

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SOLDADURA DE PUNTOS POR EL
MÉTODO FRICCIÓN-AGITACIÓN EN ALEACIONES DE MAGNESIO AZ31B

DENNILSON JAFET SEGURA VIVEROS

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2012

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SOLDADURA DE PUNTOS POR EL
MÉTODO FRICCIÓN-AGITACIÓN EN ALEACIONES DE MAGNESIO AZ31B

DENNILSON JAFET SEGURA VIVEROS

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE
INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR

Ing. FERNANDO FRANCO ARENAS

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2012

Nota de aceptación:

Firma del evaluador

Firma del evaluador

Santiago de Cali, Septiembre de 2012

A Dios, por ser esa inagotable fuente de sabiduría y a todas aquellas personas que pusieron su valiosa colaboración para llevar a cabo esta investigación. A mi familia principalmente por su incalculable apoyo, motivación y confianza.

AGRADECIMIENTOS

- A Dios por capacitarme y permitir la realización de este proyecto.
- A mis padres, Dennis Segura y Carmen Viveros, a mis hermanos Darwin, Denis, Víctor, Luis y mis hermanas Carmen Irene y Nora Edith por su apoyo incondicional y por motivarme a seguir siempre adelante.
- A mi director Fernando Franco por conducir y dar forma a todos los aspectos desarrollados en este estudio.
- A Karen Quintana, por el apoyo y el aporte conceptual en la comprensión del manejo de datos de fatiga.
- A Luisa Fernanda, Rosa Lidia, Kelly y Johana, Efrén y Ruby Patricia por su incondicional apoyo y cariño.
- Al ingeniero Orlando Paz, por la colaboración en el manejo de adquisición de datos y máquina de ensayos dinámicos para el proyecto.
- A la Escuela de Ingeniería de Materiales y de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle
- A la empresa Formaletas S.A por donar el material objeto de estudio

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN	2
2. ESTADO DEL ARTE	3
2.1 Proceso de SFAP	3
2.2 Influencia de los parámetros del proceso	3
2.3 Micro-estructura	4
2.4 Micro-dureza en SFAP	5
2.5 Tensión en SFAP	5
2.6 Fatiga	6
2.6.1 Fatiga en SFAP en aleaciones de Magnesio AZ31B	11
2.8 Fatiga en uniones remachadas de aleaciones de aluminio	13
3. OBJETIVOS	15
3.1 Objetivo general	15
3.2 Objetivos específicos	15
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	16
4.1 Material base	16
4.2 Herramienta de soldadura	17
4.3 Equipos para la realización de las soldaduras	18
4.4 Procedimiento de soldadura	188
4.5 Diseño experimental	200
5. CARACTERIZACIÓN	22
5.1 Ensayo de tensión	24
5.2 Ensayo de fatiga	24
6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	25
6.1 Análisis metalográfico	25
6.2 Mapas de micro-dureza	32
6.3 Resultados de tensión	34
6.4 Resultados de fatiga	39
7. CONCLUSIONES	47
8. BIBLIOGRAFIA	48

Lista de figuras

Figuras	Pg.
Figura 1. Esquema de proceso de soldadura FSSW.....	3
Figura 2. Punto de soldadura por la técnica de fricción-agitación a) Vista superior, b) Vista de la sección transversal.....	4
Figura 3. Micrografías de las regiones de la soldadura.....	5
Figura 4. Falla en ensayo de tensión de las SFAP, de izquierda a derecha una vista superior e inferior de la lámina superior y una vista superior de la lámina inferior. a) fractura interfacial, b) arrancamiento de grano [15].	6
Figura 5. Esfuerzos involucrados en el fenómeno de fatiga, a) esfuerzos alternantes, b) esfuerzos repetidos.	7
Figura 6. Curva S-N para un acero UNS G41300 normalizado	8
Figura 7. Fractura a fatiga de SFAP a bajo y medio ciclaje, a) lámina superior, b) lámina inferior. [47]	112
Figura 8. Fractura a fatiga de SFAP a alto ciclaje, a) lámina superior y b) lámina inferior. [47].....	13
Figura 9. Fractura a fatiga en uniones remachadas, a) arrancamiento del remache, b) fractura en la lámina de la junta [51].	14
Figura 10. Diagrama de la metodología implementada para desarrollar el proyecto.....	16
Figura 11. Herramienta fabricada para la realización de las soldaduras	17
Figura 12. Ubicación de las láminas a soldar en la bancada de la fresadora convencional.....	18
Figura 13. Procedimiento de soldadura por fricción-agitación de punto en la máquina especializada [78].....	18
Figura 14. Soldadura por fricción agitación de punto, a) láminas base soldadas, b) esquema de las probetas objeto de estudio.	19
Figura 15. Diagrama de proceso del diseño experimental	19
Figura 16. Escogencia al azar y montaje de la sección transversal del punto de soldadura para el análisis metalográfico.....	19
Figura 17. Micro-durómetro utilizado.....	20

Figura 18. Prueba de fatiga a 10 Hz y $R=0,1$	22
Figura 19. Soldadura realizada en máquina especializada	26
Figura 20. Geometría de los puntos por fricción-agitación de los diferentes tratamientos a) 111, b) 121, c) 122, d) 212, e) 112, f) 221, g) 222, h) 211	26
Figura 21. Macrográficas de la sección transversal de la soldadura pro fricción- agitación de punto, a) Identificación de las zonas de soldadura, b) Detalle de la zona agitada a 50X.....	27
Figura 22. Micrográficas de las zonas SFAP a) Metal base a 200X, b) Zona afectada termo-mecánicamente a 500X, c) Región de transición entre la ZATM y la ZA a 200X y d) Zona agitada a 300X. [78]	28
Figura 23. Medición de carga axial y Temperaturas del proceso de SFAP	29
Figura 24. Comportamiento de la carga en el proceso FSSW.....	30
Figura 25. Esquema de disposición para toma de temperaturas	35
Figura 26. a) barrido de micro-durezas para pin de 4,1mm, b) barrido de micro- durezas para pin de 4,8mm	36
Figura 27. Fuerza máxima a tensión para la SFAP y los remaches.....	37
Figura 28. Fractura a tensión de las SFAP, a) Vista superior de la lámina inferior, b) Vista superior de la lámina superior, c) vista posterior de la lámina superior, d) línea de interface, e) Corte para análisis en SEM.....	38
Figura 29. Imágenes MEB de la fractura a tensión de las SFAP, a) Superficie de la región 1 marcada en la Figura 27-e b) Zona de desgarramiento de material.....	38
Figura 30. Fractura a tensión de los remaches, a) Vista posterior de la lámina superior, b) Vista superior de la lámina inferior, c) Vista superior de la lámina superior [78].....	39
Figura 31. Imágenes MEB de la fractura de los remaches a tensión, a) Superficie de fractura de la lámina superior, b) detalle de la superficie de fractura de la lámina superior, c) Superficie de fractura de la lámina inferior, d) detalle de la superficie de fractura de la lámina inferior [78].	40
Figura 32. Comportamiento a fatiga de las SFAP al 0.5 de la carga máxima...	41
Figura 33. Curva carga-ciclos para SFAP realizada en fresadora convencional.	41

Figura 34. Curva Carga- ciclos para las uniones remachadas.	43
Figura 35. Curvas carga-ciclos de las SFAP realizadas en fresadora convencional y en máquina estándar y de las uniones remachadas.....	43
Figura 36. Macrografías de la fractura a fatiga de las SFAP a cargas bajas, a) Vista de la lámina inferior, b) vista posterior de la lámina superior, c) vista de la lámina superior.....	44
Figura 37. Macrografías de la fractura a fatiga de las SFAP a cargas altas, a) Vista superior de la lámina superior, b) vista posterior de la lámina superior, c) vista superior de la lámina inferior	43
Figura 38. Imágenes de la fractura a fatiga, a) Macrografía de la fractura, b) zona de propagación identificada como región A en la imagen a), c) detalle de la micrografía b.....	45
Figura 39. Macrografías de la fractura a fatiga de las uniones remachadas. a) Vista posterior de la lámina superior, b) Vista superior de la lámina inferior [78]	46
Figura 40. Micrografías MEB de la superficie de fractura de las uniones remachadas. a) zona de transición entre la propagación de la grieta y la superficie de fractura, b) detalle de la propagación de la grieta, c) detalle de la fractura a fatiga [78]	46

