



**República Bolivariana de Venezuela
Ministerio de Educación Cultura y Deporte
Universidad de Carabobo
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica**



***EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE UNA JUNTA DE
AA-6061 SOLDADA POR FRICCIÓN.***

Miquilena Nava, Nelson Daniel.

Bárbula, Marzo 2011.



República Bolivariana de Venezuela
Ministerio de Educación Cultura y Deporte
Universidad de Carabobo
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica



***EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE UNA JUNTA DE
AA-6061 SOLDADA POR FRICCIÓN.***

***TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECANICO***

Miquilena Nava, Nelson Daniel.

Bárbula, Marzo 2011.



República Bolivariana de Venezuela
Ministerio de Educación Cultura y Deporte
Universidad de Carabobo
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica



CERTIFICADO DE APROBACIÓN.

Los abajo firmantes miembros del jurado designado para evaluar el trabajo de grado titulado: **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE UNA JUNTA DE AA-6061 SOLDADA POR FRICCIÓN**, realizado por el bachiller Nelson Daniel Miquilena Nava, cedula de identidad: V- 16 449 839, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Ing. Argel Porrello.
Tutor

Ing. Eleazar Diaz.
Jurado

Ing. Carmelo Torres.
Jurado

VALENCIA, MARZO DE 2011

RESUMEN.

En este trabajo se llevó a cabo la Evaluación del Comportamiento a Fatiga de una Junta de AA-6061 Soldada por Fricción. El estudio se realizó utilizando probetas diseñadas según la norma ASTM (E8 para los ensayos de tracción y E-606 para los ensayos a fatiga), ensayadas en una máquina de flexión rotativa a una velocidad de giro de 1000 rpm y una carga aplicada variable la cual se distribuyó haciendo uso del método de la escalera. Con ayuda de este método se seleccionaron niveles de carga que van desde la máxima carga, es decir 100% carga, hasta la mitad de la misma; es decir 50% de carga, partiendo de que la carga máxima es el esfuerzo de fluencia encontrado en los ensayos de tracción realizados. Debido a requerimiento de la máquina además de la velocidad de giro el otro dato de entrada para la realización del ensayo de fatiga era el momento flector el cual fue calculado para cada nivel de esfuerzo. Ya con todos los datos necesarios se llevaron a cabo los ensayos, cuyo valor de salida fueron los ciclos de duración, útiles para realizar la curvas de Wöhler o curvas S-N, a través de las cuales se analizó la tendencia del comportamiento de las piezas bajo esta condición, comparándose también con las de un trabajo de referencia tomado. De igual manera se realizó un estudio de la microestructura a través de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) a algunas probetas seleccionadas con la intención de identificar mecanismos de fractura y detectar la presencia de grietas y otros defectos presentes en las piezas que pudieron propiciar el agrietamiento y fractura de las mismas. De igual modo a través de un análisis de microscopía por medio de un corte longitudinal realizado a una muestra sin ensayar se demostró que las escorias o material solidificado en el proceso de soldadura se alojan en los bordes cercanos al cordón de soldadura debido a la fuerza de empuje torsional del material que va del centro hacia fuera. Como resultado principal se encontró la resistencia a la fatiga del material soldado tuvo una disminución promedio del 18% comparada con la resistencia a la fatiga del material sin soldar para duraciones entre 250.000 y 2.000.000 ciclos.

GLOSARIO DE TÉRMINOS.

ALARGAMIENTO: conocido como elongación es una magnitud que mide el aumento de longitud que tiene un material cuando se le somete a un esfuerzo de tracción antes de producirse su rotura.

ALEACIÓN: Sustancia de características metálicas obtenida por la incorporación de unos o varios elementos a un metal.

DEFORMACIÓN: Es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo o la ocurrencia de dilatación térmica.

ESFUERZO: Las fuerzas internas de un elemento están ubicadas dentro del material por lo que se distribuyen en toda el área.

FRICCIÓN: Fuerza para resistir el movimiento relativo de dos superficies en contacto.

FRACTURA: Separación bajo presión en dos o más piezas de un cuerpo sólido.

GRIETAS: Hendiduras originadas por fracturas en los materiales frágiles o en materiales con diferentes fases.

INERCIA: Propiedad de los cuerpos que hace que éstos tiendan a conservar su estado de reposo o de movimiento.

IONIZACIÓN: Proceso fisicoquímico mediante el cual se producen iones, estos son átomos o moléculas cargadas eléctricamente debido al exceso o falta de electrones respecto a un átomo o molécula neutro.

MARCAS DE PLAYA: Señales en la superficie de una fractura que representa la posición del frente de la grieta durante diversos momentos de falla.

POROSIDADES: Pequeños depósitos de gas que se producen en una pieza fundida o en una aleación.

PROBETA: Trozo de material, destinado a ser sometido a tracción, torsión, etc., hasta llegar a la rotura, a fin de conocer algunas de sus características mecánicas.

RESISTENCIA: Capacidad para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse, adquirir deformaciones permanentes o deteriorarse de algún modo.

SIMBOLOGÍA.

A	Coefficiente de Resistencia a la Fatiga.
N	Número de Ciclos.
B	Exponente de Resistencia a la Fatiga o Exponente de Basquin.
b	Término independiente de la ecuación de la recta.
C	Distancia entre el centro y la fibra más alejada.
I	Inercia.
M	Momento flector.
Mt	Momento flector de trabajo.
m	Pendiente de la recta.
n	Cantidad de datos recolectados.
R	Relación de Esfuerzos.
R ²	Coefficiente de Correlación Lineal.
S _f	Resistencia a la fatiga.
S _t	Resistencia de Trabajo
S _y	Resistencia a la Fluencia.
X	Logaritmo del número de ciclos.
Y	Logaritmo del esfuerzo aplicado.
$\sum X$	Sumatoria de los logaritmos del número de ciclos.
$\sum Y$	Sumatoria de los logaritmos de la carga aplicada.
$\sigma_{\text{máx.}}$	Esfuerzo máximo.
$\sigma_{\text{mín}}$	Esfuerzo mínimo.
σ_a	Esfuerzo alternante.
σ_m	Esfuerzo medio.
σ_r	Intervalo de esfuerzos.

INDICE GENERAL.

	Página
INTRODUCCION.....	1
CAPITULO I. El Problema	
Titulo del Trabajo.....	2
1.1. Planteamiento de la Situación Problemática.....	2
1.2. Formulación del Problema.....	5
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. General.....	5
1.3.2. Específicos.....	5
1.4. Justificación.....	6
1.5. Limitaciones.....	6
1.6. Alcance.....	7
CAPITULO II. Marco Teórico	
2.1. Antecedentes.....	9
2.2. Generalidades del Aluminio.....	11
2.2.1. Historia.....	12
2.2.2. Características Físicas.....	13
2.2.3. Características Mecánicas.....	14
2.2.4. Características Químicas.....	15
2.3. Aplicaciones.....	15
2.4. Aleaciones de Aluminio.....	16
2.4.1. Aportaciones de los elementos Aleantes.....	16
2.4.2. Clasificación del Aluminio y las Aleaciones de Aluminio según el Producto.....	17
2.4.3. Designaciones de temple del Aluminio y las Aleaciones de Aluminio.....	20
2.4.4. Clasificación y Características del Aluminio y Aleaciones de Aluminio Forjado.....	20
2.5. Aleaciones de Aluminio de la Serie 6xxx.....	21
2.5.1. Descripción y Aplicación de la Aleación de Aluminio AA- 6061.....	21
2.5.2. Composición Química de la Aleación de Aluminio AA- 6061.....	22
2.6. Soldadura.....	22
2.6.1. La Soldadura por Fricción.....	22
2.6.2. Ventajas del Proceso de Soldadura por Fricción.....	23
2.7. Aplicaciones de la Soldadura por Fricción.....	24
2.7.1. Aplicaciones de la Soldadura por Fricción para las Industrias Agrícolas y de Transportes por Camión.....	25

2.7.2. Aplicaciones de la Soldadura por Fricción para Bimetálicos y Uso General.....	26
2.7.3. Aplicaciones de la Soldadura por Fricción para la Industria de Aeronaves y Naves Aeroespaciales.....	27
2.7.4. Aplicaciones de la Soldadura por Fricción para la Industria Automotriz.....	28
2.7.5. Aplicaciones de la Soldadura por Fricción para la Industria Militar.....	29
2.7.6. Aplicaciones de la Soldadura por Fricción para la Industria Petrolera.....	30
2.8. Materiales Soldables.....	31
2.9. Fatiga en Materiales.....	31
2.9.1. Factores que Influyen en la Resistencia a la Fatiga.....	32
2.9.2. Inicio y Propagación de la Grieta.....	34
2.9.3. Esfuerzos Fluctuantes.....	35
2.9.4. Ensayos de Fatiga.....	36
2.9.5. Curvas de Wöhler (Curvas S-N).....	38
2.9.6. Ecuación de Basquin para la Construcción de las Grafica S-N.....	40
2.10. Ajuste de curvas por el Método de los Mínimos Cuadrados.....	41
2.11. Coeficiente de Correlación Lineal.....	43
 CAPITULO III. Marco Metodológico.	
3.1. Nivel de la Investigación.....	44
3.2. Diseño de la Investigación.....	44
3.3. Población y Muestra.....	45
3.3.1. Población.....	45
3.3.2. Muestras.....	45
3.4. Tipo de Muestreo.....	46
3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	47
3.5.1. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos.....	47
3.6. Equipos Utilizados.....	48
3.7. Procedimientos Experimentales.....	49
3.7.1. Material.....	49
3.7.2. Preparación y Características Geométricas de las Probetas.....	49
3.7.2.1. Ensayos de Tracción.....	51
3.7.2.2. Ensayos de fatiga.....	52
3.7.2.3. Método de la Escalera.....	53
3.7.3. Fractografía.....	54
3.7.4. Análisis Metalográfico.....	55
 CAPITULO IV. Análisis y Discusión de los Resultados.	
4.1. Ensayos de Tracción.....	58
4.2. Ensayos de Fatiga.....	61
4.3. Análisis Estadístico de los Ensayos de Fatiga.....	67
4.4. Fractografía.....	71
4.4.1. Fractografía a 100% del esfuerzo aplicado.....	71

4.4.2. Fractografía a 90% del esfuerzo aplicado.....	72
4.4.3. Fractografía a 80% del esfuerzo aplicado.....	73
4.4.4. Fractografía a 70% del esfuerzo aplicado.....	74
4.4.5. Fractografía a 60% del esfuerzo aplicado.....	75
4.4.6. Fractografía a 50% del esfuerzo aplicado.....	75
4.5. Microscopia.....	76
4.5.1. Corte Longitudinal.....	76
4.5.2. Corte Transversal.....	78
CONCLUSIONES.....	80
RECOMENDACIONES.....	82
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	83
ANEXOS.....	85
Anexo A. Gráficas Ensayos de Tracción.	
Anexo B. Plano de Probetas Utilizadas.	
Anexo B.1. Plano de Probetas para Soldadura.	
Anexo B.2. Plano de Probetas Soldadas.	
Anexo B.3. Plano de Probetas para Tracción.	
Anexo B.4. Plano de Probetas para Fatiga.	
Anexo C. Medición de Rugosidad Superficial.	

ÍNDICE DE FIGURAS.

	Página
Figura 1. (a) Bielas de pistones hidráulicos. (b) Horquillas del eje delantero.....	26
Figura 2. (a) Conectores eléctricos de cobre a aluminio. (b) Rodillos fusores de fotocopiadoras.....	26
Figura 3. Ejes de ventilador, engranajes.....	27
Figura 4. (a) Válvulas de motor. (b) Discos para engranaje.....	28
Figura 5. (a) Forro de escopeta. (b) Mortero de humo.....	29
Figura 6. (a) Acoples de tubos colectores. (b) Bridas a cuerpos de válvulas. (c) Acoples de manguera de alta presión.....	30
Figura 7. Esquema de la Máquina de Ensayo de Fatiga.....	38
Figura 8. Curva de Wöhler.....	39
Figura 9. Flujograma de los ensayos a realizar.....	46
Figura 10. (a) Máquina para Soldadura por fricción. (b) Puesta a punto.....	50
Figura 11. Máquina para Ensayo de Tracción.....	51
Figura 12. Máquina para Ensayo de Fatiga.....	53
Figura 13. Ionizador o Cubridor de Iones.....	55
Figura 14. Microscopio Electrónico de Barrido.....	55
Figura 15. Embutidora.....	56
Figura 16. Microscopio Óptico.....	57
Figura 17. a) Levantamiento de material, tomada a 150X. b) Ampliación de la zona dúctil, tomada a 100X.	72
Figura 18. a) Marca de playas, tomadas a 150X. b) Cuerpo dendrítico direccionado desde el borde hacia el centro, tomada 150X.....	73
Figura 19. a) Agrietamiento del borde al centro, tomada a 100X. b) Zona central de la pieza, tomada a 100X.....	74
Figura 20. a) Borde de la pieza, tomada a 60X. b) centro de la pieza, tomada a 60X.....	74
Figura 21. a) Olas de playa, tomada a 100X. b) Zona frágil-dúctil, tomada a 80X.....	75
Figura 22. a) Centro de la pieza, tomada a 60X. b) Borde de la pieza, tomada a 150X.....	76
Figura 23. Cordón de soldadura. Corte Longitudinal.....	77
Figura 24. Borde cercano al cordón de soldadura tomada a 1000X.....	77
Figura 25. Zona Central cercana al cordón de soldadura tomada a 100X.....	77
Figura 26. Lateral Izq. cercano al cordón de soldadura tomada a 100X.	78
Figura 27. a) Borde 80% de carga, tomada a 400X. b) Borde 90% de carga, tomada a 100X. c) Borde 80% de carga, tomada a 1000X. d) Centro a 90% de carga, tomada a 400X.....	79

ÍNDICE DE TABLAS.

	Página
Tabla 1. Composición Química de la Aleación.....	22
Tabla 2. Esfuerzo de Fluencia Ensayo de Tracción (Probeta Soldada).....	59
Tabla 3. Esfuerzo de Fluencia (Probeta Soldada).....	60
Tabla 4. Valores para Comprobación de Material Usado.....	60
Tabla 5. Valores para Gráfico S Vs N (Probeta Soldada).....	63
Tabla 6. Promedio y Desviación Estándar para cada Nivel de Carga.....	64
Tabla 7. Valores para Comprobación de Método para Ensayo de Fatiga.....	64
Tabla 8. Valores para realizar Gráfico S Vs N (Probeta sin Soldadura).....	65
Tabla 9. Valores para Determinar los Coeficientes de la ecuación de Basquin (Probeta Soldada).....	68

ÍNDICE DE GRÁFICOS.

	Página
Gráfico 1. Curva Esfuerzo – Deformación.....	59
Gráfico 2. Curva S-N del Aluminio Soldado por Fricción.....	66
Gráfico 3. Curva S-N del Aluminio sin Soldar. (Tesis referencia).....	66
Gráfico 4. Curva S-N del Aluminio. Comparación de las Condiciones de Trabajo.....	67
Gráfico 5. Linealización de la Curva S-N.....	70

INTRODUCCION.

En los últimos años la industria metalmecánica se ha desarrollado resaltando materiales con buenas condiciones para distintos usos. El aluminio ha resultado ser un elemento metálico que por su abundancia en la corteza terrestre y debido a características que posee, tales como: excelente conductividad eléctrica y térmica, alta resistencia a la corrosión, bajo punto de fusión, excelente trabajabilidad, es considerado uno de los metales más utilizados y cotizados a nivel industrial.

Actualmente una de las aleaciones de aluminio más usadas y comercializadas es la AA-6061, que entre sus características más resaltantes tienen su buena formabilidad, soldabilidad, resistencia a la corrosión y resistencia mecánica. Es una buena aleación para usos generales que se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones estructurales y ensambladuras soldadas algunos ejemplos de esto podemos mencionar rines de aluminio, componentes de camión, vagones de ferrocarril, tuberías, aplicaciones marinas, mobiliario, aplicaciones agrícolas, aeronaves, piezas de automóviles (culatas de motores) entre otros. De allí el interés que despierta el estudiar el comportamiento ante el proceso soldadura por fricción en aleaciones de aluminio AA-6061 cuando es sometida a fatiga, ya que debido a su resistencia específica también se pueden realizar piezas de esta aleación que puedan soportar la misma carga que si fuese hecha con acero pero con un peso mucho menor. La fatiga representa el principal problemas en cuanto a la resistencia que presentan las juntas soldadas, por los métodos convencionales (arco eléctrico, etc.) lo que ha dificultado su utilización (piezas soldadas sometidas a fatiga). Es por ello que resulta de suma importancia conocer que tan eficiente es este proceso de unión (soldadura por fricción) ante este fenómeno.

En el trabajo que a continuación se presenta se sometieron un número de piezas seleccionadas y diseñadas según las normas ASTM a diversos ensayos mecánicos que permitieron determinar características importantes del material. Primero se realizaron ensayos de tracción con lo cual se determinó el esfuerzo de fluencia del material, luego con los ensayos de fatiga utilizando el método de la escalera, se encontraron los ciclos de duración del material en cada nivel de carga para de esta manera obtener valores que puedan ser útiles para la elaboración de la curvas de Wöhler que permitieron describir la tendencia del comportamiento de la aleación bajo esta condición de trabajo. Adicionalmente se realizó un estudio sistemático de la microestructura en las zonas de fracturas, donde se determinaron las posibles causas que propiciaron la rotura de la misma con el apoyo de un Microscopio Electrónico de Barrido, además de esto mediante un corte longitudinal a una pieza sin ensayar se observó el comportamiento de la soldadura y a través de cortes transversales a probetas ya rotas a 10mm de la zona de rotura se pudieron conocer los cambios sufridos en la microestructura de la misma, con ayuda de un microscopio óptico.

AGRADECIMIENTO.

Primero que todo quiero dar las gracias al Dios Poderoso, quien por su infinita misericordia, me dio la oportunidad de vivir. Después de tantas cosas que me han sucedido en esta corta vida, enfermedades, problemas de toda índole los cuales me han permitido ver como un gran regalo el aliento con el que cada día me levanto.

Por otro lado y no menos importante agradezco a mis padres Thais Antonia Nava Medina y Lucino Antonio Miquilena Rojas, su apoyo incondicional, las fuerzas y la confianza brindada para poder vencer los obstáculos que se me han presentado, y hacer de mi un hombre de bien permitiéndome realizarme como persona y formarme profesionalmente, privilegio que ellos por ser de bajos recursos no tuvieron en su momento, aunque no por eso desistieron de la esperanza de ver a sus hijos con una profesión. Por eso los admiro tanto.

Además quisiera extender mis más sinceros sentimientos de gratitud a aquellas personas que también me apoyaron y aportaron su granito de arena y me ayudaron a llegar a estas instancias: A mi bella esposa y a mis hermosas niñas quienes han venido a ser el motor que me inspira para seguir luchando y superando, a mis hermanos, tíos, primos, compañeros de clase.

Dos personajes muy importantes fueron el Ingeniero y Coordinador de Actividades Técnicas del Laboratorio de Procesos de Manufactura de La USB, Antonio Di Santis, a quien gracias a su ayuda y valiosa colaboración se pudo llevar a cabo el punto de partida de este proyecto como lo es el proceso de soldadura. De igual manera es menester extender mi gratitud al Doctor Olivar Castejón Coordinador de CIADANA (Centro de Investigación y Análisis Docente del Núcleo de Aragua) lugar donde fueron realizados los ensayos con el MEB, mucha entrega, mucha colaboración y ayuda fueron su carta de presentación. A Ellos y a ambas instituciones educativas gracias.



*Evaluación del Comportamiento a Fatiga de
Una Junta de AA-6061 Soldada por Fricción*



También me es necesario destacar la valiosa y desinteresada contribución del señor Dimas Gámez, conjuntamente con los trabajadores de su Empresa TECNITREN, quienes me extendieron la mano en el momento cuando no contaba con el recurso económico necesario para comprar el material y realizar los trabajos de mecanizado. El con mano solidaria corrió con la mayor parte de los gastos y puso a mi disposición todos los equipos, la mano de obra y calidad humana. A todos ellos muchas gracias.

Como olvidarme en estos momentos de mi segunda casa y máxima expresión del estudio en el Estado Carabobo y Venezuela. A la UC Universidad de Carabobo gratitud y reverencia por todo lo que representa para los que en ella pasamos parte de nuestras vidas y continúa formando el carácter y perfil de muchos hombres y mujeres que buscan la excelencia.

No podría dejar de agradecer una persona que mantuvo mucha paciencia y que con su sabio consejo fue el guía en la búsqueda de la excelencia, a mi profesor y Tutor Académico Argel Porrello, agradecido.

Sin más que agregar sólo espero en Dios que sigan llegando cada día las bendiciones y las experiencias que nos hacen crecer y ser mejores en la vida.



*Evaluación del Comportamiento a Fatiga de
Una Junta de AA-6061 Soldada por Fricción*



DEDICATORIA.

Me es necesario reconocer el trabajo que han realizado muchas personas importantes en mi vida, todos han puesto un gran esmero paciencia y sobre todo entrega en el transcurso de mi carrera como profesional, pero sobre todo como ser humano.

Dios es la persona más especial de todas por que es quien ha hecho posible que todo esto pueda ser real, lo digo porque en este camino me ha tocado enfrentar muchas vicisitudes, obstáculos y sobre todos múltiples enfermedades que con su ayuda pude tener la fuerza necesaria para levantarme día a día y seguir luchando. Te lo dedico Señor.

Quisiera dedicar este esfuerzo de igual manera a mis viejos, Thais y Lucino, especiales para mí y a toda mi familia a mis dos niñas bellas y preciosas, Reichell y Daniela, y a aquellos que siempre creyeron en mi, a los que dudaban pero sobre todos a los que nunca creyeron que podía superar todos los obstáculos y llegar a la meta.

El tiempo no es un indicativo de la sabiduría de las personas, la sabiduría de las personas son las que indican los tiempos

CAPÍTULO I. EL PROBLEMA

TÍTULO DEL TRABAJO.

Evaluación del comportamiento a fatiga de una junta de AA-6061 soldada por fricción.

1.1. PLANTEAMIENTO DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.

En los últimos años la industria metalmecánica se ha desarrollado enormemente, resaltando materiales con excelentes condiciones para distintos usos. El aluminio ha resultado ser un elemento metálico que por su abundancia en la corteza terrestre y debido a características que posee, tales como: excelente conductividad eléctrica y térmica, alta resistencia a la corrosión, bajo punto de fusión, excelente trabajabilidad, su baja densidad que es aproximadamente un tercio de la del acero, así como su buen comportamiento ante el beneficioso proceso de reciclaje, es considerado uno de los metales más utilizados y cotizados a nivel industrial.

Algunos usos representativos del aluminio puro se encuentran en: equipos químicos, reflectores, intercambiadores de calor, conductores y capacitares eléctricos, aplicaciones arquitectónicas y guarniciones decorativas. Una de las aplicaciones más importantes del aluminio puro es como material de revestimiento, para mejorar la resistencia a la corrosión.

A partir de las múltiples demandas y usos, ha surgido la necesidad de crear diferentes aleaciones de aluminio para hacer sus propiedades mecánicas más beneficiosas. En el mercado venezolano una de las aleaciones de aluminio más usadas y comercializadas es la AA-6061, que entre sus características más resaltantes se tienen su buena: formabilidad, soldabilidad, resistencia a la

corrosión y resistencia mecánica. Es una buena aleación para usos generales que se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones estructurales y ensambladuras soldadas ejemplos; rines de aluminio, componentes de camión, vagones de ferrocarril, tuberías, aplicaciones marinas, mobiliario, aplicaciones agrícolas, aeronaves, piezas de automóviles (culatas de motores) entre otros.

Los productos de aluminio pueden ser clasificados como forjados o fundidos, además, los procesos de conformado a los cuales pueden ser sometido son diversos: extrusión, mecanizado, soldadura, embutido, entre otros.

