicio de fisura.
- La trayectoria de la fractura se desarrolló sistemáticamente en la sección del cuello de la probeta, debido a que en esta región se localizan las zonas ZAT y la ZF donde, por una parte, la probeta soporta los mayores esfuerzos aplicados, y por la otra, el material presenta defectos por soldadura y disminución de propiedades mecánicas por el efecto térmico de soldadura.

## BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Askeland Donald R., Phulé Pradeep P., Ciencia e Ingeniería de los Materiales, THOMSON, 4ta edición, México, D.F., 2004.
- [2] Avallone Eugene A., III Baumeister Theodore, Manual del Ingeniero Mecánico Tomo 2, McGraw Hill, 9ª edición, México, D.F., 2007.
- [3] Priettoa M, Tsanga M, Hernandez S, Roepkea SJ, Piatkowskib D, Leec E, Stoyanova P, Ogrena J, Es-Said QS. The effects of heat damage of aluminum 6061-T6 AM-2 Mats and High Power Run-Up Anchor. Engineering Failure Analysis 2011; 18: 124-37.
- [4] Marini M, Ismail AB. Torsional deformation and fatigue behaviour of 6061 aluminium alloy. IIUM Engineering Journal 2011; 12: 21-32.
- [5] Chen D-Ch, Shiu JR, Nian F-L, Chen M-R. Analysis of forging forming of 6061 aluminum alloy bicycle pedal. Applied Mechanics and Materials 2013; 271-272: 31-5.
- [6] Liu L, Nakayama H, Fukumoto S, Yamamoto A, Tsubakino H. Microscopic observations of friction stir welded 6061 aluminum alloy. Materials Transactions 2004; 45: 288-91.
- [7] Missori S, and Sili A. Mechanical behaviour of 6082-T6 aluminum alloy welds. Metallurgical Science and Technology 2000; 18: 12-8.
- [8] Ahmad R, Bakar MA. Effect of a post-weld heat treatment on the mechanical and microstructure properties of AA6061 joints welded by the gas metal arc welding cold metal transfer method. Materials & Design 2011; 32: 6120-6.
- [9] Vagh AS, Pandya SN. Influence of process parameters on the mechanical properties of friction stir welded AA 2014-T6 alloy using Taguchi orthogonal array. International Journal of Eng. Sciences & Eng. Technologies 2012; 2: 51-8.
- [10] Balasubramanian V., Ravisankar V, Madhusudhan Reedy G. Influences of pulsed current welding and post weld aging treatment on fatigue crack growth behavior of AA7075 aluminium alloy joints. International Journal of Fatigue 2008; 30: 405-16.
- [11] Mutombo K, Du Toit M. Corrosion fatigue behaviour of aluminium alloy 6061-T651 welded using fully automatic gas metal arc welding and ER5183 filler alloy. International Journal of Fatigue 2011; 33: 1539-47.
- [12] Yu S-Y, Ishii H, Tohgo K. Corrosion fatigue of SiC whisker SiC particulate reinforced 6061 aluminum alloy. Fatigue & Fracture of Eng. Materials & Structures 1994; 17: 571- 8.