Lista de Tablas

Tablas	Pg.
Tabla 1. Parámetros del ensayo de fatiga.	8
Tabla 2. Factores nominales de probabilidad.....	10
Tabla 3. Resultados experimentales de SFAP en aleaciones de Magnesio AZ31B bajo condiciones de carga cíclicas	11
Tabla 4. Resultados experimentales de uniones remachadas de aleaciones de aluminio bajo cargas cíclicas.....	13
Tabla 5. Composición química de la aleación de Magnesio AZ31B.....	17
Tabla 6. Propiedades mecánicas de la aleación de Magnesio AZ31B.....	17
Tabla 7. Dimensiones de las láminas base de Magnesio AZ31B.....	17
Tabla 8. Codificación de los tratamientos.....	20
Tabla 9. Tamaño de grano promedio de la ZA para cada tratamiento.	28
Tabla 10. Carga axial para cada tratamiento.....	31
Tabla 11. Aporte de calor para cada tratamiento	32
Tabla 12. Correlación entre los tamaños de grano y los valores de micro-dureza de las SFAP	334
Tabla 13. Composición química de las partículas no-metálicas, datos en % en peso.	37

RESUMEN

El presente estudio se llevó a cabo con el objetivo de implementar un sistema de soldadura de punto por el método de Fricción-Agitación en aleaciones de Magnesio (Mg) AZ31B, utilizando para esto perfiles extruidos; las soldaduras se realizaron en una fresadora universal se compararon con uniones Remachadas y soldaduras hechas en un dispositivo para esta técnica. El énfasis del estudio es utilizar máquinas herramientas convencionales y hallar los parámetros adecuados para lograr soldaduras sanas; la caracterización mecánica se obtuvo del comportamiento a la fatiga, que permitió relacionar los cambios micro-estructurales ocasionados por el aporte de calor y de la deformación plástica con las propiedades mecánicas como Resistencia a la rotura y micro-dureza.

Los datos obtenidos evidenciaron que las juntas hechas por fricción sobrepasan entre un (140% y 250%) el comportamiento a tensión de las uniones remachadas, presentando tipo de falla de fractura interfacial; y que las SFAP presentan mejor comportamiento ante cargas cíclicas de amplitud constante comparándolas con el método convencional de uniones por remaches. Se encontró una ligera superioridad de las soldaduras realizadas en la máquina estándar frente a las realizadas en la fresadora universal atribuida al control de parámetros en el proceso

Esta investigación se realizó en tres etapas las cuales fueron: elaboración de probetas por medio del tipo de soldadura a estudiar, realización de ensayos para la caracterización estática y dinámica, de acuerdo al diseño experimental se incluyeron: Micro-dureza, análisis de micro y macrografías, tensión y fatiga; finalmente la evaluación y análisis de los resultados; es importante anotar que durante el desarrollo de la investigación fue necesario mantener una continua revisión bibliográfica, que permitió orientar y facilitar el aprendizaje de este proceso.

1. INTRODUCCION

Actualmente la industria metalmecánica está exigiendo la aplicación de materiales de alta resistencia mecánica y bajo peso, con el objetivo de lograr mayor eficiencia mecánica y mejor comportamiento en las diferentes necesidades que así lo requieran; Las aleaciones de magnesio AZ31B son las más ligeras de las aleaciones utilizadas como metales estructurales; esta fue honrada en el siglo 21 como el material estructural *verde* por su capacidad de reciclaje, con reconocidas ventajas entre las que se destacan: excelentes propiedades mecánicas, electromagnéticas, buena maquinabilidad, buena característica de blindaje y alta estabilidad dimensional. Nakanishi y Mabuchi (2001) et al [75] analizaron el gran potencial de aplicación para las aleaciones de magnesio en la industria aeroespacial, automotriz y electrónica. El incremento de su uso generó la necesidad de unir los componentes producidos de esta aleación por medio de procesos de manufactura.

Las técnicas de soldadura por fusión convencionales para realizar juntas en aleaciones de magnesio tienden a presentar inconvenientes de soldabilidad, debido a la necesidad de remoción de la capas de óxido de la superficie y a la susceptibilidad de generar defectos como poros y fisuras de solidificación durante el enfriamiento desde la fase líquida, y como consecuencia de esto se obtienen procesos de alto costo y baja calidad en las uniones soldadas [[2].

Ante esta situación surge como alternativa la soldadura por fricción agitación de punto (SFAP), que es una variación de la técnica de soldadura por fricción agitación (SFA), desarrollada en 1991 por el Instituto Tecnológico de Soldadura (ITS), de Cambridge, Inglaterra; este proceso de soldadura ofrece muchas ventajas frente a las técnicas convencionales, como la obtención de juntas soldadas sanas con buenas propiedades mecánicas, con menores esfuerzos residuales y distorsiones de la estructura. [2][3]. Razones como las mencionadas anteriormente y un bajo costo de producción han favorecido la incursión de los procesos de SFA en la industria automotriz, para la unión de partes fabricadas en aleaciones de aluminio(Al) estructural y magnesio (Mg); por ejemplo, en compañías como Ford company, Mazda Motor Corporation y Kawasaki Heavy Industries [4][5].

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Proceso de SFAP

La soldadura por fricción-agitación de punto (SFAP), es una variación del proceso de Soldadura por Fricción-Agitación (SFA), desarrollado por el Instituto Tecnológico de Soldadura (TWI), de Inglaterra en el año 1991, y ha sido ampliamente investigado para aplicaciones en las industrias automotrices, aeronáutica y estructural principalmente [1]. Este proceso difiere de la SFA por el tipo de junta; en la SFAP la unión entre las dos láminas se realiza mediante puntos únicamente, mientras que en la SFA la unión corresponde a un cordón de soldadura que es direccionado por la herramienta implementada en la soldadura.

El proceso de soldadura por fricción-agitación de punto (SFAP) en láminas metálicas puede describirse de la siguiente forma: una herramienta giratoria, penetra la lámina superior, y continua descendiendo hasta penetrar la lámina inferior; esta fuerza descendente aplicada y la velocidad de rotación se mantienen por un tiempo adecuado, hasta que el material adyacente a la herramienta, calentado por la fricción y ablandado es deformado plásticamente, y en estado sólido se adhieren las láminas superior e inferior, finalmente se retira la herramienta dejando las láminas soldadas [4, [6-[7]. En la figura 1 se muestra un esquema de este proceso de soldadura, donde se puede apreciar El descenso de la herramienta, La unión de las láminas y La salida de la herramienta de las piezas soldadas. [76]

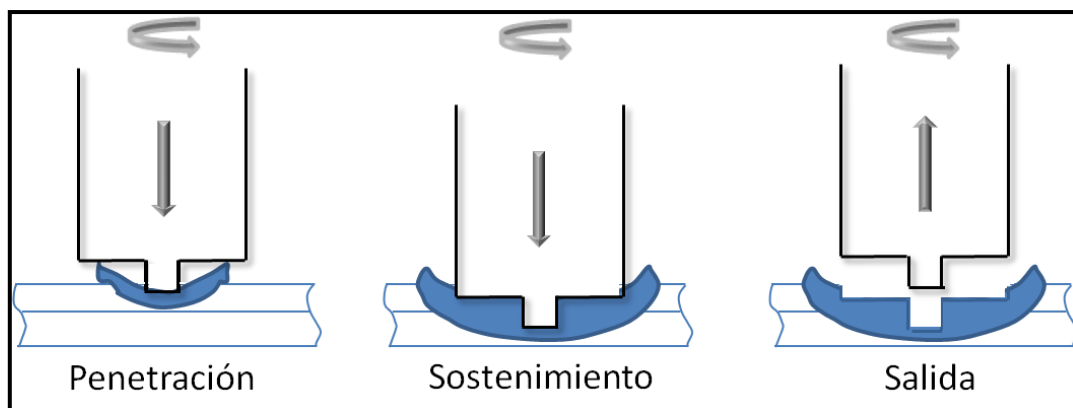


Figura 1. Esquema de proceso de soldadura FSSW

2.2 Influencia de los parámetros del proceso

Los parámetros principales que intervienen en el proceso de la SFAP son: la fuerza axial aplicada en el proceso, el tiempo de sostenimiento, la profundidad de penetración, la geometría y velocidad de giro de la herramienta. Estos parámetros afectan el comportamiento mecánico de los puntos de soldadura, haciéndose indispensable determinar correctamente la combinación de estos en cada uno de los tratamientos, para obtener soldaduras sanas con buenas propiedades mecánicas y alta calidad.