Actualmente en los procesos de conformado de piezas existe una situación en la cual se pretende sustituir el conformado total de piezas, bien sea; forjadas, extruídas o fundidas, por un conformado parcial, haciendo uso de la soldadura por fricción como proceso de unión o acople, buscando disminuir los costos, y el peso algunos casos, sin que estas pierdan su calidad. Ejemplo: barras de esta aleación extruídas de distintos diámetros, fabricación de rines de aluminio para automóviles, entre otros.

Los procesos de soldadura actualmente utilizados se pueden clasificar en dos grandes grupos como: Soldadura por Fusión y Soldadura de Estado Sólido. Entre los procesos de Soldadura por Fusión podemos encontrar: soldadura por arco eléctrico, soldadura por resistencia, soldadura con oxígeno y gas combustible y la soldadura con rayo láser, existiendo sub-clasificaciones en cada rama. Entre los procesos de Soldadura de Estado Sólido tenemos: la soldadura con rodillos, la soldadura por difusión, la soldadura por ultrasonido y la soldadura por fricción.

Así como las aleaciones de aluminio han venido adquiriendo cada día más importancia y relevancia a nivel industrial actualmente el proceso de soldadura por fricción está abarcando un amplio espacio en la industria manufacturera, ya que a través de este proceso pueden unirse una gran cantidad y variedad de piezas formadas y materiales, aun cuando una de ellas por lo menos sea de igual o

distinta naturaleza, por ejemplo: acero duro y acero suave, aluminio y aleaciones, acero y cobre, etc. Además de eso permite realizar uniones lo suficientemente fuerte para soportar el alto estrés y torsión requerida en las diferentes aplicaciones.

De allí el interés que despierta el estudiar este proceso en aleaciones de aluminio AA-6061, ya que debido a su resistencia específica también se pueden realizar piezas de esta aleación que puedan soportar la misma carga que si fuese hecha con acero pero con un peso mucho menor. Una importante característica de estos materiales es la resistencia específica, cuantificada como la relación entre resistencia a la tracción y densidad.

Además de la resistencia específica, de estas aleaciones existen propiedades mecánicas interesantes a resaltar: la resistencia a la corrosión, la ductilidad, la maleabilidad, la resistencia al impacto, pero sobre todo (esto en cualquier material), la resistencia a la fatiga.

Los componentes de máquinas, vehículos y estructuras (tales como ejes de transmisión, bielas y engranajes), suelen verse sometidos a cargas cíclicas, estos esfuerzos cíclicos resultantes inducen daños a los materiales de construcción.

Estos daños, que se producen sobre todo a esfuerzos muy por debajo del esfuerzo de fluencia, se acumulan con la aplicación continua hasta que se comienzan a formar grietas que se propagan y terminan por fracturar, a esta falla por esfuerzos y deformaciones cíclicas repetidas se le denomina fatiga, la cual es la causante aproximadamente del 80% del fallo de elementos mecánicos en maquinarias.

La fatiga representa el principal problemas en cuanto a la resistencia que presentan las juntas soldadas, por los métodos convencionales (arco eléctrico, etc.) lo que ha dificultado su utilización (piezas soldadas sometidas a fatiga). Es por ello que resulta de suma importancia conocer que tan eficiente es este proceso de unión (soldadura por fricción) ante este fenómeno.

Son muy pocos los estudios realizados con anterioridad sobre esta aleación, es por ello que no se cuenta con la información bibliográfica de como se comportaría una junta soldada por fricción de este material bajo condiciones de fatiga. Debido a esto, se pretende hacer un aporte investigativo sobre este tema, de manera que se pueda ir aumentando el conocimiento sobre esta aleación y seguir incentivando a los investigadores a continuar estudiando este material.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

¿Cual sería el comportamiento de una junta soldada por fricción de una aleación AA-6061 sometida al fenómeno de fatiga?

1.3. OBJETIVOS.

1.3.1. GENERAL.

Analizar el comportamiento de una junta soldada por fricción de la aleación AA-6061 cuando está sometida al fenómeno de fatiga.

1.3.2. ESPECÍFICOS.

1. Evaluar el comportamiento mecánico en tracción de juntas soldadas por fricción de la aleación AA-6061.
2. Determinar la resistencia a la fatiga de juntas soldadas por fricción de la aleación de aluminio AA-6061.
3. Realizar un estudio fractográfico utilizando un microscopio electrónico de barrido para determinar las características de la fractura en la aleación.

4. Establecer una relación entre la resistencia a la fatiga obtenida a través de los ensayos y los resultados obtenidos en los estudios fractográficos realizados.
5. Comparar el comportamiento a fatiga del material (aleación de aluminio AA-6061) sin soldar y aplicando el método de soldadura por fricción.

1.4. JUSTIFICACIÓN.

La necesidad de desarrollar este trabajo de grado surge como consecuencia de que actualmente no existen suficientes datos en el mercado en cuanto al comportamiento del material cuando éste es sometido a un proceso de unión como la soldadura por fricción.

Es por ello que la finalidad de este proyecto es el de proporcionar información e igualmente dar a conocer ciertas propiedades y características del material que puedan resultar útiles al momento de selección o sustitución de algún material según sea el caso.

1.5. LIMITACIONES.

Para la realización de este trabajo se deberá tomar en cuenta las siguientes limitantes:

1. El tipo de ensayo que se va a realizar es de fatiga rotativa con la máquina existente en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, cuyo intervalo de operación es de 20 Lbf*pulg² a 180 Lbf*pulg².

2. Disponibilidad de los equipos pertenecientes y no pertenecientes a la Universidad de Carabobo para la realización de los ensayos.
3. Disponibilidad horaria y humana de los laboratorios, dentro y fuera de la Universidad de Carabobo.
4. Los ensayos de soldadura por fricción serán realizados en las instalaciones de la Universidad Simón Bolívar en Caracas.

1.6. ALCANCE.

La única aleación a ensayar y estudiar es la aleación AA-6061. Las condiciones del medio en el cual se realizaran los ensayos a las probetas son las ambientales.

Debido a las condiciones de trabajo de la máquina a utilizar para realizar el proceso de soldadura ($P_{\text{máx.}}$ 600 psi, $P_{\text{mín.}}$ 400 psi, $N_{\text{máx.}}$ 1600 rpm, $N_{\text{mín.}}$ 1200rpm, un desplazamiento de 1cm.) mediante pruebas pilotos se buscará conocer la mejor relación entre V (velocidad de rotación requerida) y P (presión de contacto) que permita realizar una soldadura por fricción óptima.

Además de esto tomando en cuenta ese desplazamiento máximo de la máquina y las dimensiones requeridas para la fabricación de las probetas para los respectivos ensayos de tracción y fatiga se diseñará una probeta para soldarlas por fricción que permitan cumplir con las dimensiones normalizadas por la ASTM.

El número de probetas a utilizar para la realización de los ensayos en total es de 50 probetas, 35 probetas serán tomadas para realizar ensayos de fatiga, 10 probetas para realizar los ensayos de tracción y el resto de las mismas para los ensayos de microscopía y de reserva. Para los de fatiga se empleará el método conocido como de la escalera en el cual se evaluarán para 6 niveles de esfuerzo diferentes (%del esfuerzo de fluencia) 5 probetas preferiblemente.



*Evaluación del Comportamiento a Fatiga de
Una Junta de AA-6061 Soldada por Fricción*



El comportamiento a fatiga del material en su condición original (sin soldar) se obtendrá de trabajos anteriores, pero a manera de prueba se realizarán 5 probetas a las cuales se les aplicará los respectivos ensayos de fatiga con la intención de verificar que el método empleado es el correcto (con relación a los ensayos tomados de trabajos anteriores) y ser válida nuestra comparación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES.

Wainstein, Pérez, de Vedia y Cassanelli(2001), evaluaron el comportamiento fractomecánico de planchuelas de aluminio 6061- T6 unidas mediante soldadura por fricción - agitación, a distintas velocidades de rotación, para lo cual se determinaron las curvas de resistencia al crecimiento dúctil estable de fisura. Se realizaron ensayos de flexión en tres puntos a temperatura ambiente. Se determinó la evolución de la longitud de fisura para cada registro de carga-desplazamiento mediante distintas metodologías, y se obtuvieron, en cada caso, las correspondientes curvas *J-R*.. Luego se realizó un estudio comparativo entre las mismas y el material base sin soldar y se evaluó el desempeño de las soldaduras obtenidas con los diferentes parámetros. De los resultados obtenidos surge que la tenacidad de las uniones soldadas medida a través de la resistencia a la propagación dúctil estable varía significativamente al cambiar los parámetros de soldadura. En este sentido, los mejores valores de tenacidad indexados mediante el parámetro *JIQ* correspondieron a las soldaduras realizadas con la mínima velocidad de avance y la máxima velocidad de giro, seguidos de la soldadura realizada con alta velocidad de avance y velocidad de giro de la herramienta intermedia. Por el contrario, los más bajos valores de tenacidad correspondieron a la soldadura efectuada con baja velocidad de avance y velocidad de giro intermedia. Se destaca que en todos los casos mencionados la tenacidad de la soldadura se encuentra por encima de la del material base. Esto pone de manifiesto el fuerte procesamiento termomecánico que el material sufre durante la soldadura. Estos altos valores de tenacidad son consistentes con la microestructura de grano pequeño recristalizado que resulta de la fuerte deformación plástica y consiguiente recristalización dinámica que tiene lugar durante la soldadura. La complejidad de este proceso no permite, con los datos disponibles hasta ahora

establecer un patrón definitivo del comportamiento del material en función de los parámetros de soldadura.

Dieguez, Rivas y Sheila(2002), realizaron un trabajo en el cual evaluaron el comportamiento de las propiedades metalúrgicas involucradas en el proceso de soldadura por fricción en materiales disimiles, para determinar así, las posibles fallas en las cuales se basara el diseño de cualquier aplicación donde se necesite la unión eficiente entre dos materiales distinto.Los ensayos de soldadura por fricción fueron realizados en las instalaciones del laboratorio de Manufactura de la Universidad Simón Bolívar. Una de las conclusiones importantes a las que se llegaron, debido a observaciones metalográficas, la formación de un cordón de soldadura homogéneo y una zona de fusión definida entre ambos materiales, indicando que los materiales similares pueden ser unidos fácilmente por un proceso de soldadura por fricción bajo un amplio rango de condiciones de soldado.

Perez, Cocco y de Vedia (2002), realizaron un trabajo en el cual se evalúa la aplicabilidad del enfoque local a la predicción de la vida a la fatiga en uniones soldadas de aluminio estructural solicitadas transversalmente. Para esto, la investigación se centró en la caracterización de los iniciadores de fisura por fatiga, que en todos los casos se ubicaron en la zona del talón de las soldaduras. Las características halladas en los mismos demostraron que son fuertemente dependientes de la estructura de solidificación, por lo que no admiten un modelado simplificado, basado exclusivamente en la geometría del talón, como en el caso de los aceros. El material seleccionado para la realización de este trabajo consistió en planchuelas de aleación de aluminio AA 6061, con tratamiento térmico T 6, de 6.25 mm de espesor, producido por extrusión en caliente a $(490\pm 10)^\circ\text{C}$. Sobre las planchuelas se efectuaron soldaduras manuales a tope, de dos pasadas (una por cada lado), con repelado de raíz y penetración total. El proceso elegido fue GMAW (MIG), utilizando como aporte alambre ER 5356(94%AL, 4,5%-5.5% Mg).

Correa y Pineda(2006), estudiaron la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio AA- 6061, sometida a la acción de un medio corrosivo compuesto por NaCl al 3%, en donde se observó que la resistencia a la fatiga de la aleación se ve afectada por la presencia de un medio corrosivo. También fue realizado un estudio de fractografía en donde se determinó que el comportamiento de fatiga de la aleación de aluminio presenta un mecanismo de fractura Dúctil-Frágil.

2.2. GENERALIDADES DEL ALUMINIO.

El aluminio es el elemento metálico más abundante en la Tierra y en la Luna, pero nunca se encuentra en forma libre en la naturaleza. Se halla ampliamente distribuido en las plantas y en casi todas las rocas, sobre todo en las ígneas, que contienen aluminio en forma de minerales de alúmino silicato. Cuando estos minerales se disuelven, según las condiciones químicas, es posible precipitar el aluminio en forma de arcillas minerales, hidróxidos de aluminio o ambos. En esas condiciones se forman las bauxitas que sirven de materia prima fundamental en la producción de aluminio. El aluminio es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Los compuestos de aluminio forman el 8% de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales.

Este elemento puro es un metal suave, blanco y de peso ligero. Al ser mezclado con otros materiales como: silicón, cromo, tungsteno, manganeso, níquel, zinc, cobre, magnesio, titanio, circonio, hierro, litio, estaño y boro, se producen una serie de aleaciones con propiedades específicas que se pueden aplicar para propósitos diferentes. Puede ser fuerte y maleable. Es un excelente conductor del calor y de la electricidad; el valor de su densidad es de 2.7 y las temperaturas de fusión y ebullición son de 660° C y 2.467° C, respectivamente. No se altera en contacto con el aire ni se descompone en presencia de agua. [5]

2.2.1. HISTORIA.

Fue en 1807 cuando el inglés Davy descubrió el aluminio. En Les Baux, en 1821, el francés Berthier encontró la bauxita, la materia prima de la fabricación de aluminio industrial.

Generalmente se reconoce a Friedrich Wöhler el aislamiento del aluminio en 1827. Aun así, el metal fue obtenido, impuro, dos años antes por el físico y químico danés Hans Christian Ørsted. En 1807, Humphrey Davy propuso el nombre *aluminum* para este metal aún no descubierto, pero más tarde decidió cambiarlo por *aluminium* por coherencia con la mayoría de los nombres de elementos, que usan el sufijo *-ium*. De éste derivaron los nombres actuales en inglés y en otros idiomas.

Fue en 1886, al recibir Hall / Héroult la patente de la electrolisis, cuando el aluminio pudo fabricarse en mayores cantidades, quedando reducido su precio. Así pues, gracias a la investigación, fue posible mejorar las propiedades del aluminio, por ejemplo, mediante el uso de aleaciones.

Cuando fue descubierto se encontró que era extremadamente difícil su separación de las rocas de las que formaba parte, por lo que durante un tiempo fue considerado un metal precioso, más caro que el oro. En 1882 el aluminio era considerado un metal de asombrosa rareza del que se producían en todo el mundo menos de 2 toneladas anuales. Sin embargo, con las mejoras de los procesos los precios bajaron continuamente hasta colapsarse en 1889 tras descubrirse un método sencillo de extracción del metal aluminio. La invención de la dinamo por Siemens en 1866 proporcionó la técnica adecuada para producir la electrolisis del aluminio. La invención del proceso Hall-Héroult en 1886 (patentado independientemente por Héroult en Francia y Hall en EE.UU.) abarató el proceso de extracción del aluminio a partir del mineral, lo que permitió, junto con el proceso Bayer (inventado al año siguiente, y que permite la obtención de óxido de

aluminio puro a partir de la bauxita). Sus aplicaciones industriales son relativamente recientes, produciéndose a escala industrial desde finales del siglo XIX.

La producción mundial alcanzó las 6.700 toneladas hacia 1900, 700.000 en 1939 y en 1943 llegó a los dos millones debido al impulso de la II Guerra Mundial. Desde entonces la producción se ha disparado hasta superar la de todos los demás metales no férricos.

Actualmente el proceso ordinario de obtención del metal consta de dos etapas, la obtención de alúmina por el proceso Bayer a partir de la bauxita, y posterior electrólisis del óxido para obtener el aluminio.

La recuperación del metal a partir de la chatarra, material viejo o deshecho (reciclado) era una práctica conocida desde principios del siglo XX. Sin embargo, es a partir de los años 1960 cuando se generaliza, más por razones medioambientales que estrictamente económicas, ya que el reciclaje consume el 5% de lo que consume la producción metalúrgica a partir del mineral. [5]

2.2.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.

Entre las características físicas del aluminio, destacan las siguientes:

- ✓ Es un metal ligero, cuya densidad o peso específico es de 2700 kg/m^3 (2,7 veces la densidad del agua), un tercio de la del acero.
- ✓ Tiene un punto de fusión bajo: 660°C (933 K).
- ✓ El peso atómico del aluminio es de 26,9815.

- ✓ Es de color blanco brillante, con buenas propiedades ópticas y un alto poder de reflexión de radiaciones luminosas y térmicas.
- ✓ Tienen una elevada conductividad eléctrica (34 a 38 $m/\Omega\text{mm}^2$) y una elevada conductividad térmica (80 a 230 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$).
- ✓ Resistente a la corrosión, a los productos químicos, a la intemperie y al agua de mar, gracias a la capa de Al_2O_3 formada.
- ✓ Abundante en la naturaleza. Es el tercer elemento más común en la corteza terrestre, tras el oxígeno y el silicio.
- ✓ Su producción metalúrgica a partir de minerales es muy costosa y requiere gran cantidad de energía eléctrica.
- ✓ Material fácil y barato de reciclar. [5]

2.2.3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS.

Entre las características mecánicas del aluminio se tienen las siguientes:

- ✓ De fácil mecanizado.
- ✓ Muy maleable, permite la producción de láminas muy delgadas.
- ✓ Bastante dúctil, permite la fabricación de cables eléctricos.
- ✓ Material blando (Escala de Mohs: 2-3). Límite de resistencia en tracción: 160-200 N/mm^2 [160-200 MPa] en estado puro, en estado aleado el rango es de 1400-6000 N/mm^2 . El duraluminio es una aleación particularmente resistente.

- ✓ Para su uso como material estructural se necesita allearlo con otros metales para mejorar las propiedades mecánicas.
- ✓ Permite la fabricación de piezas por fundición, forja y extrusión.
- ✓ Material soldable.
- ✓ Con CO₂ absorbe el doble del impacto. [5]

2.2.4. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.

- ✓ Debido a su elevado estado de oxidación se forma rápidamente al aire una fina capa superficial de óxido de aluminio (Alúmina Al₂O₃) impermeable y adherente que detiene el proceso de oxidación, lo que le proporciona resistencia a la corrosión y durabilidad. Esta capa protectora, de color gris mate, puede ser ampliada por electrólisis en presencia de oxalatos.
- ✓ El aluminio tiene características anfóteras. Esto significa que se disuelve tanto en ácidos (formando sales de aluminio) como en bases fuertes (formando aluminatos con el anión [Al (OH)₄]⁻) liberando hidrógeno.
- ✓ La capa de óxido formada sobre el aluminio se puede disolver en ácido cítrico formando citrato de aluminio. [5]

2.3. APLICACIONES.

Ya sea considerando la cantidad o el valor del metal empleado, el uso industrial del aluminio excede al del cualquier otro metal exceptuando el hierro / acero. Es un material importante en multitud de actividades económicas y ha sido considerado un recurso estratégico en situaciones de conflicto. El aluminio se utiliza rara vez 100% puro, casi siempre se usa aleado con otros metales. El

aluminio puro se emplea principalmente en la fabricación de espejos, tanto para uso doméstico como para telescopios reflectores. [5]

2.4. ALEACIONES DE ALUMINIO.

La aleación es una sustancia compuesta por dos o más metales. Las aleaciones al igual que los metales puros poseen brillo metálico y conducen bien el calor y electricidad, aunque por lo general no tan bien como los metales por los metales que están formados.

La mayoría de las aleaciones se preparaban de las aleaciones mezclando los materiales fundidos, con frecuencia las propiedades de las aleaciones son muy distintas de las de sus elementos constituyentes, como la fuerza y la resistencia a la corrosión, pueden ser considerablemente mayores en la aleación que en los metales separados.(Guanipa,2000).

2.4.1. APORTACIONES DE LOS ELEMENTOS ALEANTES.

Los principales elementos aleantes del aluminio son los siguientes y se enumeran las ventajas que proporcionan:

- ✓ **Cromo (Cr):** Aumenta la resistencia mecánica cuando está combinado con otros elementos Cu, Mn, Mg.
- ✓ **Cobre (Cu):** Incrementa las propiedades mecánicas pero reduce la resistencia a la corrosión.
- ✓ **Hierro (Fe):** Incrementa la resistencia mecánica.
- ✓ **Magnesio (Mg):** Tiene alta resistencia tras el conformado en frío.

- ✓ **Manganeso (Mn):** Incrementa las propiedades mecánicas y reduce la calidad de embutición.
- ✓ **Silicio (Si):** Combinado con magnesio (Mg), tiene mayor resistencia mecánica.
- ✓ **Titanio (Ti):** Aumenta la resistencia mecánica.
- ✓ **Zinc (Zn):** Reduce la resistencia a la corrosión. (Guanipa, 2000).

2.4.2. CLASIFICACIÓN DEL ALUMINIO Y LAS ALEACIONES DE ALUMINIO SEGÚN EL PRODUCTO.

El aluminio y sus aleaciones se adquieren o se seleccionan indicando primero la designación de la aleación, seguida de un código que indica como se procesa; esto último se expresa mediante lo que se conoce como designación de temple. Los productos de aluminio son clasificados como Forjados o Fundidos. Las designaciones del aluminio están a cargo de la Aluminium Association (AA) y se estipulan en la norma H35.1 del American National Standards Institute(ANSI). El Sistema de designación de cuatro dígitos se inicia con un primer dígito que indica la adición de aleación principal del aluminio. El primer dígito “1” designa el aluminio no aleado o prácticamente puro, y los dígitos del 2 al 8 designan las aleaciones de aluminio que contienen el o los elementos de aleación principales.

En el caso de las aleaciones 1xxx el segundo dígito de la designación representa cierto control de la composición. Un 0 significa que no se controlan los límites de impurezas naturales. Un segundo dígito del 1 al 9 representa un control especial o una adición de una o más impurezas individuales. Los últimos dígitos corresponden a los dos últimos dígitos que siguen al punto decimal del contenido de aluminio.

Para el caso de las aleaciones de aluminio de las 2xxx a 8xxx, las dos últimas xx no tienen un significado especial; representan sólo un tipo determinado de aleación del grupo (por ejemplo, los elementos de aleación principales son los mismos). Un 0 como valor de la primera x o del segundo dígito de la designación representa la primera aleación de las que tiene las mismas adiciones principales (mismas dos últimas xx). Un segundo dígito del 1 al 9 representa una modificación de una aleación ya registrada, o si es una aleación totalmente nueva.

Aleaciones de Aluminio Forjadas:

- ✓ **Aleaciones 1xxx:** Son aleaciones de aluminio técnicamente puro, al 99,9%.
- ✓ **Aleaciones 2xxx:** El principal aleante de este grupo de aleaciones es el cobre (Cu), aunque también contienen magnesio Mg.
- ✓ **Aleaciones 3xxx:** El elemento aleante principal de este grupo de aleaciones es el manganeso (Mn) que está presente en un 1,2% y tiene como objetivo reforzar al aluminio.
- ✓ **Aleaciones 4xxx:** El elemento aleante principal de este grupo de aleaciones es el silicio.
- ✓ **Aleaciones 5xxx:** En este grupo de aleaciones es el magnesio es el principal componente aleante su aporte varía del 2 al 5%.
- ✓ **Aleaciones 6xxx:** Los principales elementos aleantes de este grupo son magnesio y silicio.
- ✓ **Aleaciones 7xxx:** Los principales aleantes de este grupo de aleaciones son Zinc, magnesio y cobre.

- ✓ **Aleaciones 8xxx.** Otros elementos aleantes.
- ✓ **Aleaciones 9xxx:** No se usan.

Aleaciones de Aluminio Fundidas.