- [13] Ahlatci H. Production and corrosion behaviours of the Al-12Si-XMg alloys containing in situ Mg<sub>2</sub>Si particles. *Journal of Alloys and Compounds* 2010; 503: 122-6.
- [14] Dominguez Almaraz GM, Avila Ambriz JL, Cadenas Calderón E. Fatigue endurance and crack propagation under rotating bending fatigue tests on aluminum alloy AISI 6063 T5 with controlled corrosion attack. *Engineering Fracture Mechanics* 2012; 93: 119-31.
- [15] Shi Y, Liu X, Zhang Y, and Johnson M. Analysis of metal transfer and correlated influences in dual-bypass GMAW aluminum. *Welding Research* 2008; 87: 229-36.
- [16] Wang G, Huang PG, and Zhang YM. Numerical analysis of metal transfer in gas metal arc welding under modified pulsed current conditions. *Metallurgical and Materials Transactions B* 2004; 35B: 857-66.
- [17] Nandan R, DebRoy T. and Bhadeshia HKDH. Recent advances in friction-stir welding process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, Vol. 53 (2008), pp. 980-1023.
- [18] DebRoy T, and Bhadeshia HKDH. Friction stir welding of dissimilar alloys – a perspective. *Science and Technology of Welding and Joining* 2010; 15: 266-70.
- [19] Rathod MJ, and Kutsuna M. Joining of aluminum alloy 5052 and low carbon steel by laser roll welding. *Welding Journal* 2004; January: 16-26.
- [20] Haboudou A, Peyre P, Vannes AB, Peix G. Reduction of porosity content generated during Nd: YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A* 2003; 363: 40-52.
- [21] Albert, W.A.J., 1838, “Uber Treibseile am Harz. *Archive fur Mineralogie, Geognosie, Bergbau und Huttenkunde* 10, 215-34.
- [22] Smith, R.A. (1990), “The Versailles railway accident of 1842 and the first research into metal fatigue. In *Fatigue 90* (eds. H. Kitagawa & T. Tanaka), vol. IV, pp. 2033-41”; Birmingham: Materials and Component Engineering Publications.
- [23] Ranking, W.J.M. (1843). On the causes of unexpected breakage of the journals of railway axles and the means of preventing such accidents by observing the law of continuity in their construction. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, London 2, 105-8.
- [24] Hodgkinson, E.A. (1849). Report of the Commissioners Appointed to Enquire into the Application of Iron to Railway Structures, Command Paper No. 1123. London: His Majesty's Stationery Office.

- [25] Braithwaite, F. (1854). On the fatigue and consequent fracture of metals. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, London 13, 463-75.
- [26] Poncelet, J.V. (1839). Introduction a la Mécanique, Industrielle, Physique ou Expérimentale., pp. 317-8. Deuxième édition, Imprimerie de Gauthier-Villars, Paris.
- [26] Wohler, A. (1860). Versuche ubre die Festigkeit der Eisenbahnwagenachsen. Zeitschrift fur Bauwesen 10 ; English summary (1867). Engineering 4, 160-1.
- [27] Fairbairn, W. (1864). Experiments to determine the effect of impact, vibratory action, and long continued changes of load on wrought iron girders. Philosophical Transactions of the Royal Society, London 154, 311.
- [28] Gerber, H. (1874). Bestimmung der zulassigen Spannungen in Eisen-konstruktionen. Zeitschrift des Bayerischen Architekten und Ingenieur-Vereins 6, 101-10.
- [29] Goodman, J. (1899). Mechanics Applied to Engineering. London: Longmans Green.
- [30] Bauschinger, J. (1886). Ueber die Veränderungen der Elastizitätsgrenze und der festigkeit des Eisens und Stahls durch Strecken, Quetschen, Erwarmen Abkuhlen und durch oftmals wiederholte Belastung. Mitt: Mech-Tech Lab., XIII Munchen.
- [31] Ewing, J.A. & Rosenhain, W. (1900). Experiments in micro-metallurgy: Effects of strain. Preliminary notice. Philosophical Transactions of the Royal Society, London, A119, 85-90.
- [32] Ewing, J.A & Humfrey, J.C. (1903). The fracture of metals under rapid alterations of stress. Philosophical Transactions of the Royal Society, London, A200, 241-50.
- [33] Basquin, O.H. (1910). The exponential law of endurance tests. Proceedings of the American Society for Testing and Materials 10, 625-30.
- [34] Bairstow, L. (1910). The elastic limits of iron and steel Ander cyclic variations of stress. Phylosophical Transactions of the Royal Society, London 210, 35-55.
- [35] Boudouard, O. (1911). Essai des métaux par amortissement de leurs vibrations. Mémoires de la Société d'Encouragement á l'industrie Nationale, pp. 545.
- [36] Guillet, A. (1910). Intervention de l'amortissement dans l'essai des fers. Revue des Metall. Memoires, pp. 885.
- [36] Smith, J.H. (1910). Some experiments on the fatigue of metals. Journal of Iron and Steel Institute 91, 365-97.
- [38] Bach, C. (1913). Die maschinen-elemente, 1. Band, 11. Auflage, Kroner Verlag Leipzig.