La variación de la fuerza axial en el proceso de soldadura está relacionada con la velocidad de rotación de la herramienta, en la medida en que esta se incrementa disminuye la magnitud de la fuerza axial [8]. Diferentes autores como O. Fregaad et al [9] confirman que la velocidad de rotación de la herramienta presenta una influencia directa en el aporte de calor durante el proceso de soldadura, favoreciendo en la medida en que se incrementa la velocidad rotacional.

Yuan-Ching Lin et al [13] probaron una aleación de magnesio AZ61 comprobando que la velocidad de rotación de la herramienta afecta la carga a tensión, la cual incrementa conforme se incrementa la velocidad de rotación, mientras que tiempos de sostenimiento entre 4s y 8s pueden maximizar la resistencia de la soldadura [15].

La profundidad de penetración de la herramienta tiene una relación proporcional con la carga a tensión de la soldadura, que es independiente del tiempo de sostenimiento, este benéfico efecto confirmado por varios investigadores J.C. McClure et al [17-**23**] también ha sido limitado por algunos autores cuando la profundidad de penetración es mayor al 75% del espesor de las dos láminas M. Fujimoto et al [17]**[18]**. La geometría de la herramienta tiene dos funciones principales en la SFAP, focalizar el calor y permitir el flujo del material, para esto es indispensable mantener dimensiones y geometría adecuadas. Padmanaban, V. Balasubramanian [19] propone pin cilíndrico con rosca UNC y una relación de diámetros Hombro-Pin de 3:1 para aleaciones de Magnesio AZ31B.

2.3 Micro-estructura

La geometría y apariencia típica de un punto de soldadura por fricción-agitación en una aleación de Magnesio AZ31B se muestra en la **Figura 2-a)**, en la que se aprecia el anillo que forma el material removido alrededor del punto de soldadura y el agujero de salida del pin, en la **Figura 2-b)** se muestra la sección transversal de una SFAP en la cual es posible observar la profundidad de penetración de la herramienta así como la huella dejada por el pin en las dos láminas, adicionalmente se destaca el área de adherencia, como se muestra en el recuadro, se presenta una línea con origen en la línea de mezcla de las dos láminas, la cual se podría designar como la iniciación de una grieta.

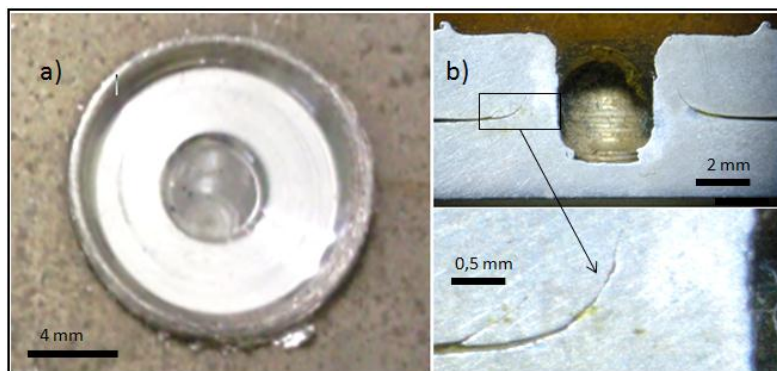


Figura 2. Punto de soldadura por la técnica de fricción-agitación a) Vista superior, b) Vista de la sección transversal

El proceso de SFAP produce agitación y re-cristalización dinámica del material [7], que se refleja en una micro-estructura fina y equiaxial, producto del refinamiento del grano, en la Zona Agitada de la SFAP respecto al metal base. Las zonas características de la SFAP son el metal base, MB, la zona afectada por el calor, ZAC, la zona termo-mecánicamente afectada, ZATM y la zona agitada, ZA. La Figura muestra las zonas de la soldadura respectivamente.

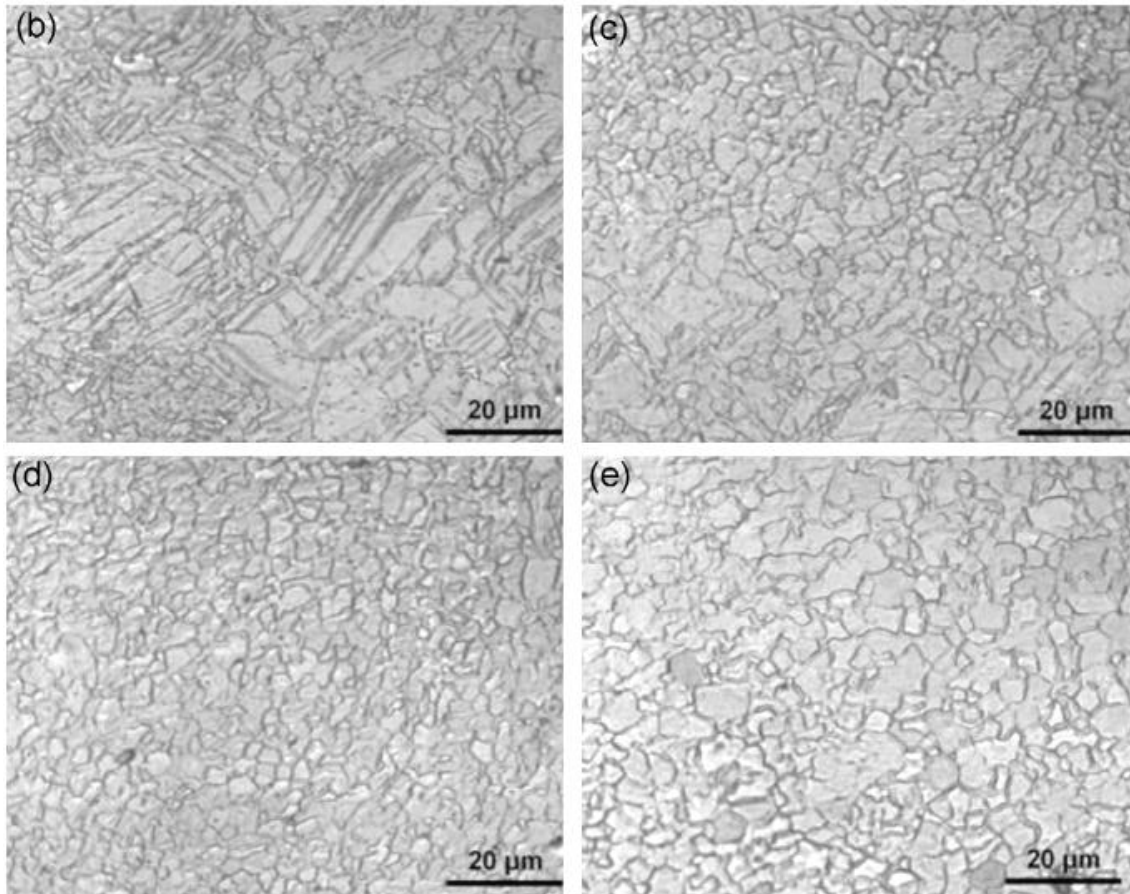


Figura 3. Micrografías de las regiones de la soldadura b) MB, c) ZAC, d) ZA, e) ZATM [7].

2.4 Micro-dureza en SFAP

El comportamiento de micro-dureza en las SFAP inicialmente decrece cerca de la frontera entre el metal base y la zona afectada térmicamente, luego cae drásticamente a un valor mínimo en la zona afectada termo-mecánicamente y posteriormente pasando esta zona, incrementa gradualmente en la zona agitada. El metal base y la ZA representan las zonas más duras de la probeta, lo que es atribuido al refinamiento del tamaño de grano producto del proceso de soldadura [7, 9, 13, 24].