- ✓ **Aleaciones 1xx.y:** Son aleaciones de aluminio técnicamente puro, al 99,9%.
- ✓ **Aleaciones 2xx.y:** El principal aleante de este grupo de aleaciones es el cobre (Cu), aunque también contienen magnesio Mg.
- ✓ **Aleaciones 3xx.y:** El elemento aleante principal de este grupo de aleaciones es Si-Mg, Si-Cu, Si-Cu-Mg.
- ✓ **Aleaciones 4xx.y:** El elemento aleante principal de este grupo de aleaciones es el silicio.
- ✓ **Aleaciones 5xx.y:** En este grupo de aleaciones es el magnesio es el principal componente aleante su aporte varía del 2 al 5%.
- ✓ **Aleaciones 6xx.y:** No se usa.
- ✓ **Aleaciones 7xx.y:** El principal elemento aleante de este grupo de aleaciones es el Zinc.
- ✓ **Aleaciones 8xx.y:** El principal elemento aleante es el estaño.
- ✓ **Aleaciones 9xx.y:** Otros elementos. (Guanipa, 2000).

2.4.3. DESIGNACIONES DE TEMPLE DEL ALUMINIO Y LAS ALEACIONES DE ALUMINIO.

El tratamiento del aluminio y de sus aleaciones se codifica mediante letras y números, y se indica enseguida de la designación de la aleación después de un guión. El código de letras con números constituye la designación de temple, e indica precisamente como se va a tratar el material. Aunque algunas de las designaciones no son aplicable para todas las aleaciones, las designaciones de temple son aplicables en general a los productos tanto forjados como fundidos.

Los Tratamientos apropiados se indican mediante los códigos de letras siguientes:

F, Fabricado tal cual, se asigna una F a los productos a los que se ha dado forma mediante procedimientos de trabajado en frío, trabajado en caliente o moldeado.

O, Recocido. Los productos han sido recocidos para conseguir menor resistencia y a los productos fundidos para mejorar su ductilidad y su estabilidad dimensional.

H, Endurecido por deformación. Sólo para forjados.

T, Térmicamente tratado por disolución. (Guanipa, 2000).

2.4.4. CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL ALUMINIO Y ALEACIONES DE ALUMINIO FORJADO.

Las aleaciones de aluminio forjadas se clasifican en dos tipos básicos: aleaciones no termotratables y aleaciones termotratables. Las aleaciones no termotratables incluyen incluyen las diversas calidades de aluminio puro y todas las demás aleaciones cuya resistencia obedece al endurecimiento por disolución de sólido y al trabajo en frío o endurecimiento por deformación derivado del temple recocido.

Estos materiales incluyen las aleaciones 1xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx, aunque unas pocas de ellas pertenecen a las series 7xxx y 8xxx. Las termotratables son las que contienen uno o más de los elementos cobre, magnesio, silicio y zinc, que tienen la cualidad de incrementar su solubilidad en aluminio a medida que la temperatura aumenta, y poseen las características genéricas para el endurecimiento por precipitación. Estos materiales incluyen las aleaciones 2xxx, 6xxx y 7xxx, aunque algunas de ellas pertenecen también a las series 4xxx y 5xxx, que contienen una combinación de los elementos citados. (Guanipa, 2000).

2.5. ALEACIONES DE ALUMINIO DE LA SERIE 6XXX.

Estas aleaciones contienen silicio y magnesio, aproximadamente en la proporción que se requiere para formar el compuesto Mg_2Si , siliciuro de magnesio, que precipita y endurece las aleaciones durante el tratamiento térmico. De resistencia media, pero no tan resistentes como las aleaciones 2xxx y 7xxx, las 6xxx tienen buena formabilidad, soldabilidad, labrabilidad y resistencia a la corrosión. Se pueden conformar a diferentes perfiles en la condición T4, para después endurecerlas aun más a la condición de T6 después del conformado. (Guanipa, 2000).

2.5.1. DESCRIPCIÓN Y APLICACIÓN DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA-6061.

Esta aleación presenta entre sus características más importantes una buena formabilidad, soldabilidad, alta resistencia a la corrosión y resistencia mecánica en los temple T. Es una buena aleación para usos generales que se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones estructurales y ensambladuras soldadas, como componentes de camión, vagones de ferrocarril, tuberías, aplicaciones marinas, mobiliario, aplicaciones agrícolas, aeronaves, aplicaciones arquitectónicas, piezas de automóvil, productos para la construcción, equipos químicos, carrocería de volteo, aplicaciones eléctricas y electrónicas, fijadores, alambres de cerca, paletas

de ventilador, palastro en general, señales de carretera, equipo medico y de hospital, equipo de cocina, piezas de maquinas, artillería, equipo recreativo, vehículos recreativos, camiones y trailers. (Guanipa, 2000).

2.5.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA-6061.

Tabla 1. Composición Química de la Aleación. Fuente: (Handbook, 1995).

Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros
% en peso	0.4-0.8	0.7	0.15-0.4	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	0.15	0.15	0.15

2.6. SOLDADURA.

Procedimiento por el cual dos o más piezas de metal se unen por aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin el aporte de otro metal, llamado metal de aportación, cuya temperatura de fusión es inferior a las de las piezas que se han de soldar. (Higgins, 1984).

2.6.1. LA SOLDADURA POR FRICCIÓN.

La soldadura por fricción es un método de soldadura que aprovecha el calor generado por la fricción mecánica entre dos piezas en movimiento. Es utilizada para unir dos piezas aun cuando una de ellas por lo menos sea de igual o distinta naturaleza, por ejemplo: acero duro y acero suave, aluminio y aleaciones, acero y cobre, etc. El principio de funcionamiento consiste en que la pieza de revolución gira en un movimiento de rotación fijo o variable alrededor de su eje longitudinal y se asienta sobre la otra pieza. Cuando la cantidad de calor producida por rozamiento es suficiente para llevar las piezas a la temperatura de soldadura, se detiene bruscamente el movimiento, y se ejerce un empuje el cual produce la soldadura por interpenetración granular.

Es un proceso de fase total de penetración sólida, el cual puede ser implementado en la unión de laminas de metal (hasta ahora principalmente para aluminio) sin llegar a su punto de fusión.

Entre los materiales que han sido soldados exitosamente con Fricción hasta la actualidad se incluye una gran variedad de aleaciones de aluminio (las series 2xxx, 5xxx, 7xxxx, 8xxx) y las aleaciones Al-Li son las mas recientes, la soldadura por fricción también ha demostrado ser efectiva en la unión de Plomo, Cobre, Magnesio y hasta aleaciones de Titanio. [9]

2.6.2 VENTAJAS DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN.

- ✓ Permite a menudo, soldar metales diferentes con facilidad, aun algunos considerados como incompatibles o insoldables.
- ✓ El proceso de soldadura por fricción es al menos 2 y hasta 100 veces más rápido que otras técnicas de soldado.
- ✓ Los soldadores por fricción son lo suficientemente versátiles para unir un amplio rango de formas, materiales y tamaños.
- ✓ La preparación de superficies de unión no es crítica así sean maquinadas, aserradas o hasta cizalladas, todas son soldables.
- ✓ Las uniones resultantes tienen calidad de forjado, con soldaduras 100% al tope en toda la superficie de soldado.
- ✓ Como no hay derretimiento, no ocurren defectos de solidificación, por ejemplo porosidad de gas, segregación ni inclusiones de escoria.

- ✓ Los componentes pulvimetalúrgicos pueden soldarse a otros materiales pulvimetalúrgicos, forjados, fundiciones o material forjado trabajado.
- ✓ No requiere de insumos como flux, rellenos o gas protector.
- ✓ El proceso controlado por la maquinaria elimina el error humano por lo que la calidad de la soldadura es independiente de la habilidad o actitud del operario.
- ✓ Es ecológicamente limpio, no se genera humo, emisiones o gases que necesiten ser evacuados.
- ✓ No hay salpicaduras de la soldadura y se producen pocas chispas.
- ✓ El requerimiento de energía es de hasta un 20% menos del requerido en procesos de soldadura convencionales.
- ✓ No se necesita una cimentación o requerimientos de energía especiales.
- ✓ Los parámetros del proceso son fácilmente monitoreados.
- ✓ El equipo de Soldadura por Fricción es fácilmente automatizado para lograr tasas de producción elevadas. [9]

2.7. APLICACIONES DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN.

Los soldadores por fricción son los suficientemente versátiles para unir un amplio rango de piezas formadas, materiales y diferentes tamaños de soldadura. Las aplicaciones típicas incluyen componentes para aeronaves y aeroespaciales, herramientas de corte, maquinaria agrícola, partes automotrices, piezas de campos

petroleros, contenedores de desecho, equipos militares, ejes y materiales bimetálicos. [9]

2.7.1. APLICACIONES DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN PARA LAS INDUSTRIAS AGRÍCOLAS Y DE TRANSPORTES POR CAMIÓN.

La soldadura por fricción se utiliza de forma amplia en la industria agrícola y la industria de transportes por camión porque las soldaduras son de calidad de forjado y de soldadura a tope en 100% del área de contacto. Esta unión es lo suficientemente fuerte para soportar el alto estrés y torsión requerida en los componentes de maquinaria pesada.

Los costos de los componentes se pueden reducir significativamente al reemplazar las partes completamente forjadas por componentes con extremos en forja soldados a barras o tubos en inventario, sin perder la calidad. Un ejemplo de esto, son las bielas de pistones hidráulicos, los cuales tienen tamaños de extremos similares, pero varían en cuanto al diámetro y longitud de la biela.

En lugar de mantener un inventario costoso de diferentes configuraciones de longitudes y diámetros, los extremos estandarizados se pueden soldar al tamaño de biela requerido, reduciendo los costos de componentes como también los requerimientos de espacio físico de inventario.

Otras aplicaciones agrícolas y de transporte por camión incluyen las columnas de las horquillas del eje delantero, columnas de transmisión y engranajes. [9]

En la figura N°1 se puede observar algunas de las aplicaciones de este tipo de soldadura en la industria agrícola y de transporte.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Bielas de pistones hidráulicos. (b) Horquillas del eje delantero.

(Inercia Friction Welder and Direct Drive Friction Welder- Manufacturing Tecnology, Inc)

2.7.2. APLICACIONES DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN PARA BIMETÁLICOS Y USO GENERAL.

Este tipo de soldadura hace posible unir combinaciones de metales que no se consideran normalmente compatibles, como por ejemplo el aluminio al acero, el cobre al aluminio, el titanio al cobre y aleaciones de níquel al acero. Como se pueden unir materiales distintos, hay un ahorro significativo al diseñar y utilizar materiales bimetálicos que utilizan materiales costosos solo donde se requieren. MTI posee la experiencia con muchas aplicaciones bimetálicas. Algunas incluyen: conectores eléctricos de cobre a aluminio, rodillos fusores de fotocopiadoras de aluminio a acero inoxidable, electrodos de cobre a titanio utilizados en celdas desalinizadoras y ejes de hélice de acero inoxidable a aleación para motores fuera de borda. En la figura N°2 se muestran algunas de estas aplicaciones señaladas. [9]



(a)



(b)

Figura 2. (a) Conectores eléctricos de cobre a aluminio. (b) Rodillos fusores de fotocopiadoras. (Inercia Friction Welder and Direct Drive Friction Welder- Manufacturing

Tecnology, Inc).

2.7.3. APLICACIONES DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN PARA LA INDUSTRIA DE AERONAVES Y NAVES AEROESPACIALES.

La demanda de aeronaves más grandes significa que los aero-motores aumentan en impulsión, temperatura y tamaño. Para poder aguantar las altas temperaturas, los componentes críticos de aeronaves y naves aeroespaciales están siendo fabricados en materiales tales como superaleaciones, bimetálicos, acero inoxidable y aluminio. Estos materiales, los cuales pueden ser difíciles y en algunos casos imposibles de soldar, pueden ser unidos por procesos de soldadura por fricción.

Para poder enfrentar esta demanda creciente, MTI diseñó un soldador por fricción de inercia de 2.000 toneladas. Este es el soldador por fricción más grande en servicio de hoy en día. Además de estas grandes máquinas, se utilizan soldadores por fricción de todos los tamaños en esta industria. Los componentes para aeronaves y naves aeroespaciales soldados por soldadura por fricción incluyen rotores de compresores, ejes de ventilador, engranajes, componentes de trenes de aterrizaje, remaches bimetálicos y pernos en forma de gancho, tubería de calentamiento de aluminio y componentes de cohetes criogénicos. Se diseño y construyó una máquina especial para soldar los postes de inyección para el motor principal del transbordador espacial. En la figura N° 3 se puede ver una de las aplicaciones en el área aeroespacial. [9]



Figura 3. Ejes de ventilador, engranajes. (Inercia Friction Welder and Direct Drive Friction Welder- Manufacturing Technology, Inc)

2.7.4. APLICACIONES DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ.

Las aplicaciones de soldadura por fricción diseñados para la industria automotriz incluyen: barras estabilizadoras, válvulas de motor, tapas para los convertidores de torsión, ejes de transmisión, discos para engranajes, componentes de la dirección bombas de agua, ejes, ejes de levas, acumuladores de aire acondicionado, juntas universales cardánicas y más.

La demanda de infladores de bolsas de aire para automóviles ha estimulado un aumento en la cantidad de soldadores por fricción fabricados para la industria automotriz desde los años 80. Ventajas tales como una soldadura de penetración total, como también una zona de afectación de calor estrecha ha hecho de la soldadura por fricción un método clave para unir infladores de bolsa de aire completamente inflados.

Las combinaciones de materiales exitosos incluyen aluminio, acero de bajo carbono y aleaciones de acero inoxidable. La figura N°4 muestra alguna de estas aplicaciones. [9]



(a)



(b)

Figura 4. (a) Válvulas de motor. (b) Discos para engranajes. (Inercia Friction Welder and Direct Drive Friction Welder- Manufacturing Tecnology, Inc)

2.7.5. APLICACIONES DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN PARA LA INDUSTRIA MILITAR.

Las agencias gubernamentales de los Estados Unidos y el exterior confían en MTI como su fuente de tecnología de soldadura por fricción. La investigación continuada de MTI abordando la energía almacenada en la soldadura por fricción, iniciada por Caterpillar Tractor, Inc. y AMF, resultó en los primeros estándares militares escritos sobre el proceso de soldadura por inercia (MIL-STD-1252).

Las ventajas de este proceso como la ausencia de humo, emisiones o gases y la producción de pocas chispas además del hecho de que el proceso es automatizado, lo hacen apropiado para uso en ambientes explosivos potencialmente peligrosos. La máquina puede ser completamente automática por que el operario puede estar en un lugar seguro fuera de peligro.

La maquinaria de MTI como también sus servicios de soldadura contratados ha sido utilizada para fabricar componentes militares de defensa, como también de aeronaves y componentes en tierra. [9]

En la figura N° 5 puede apreciarse dos de estas aplicaciones del área militar.



(a)



(b)

Figura 5. (a) Forro de escopeta. (b) Mortero de humo. (Inercia Friction Welder and Direct Drive Friction Welder- Manufacturing Tecnology, Inc)

2.7.6. APLICACIONES DE LA SOLDADURA POR FRICCIÓN PARA LA INDUSTRIA PETROLERA.

La industria de la soldadura es una necesidad para la industria petrolera. La confiabilidad probada de las uniones de soldadura por fricción, emparejados con un proceso con ventajas tales como la ser un proceso limpio, rápido y consistente además de estar libre de errores por parte de los operarios, hacen de la soldadura por fricción uno de los métodos líderes para unir bridas a cuerpos de válvulas, tuberías de perforación, acoples de manguera de alta presión y tubos de colectores.

Una tubería de perforación típica tiene de 3 a 4 millas de largo, en secciones de 30 pies. Las soldaduras por fricción aguantan el ensamble inferior de la columna de perforación (compuesto de otros tubos de perforación, el collarín de perforación y el taladro de perforación) y transmiten la torsión rotativa necesaria para la perforación. La soldadura por fricción produce una unión metalúrgica lo suficientemente fuerte para soportar la torsión alta y la fuerte carga rotativa debido a la perforación direccional. [9]

La figura N°6 muestra varias de estas aplicaciones antes descritas.

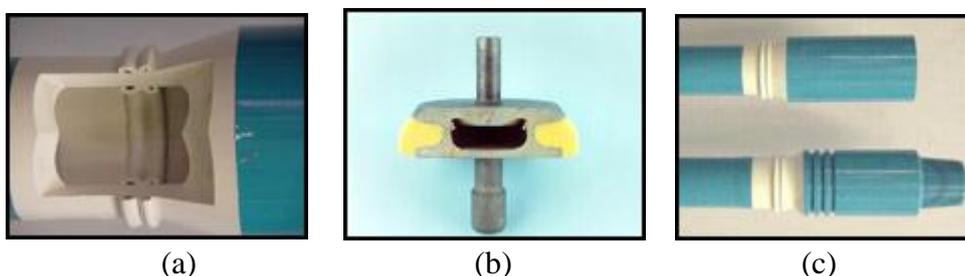


Figura 6. (a) Acoples de tubos colectores. (b) Bridas a cuerpos de válvulas. (c) Acoples de manguera de alta presión. (Inercia Friction Welder and Direct Drive

Friction Welder- Manufacturing Technology, Inc)

2.8. MATERIALES SOLDABLES.

Las combinaciones de metal normalmente no consideradas como compatibles pueden unirse por medio de soldadura por fricción, tales como el aluminio al acero, cobre al aluminio, titanio a cobre y aleaciones de níquel al acero.

Como regla general, todos los materiales metálicos de ingeniería que pueden forjarse también pueden soldarse por fricción, incluyendo las aleaciones de válvulas automotrices, acero al níquel bajo en carbono, acero para herramientas y tántalo. Además, muchos moldes forjados, pulvimetalúrgicos y compuestos de matriz de metal son soldables. Hay un ahorro significativo, ya que los ingenieros pueden diseñar partes bimetálicas que utilizan materiales costosos sólo donde se requieren. Las forjas y moldeados costosos pueden reemplazarse con forjas más económicas soldadas a tubo, barras, placas y materiales parecidos. [9]

2.9. FATIGA EN MATERIALES.

Los componentes de maquinas, vehículos y estructuras, tales como (ejes de transmisión, bielas y engranajes); suelen verse sometidos a cargas cíclicas repetidas, y los esfuerzos cíclicos resultantes inducen daños a los materiales de construcción. Estos daños, que se producen porque estos sobre todo muy por debajo del esfuerzo de influencia, se acumulan con la aplicación continúan hasta que se comienzan a formar grietas que se propagan y terminan por fracturar el material. Por tanto, la fatiga en los metales se produce bajos repetidos esfuerzos cíclicos a causa de la aparición y crecimientos de grietas dentro de un área muy endurecida de un material, de un extremo afiliado o de una entalla o de una inclusión o de un defecto, donde se origina un punto de concentración de tensiones. Una vez nucleada, la fisura se propaga a través del componente debido a las tensiones cíclicas. En esta etapa del proceso de fatiga se forman la denominada concha de almeja o marcas de playa.

Las grietas por Fatiga se inician en la superficie del material. Por ello debe evitarse en lo posible ralladuras y arañazos en las superficies de buen acabado (por ejemplo, grabar el nombre comercial en la pieza), sobre todo en zonas con elevado nivel de tensión.

Cualquier tratamiento superficial (térmico o mecánico) que produzcan un estado de tensiones residuales de compresión en la superficie de las piezas aumentando la dureza de la superficie (por ejemplo, el temple, granallado o laminado superficial) incrementará la vida a fatiga de la pieza. (Guanipa, 2000).

2.9.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTENCIA A LA FATIGA.

La resistencia a la fatiga de un metal o aleación viene afectada por otros factores además de la composición química del metal. Algunos de los factores más importantes son:

- ✓ **El Acabado Superficial:** es quizás el más significativo. En general, cuanto más liso sea el acabado superficial de la probeta metálica mayor será su resistencia a la fatiga. Las superficies rugosas generan concentración de tensiones que facilitan la formación de fisuras por fatigas.

- ✓ **Endurecimiento de la Superficie por medios Químicos o Mecánicos:** Esto aumenta la resistencia a la fatiga si este endurecimiento produce esfuerzos superficiales de compresión. Puesto que la mayoría de fallos por fatiga se originan en la superficie de metal, cualquier cambio importante en la condición de la superficie afectara la resistencia a la fatiga del metal. Por ejemplo tratamientos de endurecimiento superficial.

- ✓ **La Naturaleza Química del Ambiente:** si se encuentra presente un ambiente corrosivo durante la aplicación de ciclos de fatiga en un metal, el ataque químico acelera de manera muy importante la velocidad a la cual de propaga la fisura por fatiga. La combinación de ataque corrosivo y tensiones cíclicas en un metal se conoce como corrosión-fatiga.

- ✓ **Aplicación de Esfuerzos Constantes:** donde el material puede poseer zonas o puntos de concentración de tensiones. La resistencia a la fatiga queda reducida de forma muy importante por la presencia de puntos con concentración de tensión como entallas, orificios, hendiduras o cambios bruscos en la sección transversal

- ✓ **El Método de Elaboración:** produce variaciones, como por ejemplo la geometría de la muestra.

- ✓ **La Temperatura:** la influencia de la temperatura radica en el debilitamiento de las fuerzas atractivas en el material, producto de la conversión de la energía térmica en energía cinética media de las moléculas. Por tanto, a mayor temperatura menor es la resistencia a la fatiga.

Las propiedades relacionadas con la fatiga son una consideración de diseño en partes rotatorias y reciprocantes, componentes adyacentes sujetos a vibración y otras situaciones donde las cargas cambian en una forma cíclica.

Esto implica la predicción de la duración (número de ciclos) que el material puede soportar antes que se comiencen a formar grietas y el tiempo antes que una de estas grietas se propaguen hasta alcanzar el tamaño crítico.

Dado que interviene un tamaño crítico. Dado que interviene un tamaño de grieta crítica, el procedimiento de diseño que tiene en cuenta la fatiga se hace en combinación con la tenacidad a la fractura del material. (Guanipa, 2000).

2.9.2. INICIO Y PROPAGACIÓN DE LA GRIETA.

- ✓ **Inicio:** Las grietas que originan la rotura o fractura casi siempre nuclean sobre la superficie en un punto donde existen concentraciones de tensión (originadas por diseño o acabados, ver Factores).

Las cargas cíclicas pueden producir discontinuidades superficiales microscópicas a partir de escalones producidos por deslizamiento de dislocaciones, los cuales actuarán como concentradores de la tensión y, por tanto, como lugares de nucleación de grietas.

- ✓ **Propagación:**
 - Etapa I: una vez nucleada una grieta, entonces se propaga muy lentamente y, en metales policristalinos, a lo largo de planos cristalográficos de tensión de cizalladura alta; las grietas normalmente se extienden en pocos granos en esta fase.
 - Etapa II: la velocidad de extensión de la grieta aumenta de manera vertiginosa y en este punto la grieta deja de crecer en el eje del esfuerzo aplicado para comenzar a crecer en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado. La grieta crece por un proceso de enromamiento y agudizamiento de la punta a causa de los ciclos de tensión.
- ✓ **Rotura:** Al mismo tiempo que la grieta aumenta en anchura, el extremo avanza por continua deformación por cizalladura hasta que alcanza una configuración enromada.

La región de una superficie de fractura que se formó durante la etapa II de propagación puede caracterizarse por dos tipos de marcas, denominadas marcas de playa y estrías. Ambas indican la posición del extremo de la grieta en diferentes instantes y tienen el aspecto de crestas concéntricas que se expanden desde los puntos de iniciación. Las marcas de playa son macroscópicas y pueden verse a simple vista. Las marcas de playa y estrías no aparecen en roturas rápidas. (Smith, 1993).

2.9.3. ESFUERZOS FLUCTUANTES.

Para realizar cálculos de fallas por fatiga, es necesario conocer que cuando se produce una variación de los esfuerzos a los que esta sometida una fibra cualquiera de una pieza, bien sea por cambio de las fuerzas a las que esta sometida o por un cambio de posición con respecto a las cargas.