- [39] Haigh, B.P. (1915). Report on alternating stress tests of a simple of mild steel received from the British Association Stress Committee. Report of the British Association. 85, 163-170.
- [40] Moore, H.F. & Seeley, F.B. (1915). The failure of metals under repeated stress. Proceedings of the American Society for Testing and Materials 15, part 2, 437-66.
- [41] Smith, J.H. & Wedgwood, G.A. (1915). Stress-strain loops for steel in the cyclic state. Journal of Iron and Steel Institute 82, 246-318.
- [42] Ludwik, P. (1919). Uber die Anderung der Festigkeitseigenschaften der Metalle bei wechselnder Beanspruchung. Zeitschrift fur Metallkunde 11, 157-68.
- [43] Gough, H.J. & Hanson, D. (1923). The behaviour of metals subjected to repeated stresses. Proceedings of the Royal Society, London A104, 535-65.
- [44] Jenkin, C.F. (1923). The fatigue failure of metals. Proceedings of the Royal Society, London A103, 121-38.
- [45] Masing, G. (1926). Eigenspannungen und verfestigung beim Messing. In Proceedings of the Second International Conference of Applied Mechanics, pp. 332-5. Zurich.
- [46] Soderberg, C.R. (1939). Factor of safety and working stress. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers 52, 13-28.
- [47] Gough, H.J. (1926). The Fatigue of Metals. London: Benn.
- [48] Moore, H.F. & Kommers, J.B. (1927). The Fatigue of Metals. New York: McGraw-Hill.
- [49] Haigh, B.P. (1917). Experiments on the fatigue of brasses. Journal of the Institute of Metals 18, 55-77.
- [50] MacAdam, D.J. (1926). Stress-strain relationships and the corrosion fatigue of metals. In Corrosion Fatigue, Special Technical Publication 26, pp. 224-54. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- [51] Gough, H.J. (1933). Crystalline structure in relation to failure of metals –especially by fatigue. Edgar Marburg Lecture. Proceedings of the American Society for Testing and Materials 33, Part II, 3-114.
- [52] Palmaren, A. (1924). Die Lebensdauer von Kugellagern. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure 68, 339-41.
- [52] Miner, M.A. (1945). Cumulative damage in fatigue. Journal of Applied Mechanics 12, 159-64.

- [54] Neuber, H. (1946). Theory of Notch Stresses: Principle for Exact Stress Calculations. Ann Arbor, MI: Edwards.
- [55] Langer, B.F. (1937). Fatigue failure from stress cycles of varying amplitude. Journal of Applied Mechanics 59, 160-2.
- [56] Weibull, W. (1939). A statistical theory of the strength of materials. Proceedings 151. Stockholm: Royal Swedish Academy of Engineering Sciences.
- [57] Thum, A. (1939). Festigkeitsprüfung bei schwingender Beanspruchung. Siebel, Handbuch der Werkstoffprüfung, 2. Bd. S. 175/231. Berlin: Verlag Springer.
- [58] Gassner, E. (1941). Auswirkung betriebsähnlicher Belastungsfolgen auf die Festigkeit von Flugzeugbauteilen. Jahrbuch 1941 der deutschen Luftfahrtforschung, 472-83.
- [59] Eden, E.M., Rose, W.N. & Cunningham, F.L. (1911). The endurance of metals. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 4, 839-974.
- [60] Tomlinson, G.A. (1927). The rusting of steels surfaces in contact. Proceedings of the Royal Society, London A115, 472-83.
- [61] Warlow-Davies, E.J. (1941). Fretting corrosion and fatigue strength: brief results of preliminary experiments. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 146, 32-8.
- [62] MacDowell, J.R. (1953). Fretting corrosion tendencies of several combinations of materials. In Fretting Corrosion, Special Technical Publication 144, pp. 24-39. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- [63] Coffin, L.F. (1954). A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers 76, 931-50.
- [64] Manson, S.S. (1954). Behavior of materials under conditions of thermal stress. National Advisory Commission on Aeronautics: Report 1170. Cleveland: Lewis Flight Propulsion Laboratory.
- [65] Inglis, C.E. (1913). Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Transactions of the Institute of Naval Architects 55, 219-41.
- [66] Griffith, A.A. (1921). The phenomenon of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions of the Royal Society, London A221, 163-97.
- [67] Irwin, G.R. (1957). Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. Journal of Applied Mechanics 24, 361-4.
- [68] Paris, P.C., Gomez, M.P. & Anderson, W.P. (1961). A rational analytic theory of fatigue. The Trend in Engineering 13, 9-14.