2.5 Tensión en SFAP

Diferentes autores [6, 11-13, 24, 34] manifiestan que en aleaciones de aluminio la carga a tensión incrementa en la medida en la que se disminuye la velocidad de rotación en la SFAP [77] Yuan-Ching Lin et al. dicen que en las aleaciones

de magnesio el aumento en la velocidad incrementa la carga a tensión y que bajo condición de carga estática la falla inicia cerca de la zona agitada, en la parte central del botón de soldadura, y se propaga de forma circunferencial alrededor de esté, hasta la fractura final, presentado falla por arrancamiento [7,[15] o falla por fractura interfacial en la soldadura [15].

La Figura 4-a) muestra una falla por fractura interfacial y en la Figura 4-b) se muestra una falla por arrancamiento. Las gráficas muestran de izquierda a derecha una vista superior e inferior de la lámina superior y una vista superior de la lámina inferior de las SFAP [15]. El principal mecanismo de iniciación de falla por arrancamiento en los puntos de soldadura por fricción, es la combinación de una reducción inicial de espesores durante el proceso de deformación, bajo condiciones de esfuerzo estático, y posteriormente una falla casi cortante [32-[33].

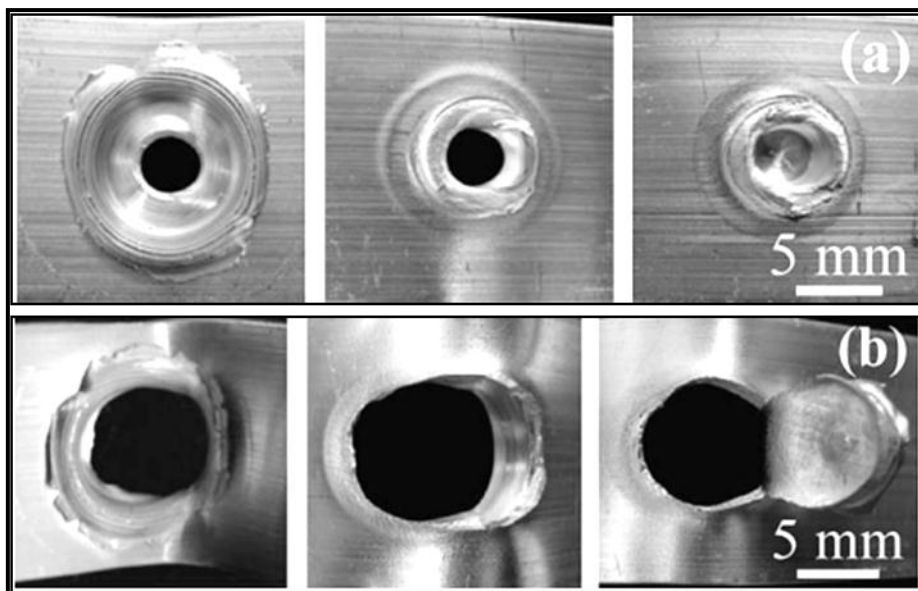


Figura 4. Falla en ensayo de tensión de las SFAP, de izquierda a derecha una vista superior e inferior de la lámina superior y una vista superior de la lámina inferior. a) Fractura interfacial, b) arrancamiento de grano [15].

2.6 Fatiga

El fenómeno de fatiga de materiales se presenta cuando existen cargas dinámicas cíclicas o fluctuantes, de valores inferiores a la resistencia a la tensión o al esfuerzo de fluencia, que producen la fractura del material. Los casos reportados de falla por fatiga resultan catastróficos, pues en la mayoría de estos se presenta el colapso del elemento sin previo aviso. La fractura del material bajo valores de esfuerzos inferiores a los de diseño en condición estática es atribuida a que en este fenómeno, no solo afecta el valor de la carga sino la combinación de la carga aplicada, el tipo de carga, el número de repeticiones, las condiciones micro-estructurales del material, la homogeneidad del material, la geometría del elemento y las condiciones del ambiente de trabajo, entre otras [35].

La falla a fatiga inicia con la nucleación de una grieta imperceptible a simple vista, que ocurre generalmente en una discontinuidad del material; una vez

formada la grieta se incrementa el efecto de concentración de esfuerzos, al disminuir el área resistente se aumenta la magnitud del esfuerzo que contribuye a la propagación de la grieta hasta que ocurre la falla repentina, como consecuencia, en las fallas por fatiga se pueden apreciar dos zonas, la zona de propagación de la grieta y la zona de fractura.

El fenómeno de fatiga es afectado principalmente por tipos de esfuerzos alternantes, repetidos y aleatorios. Los esfuerzos alternantes tienen lugar cuando el elemento es sometido a esfuerzos ténsiles (positivos) y esfuerzos compresivos (negativos), en los esfuerzos repetidos el elemento se somete a esfuerzos ténsiles únicamente, es decir que la variación de esfuerzos se realiza dentro de valores positivos únicamente, y los esfuerzos aleatorios corresponden a la variación de esfuerzos ténsiles y de compresión sin ningún comportamiento predecible. En este sentido el caso más crítico se presenta para los esfuerzos repetidos, ya que son justamente los esfuerzos presentados en la zona de tensión los que generan la propagación de las grietas y promueven la falla por fatiga en los materiales, por tanto dentro de las aplicaciones prácticas, este caso es el más significativo.

El comportamiento a la fatiga del material, se determina de manera experimental, aplicando cargas cíclicas de tensión, torsión, flexión y/o combinadas a las muestras del material, de acuerdo a lo estipulado por la norma ASTM E466 [36].

El esfuerzo máximo, esfuerzo mínimo, esfuerzo medio, esfuerzo alternante o amplitud, el factor de esfuerzos R y el rango de esfuerzos son algunos de los parámetros que se deben tener en cuenta en un ensayo de fatiga; La Figura muestra gráficamente estos parámetros y en la Tabla 1 se presentan las ecuaciones empleadas para determinarlos.

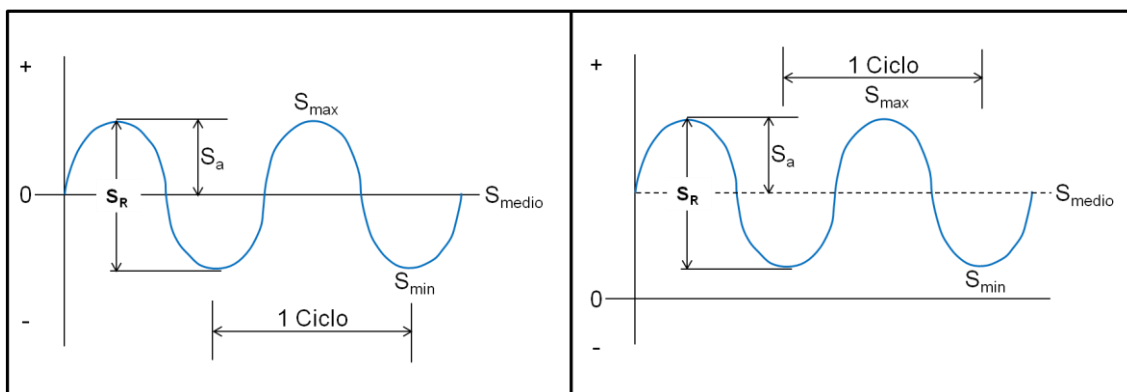


Figura 5. Esfuerzos involucrados en el fenómeno de fatiga, a) esfuerzos alternantes, b) esfuerzos repetidos.

Tabla 1. Parámetros del ensayo de fatiga.