La variación de los esfuerzos en función del tiempo, viene definida por las componentes de esfuerzos en base a una forma senoidal. Tales componentes se detallan y están expresadas por los esfuerzos máximos ($\sigma_{\text{máx}}$), mínimos ($\sigma_{\text{mín}}$), alternos (σ_a), medios (σ_m) y el intervalo de esfuerzos (σ_r). A continuación se muestran las expresiones que permiten determinar las componentes.

$$\sigma_m = (\sigma_{\text{máx.}} + \sigma_{\text{mín.}})/2 \quad (2.1)$$

$$\sigma_a = (\sigma_{\text{máx.}} - \sigma_{\text{mín.}})/2 \quad (2.2)$$

$$\sigma_r = \sigma_{\text{máx.}} + \sigma_{\text{mín.}} \quad (2.3)$$

En donde:

$\Sigma_{\text{máx.}}$ Esfuerzo máximo. (Mpa)

- σ_{\min} . Esfuerzo mínimo. (Mpa)
- σ_a Esfuerzo alternante. (Mpa)
- σ_m Esfuerzo medio. (Mpa)
- σ_r Intervalo de esfuerzos. (Mpa)

En las piezas sometidas a cargas variables se puede producir cuatro tipos de situaciones de variaciones de esfuerzos, a continuación se detallan:

- ✓ **Esfuerzos alternante puro**, en esta situación por lo general el esfuerzo medio (σ_m) presenta igual a cero y la variación de esfuerzo se produce en ambas direcciones, es decir, se producen esfuerzos a tracción y compresión con igual magnitud pero con dirección distinta.
- ✓ **Esfuerzo fluctuante**, en este caso los valores de los esfuerzos máximo y mínimo no son iguales y se producen en una sola dirección. En algunos casos los esfuerzos pueden estar en distintas direcciones y se tendrán combinaciones de esfuerzos a compresión y tracción respectivamente.
- ✓ **Esfuerzos intermitentes**, se producen cuando el esfuerzo mínimo es igual a cero y la incidencia de las cargas es solamente a compresión o tracción.
- ✓ **Esfuerzo irregulares o aleatorios**, ocurren cuando las frecuencias de los esfuerzos no siguen un comportamiento senoidal y la distribución de los esfuerzos es de forma desordenada o aleatoria. (Smith, 1993).

2.9.4. ENSAYOS DE FATIGA.

Las propiedades de fatiga de los materiales se pueden obtener por medio de un ensayo con un esfuerzo de amplitud constante o con amplitud de deformación constante.

Para determinar el límite de resistencia a la fatiga las probetas de acero se ensayan a base de $5 \cdot 10^6$ de ciclos, y las de las aleaciones no ferrosas a base de $20 \cdot 10^6$ de ciclos. Hay una gran cantidad de aparatos especiales para efectuar el ensayo a la fatiga para los casos de deformaciones por flexión, tracción, torsión, etc.

Para el caso de flexión la superficie de la probeta tiene que estar bien pulida y con forma y disposición geométrica según lo especifica las normas ASTM para ensayos de fatiga.

La máquina para ensayos de fatiga debe permitir el control y registro de los parámetros de ensayo, siguientes:

- ✓ Cargas aplicadas, F.
- ✓ Contador de vueltas de la probeta, n.
- ✓ Velocidad angular, rpm.

A continuación la figura N°7 muestra un esquema del equipo utilizado para las pruebas. La probeta se monta en *cantilever*, las cargas son aplicadas a través de un brazo de carga y un rodamiento de bolas, y corresponden a un peso suspendido sobre una barra calibrada que está pivotada en el otro extremo de la máquina. La probeta está girando continuamente de manera que cada punto de su sección (con excepción del eje neutro) esta sometido alternativamente a ciclos de flexión y compresión y cada ciclo de estos corresponde a una vuelta del motor eléctrico.

El esfuerzo al que estará sometida la probeta se logra aplicando el momento flector, el cual, conociendo el nivel de esfuerzo a aplicar en la probeta se determina a través de las siguientes ecuaciones, establecidas en el Manual de Operaciones de Máquina.

(2.4)

$$S = (M \cdot C) / I$$

$$I = (\pi \cdot D^4) / 64. \quad (2.5)$$

Donde:

M: Momento flector en Lbf-pulg.

S: Esfuerzo de flexión aplicado a la sección transversal mínima de la probeta Lbf/pulg².

C: Es la distancia de la fibra más alejada del eje de inercia ($C = D/2$).

D: Diámetro de la mínima sección transversal de la probeta en pulg.

I: Es el momento de inercia polar.

De las expresiones anteriores resulta la siguiente ecuación definitiva de donde se obtiene el valor del momento flector a aplicar en los ensayos de fatiga el cual también es especificado en el manual de la máquina usada para tales ensayos.

$$M = 0,0982 \cdot S_f \cdot D^3 \quad (2.6)$$

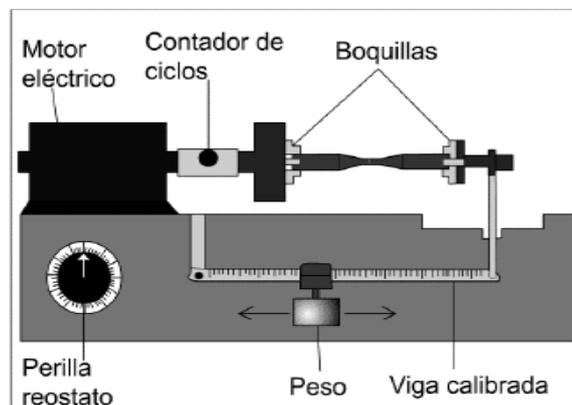


Figura 7. Esquema de la Máquina de Ensayo de Fatiga. (Guanipa, V.2000)

2.9.5. CURVAS DE WÖHLER (CURVAS S-N)

Hace muchos años, August Wöhler introdujo el concepto de amplitud de tensión límite (límite de fatiga) en la evaluación de la resistencia a la fatiga de las

estructuras. La curva de Wöhler presenta un gráfico relacionando la amplitud de tensión (S) con el número de ciclos necesarios para la fractura, indicando que cuanto mayor es la magnitud de la amplitud, menor será el número de ciclos que el material será capaz de soportar antes de la fractura.

Son observados dos tipos de comportamiento para la curva de Wöhler. En algunos materiales ferrosos y aleaciones de titanio, la curva S-N tiende a una horizontal para un determinado número de ciclos y tensión límite, caracterizando el límite de fatiga. El límite de fatiga es la amplitud de tensión máxima a la que una estructura puede ser sometida a infinitos ciclos de carga sin ocurrir la falla por fatiga. Por tanto, debajo de ese límite, el material podría aguantar infinitos ciclos sin que ocurra la fracturar.

Ya los materiales no ferrosos, como el aluminio no presentan el límite de fatiga. De acuerdo con DIETER (1976), para esos materiales, las propiedades de fatiga son especificadas como resistencia a la fatiga para un número arbitrario de ciclos, por ejemplo, 10^8 ciclos. Ver figura N° 8. (Shigley y Mischke, 1990).

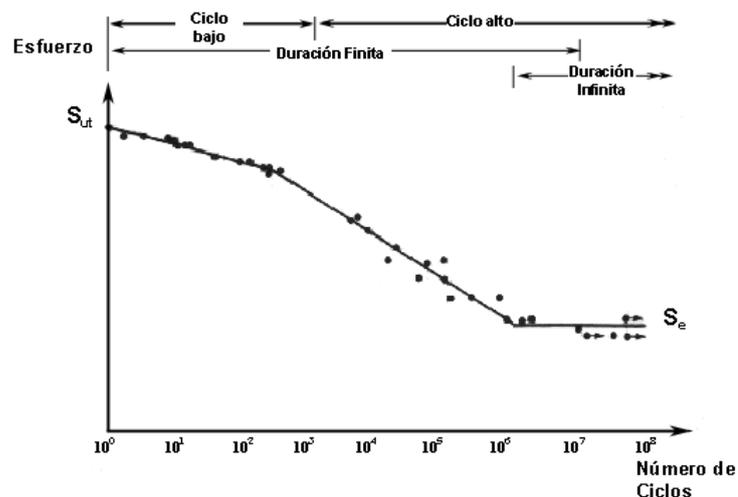


Figura 8. Curva de Wöhler. (Shigley y Mischke, 1990).

Las ordenadas de este diagrama se definen como resistencia a la fatiga (S_f). Al hablar de resistencia a la fatiga (S_f) se deberá por lo tanto especificar el número de

ciclos N a la que corresponde. El empleo de escala logarítmica destaca los cambios de pendientes de la curva que no se manifestaría si se emplearan coordenadas cartesianas. En la Figura se observa que hay tres rectas que podrían aproximar la nube de puntos experimentales. Estas rectas permiten distinguir entre fatiga a bajo número de ciclos ($<10^3$) y fatiga de alto número de ciclos ($>10^3$). La recta horizontal define el límite de resistencia a la fatiga S_e del material. Es el límite de carga por debajo del cual el material no fallará por fatiga.

No todos los materiales poseen un límite de resistencia a la fatiga. Los aceros muestran un comportamiento como el citado, pero en el caso de metales no féreos y sus aleaciones.

2.9.6. ECUACIÓN DE BASQUIN PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS GRAFICA S-N.

Una vez obtenida la historia de ciclos de histéresis tensión - deformación a los que se somete el componente, se procede a establecer una relación entre éstos y la vida útil. Tal y como se ha hecho con el comportamiento plástico, se trabaja con el modelo S-N ya que el basado en amplitud de ciclos de tensión se deduce como caso particular del primero.

Para niveles bajos de carga, en los que la deformación producida permanece dentro del régimen elástico, la vida del componente se correlaciona de forma adecuada con la amplitud de tensiones, según la llamada Ley de Basquin:

Para desarrollar un enfoque analítico, la ecuación de la Curva S-N será:

$$S_f = A * N^{-B} \quad (2.7)$$

Donde:

S: Resistencia a la Fatiga. (Mpa).

A: Coeficiente de Resistencia a la Fatiga.

N: Numero de Ciclos.

B: Exponente de Resistencia a la Fatiga o Exponente de Basquin.

A fin de identificar el nivel o grado de ajuste de los resultados experimentales obtenidos, se debe calcular el índice de correlación lineal para las curvas de comportamiento a la fatiga, dicho valor permite inferir la relación que tienen las variables de esfuerzo y número de ciclos.

Debido a que la ecuación de Basquin es de tipo potencial por ser de la forma $Y = a * X^b$, para su linealización en escala bilogarítmica se hará el ajuste de la curva por el Método de los Mínimos Cuadrados.

$\text{Log}(S_f) = \text{Log}(A) - B \text{log}(N)$ donde se aplica el cambio de variable :

$$\text{Log}(S_f) = Y$$

$$\text{Log}(A) = b$$

$$\text{Log}(N) = X$$

$B = m$ Obteniendo de esta manera la siguiente ecuación de la recta:

$$Y = m * X + b.$$

2.10. AJUSTE DE CURVAS POR EL MÉTODO DE LOS MÍNIMOS CUADRADOS.

Se basa en calcular la ecuación de una curva para una serie de puntos dispersos sobre una gráfica, curva que se considera el mejor ajuste, entendiéndose por tal, cuando la suma algebraica de las desviaciones de los valores individuales respecto a la media es cero y cuando la suma del cuadrado de las desviaciones de los puntos individuales respecto a la media es mínima.

Sean $\{(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)\}$ un conjunto de puntos experimentales de dos magnitudes física X e Y, que se han medido en un experimento de laboratorio, y se quiere determinar la relación funcional entre ellas. Estas diferencias se identifican como $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$. Para cada X_i su diferencia $S_i = Y_i - F(X_i)$.

Si se grafica este conjunto de datos sobre papel con escalas lineales y se traza la curva que mejor se aproxima a todos los puntos experimentales, en general se observa que para cada valor de X_i hay una diferencia entre el valor observado experimentalmente Y_i y el valor de la ordenada Y que se obtiene a partir de la curva.

Entonces la curva que mejor se ajusta al conjunto de puntos experimentales por el Método de Los Mínimos Cuadrados será aquella que cumpla que la suma de todas las diferencias $\sum S_i^2$ sea mínima, es decir:

$$S = S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_n^2$$

✓ **Línea Recta de los Mínimos Cuadrados**

En este caso el conjunto de puntos experimentales se ajusta al polinomio $Y = A_1 * X + A_0$, el sistema de ecuaciones que definen los parámetros A_0 y A_1 es:

$$nb + \sum X_i * m = \sum Y_i$$

$$\sum X_i * b + \sum X_i^2 * m = \sum X_i Y_i$$

Resolviendo este sistema resulta:

$$b = \frac{\sum Y_i * \sum X_i^2 - \sum X_i * \sum X_i Y_i}{n * \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (2.8)$$

$$m = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (2.9)$$

En donde n representa la cantidad de datos recolectados. (Canavos, 2000).

2.11. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL.

El propósito principal del análisis de la correlación lineal es medir la exactitud de una relación lineal entre dos variables. El coeficiente de la correlación R es la medida numérica de la relación lineal estrecha entre dos variables. El coeficiente refleja la consistencia del efecto que tiene al cambiar una variable sobre la otra. A continuación se muestra la ecuación con la cual se realizara el cálculo del coeficiente para este ensayo:

$$R^2 = \frac{[\sum X_i Y_i - (\sum X_i \sum Y_i)/n]^2}{[\sum X_i^2 - (\sum X_i)^2/n] * [\sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2/n]} \quad (2.10)$$

En donde n representa la cantidad de datos recolectados. (Canavos, 2000).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.

Se trata de una investigación de tipo Descriptiva – Explicativa.

- ✓ **Descriptiva:** se expone el como puede comportarse este material unido por el proceso de soldadura por fricción bajo ciertas condiciones de trabajo buscando especificar las propiedades importantes para medir y evaluar su comportamiento mecánico.
- ✓ **Explicativa:** está dirigida a predecir los posibles cambios de fase en la microestructura de la soldadura, lo cual dará a conocer la zona más propensa a fallar en dicha junta y su tendencia de duración para diferentes exigencias de cargas.

3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.

En atención al diseño la investigación se clasifica en: Documental – Experimental.

- ✓ **Documental:** se realizó la búsqueda de información respecto a las bases teóricas del proceso de esta investigación utilizando fuentes primarias tales como libros y revistas especializadas, y otras fuentes secundarias tales como trabajos de grado y direcciones World Wide Web.
- ✓ **Experimental:** Se hace necesaria la realización de ensayos experimentales tales como mecanizado de probetas, soldadura por fricción, metalografía, entre otros, los cuales están respaldados por bases teóricas para llegar a las conclusiones más correctas, y de esta manera cumplir con los objetivos

establecidos en este trabajo de grado. A través de estos ensayos también se encontraron los parámetros experimentales de la máquina más convenientes del resultado de la soldadura por fricción, los cuales sirvieron para el posterior diseño y construcción de las probetas a soldar por fricción en el laboratorio de procesos y manufactura, trabajo que se realizó en otro proyecto de grado.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA.

3.3.1. POBLACIÓN.

La población con la cual se contó fué de 50 muestras, de las cuales 40 probetas fueron soldadas por fricción, cada una conformada por dos probetas de idéntico tamaño, (ver anexo B.1). Adicional a estas se fabricaron 10 probetas sin soldar (condición original) para comprobación de material y verificación de método usado para la realización de los ensayos.

3.3.2. MUESTRAS.

La muestra es un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible.

De las 40 probetas disponibles las cuales fueron soldadas por fricción se prepararon 30 para realizar ensayos de fatiga, 5 para ensayos de tracción y las otras para reserva (fractografía o por si alguna se parte o cualquier inconveniente en el proceso de mecanizado). De las 10 sin soldar es decir en su condición original 5 fueron para ensayos de fatiga y 5 para ensayos de tracción esto para verificación del material y comprobación del método utilizado en los ensayos de fatiga. En la figura N° 9 se puede visualizar de manera más clara la explicación antes expuesta.

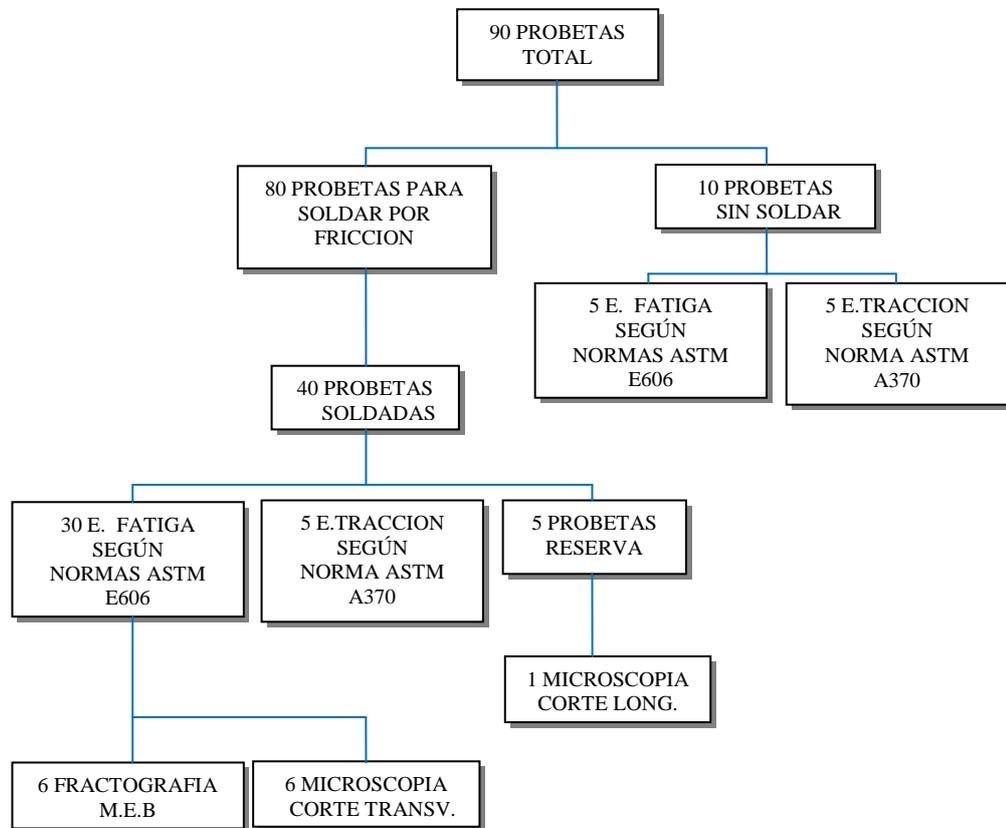


Figura 9. Flujograma de los ensayos.

3.4. TIPO DE MUESTREO.

El tipo de muestreo se caracteriza por ser de tipo no probabilístico debido a que se desconoce la probabilidad que tienen los elementos (probetas) en formar parte de la muestra.

Además de esto se puede decir que está clasificado como intencional u opinático ya que las probetas han sido escogidas conforme a ciertos estándares para realizar los ensayos tanto de tracción como de fatiga, lo cual permitió conocer y comprobar ciertas propiedades que se quieren analizar.

En el caso de los ensayos de fatiga y tracción, es necesario que las probetas o elementos de la muestra fallen dentro de una zona de ensayo definida, las probetas que presenten un comportamiento distinto, no formaron parte de la muestra; desconociéndose la probabilidad de que esto suceda.

3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

Entre las técnicas utilizadas para la obtención de los datos necesarios para realizar la investigación se pueden mencionar el método de observación directa y rigurosa en cada uno de los ensayos y el análisis documental de trabajos anteriores y el análisis de los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos.

Entre los instrumentos para la recolección de datos se tienen tablas diseñadas para agrupación de datos, gráficos, cámara fotográfica para obtención de imágenes de la microestructura en el análisis con el Microscopio Electrónico de Barrido.

3.5.1. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.

Los datos e información recolectados fueron sometidos a una serie de análisis de tipo teórico-estadísticos, mediante la ayuda de ecuaciones y técnicas definidas para cada comportamiento (ensayo de tracción, fatiga, microscopía, microscopía, fractografía).

Mediante la curva de esfuerzo - deformación se obtuvo el esfuerzo de fluencia del material que es el punto de partida para realizar los ensayos de fatiga, las Curvas de Wöhler para marcar la tendencia del proceso de trabajo repetitivo al cual será sometido el material para distintos niveles de esfuerzo en relación con su período de duración o número de ciclo. Adicional a esto se analizó el mecanismo de fractura de material y se comparó con patrones existentes analizando su comportamiento cerca de la zona de fractura.

3.6. EQUIPOS UTILIZADOS.

Los equipos e instrumentos con los cuales se realizaron los diversos ensayos y actividades complementarias para preparación del material y así de esta manera conseguir un resultado óptimo en los datos obtenidos se pueden dividir en dos tipos: los pertenecientes a la Universidad de Carabobo y aquellos que se utilizaron y son pertenecientes a otras universidades o taller metalmecánico externo. Estos se van a mencionar según el orden de preparación de material y ensayo realizado:

- ✓ Máquina de Ensayo de Soldadura por Fricción. Fabricada por estudiantes de la Universidad de la Universidad Simón Bolívar. Ubicada en el Laboratorio de Procesos de Manufactura USB.
- ✓ Torno Convencional. Modelo JasHone M180-E, Ubicado en el Laboratorio de Procesos de Fabricación UC.
- ✓ Torno CNC. Marca Olivetti. Modelo Vega.
- ✓ Máquina de Ensayo Universal de Tracción. Marca Galdabini. Modelo CTM 20. Capacidad de 20 TON. Ubicado en el Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación UC.
- ✓ Rugosímetro Marca Mitutoyo Modelo SJ-201. Ubicado en el Laboratorio de Metrología UC.
- ✓ Máquina de Ensayo de Fatiga. Marca Fatigue Dynamics Inc. Modelo RBF- 20HT. Ubicado en el Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación UC.
- ✓ Ionizador o Cubridor de Iones. Marca EIKO IB-3. Modelo 03-150. Ubicado en el CIADANA (Centro de Investigación y Análisis Docente

Asistencial del Núcleo de Aragua) Laboratorio de Microscopía Electrónica.

- ✓ Microscopio Electrónico de Barrido (Scanning Electrón Microscope). Marca Hitachi. Modelo S-2300. Ubicado en el CIADANA (Centro de Investigación y Análisis Docente Asistencial del Núcleo de Aragua) Laboratorio de Microscopia Electrónica.
- ✓ Embutidora Marca Simplemmet II. Ran Force Lbsx1000/Newtonx200. Diam. 1", 1 1/2", 1 1/4"
- ✓ Microscopio Óptico. Marca Unión. Modelo MC 86267. Capacidad 50-1000X. Ubicado en el Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación UC.

3.7. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES.

3.7.1. MATERIAL.

Las probetas a fabricar fueron elaboradas con la aleación de aluminio en estudio AA-6061, del material se cuenta con información de su composición química proporcionada por el certificado de calidad de la aleación, y algunas propiedades mecánicas provenientes de otras fuentes documentales donde se manejan datos sobre las propiedades del aluminio.

3.7.2. PREPARACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS PROBETAS.

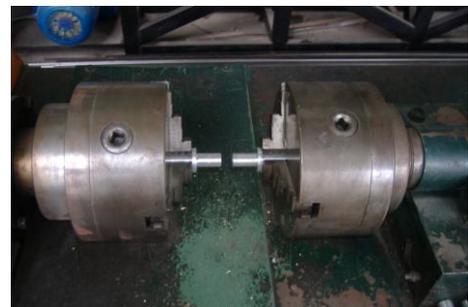
Para comenzar con el proceso de preparación de las probetas como etapa inicial se procedió a conocer el equipo que se iba a utilizar para realizar la soldadura por fricción (ver figura N° 10), con conocimiento anticipado de las características y

especificaciones geométricas que deberían tener las probetas a utilizar para los ensayos de tracción y fatiga según las normas ASTM. El estudio de la máquina era necesario para diseñar las piezas a unir de tal manera que sus dimensiones permitieran primeramente realizar la soldadura de forma óptima y adicional a esto poder conseguir por medio de mecanizado del material la geometría estándar para los ensayos que se realizaron.