- [69] Paris, P.C. & Erdogan, F. (1963). A critical analysis of of crack propagation laws. *Journal of Basic Engineering* 85, 528-34.
- [70] Thompson, N., Wadsworth, N.J. & Louat, N. (1956). The origin of fatigue fracture in copper. *Philosophical Magazine* 1, 113-26.
- [71] Zappfe, C.A. & Worden, C.O. (1951). Fractographic registrations of fatigue. *Transactions of the American Society for Metals* 43, 958-69.
- [72] Forsyth, P.J.E. & Ryder, D.A. (1960). Fatigue fracture. *Aircraft Engineering* 32, 96-9.
- [73] Laird, C. & Smith, G.C. (1962). Crack propagation in high stress fatigue. *Philosophical Magazine* 8, 847-57.
- [74] McClintock, F.A. (1963). On the plasticity of the growth of fatigue cracks. In *Fracture of Solids* (eds. D.C. Drucker & J.J. Gilman), Vol. 20, pp. 65-102. New York: Wiley.
- [75] Weertman, J. (1966). Rate of growth of fatigue cracks calculated from the theory of infinitesimal dislocations distributed on a crack plane. *International Journal of Fracture* 2, 460-7.
- [76] Laird, C. (1967). The influence of metallurgical structure on the mechanisms of fatigue crack propagation. In *fatigue Crack Propagation*, Special Technical Publication 415, pp. 131-68. Philadelphia: The American Society for Testing and Materials.
- [77] Rice, J.R. (1967). Mechanics of crack tip deformation and extensión by fatigue. In *Fatigue Crack Propagation*, Special Technical Publication 415, pp. 247-309. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- [78] Neumann, P. (1969). Coarse slip model of fatigue. *Acta Metallurgica* 17, 1219-25.
- [79] Pelloux, R.M.N. (1969). Mechanisms of formation of ductile fatigue striations. *Transactions of the American Society for Metals* 62, 281-5.
- [80] Elber, W. (1970). Fatigue crack closure under cyclic tension. *Engineering Fracture Mechanics* 2, 37-45.
- [81] Elber, W. (1971). The significance of fatigue crack closure. In *Damage Tolerance in Aircraft Structures*, Special Technical Publication 486, pp. 230-42. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- [82] Ritchie, R.O., Suresh, S. & Moss, C.M. (1980). Near-threshold fatigue crack growth in 21/4 Cr-1Mo pressure vessel steel in air and hydrogen. *Journal of Engineering Materials and Technology* 102, 293-9.