Parámetro de fatiga	Ecuación	Unidades
Tipo de onda	Sinusoidal, triangular, cuadrada	----
Porcentaje de carga evaluado (PE)	Los valores más utilizados son: 0,3 – 0,5 – 0,7	----
Frecuencia	$F = \frac{\text{ciclos}}{s}$	Hz
Esfuerzo máximo ($S_{\max}$)	$S_{\max} = S_{ut} \times PE$	MPa
Esfuerzo mínimo ($S_{\min}$)	$S_{\min} = S_{\max} \times R$	MPa
Factor de esfuerzos (R)	$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}}$	----
Esfuerzo medio (S_{med})	$S_{\text{med}} = \frac{S_{\min} + S_{\max}}{2}$	MPa
Amplitud (A)	$A = S_{\max} - S_{\text{med}}$	MPa
Rango de esfuerzos (S_R)	$S_R = S_{\max} - S_{\min}$	MPa

El comportamiento a fatiga de los materiales se presenta en diagramas que muestran el esfuerzo aplicado en función del número de ciclos en escala log-log, y son conocidos como las curvas S-N o diagramas de Wölher.

Las curvas S-N para los aceros, muestran el límite a la fatiga, el cual corresponde al valor de esfuerzos, a partir del cual, la probeta no presentará falla por fatiga sino que pasará a vida infinita; este valor, conocido también como resistencia a fatiga, se identifica en la curva S-N, como el valor de esfuerzos en el que ocurre un cambio de pendiente con valor igual a cero, es decir a partir de este punto la curva se observa como un tramo horizontal. La Figura muestra la curva S-N para un acero UNS G41300 normalizado [37].

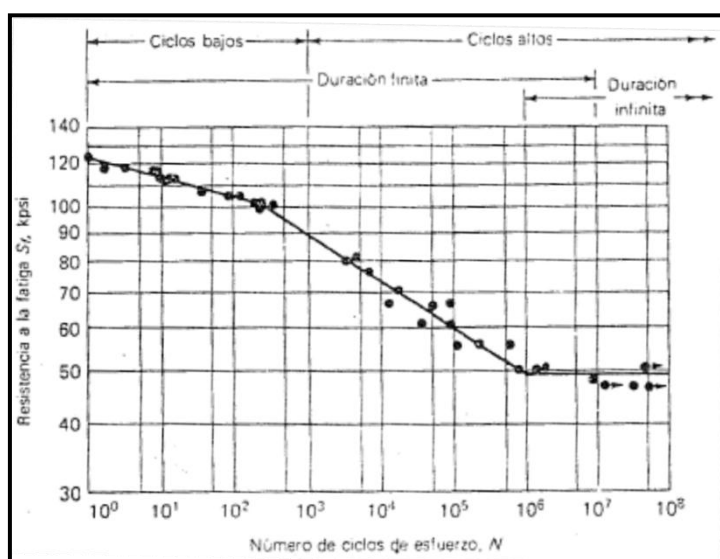


Figura 6. Curva S-N para un acero UNS G41300 normalizado

En la Figura se aprecian dos clasificaciones en el comportamiento a fatiga, de acuerdo al número de ciclos, considerando bajo ciclaje entre 0 y 10^3 ciclos, y alto ciclaje a partir de 10^3 ciclos; y de acuerdo a la duración del ensayo, considerando vida infinita a partir de 10^6 ciclos. En esta curva de fatiga se aprecia que el límite de resistencia a la fatiga está dado para un valor de esfuerzo de 50 Kpsi.

Para los metales no ferrosos como las aleaciones de aluminio y magnesio, la curva de fatiga no presenta un límite a fatiga definido, es decir que la curva tiende a ser horizontal sin llegar a serlo; por tanto el límite de fatiga en estos casos se estima de acuerdo al número de ciclos; algunos autores establecen que se presenta cuando dos o más probetas superen 10^6 ciclos sin fallar [35], y otros establecen que el límite a fatiga se presenta cuando se superan 2×10^6 ciclos [38] o 5×10^6 ciclos [39].

Para determinar las curvas S-N a partir de ensayos experimentales es conveniente aplicar la relación de Basquin descrita en la Ecuación 1, donde C es una constante de proporcionalidad y m es el exponente a fatiga [39].

$$N_f = C(S_R)^m \quad (1)$$

Para realizar la curva log-log de acuerdo a la ecuación de Basquin es necesario realizar un análisis estadístico que permita estimar los coeficientes de la ecuación de Basquin, se realiza la aproximación dada en la Ecuación 2 [40].

$$\log(N) = \log(C) - m \log(S_R) \quad (2)$$

Dónde:

$$Y = \log(N); \quad X = \log(S_R); \quad A = \log C; \quad B = m$$

La Ecuación 3 muestra la forma de calcular las componentes de la ecuación 8, donde los coeficientes A y B se determinan a partir de una regresión, mediante el uso de mínimos cuadrados, según lo propuesto por Mordago *et al* [41] en las Ecuaciones 4, 5 y 6. Los coeficientes A y B corresponden al punto de intercepción con el eje y B a la pendiente.

$$Y = A + BX \quad (3)$$

$$\ddot{A} = \bar{Y} - B\bar{X} \quad (4)$$

$$\ddot{B} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (5)$$

Donde el símbolo ($\ddot{}$) es el estimador, la barra en la parte superior ($\bar{}$) significa promedio, n es el número total de datos experimentales, y los promedios $\bar{X}$ y $\bar{Y}$ se determinan con las Ecuaciones 6 y 7.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log S_{Ri} \quad (6)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log N_i \quad (7)$$

Los valores de C y m se calculan por medio de las Ecuaciones 8 y 9.

$$m = B \quad (8)$$

$$C = 10^A \quad (9)$$

Debido a que las curvas S-N se obtienen a partir de ensayos de laboratorios en los que se controlan la mayoría de los factores que afectan el comportamiento a fatiga, es necesario determinar un rango de confiabilidad que se encuentre por debajo de la curva media calculada a partir de los datos experimentales, esta curva se denomina curva de diseño y el criterio para establecerla depende principalmente de las condiciones de trabajo reales de la pieza objeto de estudio, y de la normatividad de la industria.

Para determinar la curva de diseño la Ecuación 2 se afecta por los factores k y α , que son determinados según la norma a usar, como se muestra en la Ecuación 10. El British Standard Code 7608 [42], establece la determinación de la curva de fatiga implementando la Ecuación 10, donde α es el factor equivalente a la probabilidad de falla (P) con correspondencia al factor d , s es el valor de la desviación estándar de los valores de $\log(N)$. En la Tabla 2 se presentan los valores de confiabilidad (R) determinada por la reducción de la unidad en la probabilidad de falla, $R=1-P$.

$$\log(N) = \log(C) - k \times \alpha - m \log(S_R) \quad (10)$$

Tabla 2. Factores nominales de probabilidad

d	P (%)	R(%)	Observaciones
0	50	50	Curva experimental
0,5	31	69	
1	16	84	
2	2,5	97,5	Curva de diseño estándar
3	0,14	99,86	

En las Ecuaciones 11 a 13 se muestra el proceso de obtención de la ecuación que describe el comportamiento de la curva de diseño, según la metodología planteada por el British Standard Code 7608 [42].

$$\log(N) = \log(C) - d \times s - m \log(S_R) \quad (11)$$

$$\log(C_d) = \log(C) - d \times s \quad (12)$$

$$N = C_d S_R^m \quad (13)$$

2.6.1 Fatiga en SFAP en aleaciones de Magnesio AZ31B

En la Tabla 3 se sintetizan los resultados experimentales, de los diferentes tratamientos probados en la aleación de magnesio AZ31B los ensayos se realizaron bajo condición de carga cíclica, la configuración de las SFAP fueron láminas traslapadas de aleaciones de Magnesio. Todos los ensayos se realizaron a una frecuencia de 10 Hz, un factor de esfuerzos de 0,1 y tipo de onda sinusoidal.

Tabla 3. Resultados experimentales de SFAP en aleaciones de Magnesio AZ31B bajo condiciones de carga cíclicas.