Después de varios ensayos de pruebas se definió el diseño que más cumplió con los requerimientos exigidos y además de esto también se definieron los parámetros de operación de la máquina. La Presión de trabajo de 400psi, a una velocidad de giro de N1200rpm y un desplazamiento del cabezal móvil de 1cm. Para ver el las dimensiones y geometría de la pieza para realizar el ensayo de soldadura por fricción (ver anexos B.1, B.2).



(a)



(b)

Figura 10. (a) Máquina para Soldadura por fricción. (b) Puesta a punto.

Luego de conseguida la unión de las 80 piezas preparadas para la soldadura se cuentan ahora con 40 probetas, las cuales como vimos anteriormente serian destinadas un grupo para los ensayos de tracción y el otro para los de fatiga. Para conseguir la forma deseada para cada ensayo fue necesario de la utilización de

diversos equipos e instrumentos entre los cuales podemos citar: torno convencional (probetas de tracción), torno CNC (probetas de fatiga).

3.7.2.1. ENSAYOS DE TRACCIÓN.

Las probetas para el desarrollo de los ensayos de tracción se rigen bajo la norma ASTM E-8, que para este tipo de probeta condiciona las dimensiones de la sección de ensayo a 6,35mm de diámetro y 32,00mm de largo en el entalle; esta sección de ensayo se encuentra insertada dentro de una probeta cilíndrica de 12,70mm de diámetro y 120,00mm de largo en total, siendo estas últimas las dimensiones generales de la probeta (ver anexo B.3).

En la figura N° 11 se muestra la máquina universal de ensayos a tracción, en la cual se realizaron los ensayos de tracción, ubicada en el Laboratorio de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

Las variables del ensayo (fuerza y velocidad), se establecen en el software del equipo.



Figura 11. Máquina para Ensayo de Tracción.

3.7.2.2. ENSAYOS DE FATIGA.

Las probetas para el desarrollo de los ensayos de fatiga se rigen bajo la norma ASTM-E606 y según indicaciones presentes en el manual de la máquina de ensayos de fatiga, que para este tipo de probeta condiciona las dimensiones de la sección de ensayo a 6,35mm de diámetro y 38,10mm de largo; este entalle forma parte de una probeta cilíndrica de 12,70mm de diámetro y 215,90mm de largo en total, siendo estas últimas las dimensiones generales de la probeta. (ver anexo B.4).

Los ensayos de fatiga fueron aplicados tanto a las muestras soldadas por fricción como a las 5 probetas sin soldar para comprobación del método utilizado. Dicho ensayo se realizó sometiendo a las probetas a esfuerzos cíclicos, haciendo el conteo del número de ciclos que soporta el material antes de la falla.

La probeta se colocó en la máquina de ensayos sujetándose de sus extremos mediante mordazas acopladas tanto al eje del motor como en un eje cónico posterior, el cual va unido a la barra graduada, en la cual se fija el momento torsor a aplicar en la probeta. La máquina de ensayos de fatiga utilizada está diseñada para aplicar cargas totalmente invertidas en voladizo, garantizando de esta manera su aplicación en la zona de ensayo.

Los resultados de los ensayos fueron reportados en una tabla, con la finalidad de usar la data para la construcción de la correspondiente Curva de Wöhler para cada condición de estudio, presentándose también una gráfica comparativa de la condición ensayada conjuntamente con la tomada de la tesis de referencia en la condición de medio inerte y con ello será determinado, para cada una de las condiciones estudiadas la ecuación de Basquin y sus parámetros.

Los ensayos de fatiga, fueron realizados en la máquina de ensayo a fatiga a flexión rotativa mostrada en la figura N°12, ubicada en el Laboratorio de

Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo. Dicha máquina esta diseñada para aplicar cargas totalmente invertidas en voladizo sobre probetas de sección cilíndrica. Esta posee un controlador de ciclos y un regulador de velocidad la cual puede variar entre 500 y 10000 RPM.



Figura 12. Máquina para Ensayo de Fatiga.

3.7.2.3. MÉTODO DE LA ESCALERA.

Este procedimiento establece los pasos mediante los cuales se realizaron los ensayos de fatiga, los cuales serán detallados a continuación:

Ensayar el material a un nivel máximo de esfuerzo igual o cercano a su límite de fluencia.

Si con el primer esfuerzo o carga aplicada el material falla, se debe disminuir el nivel de esfuerzo a un escalón predeterminado. Los valores de los escalones dependen del rango de las cargas que aplica la máquina de fatiga, el cual oscila entre 20 y 200 lbf*pulg.

Para cada carga de trabajo aplicada se debe tener como mínimo un total de cuatro ensayos con resultados válidos. Aquellos valores que impliquen irregularidades o dispersión de los resultados, no fueron tomados en cuenta para el análisis.

3.7.3. FRACTOGRAFÍA.

Después de culminados los ensayos fatiga, se analizaron las condiciones de falla del material a través de la observación y evaluación de la superficie de fractura con ayuda de un Microscopio Electrónico de Barrido el cual se muestra en la figura N°14, y una cámara digital Marca Samsung Modelo ES60 de 12.2 Mega píxels para determinar las características de la fractura así como el mecanismo de propagación de la misma y así de esta manera relacionar los resultados que se obtengan con la resistencia a fatiga del material.

Para este ensayo se tomaron 6 muestras una por cada nivel de esfuerzo aplicado cuya selección dependerá del periodo de duración de cada una escogiendo la que esté más cercana al promedio de medidas por nivel. Estas muestras fueron seccionadas mediante un corte transversal de 10mm aproximadamente por debajo de la zona de fractura con ayuda de una sierra de arco (segueta).

Como parte inicial del proceso de preparación de las muestras se procedió a limpiar los STUB o porta muestras de aluminio, con resina y algodón, luego se le adherio una cinta grafitada con pega por arriba y por debajo con la intención de fijar las piezas al porta muestras.

Después de esto se procedió a recubrirlas (ionizar las muestras con una capa muy fina de Platino-Paladio de 100 Astrom), esto para que se desprendan más electrones de las muestras y se pueda conseguir una mejor apariencia al observar la superficie, con ayuda del ionizador que se presenta en la figura N°13. La ionización se logra a través de un rayo de plasma que irradia hacia la pieza durante 5 min.



Figura 13. Ionizador o Cubridor de Iones.

Con la utilización del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) se quiere observar la estructura tridimensional de la muestra; esto se logra en el equipo con la generación de un haz de electrones en una columna de vacío que es focalizado y dirigido sobre un pequeño punto exacto de la superficie de la muestra, los electrones con ángulo de distorsión reaccionan con las irregularidades de la superficie creando una dispersión de electrones secundarios que producen una señal electrónica, dando una imagen con profundidad.



Figura 14. Microscopio Electrónico de Barrido.

3.7.4. ANÁLISIS METALOGRAFICO.

Este análisis se realizó con la intención de ver los cambios que se producen en una sección cerca de la fractura del material. La zona seleccionada para ser preparada

y posteriormente observada a través de un Microscopio Óptico como el que se puede apreciar en la figura en la figura N°16 será una sección transversal a 10mm por debajo de la zona de rotura para cada nivel de esfuerzo y observar su comportamiento y una sección longitudinal de una probeta especial que no fue ensayada en la máquina de fatiga con la intención de visualizar la soldadura y los cambios microestructurales en las regiones vecina.

El procedimiento que se siguió para la preparación de las muestras fue el siguiente: Se realizó el corte transversal a 6 piezas según la cantidad de niveles de esfuerzos aplicados (100, 90%, 80 %, 70%, 60% y 50%) de igual manera se realizó el corte longitudinal a la probeta seleccionada. Seguidamente debido al tamaño de las muestras se realizó un proceso de embutido en el cual con calentamiento y presión aplicada se agregaba bakelita en la cavidad de la embutidora conjuntamente con las muestras, la embutidora puede observarse en la figura N°15.



Figura 15. Embutidora.

Después de estos se prosiguió con el proceso de desbaste con lijas de 240, 320, 400, 600, 800, y 1200 respectivamente, luego se realizó un pulido grueso en un paño de pulido basto con alumina de 0.1 μ m durante 5min aproximadamente, luego la pieza se lavaba con agua rápidamente y se le procedía a impregnar Etanol y luego se secaba con aire caliente y se veía la superficie en el microscopio. Se seguidamente procedía a realizarle un pulido fino en un paño de

pulido fino y alumina de 0.05 μm durante 5min aproximadamente, luego se lavaba con agua rápidamente y se le procedía a impregnar de etanol y luego se secaba con aire caliente y se veía la superficie en el microscopio. Este proceso era continuo hasta que se lograra la superficie deseada. Luego que esta se logró se le realizó un ataque químico seleccionado según el material y lo que se quiere visualizar, el mismo se realizó con una solución compuesta por: 95 ml H₂O, 1.5 ml HCL, 2.5 ml HNO₃, 2.5 ml HI, (48%) (0.5 ml) durante 5seg, luego se impregna etanol, se lava y se seca y las probetas o muestras estarían listas para la observación microscópica (el ataque debe aplicarse de forma rápida esto para evitar que la muestra pueda quemar o tomar una apariencia ennegrecida).



Figura 16. Microscopio Óptico.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

En el capítulo que a continuación se inicia se mostraran de manera clara y específica los resultados que se obtuvieron en los distintos ensayos realizados al material especificado.

Además de ello se realizó un análisis sistemático y se discutieron los resultados con apoyo en la informaron recopilada de los estudios realizados y las fuentes consultadas obteniendo así una síntesis valiosa sobre el comportamiento a fatiga de una soldadura por fricción en este material.

4.1. ENSAYOS DE TRACCIÓN.

Los ensayos de tracción realizados permitieron obtener el Esfuerzo de Fluencia del material para la condición estudiada y de igual manera para éste en su condición original, es decir, sin aplicación de soldadura, el cual representa el punto de partida para la realización de los ensayos de fatiga posteriores.

En el gráfico N°1 se presenta la curva Esfuerzo Vs Deformación obtenido de los datos del ensayo a tracción de la probeta #1, útiles para el cálculo del Esfuerzo de Fluencia, los correspondientes a los demás ensayos de tracción se encuentran en el anexo A.

Los valores de esfuerzos calculados con ayuda de los resultados obtenidos a través de los ensayos realizados a (5) probetas, haciendo uso del método de la recta offset 0.2% se pueden observar en la tabla N°2 para los ensayos realizados a probetas soldadas y en la tabla N°3 sólo los valores de esfuerzos para aquellas probetas que partieron dentro de la zona calibrada según la norma. Por otro lado para la comprobación del material utilizado (Aleación de Aluminio 6061) se

Debido a que en el ensayo #4 la probeta partió fuera de la zona calibrada se desechó su resultado para el cálculo del valor promedio.

Tabla 3. Esfuerzo de Fluencia (Probeta Soldada).

Ensayo	Esfuerzo de Fluencia Sy (Mpa)
Tracc.1	220,85
Tracc2	243,64
Tracc.3	241,17
Tracc.5	220,59
$Sy_{\text{promedio}} = 231,56$ Desviación=12,56	

Tabla 4. Valores para Comprobación de Material Usado. (Probetas sin Soldar).

Ensayo	Esfuerzo de Fluencia Sy (Mpa)
Tracc.1	302,15
Tracc2	305,27
Tracc.3	311,76
Tracc.4	300,13
Tracc.5	297,89
$Sy_{\text{promedio}} = 303,44$ Desviación= 5,38	

$$\% \text{ Error } Sy = \frac{\text{Valor Tabulado} - \text{Valor Obtenido}}{\text{Valor Obtenido}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\% \text{ Error } Sy = \frac{310\text{Mpa} - 303.44\text{Mpa}}{303,44\text{Mpa}} \times 100 = 2,16\%$$

4.2. ENSAYOS DE FATIGA.

Los ensayos de fatiga permiten obtener el número de ciclos de duración para cada uno de los esfuerzos aplicados a las probetas de aluminio soldadas y así compararlos con los resultados obtenidos para un medio inerte en el trabajo de grado titulado: *ESTUDIO SOBRE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE LA ALEACIÓN AA – 6061 BAJO UN MEDIO ACUOSO CON NACL AL 3%*, posteriormente.(Correa y Pineda,2006).

Como primer mecanismo de control en el ensayo se buscó controlar el acabado superficial de las mismas, ya que representa un factor importante en la resistencia a la fatiga de un material, logrando así un valor promedio de la rugosidad superficial que se encuentre entre 0,25 – 0,9 μm (ver anexo C) con lo cual se descarta la presencia de cualquier mecanismo que propicie la fractura (microgrietas, defectos del mecanizado, irregularidades del material entre otras). En las tablas anexas se pueden apreciar los valores de las mediciones de la rugosidad superficiales para el caso de las probetas soldadas y de igual manera de las que no estaban soldadas por fricción.

Cabe destacar que para la secuencia de cargas aplicadas a las probetas se utilizó el método de la escalera tomando como valor máximo de carga el esfuerzo a la fluencia y a partir de allí ir bajando los escalones de tal manera que se pueda lograr un amplio rango de comparación de los número de ciclos de duración para valores de carga similares a los aplicados en el trabajo referencia citado anteriormente. Los niveles de esfuerzos que se aplicaron fueron 100%, 90%, 80%, 70%, 60%, y 50% de la carga para obtener un buen rango de comparación con respecto a los números de ciclos entre 0 y los 2.500.000 ciclos, el cual es campo de trabajo utilizado en el trabajo de referencia. La frecuencia de giro utilizada para cada ensayo fue de 42 Hz (2500 rpm).

Tabla 5. Valores para realizar Grafico S Vs N (Probeta Soldada).

Muestra	Mt(N*mm)	St(Mpa)	%St(%)	N(ciclos)
1	51,51	231,562	100	10600
2	46,36	208,405	90	21200
3	46,36	208,4058	90	21700
4	46,36	208,4058	90	16300
5	46,36	208,4058	90	23000
6	46,36	208,4058	90	40500
7	41,21	185,249	80	86500
8	41,21	185,249	80	47200
9	41,21	185,249	80	161500
10	41,21	185,249	80	37000
11	41,21	185,249	80	48600
12	41,21	185,2496	80	26100
13	41,21	185,249	80	47000
14	41,21	185,249	80	52600
15	36,06	162,093	70	60600
16	36,06	162,093	70	94650
17	36,06	162,093	70	164250
18	30,91	138,937	60	180300
19	30,91	138,937	60	135000
20	30,91	138,937	60	108750
21	30,91	138,937	60	626700
22	30,91	138,937	60	637500
23	30,91	138,937	60	356250
24	30,91	138,937	60	884500
25	25,76	115,781	50	305400
26	25,76	115,781	50	1233700
27	25,76	115,781	50	72000
28	25,76	115,781	50	2038200
29	25,76	115,781	50	1747200
30	25,76	115,784	50	2875600

Tabla 6. Promedio y Desviación Estándar para cada Nivel de Carga.

Promedio(ciclos)	Desviación Estándar	%Carga
10.600	-----	100
24.540	9.276,48	90
63.312,5	43.280,63	80
106.500	52.831,31	70
392.671,43	301.495,11	60
1.378.683,33	1.066.949,38	50

Tabla 7. Valores para Comprobación de Método para Ensayo de Fatiga.

Muestra	St(MPa)	%St	Sft(Mpa)	M(Lbf-in)	Nº Ciclos
1	305	100	305	67	10.200
2	305	90	270	60	14.000
3	305	90	270	60	20.500
4	305	80	243	54	40.100
5	305	80	243	54	44.100

La tabla N°8 contiene los resultados de los ensayos realizados para esta condición de material en su condición original (sin soldadura) los cuales fueron extraídos de la tesis de referencia con la intención de tomarlos como patrón de comparación.

En los gráficos N° 2, 3 y 4 respectivamente se muestra; en el primer caso el comportamiento del aluminio cuyas muestras fueron soldadas por fricción, el siguiente es el comportamiento del material en su condición natural y por último la comparación de ambas condiciones de trabajo.

A continuación se presentaran los gráficos obtenidos de los datos experimentales de los ensayos de fatiga.

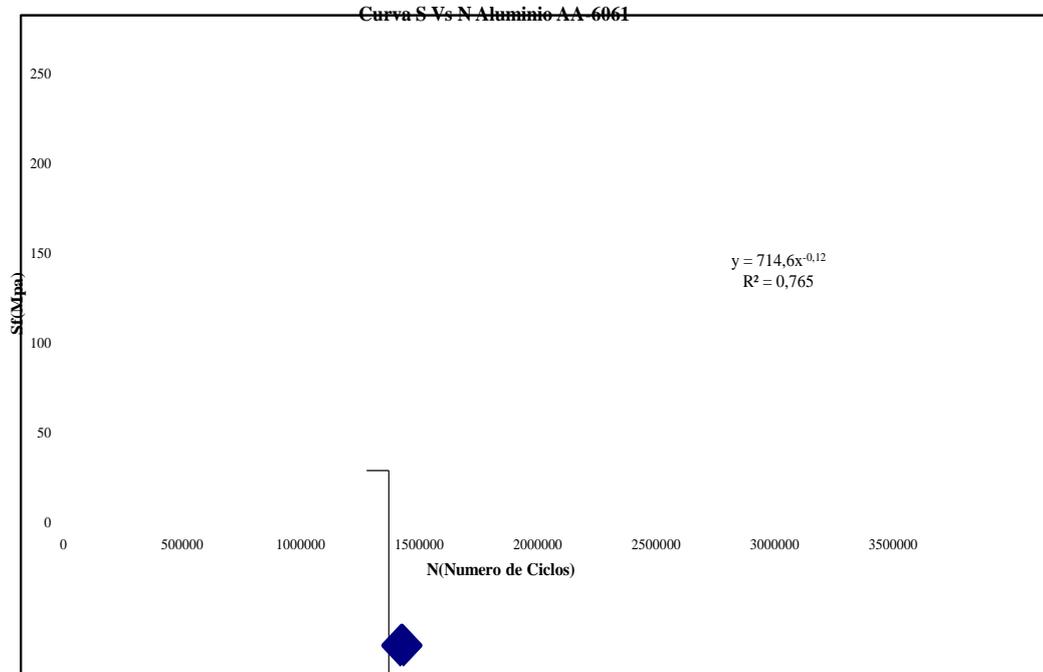


Gráfico 2. Curva S-N del Aluminio Soldado por Fricción.

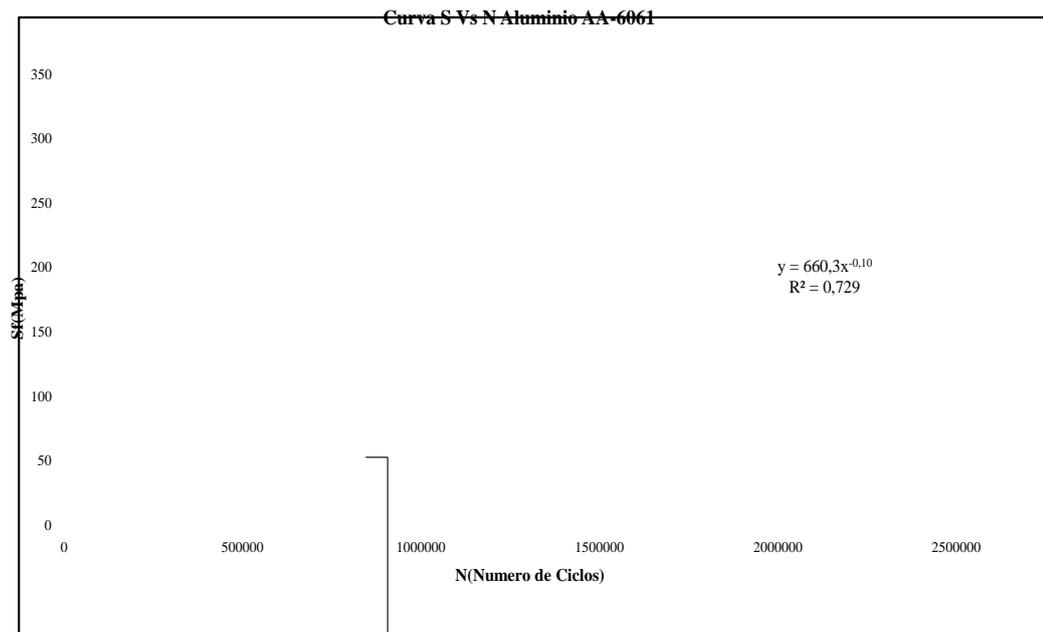


Gráfico 3. Curva S-N del Aluminio sin Soldar. (Tesis referencia).

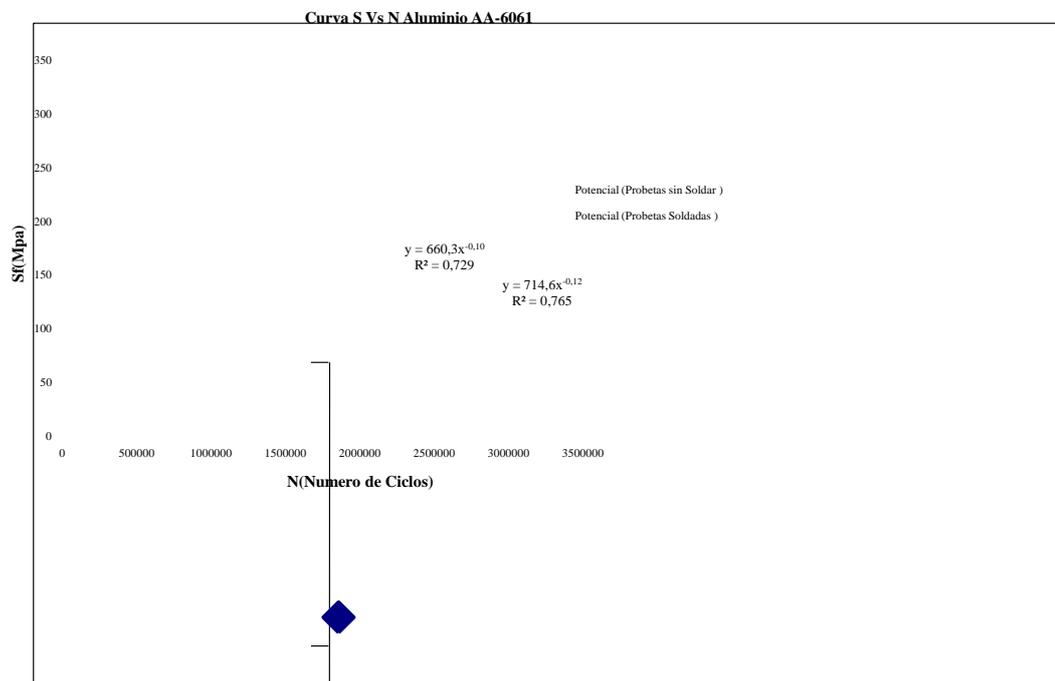


Grafico 4. Curva S-N del Aluminio. Comparación de las Condiciones de Trabajo.

4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS ENSAYOS DE FATIGA.

Para determinar las propiedades dinámicas de la condición en estudio se construyó la ecuación de resistencia a la fatiga mediante el método de regresión lineal con los datos experimentales obtenidos. Se buscó con esto determinar los coeficientes de la curva de resistencia a la fatiga mediante el uso de la ecuación de Basquin (ecuación 2.7), cuyos valores para determinar los coeficientes de la ecuación de Basquin se muestran en la tabla N°9.