- [83] Suresh, S., Zamiski, G.F. & Ritchie, R.O. (1981). Oxide-induced crack closure: an explanation for near-threshold corrosion fatigue crack growth behavior. Metallurgical Transactions 12A, 1435-43.
- [84] Suresh, S., & Ritchie, R.O. (1984a). Near-threshold fatigue crack propagation: a perspective on the role of crack closure. In Fatigue Crack Growth Threshold Concepts (eds. D.L. Davidson & S. Suresh), pp. 227-61. Warrendale: The Metallurgical Society of the American Institute of Mining, Mineral and Petroleum Engineers.
- [85] Suresh, S., (1983a). Crack deflection: implications for the growth of long and short fatigue cracks. Metallurgical Transactions 14A, 2375-85.
- [86] Rodríguez Claudio Pedro, MANUAL DE SOLDADURA: Soldadura eléctrica MIG y TIG, Librería y Editorial Alsina, 1ra ed., Buenos Aires Argentina, 2001.
- [87] González Jorge Luis, Metalurgia Mecánica, LIMUSA, primera edición, México, D.F., 2003.
- [88] Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, McGraw Hill, 8va ed., Mexico DF., 2008.
- [89] Askeland Donald R., Phulé Pradeep P., Ciencia e Ingeniería de los Materiales, THOMSON, 4ta edición, México, D.F., 2004
- [90] M. Mitchell. "Fundamentals of modern Fatigue analysis for design". Fatigue and Microstructure, M. Meschii Ed, American Society for Metals Park OH pp. 385-437, 1978.
- [91] Avallone Eugene A., III Baumeister Theodore, Manual del Ingeniero Mecánico Tomo 2, McGraw Hill, 9ª edición, México, D.F., 2007.
- [92] L. de Vedia, H. Svoboda, Introducción a la metalurgia de la soldadura, Apuntes de Cátedra, Nov. 2004.
- [93] P.T. Houldcroft, Tecnología de los procesos de soldadura, Grupo editorial Ceac s.a, 3ra ed., España, 1980.
- [94] Horwitz Henry, SOLDADURA APLICACIONES Y PRACTICA, Alfaomega, 1ra ed., México, 1997.
- [95] Giachino W. Joseph, Weeks William, Técnica y práctica de la soldadura, Editorial Reverte, 1ª edición, España, 2007, 378-380 p.
- [96] Jeffus Larry, Soldadura Principios y Aplicaciones, Paraninfo, 5ª ed., España, 2009, 894 pp
- [97] L. MENDEL, Manual práctico de soldadura. Madrid: Ed. Paraninfo, 1981, 345 pp.

[98] Rodríguez Claudio Pedro, Manual de Soldadura: Soldadura eléctrica MIG y TIG, Librería y Editorial ALSINA, 1ra ed., Argentina, 2001, 65 pp.

[99] Mandal M.R, ALUMINUM WELDING, Narosa, 2a ed., India, 2005, 168 pp.

## ANEXOS

Artículos en revistas indexadas, congresos nacionales e internacionales realizados durante el desarrollo de la tesis.



Sociedad Mexicana  
de Materiales A.C.

---

August 2012

TO WHOM IT MAY CONCERN  
Present

This is to certify that *Gonzalo M. Domínguez Almaraz, Julio Cesar Verduzco Juárez, Erasmo Correa Gómez, Renato González Bernal, Jorge L. Avila Ambriz* presented the contribution:

FATIGUE ANALYSIS UNDERGOING ROTATING BENDING TESTS OF ALUMINUM ALLOY AISI 6061-T6, SUBJECTED TO WELDING PROCESS GMAW (GAS METAL ARC WELDING), in the Advanced Structural Materials Symposium at the XXI International Materials Research Congress held in Cancun, Mexico from August 12th to 16th, 2012.

Sincerely,

Sergio Mejía Rosales  
President



Sociedad Mexicana  
de Materiales A.C.

---

August 2013

TO WHOM IT MAY CONCERN  
P r e s e n t

This is to certify that *Gonzalo Mariano Dominguez Almaraz, Julio C. Verduzco Juárez, Renato González Bernal* presented the contribution: **ROTATING BENDING FATIGUE ENDURANCE OF ALUMINUM ALLOY AISI 60, WELDED BY GMAW PROCESS**, in the Advanced Structural Materials Symposium at the XXI International Materials Research Congress held in Cancun, Mexico from August 11th to 15th, 2013.

Sincerely,

Armando Salinas Rodriguez  
President

---

S4A-0030