Comportamiento a fatiga de las SFAP al 0.5 de la carga máxima		
Tratamiento (t,ω,p)	0,5Carga Máxima	Número de Ciclos
111	1166	170873
	1166	114126
	1166	85338
121	2032	28291
	2032	35000
	2032	32524
211	1496	17836
	1496	45846
	1496	28315
221	2057	35000
	2057	50000
	2057	32750
112	1124	184992
	1124	213628
	1124	256377
212	1300	36541
	1300	34429
	1300	41606
122	1734	54777
	1734	98308
	1734	53004
222	1858	114074
	1858	58447
	1858	221206

En la Tabla 3, se presentan los resultados del comportamiento a fatiga de las SFAP en función de la carga máxima en lugar del esfuerzo máximo, debido a la geometría del punto de soldadura. Por otra parte, los reportes indican que bajo valores de cargas cíclicas altas, correspondientes al 70 % de la carga de tensión, las SFAP presentan bajo ciclaje entre 10^3 y 10^4 ciclos, mientras que para valores de cargas cíclicas bajas, correspondientes a valores entre el 20 y 40 % de la carga de tensión aproximadamente, las SFAP presentan alto ciclaje entre 10^5 y 10^7 ciclos. El comportamiento de vida infinita, se evidencia bajo un valor de carga máxima de 500 N.

La fractura encontrada en las SFAP, bajo condiciones de carga cíclica, difieren de acuerdo al ciclaje de la probeta; identificando dos tipos de falla correspondientes a la vida a fatiga para bajo y alto ciclaje [43-[47].

En la fractura presentada en condiciones de bajo y medio ciclaje entre 10^3 y 10^5 ciclos, y/o valores de carga altas y medias respectivamente, una grieta inicia en la interface de las láminas superior e inferior y se propaga circunferencialmente cerca al contorno de la zona agitada, en la ZATM, atravesándola y terminando en la superficie de la lámina superior en la ZA. Adicionalmente se presenta la propagación de una grieta adicional, la cual también proviene de la interface entre las dos láminas y se propaga en la lámina inferior en dirección longitudinal y a través del ancho de esta, generando un cambio en la fractura de la probeta. [43, [47]. La Figura muestra la fractura a fatiga de SFAP, en la que se observan la lámina superior en la figura c), y la lámina inferior en la figura d), en esta última, la flecha indica la fractura a través del ancho de la lámina inferior, causada por la grieta que se propaga en esta lámina.

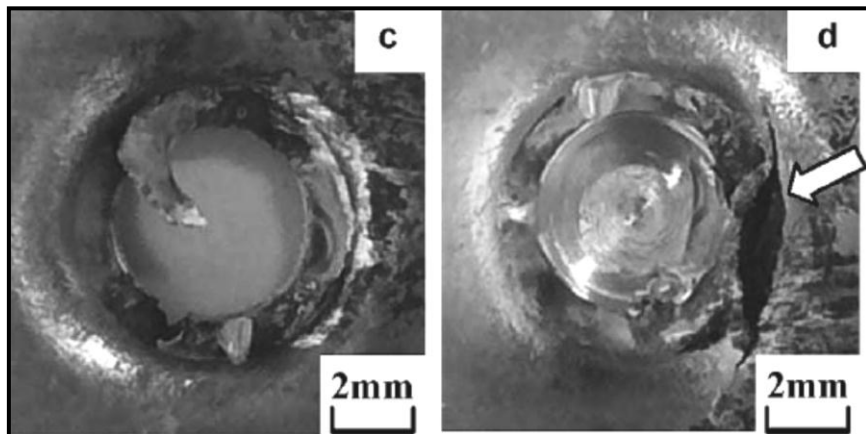


Figura 7. Fractura a fatiga de SFAP a bajo y medio ciclaje, a) lámina superior, b) lámina inferior. [47]

La fractura presentada en condiciones de alto ciclaje, a partir de 10^5 ciclos, es similar a la fractura interfacial encontrada bajo condición de carga estática, en la cual la grieta proveniente de la interface entre las láminas superior e inferior se propaga circunferencialmente, a través de la ZATM, hasta generar la fractura de la probeta, en la que parte del botón de soldadura queda adherido a la lámina inferior [47]. La Figura muestra la fractura de fatiga de SFAP para altos ciclos, en la que se observa la similitud con la fractura de tipo interfacial presentada bajo condiciones de carga estática.

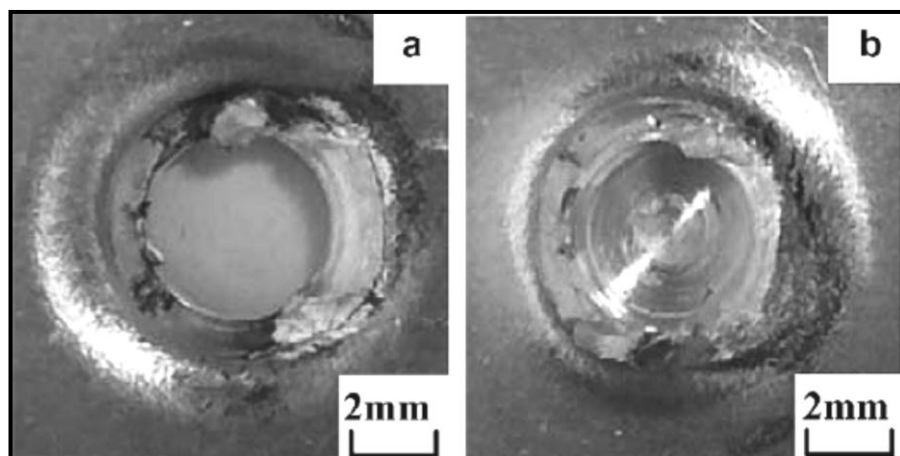


Figura 8. Fractura a fatiga de SFAP a alto ciclaje, a) lámina superior y b) lámina inferior. [47]

2.6.2 Fatiga en uniones remachadas de aleaciones de aluminio

En la Tabla 4 se presentan los resultados experimentales de uniones remachadas de aleaciones de aluminio ensayadas bajo cargas cíclicas con un factor de esfuerzos de 0,1, una frecuencia de 20 Hz y tipo de onda sinusoidal.

Tabla 4. Resultados experimentales de uniones remachadas de aleaciones de aluminio bajo cargas cíclicas.

Aleación de aluminio	Tipo de remache	Valor de carga máxima (N)	Número de ciclos	Observaciones	Autores
6111-T4	Nominal	2000	$2,5 \times 10^4$	----	M. Fu, P. Mallick. [48]
		1000	10^6	Con carga viva	
5182	Nominal	2700	10^3	----	X. Sun, E. Stephens, M. Khaleel. [49]
		1800	10^6	Sin carga viva	
----	Nominal	1384	$6,6 \times 10^3$	----	B. Li, A. Fatemi. [50]
		593	$1,7 \times 10^5$	Sin carga viva	
----	Pop	1878	$3,9 \times 10^3$	----	B. Li, A. Fatemi. [50]
		494	9×10^4	Sin carga viva	

La Tabla 4 muestra que para valores de carga altas, correspondientes al 70 % de la carga máxima a tensión la vida a fatiga de las uniones remachadas se encuentra entre 10^3 y 10^4 ciclos, mientras que para valores de carga bajo, correspondientes a valores entre el 50 y 40 % de la carga máxima a tensión, la vida a fatiga se encuentra entre 10^5 y 10^6 ciclos, con excepción del remache tipo pop que tiene una vida de 90000 ciclos aproximadamente. Es de notar que la única serie que reporta carga viva es la 6111-T4, la cual se presenta para un valor de carga máxima de 1000 N.

X. Sun *et al.* [49] estudiaron el comportamiento a fatiga de uniones realizadas en la AA5182, mediante remaches y puntos de soldadura por resistencia eléctrica, encontrando que el comportamiento bajo cargas cíclicas de las uniones remachadas es 100 % superior que para las uniones realizadas mediante puntos por resistencia eléctrica.

Por otra parte, B. Li y A. Fatemi [50] compararon el comportamiento a fatiga de juntas realizadas en aleaciones de aluminio mediante dos tipos de remaches, nominal y pop, encontrando que a pesar de que el comportamiento a tensión de los remaches tipo pop es superior frente a los de tipo nominal; en el comportamiento a fatiga, para cargas altas o corta vida, no hay diferencias altamente significativas entre las uniones realizadas mediante los dos tipos de remaches, mientras que para cargas bajas o larga vida, los esfuerzos soportados por los remaches nominales fueron en general mayores que los soportados por los de tipo pop.