Mediante la aplicación de un cambio de variable se puede linealizar la curva haciendo uso del método de los mínimos cuadrados según la recta:

$$\text{Log}(S_f) = \text{Log}(A) - B \text{Log}(N)$$

Donde se aplica el cambio de variable: $\text{Log}(S_f) = Y = \text{Log}(A) = b$

Con ayuda de los datos y cálculos reflejados en la tabla anterior y sustituyendo en las ecuaciones 2.8 y 2.9 respectivamente se tiene:

$$b = \frac{\sum Y_i * \sum X_i^2 - \sum X_i * \sum X_i Y_i}{n * \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} = \frac{66,07 * 790,42 - 152,69 * 334,57}{30 * 790,42 - 152,69^2} = 2,855$$

$$m = \frac{n * \sum X_i Y_i - \sum X_i * \sum Y_i}{n * \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} = \frac{30 * 334,57 - 152,69 * 66,07}{30 * 790,42 - 152,69^2} = -0,128$$

$$\text{Log}(S_f) = Y$$

$$\text{Log}(A) = b$$

$$\text{Log}(N) = X$$

$$B = -m$$

Resolviendo:

$$\text{Log}(A) = 2,855$$

$${}_{10}\text{Log}(A) = 10^{2,855}$$

$$A = 716,143$$

$$B = -(-0,128) = 0,128$$

$$Y = 2,855 - 0,128X$$

Para la condición en estudio la ecuación de Basquin quedaría de la siguiente manera:

$$S_f = 716,143 * N^{-0,128}$$

El coeficiente de correlación lineal entre las dos variables involucradas en la ecuación de fatiga se determinó haciendo uso de la ecuación 2.10, sustituyendo:

$$R^2 = \frac{[\sum X_i Y_i - (\sum X_i * \sum Y_i) / n]^2}{[\sum X_i^2 - (\sum X_i)^2 / n] * [\sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2 / n]}$$

$$R^2 = \frac{[334,57 - (152,69 * 66,07) / 30]^2}{[790,42 - (152,69)^2 / 30] * [145,78 - (66,07)^2 / 30]} = 0,805$$

Resumiendo tenemos que el Coeficiente de Correlación Lineal es: 0,805

Mediante el grafico N°5 se puede observar la linealización de la Curva S-N.

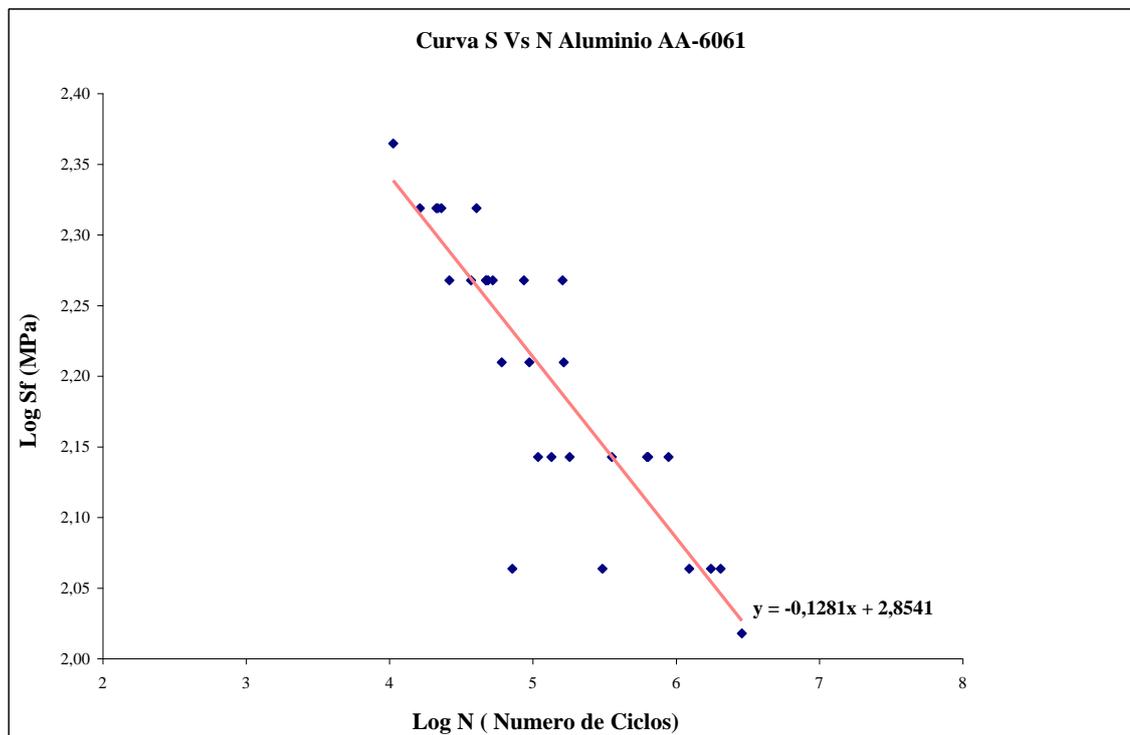


Gráfico 5. Linealización de la Curva S-N.

4.4. FRACTOGRAFÍA.

El análisis fractográfico de las probetas soldadas por el proceso de unión fija de soldadura por fricción, se realizó a través de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) empleando un Microscopio Electrónico de Barrido.

Dicho estudio se condujo con el objeto de determinar las características fractográficas y establecer la secuencia de iniciación, crecimiento y propagación de las grietas por fatiga en las muestras. Para tal fin se analizaron las superficies de fractura de las probetas ensayadas a fatiga con el número de ciclos a falla más cercano a los valores promedio para cada nivel de esfuerzo aplicado.

El estudio fractográfico conducido a través de MEB aporta información fundamental en cuanto a la comprensión de la secuencia de agrietamiento y la misma ayudaría a explicar la notable mejora en la vida a la fatiga-soldadura.

A continuación se mostraran las imágenes tomadas para los diversos niveles de esfuerzo 100%, 90%, 80%, 70%, 60% y 50% respectivamente. Todas estas fueron tomadas a 25Kv y 500 μ m variando sólo el aumento seleccionado, por lo que en algunos casos sólo se hace referencia el aumento utilizado. Las fotografías presentadas para cada nivel de carga fueron seleccionadas de una amplia variedad tomadas durante el proceso de toma de imágenes estratégicas útiles para el correspondiente estudio de las fracturas de las muestras, es por ello que para estandarización y mejor percepción de lo observado se colocaran dos imágenes para cada nivel de carga.

4.4.1. FRACTOGRAFÍA A 100% DEL ESFUERZO APLICADO.

A este nivel de esfuerzo se puede presenciar una zona de rotura en la cual se denotan diversos cuerpos incrustados en el material de color oscuro esto es material solidificado del proceso de soldadura debido a las altas temperaturas

alcanzadas en el proceso formando de clivajes en la misma. Además de esto se puede observar de manera clara levantamiento de material debido a la alta carga aplicada en la sección transversal de la pieza.

Las porosidades y textura áspera es indicio de una fractura dúctil a altos niveles de esfuerzos alternantes. En la figura N° 17 puede apreciarse lo antes expuesto.

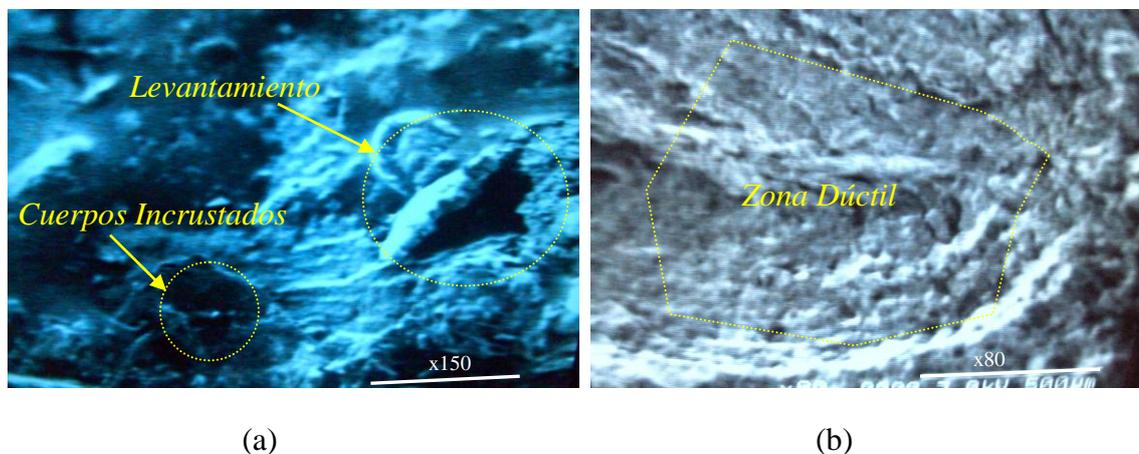


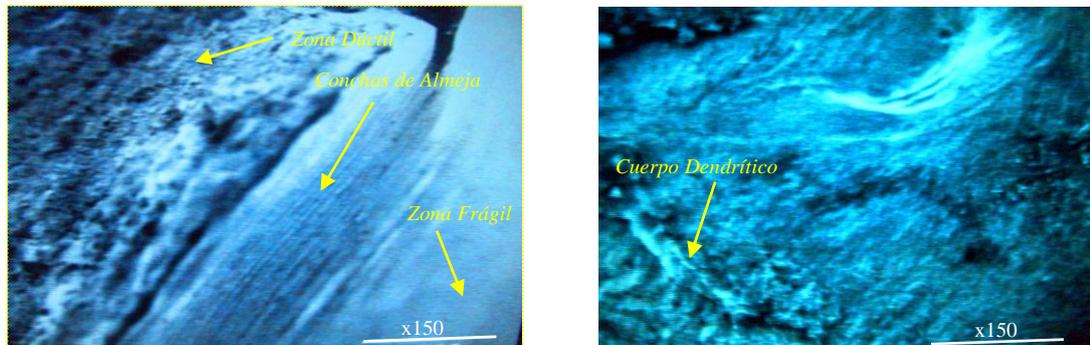
Figura 17. a) Levantamiento de material, tomada a 150X. b) Ampliación de la zona dúctil, tomada a 80X.

4.4.2. FRACTOGRAFÍA A 90% DEL ESFUERZO APLICADO.

Este es un nivel de carga también elevado en el cual se pudo observar una región lisa debido a la fricción entre las superficies abiertas durante la propagación de la fisura a través de la sección y una zona rugosa generada durante la fractura debido a la carga aplicada. Aquí se puede denotar también las conocidas conchas de almeja o marcas de playas las cuales se producen debido a los de clivajes producidos en el proceso de fractura.

En el borde de la misma se puede ver las líneas de fluencia de material por medio de las cuales se comprueba el sentido de rotación al que se produjo la fractura,

además de ello un cuerpo dendrítico con ramificaciones hacia el centro de la misma. En la figura N°18 se puede observar lo anteriormente expuesto.



(a)

(b)

Figura 18. a) Marca de playas, tomadas a 150X. b) Cuerpo dendrítico direccionado desde el borde hacia el centro, tomada 150X.

4.4.3. FRACTOGRAFÍA A 80% DEL ESFUERZO APLICADO.

Para la pieza observada a este nivel de carga lo más resaltante a destacar son la gran cantidad de poros alojados en el borde de la pieza y en el centro de la misma, propagación de grietas que nacen desde el borde hacia al centro. Además de ello se puede enmarcar con claridad corrimientos de material en forma de olas de playas esto debido a las deformaciones los cuales pueden ser identificados por la presencia de los múltiples escalones de clivaje debido a la intersección de dos frentes de grietas en pleno avance.

Las líneas de direccionamiento de las grietas yacen en el borden y se ramifican con mayor pronunciación en el centro de la misma, adicionalmente es necesario destacar la aparición de una zona muy oscura en la parte central la cual es investida por una zona irregular claramente definida.

La figura N° 19 refleja lo antes expuesto y en ella se enmarca lo descrito.

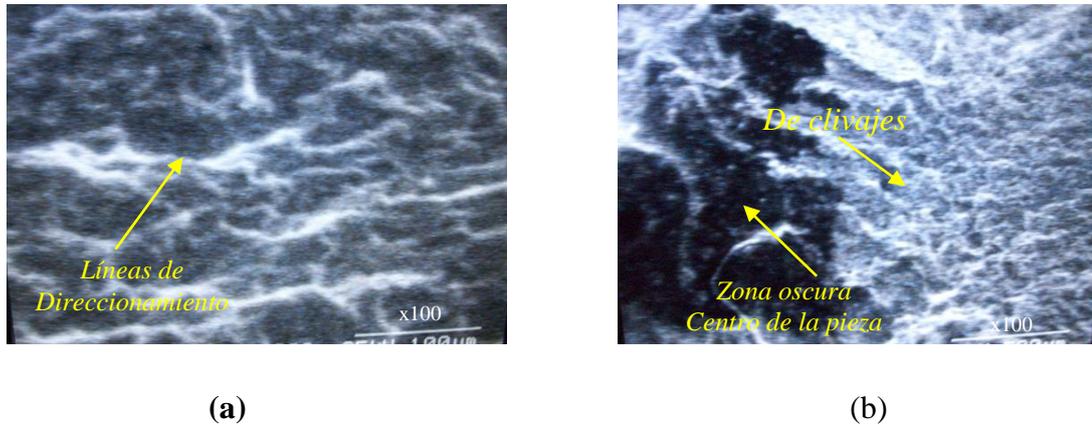


Figura 19. a) Agrietamiento del borde al centro, tomada a 100X. b) Zona central de la pieza, tomada a 100X.

4.4.4. FRACTOGRAFÍA A 70% DEL ESFUERZO APLICADO.

La muestra que corresponde en esta ocasión presenta amplia porosidades en su superficie y en su borde un concentrador de esfuerzo a partir del cual se inicia la fractura alrededor del cual se rodean segregaciones. Para este nivel de esfuerzo los relieves en la pieza no son muy notorios más bien se puede presenciar un material más fatigado con una textura más distorsionada por ello se puede asumir que la misma a fracturado en toda la mitad de la misma es decir en la soldadura. A continuación la figura N°20 presenta la condición de la pieza.

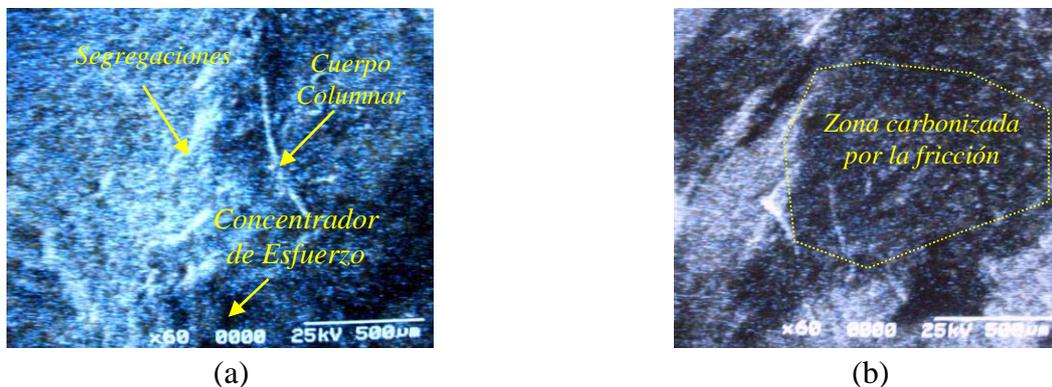
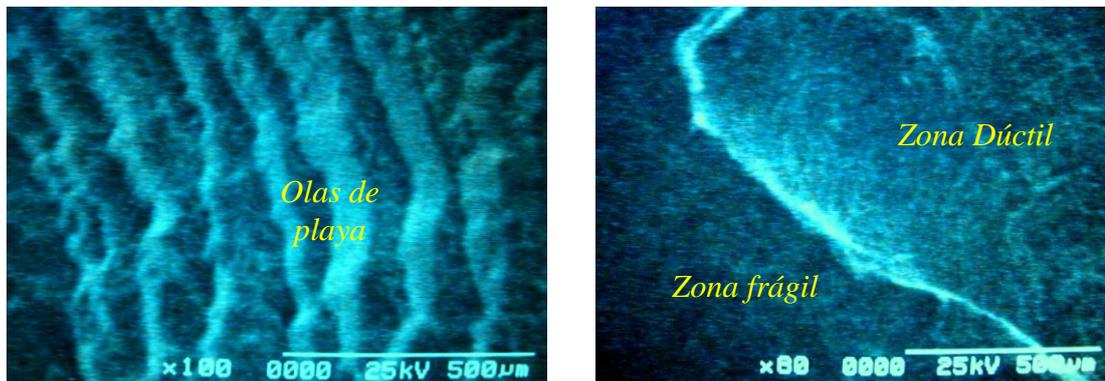


Figura 20. a) Borde de la pieza, tomada a 60X. b) centro de la pieza, tomada a 60X.

4.4.5. FRACTOGRAFÍA A 60% DEL ESFUERZO APLICADO.

En este caso la superficie observada es muy diferente a las anteriores ya que se pueden demarcar varias zonas con diversas texturas o apariencias con lo cual se predice la fractura dúctil- frágil de la misma diferenciándose dos zonas una lisa y una rugosa con presencia de porosidades en el centro debido a mal formaciones en el proceso de soldadura al momento de la enfriamiento-solidificación del material.

La figura N°21 refleja lo antes expuesto.



(a)

(b)

Figura 21. a) Olas de playa, tomada a 100X. b) Zona frágil-dúctil, tomada a 80X.

4.4.6. FRACTOGRAFÍA A 50% DEL ESFUERZO APLICADO.

A este nivel de carga el proceso de iniciación de la grieta es más lento por ello puede verse en el centro de la misma una zona bastante rugosa con pronunciados relieves lo cual es característico de una fractura dúctil. En los bordes la apariencia es muy semejante a la del nivel anterior es decir a la variedad de texturas presentes. En la figura N° 22 se puede apreciar la microestructura observada en el microscopio a los distintos aumentos seleccionados.

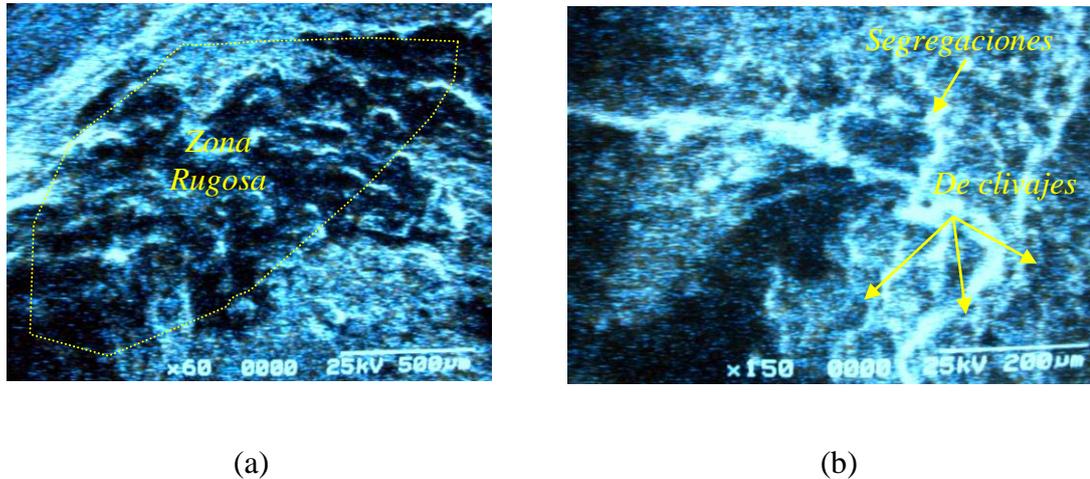


Figura 22. a) Centro de la pieza, tomada a 60X. b) Borde de la pieza, tomada a 150X.

4.5. MICROSCOPIA.

4.5.1. CORTE LONGITUDINAL.

En esta muestra se pudo observar en los diferentes aumentos seleccionados tres zonas bien definidas bordes – centro – laterales en cada una de las cuales se vieron características muy propias. El objetivo de esta sesión microscópica era el de analizar las zonas cercanas al punto de unión de la probeta a través del proceso de soldadura por fricción y de esta manera describir el comportamiento mediante las observaciones realizadas.

Primeramente es importante destacar que en los bordes de la sección cercanos al cordón (observado claramente sin hacer uso del microscopio), ver figura N°23, se alojaban especie de inclusiones de material oscuro (escoria) debido al proceso de unión los cuales se encontraban sólo en la cercanía del cordón de soldadura. Estos se localizaban en los bordes debido al sentido de rotación producido en la fundición y solidificación interna del material al ser soldada la pieza, en la figura N°24 puede apreciarse lo dicho.

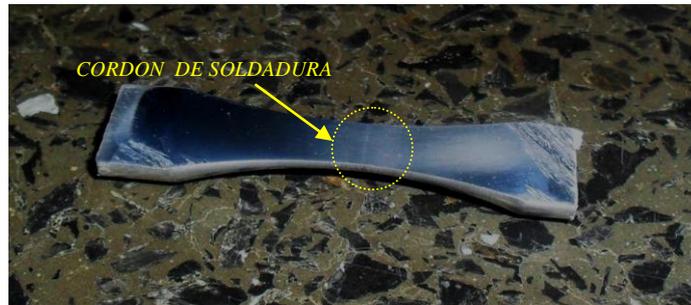


Figura 23. Cordón de soldadura. Corte Longitudinal.

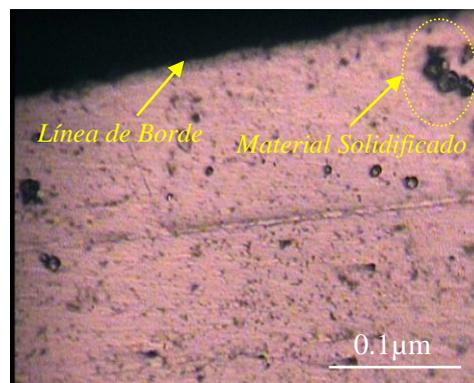


Figura 24. Borde cercano al cordón de soldadura tomada a 1000X.

Por otra parte en la figura N°25 se puede observar en la zona central de la pieza justo donde se encontraba el cordón de soldadura que existían muchas porosidades lo que la caracterizaba como una zona muy áspera esto debido al agitación a elevadas temperatura que se alcanzan en el proceso produciendo deformaciones plásticas notable en el material.

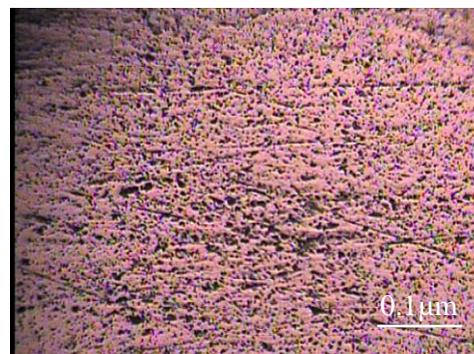


Figura 25. Zona Central cercana al cordón de soldadura tomada a 100X.

Por último se observó que ya a escasos 10 mm en adelante el comportamiento del material era el mismo una zona con mejor apariencia sin tantas inclusiones ni porosidades por efecto de deformación por la fusión – solidificación del material producido por la soldadura. En la figura N°26 puede apreciarse la zona de la pieza antes citada.



Figura 26. Lateral Izq. cercano al cordón de soldadura tomada a 100X.

4.5.2. CORTE TRANSVERSAL.

Para esta sesión como es sabido se prepararon 6 probetas una para cada nivel de esfuerzo aplicado con la intención de observar el comportamiento de la zona a 5mm por debajo de la zona de rotura del material ensayado, siguiendo el procedimiento para preparación metalográfica, las muestras seleccionadas fueron observadas una tras otra como primer chequeo de inspección de muestras notando que entre ellas la similitud en apariencia y en rasgos característicos eran parecidos para los distintos niveles de aumento seleccionados es por ello que para nuestro caso para los diversos porcentaje de esfuerzo (100, 90, 80, 70, 60 y 50%) se realizará una análisis general en el cual se describirán las características observadas en las muestras entre las cuales tenemos:

Un color oscuro en la superficie de la muestra el cual se creía en primera instancia que era debido a una mala aplicación del ataque químico en la preparación metalográfica hipótesis que se diluyo ya que estas fueron realizadas bajo

supervisión calificada y se llegó a la conclusión al ver el corte longitudinal de que era debido al calentamiento producido por la fricción en el proceso de soldadura ya que en zonas más alejadas de la zona de soldadura la apariencia era más clara propia de la aleación. En el centro de las mismas se pudo observar porosidades debido a la fluencia del material del centro hacia los bordes debido al agitación del mismo por el proceso de soldadura creando una zona pastosa en el núcleo de la pieza. En los bordes algo común en todos los casos fueron las varias inclusiones de material fundido, además de esto la presencia de una sustancia blanquecina debido a precipitados producidos en el proceso de enfriamiento del material. Ver la figura N°27.

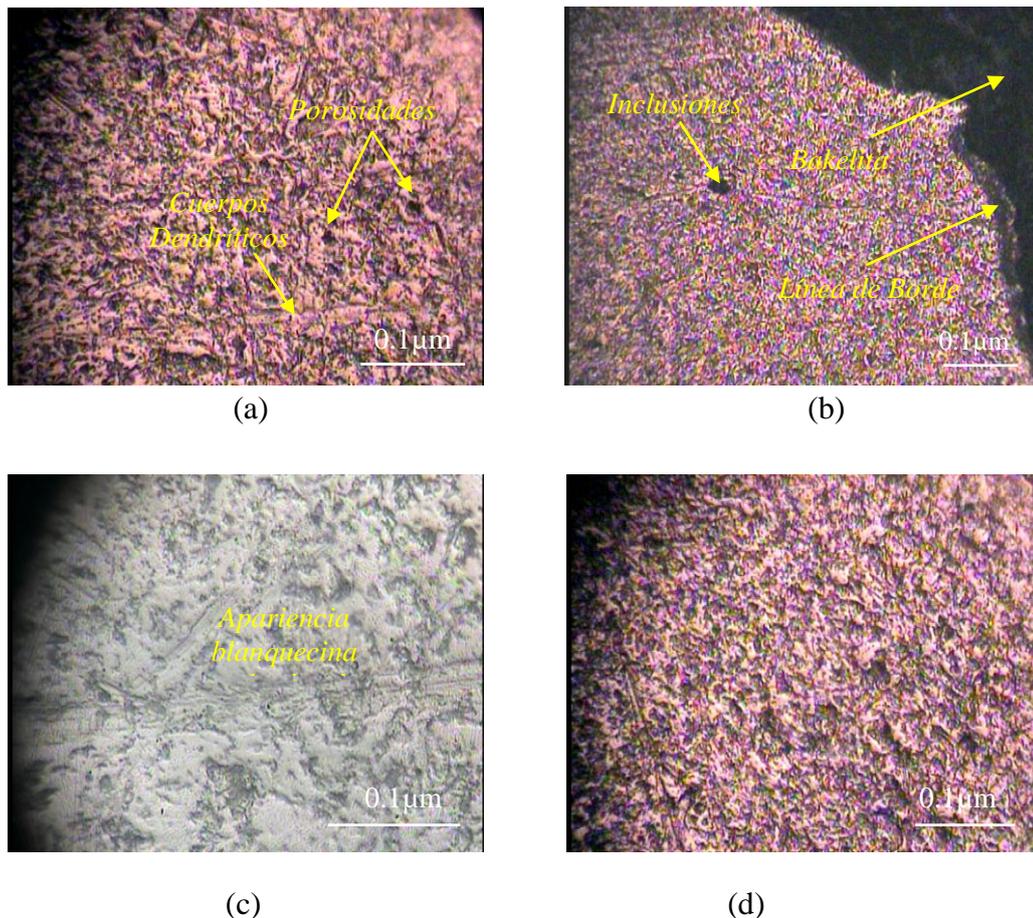


Figura 27. a) Borde 80% de carga, tomada a 400X. b) Borde 90% de carga, tomada a 100X. c) Borde 80% de carga, tomada a 1000X. d) Centro a 90% de carga, tomada a 400X

CONCLUSIONES.

Después de finalizado este trabajo y evaluar el comportamiento a fatiga de las juntas soldadas por fricción se concluirá lo siguiente:

El esfuerzo de fluencia encontrado para la condición estudiada (probeta soldada por fricción) con respecto al obtenido en su condición original (sin soldadura ni tratamiento térmico) tuvo un descenso del 23%.

La resistencia a la fatiga del material soldado según el comportamiento descrito por la tendencia de la curva S-N tuvo una disminución promedio del 18% comparada con la resistencia a la fatiga del material sin soldar para duraciones entre 250.000 y 2.000.000 ciclos.

El valor encontrado de la correlación lineal entre las variables Resistencia a la fatiga y Número de Ciclos fue de 0,85 el cual es muy cercano a la unidad la cual denota una relación perfecta. Además de ello comparada con la del trabajo de referencia para la condición de medio inerte se observó que los valores son similares ya que esta fue de 0,72.

El proceso de soldadura no se realizó de forma eficiente en algunas piezas ya que se observó que en algunos casos (las duraciones más bajas) la pieza rompía en la soldadura.

Las escorias o material solidificado en el proceso de soldadura se alojan en los bordes cercanos al cordón debido a la fuerza de empuje torsional del material que va del centro hacia fuera.

En la fractura de las piezas de aluminio ensayadas se pueden reconocer dos tipos distintos de superficies, una lisa debida a la fricción entre las superficies abiertas

durante la propagación de la fisura a través de la sección y una rugosa generada durante la fractura cuando la carga es demasiado elevada para la sección remanente.

A medida que disminuye el esfuerzo aplicado aumenta la vida útil de la pieza ensayada esto se corresponde con lo observado en la microestructura a través de microscopia electrónica con una zona dúctil de rotura más amplia con un crecimiento de grieta más notorio y las apariciones de las marcas de playa y estrías las cuales no aparecen en roturas rápidas.

RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar un estudio de fatiga para diferentes tipos de presión y velocidad de giro.
- ✓ Realiza un estudio a fatiga para material disimiles o aleaciones de aluminio distintas y de esta manera ver las mejoras que se puedan lograr para casos especiales.
- ✓ Mejorar las condiciones operativas de la maquina rotativa de fatiga (vibraciones, automatización del conteo de numero de ciclos, etc.) de manera de tratar de disminuir cualquier factor que contribuya de manera directa a la disminución de la resistencia del material y así obtener valores más cercanos a lo ideal.
- ✓ Debido a que el Microscopio Electrónico de Barrido con el que se cuenta en nuestro centro de estudio estaba dañado como alternativa se opto por utilizar uno de afuera por lo que la calidad en la toma de imágenes en el estudio fractográfico no fue la más optima, se recomienda la realización de un chequeo y/o mantenimiento preventivo constante del equipo de manera que los estudios realizados para el análisis de la microestructura de la fractura puede ser la más adecuada.

BIBLIOGRAFÍA.

- Arias, F. (2006). *El proyecto de Investigación Introducción a la Metodología Científica*. (5ta edición). Caracas, Venezuela: Editorial Episteme.
- Cabot, P; Moglioni , A y Carella E.(2003). *Soldadura Por Fricción Agitación (FSW) De AA 6061 T6* [Tesis en Línea]. Comisión Nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina. Consultada el 10 noviembre del 2008 en <http://www.Materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10147>.
- Correa, F y Pineda, M. (2006). *Estudio sobre la Resistencia a la Fatiga de la Aleación AA – 6061 bajo un Medio Acuoso con NaCl al 3%*. Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad de Carabobo.
- Dieguez, M y Rivas, Sh . (2002). *Evaluación de la Metalurgia en la Soldadura por Fricción de Materiales Disimiles*. Trabajo de Especial de Grado de la no publicado. Universidad de Carabobo.
- El Aluminio. (2010). [Página Web en línea]. Disponible en <http://es.wikipedia.org/Aluminio>.
- Guanipa, V. (2000). *Selección de Materiales de Ingeniería*. (1era. Edición). Trabajo de Ascenso, Universidad de Carabobo.
- Higgins, R. (1984). *Ingeniería Metalúrgica*. (Tomo 1). México: Editorial Continental, S.A.
- Iriza, M. (2004). *Manual de Practicas del Laboratorio de Materiales*. Universidad de Carabobo.

Inercia Friction Welder and Direct Drive Friction Welder- Manufacturing Technology, Inc. (2010). [Página web en línea]. Disponible en <http://mtiwelding.com>.

SAE HandBook. (1995). Materiales Fuel, Emisiones, And Noise. Vol. 1. Publicado por SAC.

Sáenz, L. (1996). *Fundamentos y Aplicaciones en Ingeniería de Fluencia Lenta Fatiga*. Trabajo de Ascenso, Universidad de Carabobo.

Shigley, J y Mischke, Ch. (1990). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. (5ta. Edición). México: Editorial McGraw Hill.

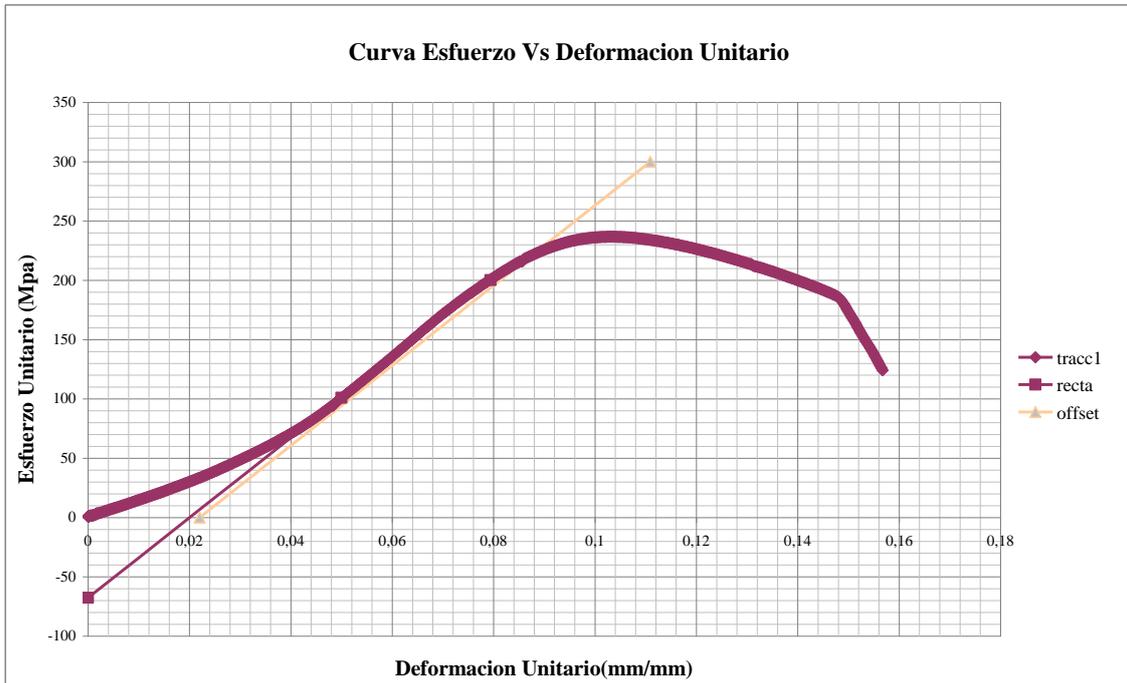
Smith, W. (1993). *Fundamentos de la Ciencia de Materiales*. (2da. Edición). Madrid, España: Editorial McGraw Hill.

SAE HandBook. (1995). Vol. 1. Materiales Fuel, Emisiones, And Noise. Publicado por SAC.

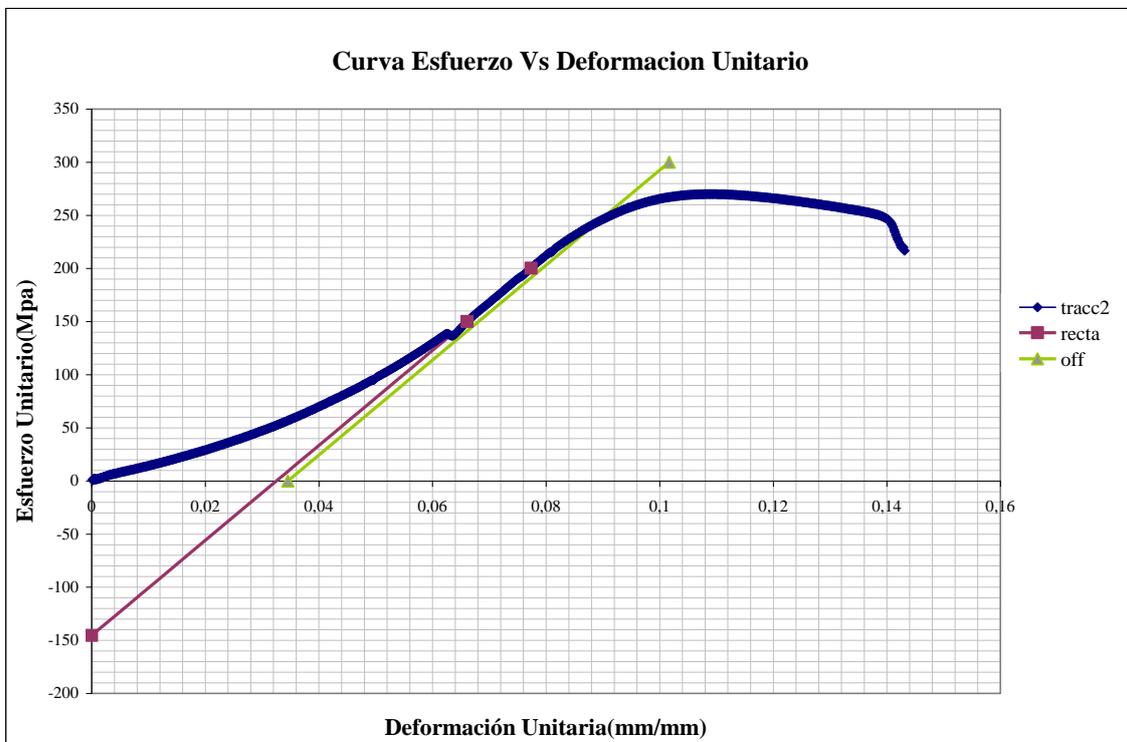
Perez, C; Chapetti, C; Cocco, C y De Vedia, L. (2002). *Iniciación y Crecimiento de Fisuras por Fatiga en Uniones Soldadas de Aluminio de Alta Resistencia: Aplicación del Enfoque Local*. Jornada SAM 2000-IV coloquio latinoamericano de fractura y fatiga.

Wainstein, J; Pérez, C; De Vedia, L y Cassanelli, A. (2001). *Determinación de Curvas J-R de Uniones Soldadas por "Friction Stir Welding"*. Facultad de Ingeniería, Univ. Nac. de Mar del Plata, J. B. Justo 4302, 7600, Mar del Plata, Argentina. Inst. de Tecnología, Prof. Jorge A. Sábato (UNSAM-CNEA), CIC, Argentina.

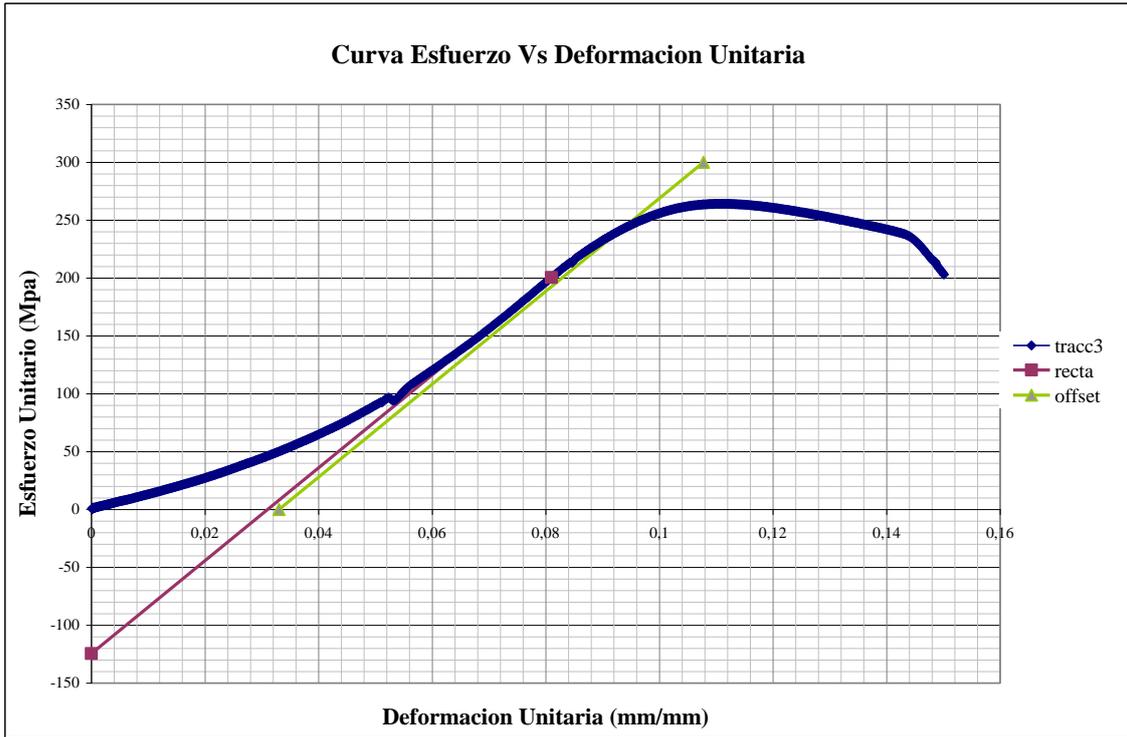
Ensayos de Tracción.



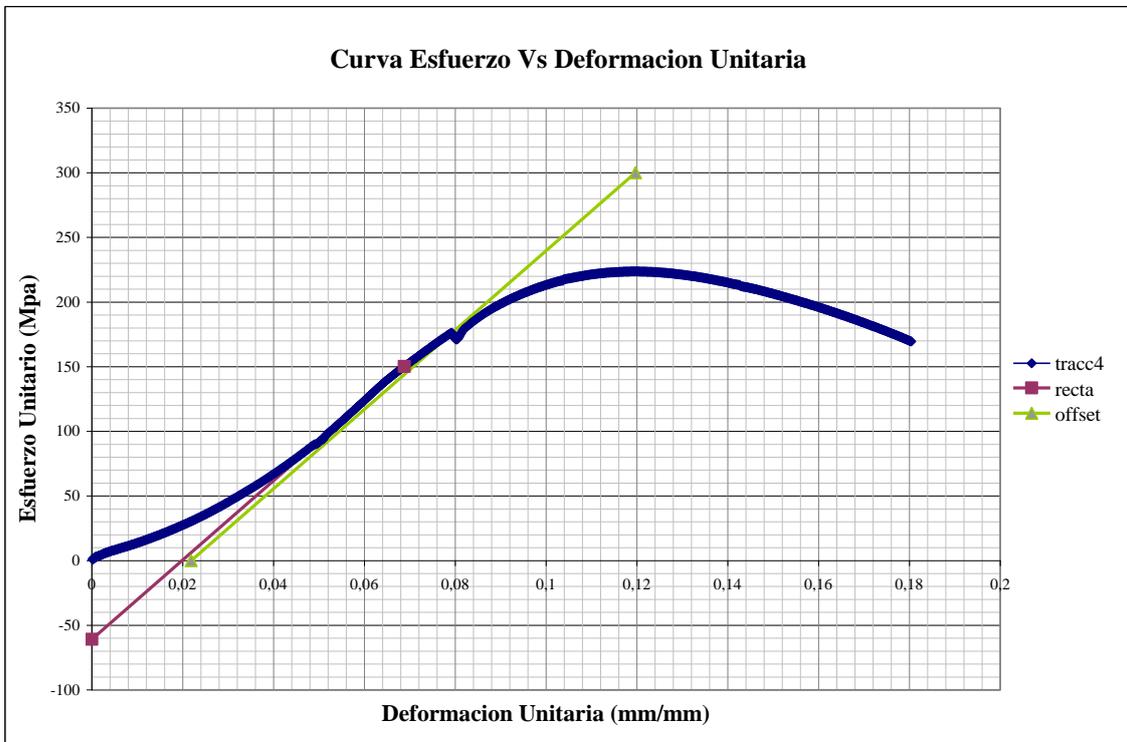
Ensayo 1.



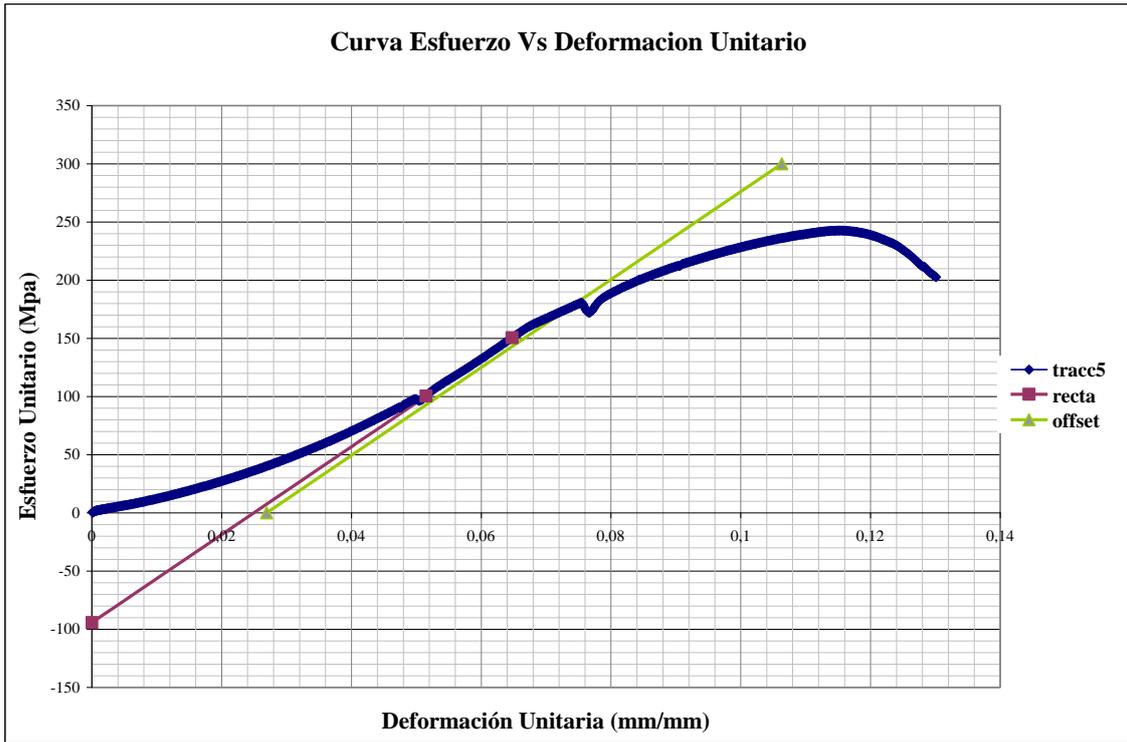
Ensayo 2.



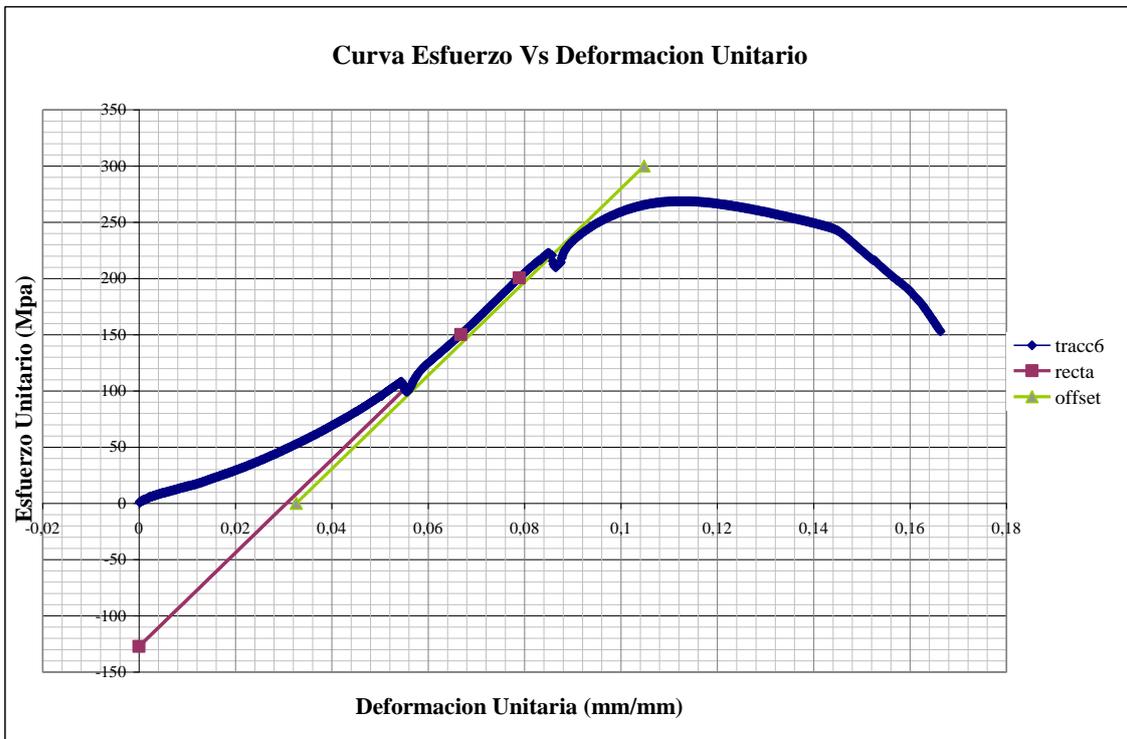
Ensayo 3.