Los modos de falla a fatiga, reportados para este tipo de uniones, son en general arrancamiento del remache [49-[50], como se muestra en la Figura -a), y fractura en la lámina superior, a causa de la propagación de una grieta de fatiga a través del ancho de la lámina, en dirección perpendicular a la aplicación de la carga [49-[50], como se muestra en la Figura -b). Estas fracturas son similares a los reportados por las SFAP.

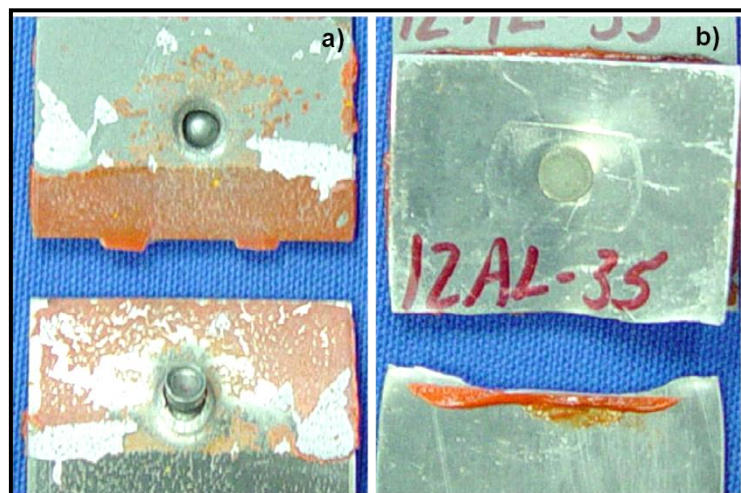


Figura 9. Fractura a fatiga en uniones remachadas, a) arrancamiento del remache, b) fractura en la lámina de la junta [49].

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general.

Estudiar las propiedades mecánicas generadas por la soldadura de punto por el método fricción-agitación en perfiles de aleaciones Magnesio AZ31B, realizadas en fresadora universal y comparar con soldaduras convencionales y hechas en máquina estándar.

3.2 Objetivos específicos

- Implementar el proceso, construcción dispositivo de sujeción, herramienta rotatoria para realización de las soldaduras.
- Determinar el comportamiento mecánico bajo carga estática de FSSW y analizar el comportamiento de la fractura.
- Determinar el comportamiento mecánico bajo carga dinámica de las juntas logradas por FSSW y analizar el comportamiento de la fractura.
- Determinar las propiedades estáticas y dinámicas de las distintas probetas y comparar su desempeño con los métodos convencionales (Remaches).
- Con el proceso implementado, hallar el valor de los parámetros para garantizar soldaduras sanas.

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

La metodología implementada para desarrollar el proyecto se fundamentó en cinco etapas, una revisión bibliográfica permanente, la adaptación del equipo, la preparación de las probetas, la caracterización de las soldaduras y el análisis de los resultados, tal como se muestra en la Figura 2,

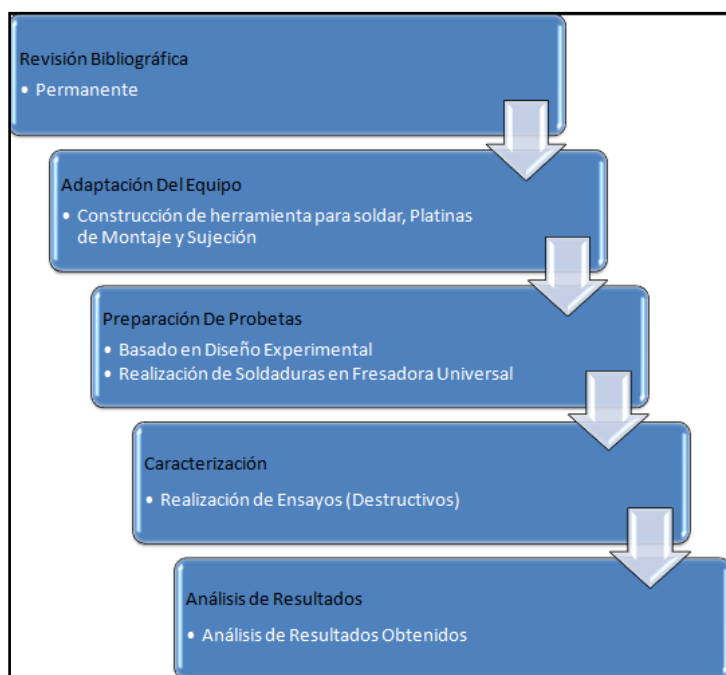


Figura 20. Diagrama de la metodología implementada para desarrollar el proyecto.

4.1 Material base. El magnesio es uno de los metales no ferrosos más utilizados en la industria actualmente, el gran auge en las aplicaciones es atribuida principalmente a propiedades como bajo peso específico, alta resistencia a la corrosión y alta conductividad térmica, propiedades que lo catalogan como altamente atractivo [59].

Para este se dispone de una aleación de magnesio AZ31B, cuya composición se expone en la Tabla 8; esta composición química se obtuvo en un espectrómetro de fluorescencia de rayos X de Panalytical, modelo MagiX, ubicado en los laboratorios del CAT, en la Universidad Rey Juan Carlos. El material hacía parte de perfiles planos extruidos, importados al país por la empresa Formaletas S.A de la ciudad de Cali-Colombia, y fueron donadas para esta investigación.

Las aleaciones de Magnesio se caracterizan por tener alta resistencia mecánica, convirtiéndose en uno de los principales materiales implementados en carrocerías, componentes aeronáuticos y estructurales. La aleación de Magnesio seleccionada para la realización de las soldaduras por fricción-agitación de punto de este proyecto es la AZ31B[52]

Tabla 5. Composición química de la aleación de Magnesio AZ31B % de peso

Al	Mg	Fe	Mn	Si	Zn	Autor
2.5-3.5	Balance	0.005	0.2-1	0.10	0.6-1.4	Friedrich et al.
2.8	Balance	0.007	0.52	0.09	1.0	J.A. Ávila

Para nuestro estudio utilizamos material donado por la empresa Formaletas S.A y referenciado por J.A Ávila

Tabla 6. Propiedades mecánicas de la aleación de Magnesio AZ31B

Esfuerzo ultimo (MPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Elongación a ruptura (%)	Módulo de elasticidad (MPa)	Dureza (HRB)
240	120	11	69	49

EL material base para la realización de las probetas fueron tomadas de perfiles extruidos comercialmente de 3,1 mm de espesor, las dimensiones de las láminas obtenidas a partir de estos perfiles se especifican en la Tabla 7.

Tabla 7. Dimensiones de las láminas base de AZ31B

Ancho (mm)	Longitud (mm)	Espesor
75	125	3,1

4.2 Herramienta de soldadura. Para la realización de la soldadura por fricción –agitación de punto en las láminas de magnesio AZ31B, se empleó una herramienta en Acero AISI H13 con tratamiento térmico de temple y revenido para una dureza de $50 < \text{HRC} < 60$. La herramienta cilíndrica, tiene hombro plano de 12 mm de diámetro y pin de rosca ordinaria de 4 mm de diámetro 4,1 y 4,8 mm de longitud respectivamente para conseguir penetraciones del 50 y 75% de la lámina inferior; la herramienta de soldadura se muestra en la Figura 3. Las dimensiones son acordes a las recomendadas por investigaciones previas de soldadura por fricción agitación para el Magnesio AZ31B [19].

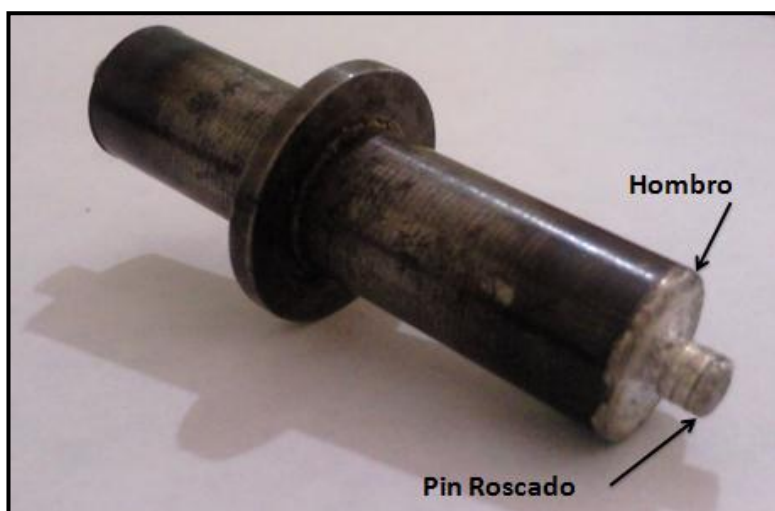


Figura 31. Herramienta fabricada para la realización de las soldaduras

4.3 Equipos para la realización de las soldaduras. El proceso de soldadura se realizó en una fresadora universal Cervinia adaptada para esta técnica, se utilizó una placa base y una placa de sujeción en acero estructural A36, con dimensiones ajustadas a la estructura de la fresadora y a las dimensiones de las probetas, de tal forma que se garantizara la correcta disposición y sujeción de las láminas a soldar a la bancada de la máquina, como se muestra en la Figura 12.