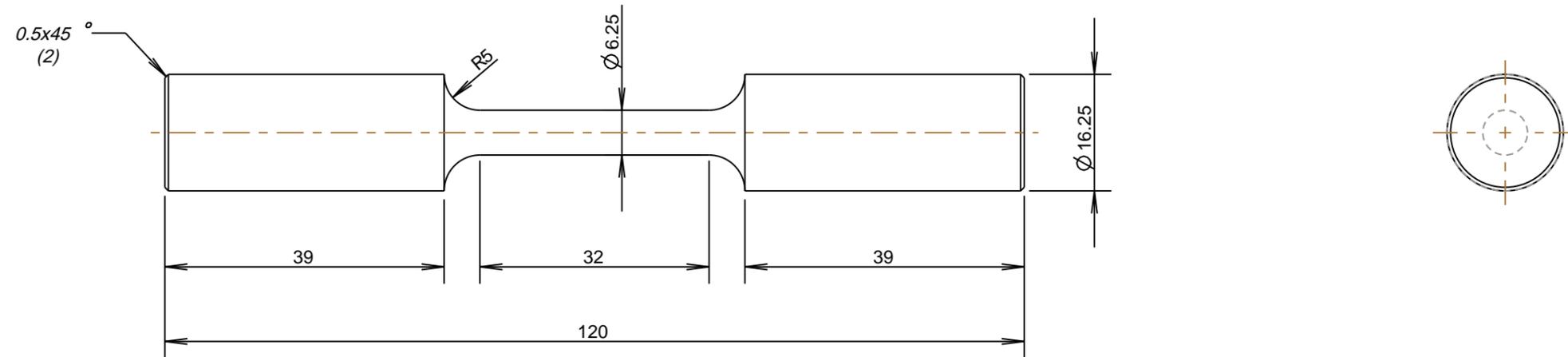
Ensayo 4.



Ensayo 5.

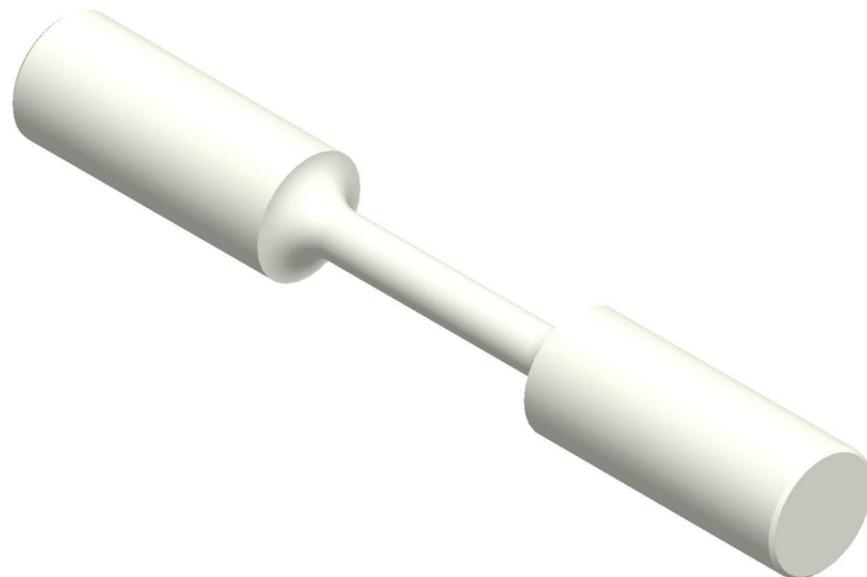


Ensayo 6.

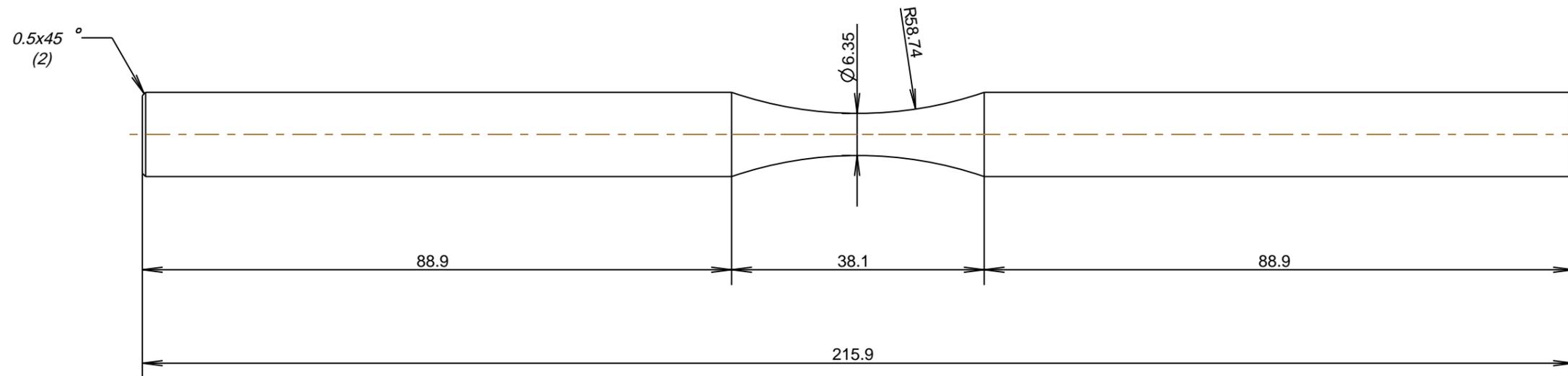


NOTA:
 *5 PROBETAS SOLDADAS POR FRICCION
 *5 PROBETAS PARA COMPROBACION DE MATERIAL

VISTA ISOMETRICA



LETRA	MODIFICACION		VALOR ANTERIOR	FECHA	FIRMA
REVISIONES					
TOLERANCIAS NO ACUMULABLES - NO INCLUYE ESPESOR -DIMENSIONES EN mm. SI NO SE ESPECIFICA OTRA UNIDAD					
PERFORACIONES: \emptyset	± 0.2	RADIOS:	± 0.8	SUPERFICIES MECANIZADAS	
LONG. PIEZAS MECANIZADAS	± 0.2	ANGULOS:	$\pm 1^\circ$	SIMBOLO	TOLERAN. PROF. HUELLA
PIEZAS CORTADAS C/CIZALLA	± 0.8	PIEZAS FUND. OXIC. ETC.	± 1.5	∇	± 0.8 BASTO
ENTRE PERF. BORDES Y PERF.	± 0.8	PIEZAS TROQUELADAS:	± 0.8	$\nabla \nabla$	± 0.2 0.025-0.100
DOBLECES: DOBLEZ/PESTAÑA	± 0.8	PIEZAS FIB. VID. /PLAST.	± 1.5	$\nabla \nabla \nabla$	± 0.2 0.006-0.025
1er. N° DE CONJUNTO	1er. N° DE MODELO	N° MAT. PR.	10	AA - 6061	MECAN.TORNO CNC
0	000	0	00/00/00	PESO (Kg)	
				FECHA	NOMBRE
				DIS.	
				DIB.	16/02/09 NELSON M.
				CONT.	
AÑO	N° EMIS	ESTADO DE EMIS	FECHA DE MODIF.		
N° CLASIFICACION	PROYECCION	ESCALA:	FORMATO	SUSTITUYE A	No. DE PARTE
		0.050	A-3	-----	PIEZATRACCION
ESTE PLANO ES PROPIEDAD DE ENCAVA C.A. - NO PUEDE SER REPRODUCIDO PARCIALMENTE SIN AUTORIZACION					



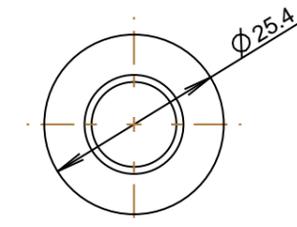
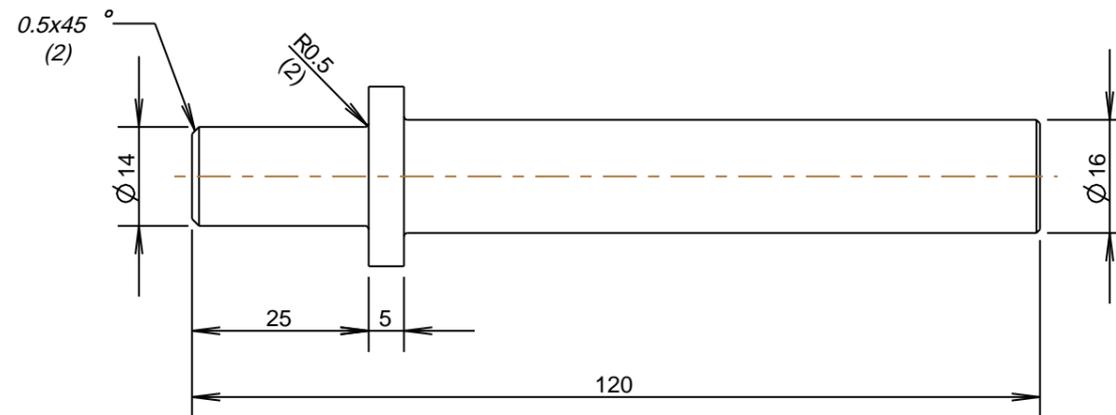
Medidas en mm

NOTA:
 *30 PROBETAS SOLDADAS POR FRICCION
 *10 PROBETAS SIN SOLDAR

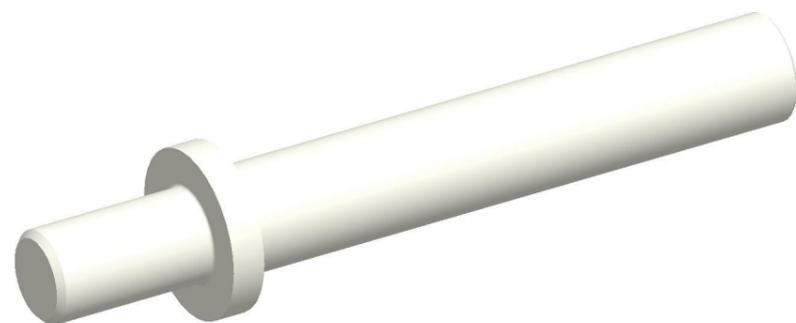
VISTA ISOMETRICA
 ESC.:0.80



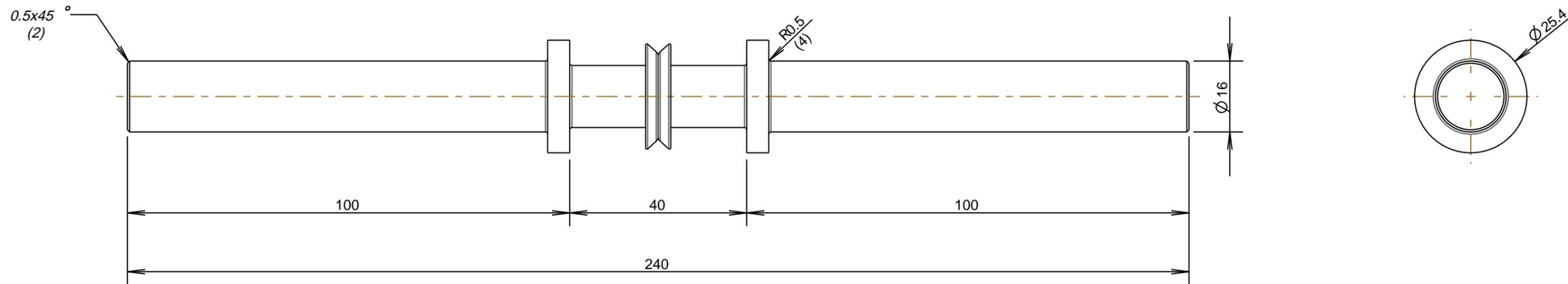
LETRA	MODIFICACION		VALOR ANTERIOR	FECHA	FIRMA
REVISIONES					
TOLERANCIAS NO ACUMULABLES - NO INCLUYE ESPESOR -DIMENSIONES EN mm. SI NO SE ESPECIFICA OTRA UNIDAD					
PERFORACIONES: Ø	±0.2	RADIOS:	±0.8	SUPERFICIES MECANIZADAS	
LONG. PIEZAS MECANIZADAS	±0.2	ANGULOS:	±1°	SIMBOLO	TOLERAN. PROF. HUELLA
PIEZAS CORTADAS C/CIZALLA	±0.8	PIEZAS FUND. OXIC. ETC.	±1.5	▽	±0.8 BASTO
ENTRE PERF. BORDES Y PERF.	±0.8	PIEZAS TROQUELADAS:	±0.8	▽▽	±0.2 0.025-0.100
DOBLECES: DOBLEZ/PESTAÑA	±0.8	PIEZAS FIB. VID. /PLAST.	±1.5	▽▽▽	±0.2 0.006-0.025
1er. N° DE CONJUNTO	1er. N° DE MODELO	N° MAT. PR.	40	AA-6061	MECAN. TORNO CNC
0	000	0	00/00/00	MATERIAL	OBSERVACIONES
PESO (Kg)			FECHA	UNIVERSIDAD DE CARABOBO	
				VALENCIA - EDO. CARABOBO	
			DIS.	DENOMINACION	
			DIB. 16/02/09	PROBETA PARA ENSAYO DE FATIGA	
			CONT.	NELSON M.	
AÑO	N° EMIS	ESTADO DE EMIS	FECHA DE MODIF.	No. DE PARTE	
N° CLASIFICACION		PROYECCION	ESCALA:	FORMATO	SUSTITUYE A:
			0.500	A-3	-----
ESTE PLANO ES PROPIEDAD DE ENCAVA C.A. - NO PUEDE SER REPRODUCIDO PARCIALMENTE SIN AUTORIZACION					



VISTA ISOMETRICA

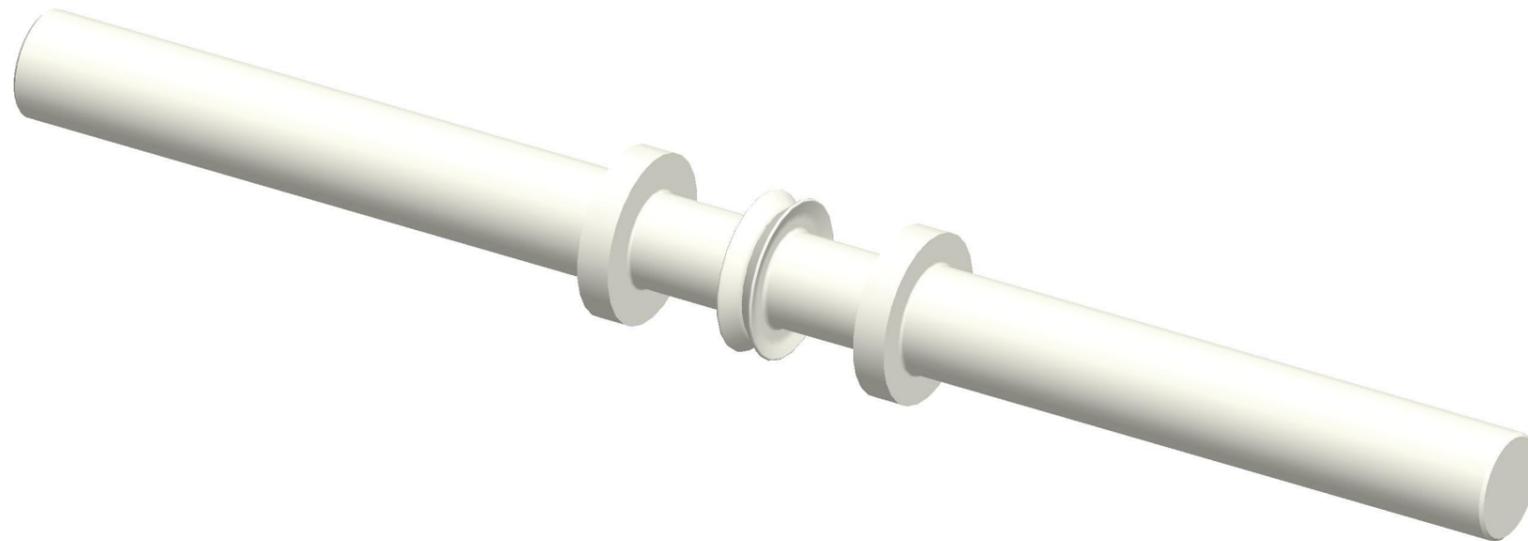


LETRA	MODIFICACION	VALOR ANTERIOR	FECHA	FIRMA					
REVISIONES									
TOLERANCIAS NO ACUMULABLES - NO INCLUYE ESPESOR -DIMENSIONES EN mm. SI NO SE ESPECIFICA OTRA UNIDAD									
PERFORACIONES: Ø	±0.2	RADIOS:	±0.8	SUPERFICIES MECANIZADAS					
LONG. PIEZAS MECANIZADAS	±0.2	ANGULOS:	±1°						
PIEZAS CORTADAS C/CIZALLA	±0.8	PIEZAS FUND. OXIC. ETC.	±1.5	▽	±0.8	BASTO			
ENTRE PERF. BORDES Y PERF.	±0.8	PIEZAS TROQUELADAS:	±0.8	▽▽	±0.2	0.025-0.100			
DOBLECES: DOBLEZ/PESTAÑA	±0.8	PIEZAS FIB. VID. /PLAST.	±1.5	▽▽▽	±0.2	0.006-0.025			
1er. N° DE CONJUNTO	1er. N° DE MODELO	N° MAT. PR.	80	AA 6061	MECAN. TORNO CONV.				
			CANT	MATERIAL	OBSERVACIONES				
0	000	0	00/00/00	PESO (Kg)		UNIVERSIDAD DE CARABOBO VALENCIA - EDO. CARABOBO			
				FECHA	NOMBRE				
				DIS.					
				DIB.	16/02/09 NELSON M.				
				CONT.		DENOMINACION			
						PROBETA PARA ENSAYO DE SOLDADURA POR FRICCION			
AÑO	N° EMIS	ESTADO DE EMIS	FECHA DE MODIF.	N° CLASIFICACION	PROYECCION	ESCALA:	FORMATO	SUSTITUYE A	No. DE PARTE
						1.000	A-3	-----	PROBETA_ENSAYO_SOLDADURA
ESTE PLANO ES PROPIEDAD DE ENCAVA C.A. - NO PUEDE SER REPRODUCIDO PARCIALMENTE SIN AUTORIZACION									



NOTA:
 *30 PROBETAS PARA ENSAYO DE FATIGA
 *5 PROBETAS PARA ENSAYO DE TRACCION
 *5 PROBETAS PARA PRUEBA LONGITUDINAL (Y/O RESERVA)

VISTA ISOMETRICA



LETRA	MODIFICACION	VALOR ANTERIOR	FECHA	FIRMA
REVISIONES				
TOLERANCIAS NO ACUMULABLES - NO INCLUYE ESPESOR -DIMENSIONES EN mm. SI NO SE ESPECIFICA OTRA UNIDAD				
PERFORACIONES: \varnothing	± 0.2	RADIOS:	± 0.8	SUPERFICIES MECANIZADAS
LONG. PIEZAS MECANIZADAS	± 0.2	ANGULOS:	$\pm 1^\circ$	SIMBOLO
PIEZAS CORTADAS C/CIZALLA	± 0.8	PIEZAS FUND. OXIC. ETC.	± 1.5	TOLERAN.
ENTRE PERF. BORDES Y PERF.	± 0.8	PIEZAS TROQUELADAS:	± 0.8	PROF. HUELLA
DOBLECES: DOBLEZ/PESTAÑA	± 0.8	PIEZAS FIB. VID. /PLAST.	± 1.5	
-----	-----	-----	40	AA-6061
1er. N° DE CONJUNTO	1er. N° DE MODELO	N° MAT. PR.	CANT	MATERIAL
0	000	0	00/00/00	PESO (Kg)
				FECHA
				NOMBRE
				DIS.
				DIB. 16/02/09
				NELSON M.
				CONT.
AÑO	N° EMIS	ESTADO DE EMIS	FECHA DE MODIF.	
N° CLASIFICACION	PROYECCION	ESCALA:	FORMATO	SUSTITUYE A
		1.000	A-3	-----
				No. DE PARTE
				PROBETA_SOLDADA
ESTE PLANO ES PROPIEDAD DE ENCAVA C.A. - NO PUEDE SER REPRODUCIDO PARCIALMENTE SIN AUTORIZACION				

Mediciones de la Rugosidad Superficial.

a) Medición de la rugosidad superficial #1.

a.1) Probetas para ensayos de fatiga soldadas por fricción.

Ítem	Rugosidad Superficial (μm)			Rugosidad Promedio(μm)
	1	2	3	
1	0,96	0,89	0,95	0,93
2	0,79	0,76	0,84	0,79
3	0,83	0,75	0,83	0,80
4	0,92	1,17	1,17	1,08
5	0,7	0,7	0,98	0,79
6	0,5	0,66	0,53	0,56
7	0,93	0,75	0,7	0,79
8	0,73	0,94	0,82	0,83
9	0,72	1,2	0,81	0,91
10	0,95	0,79	0,75	0,83
$X_{\text{promedio}} = 0.834$				Desv. = 0.13

a.2) Probetas para ensayos de fatiga sin soldar.

Ítem	Rugosidad Superficial (μm)			Rugosidad Promedio(μm)
	1	2	3	
1	0,79	0,61	0,82	0,74
2	0,86	0,94	0,87	0,89
3	0,8	0,75	0,82	0,79
$X_{\text{promedio}} = 0,81$				Desv. = 0.07

b) Medición de la rugosidad superficial #2.

b.1) Probetas para ensayos de fatiga soldadas por fricción.

Ítem	Rugosidad Superficial (μm)			Rugosidad Promedio(μm)
	1	2	3	
1	0,49	0,52	0,55	0,52
2	0,75	0,81	0,78	0,70
3	0,50	0,42	0,47	0,46
4	0,62	0,59	0,58	0,59
5	0,53	0,51	0,50	0,51
6	0,54	0,55	0,53	0,54
7	0,5	0,54	0,54	0,53
8	0,70	0,73	0,80	0,74
9	0,62	0,6	0,58	0,60
10	0,69	0,75	0,7	0,71
$X_{\text{promedio}} = 0,59$				Desv. = 0.09

b.2) Probetas para ensayos de fatiga sin soldar.

Ítem	Rugosidad Superficial (μm)			Rugosidad Promedio(μm)
	1	2	3	
1	0,66	0,58	0,65	0,63
2	0,59	0,58	0,57	0,58
3	0,7	0,71	0,74	0,72
$X_{\text{promedio}} = 0,64$				Desv. = 0.07