Las soldaduras por fricción-agitación se realizaron en una fresadora universal Cervinia de 4 HP con velocidades de rotación hasta de 1800 rpm y velocidad de avance vertical de 68 mm/min, con carrera de 600 mm y avances automáticos en los ejes X, Y, Z.

Con el objetivo de validar las soldaduras realizadas en la fresadora convencional, se comparan los resultados obtenidos con los del artículo utilizó la máquina estándar para SFA, RM-1 Transformation Technologies Inc. para realizar una serie de soldaduras, que permitiera comparar las propiedades mecánicas de los tratamientos realizados en los dos equipos.

4.4 Procedimiento de soldadura. Para realizar las soldadura en la fresadora convencional se realizó el montaje que se describe a continuación: Inicialmente se ubicó la platina base sobre la bancada de la fresadora, posteriormente se dispuso sobre está dos láminas base de AZ31B con un área de traslape de 25 mm², nivelando la posición con láminas base adicionales, y se ajustaron a la bancada implementando la platina de sujeción, como lo muestra la Figura 4.

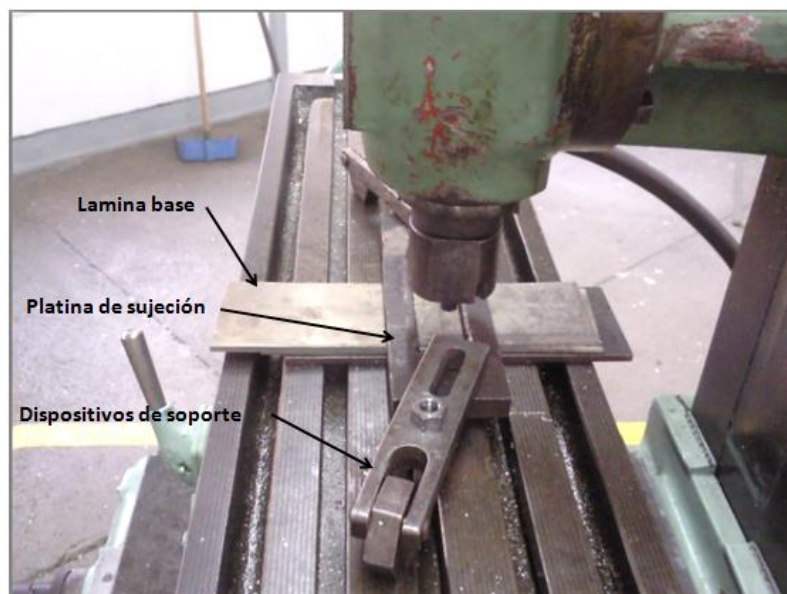


Figura 42. Ubicación de las láminas a soldar en la bancada de la fresadora convencional.

Una vez ubicada la herramienta se procedió a definir la posición cero se realizaron los puntos de soldadura con el desplazamiento vertical en modo automático y controlando el tiempo de sostenimiento manualmente mediante un cronometro.

El procedimiento de soldadura en la máquina estándar consistió en la ubicación y sujeción de las láminas base en la bancada del equipo y en el montaje de la herramienta, como lo muestra la Figura 3. El control de los parámetros de soldadura, en este caso, se realizan automáticamente por el software de la máquina.

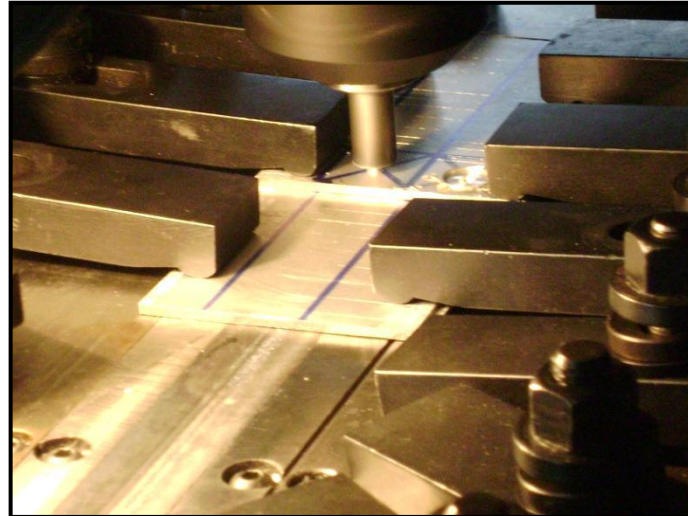


Figura 13. Procedimiento de soldadura por fricción-agitación de punto en la máquina especializada [78]

Finalmente, después de realizar los procesos de soldadura tanto en la fresadora convencional como en la máquina estándar, se obtienen las láminas soldadas, como lo muestra la Figura 4-a), mediante un proceso de corte en sierra sin-fin y un posterior refrentado en la fresadora, se mejora el acabado para garantizar la homogeneidad y evitar concentradores de esfuerzo de esta manera se obtienen las probetas objeto de estudio, la Figura 4-b) muestra las dimensiones de las probetas utilizadas en los ensayos tanto de fatiga como resistencia a la tensión.

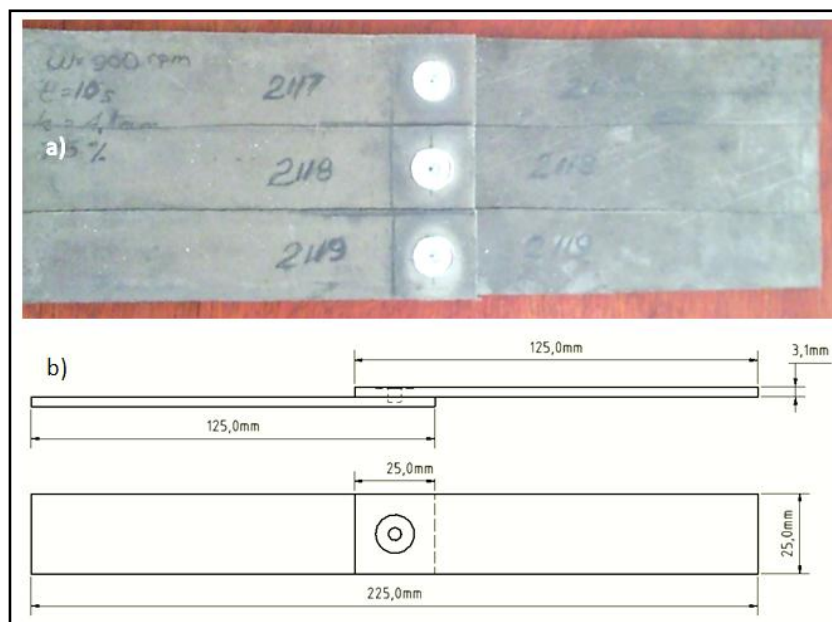


Figura 14. Soldadura por fricción agitación de punto, a) láminas base soldadas, b) esquema de las probetas objeto de estudio.

4.5 Diseño experimental. Con el objetivo de determinar la influencia de la velocidad de giro de la herramienta, el tiempo de sostenimiento y la altura del pin en las propiedades mecánicas de la soldadura, tales como micro-dureza, tensión, fatiga y los cambios micro estructurales de estas, se planteó el diseño experimental que se muestra en la

4.6 Figura 15.

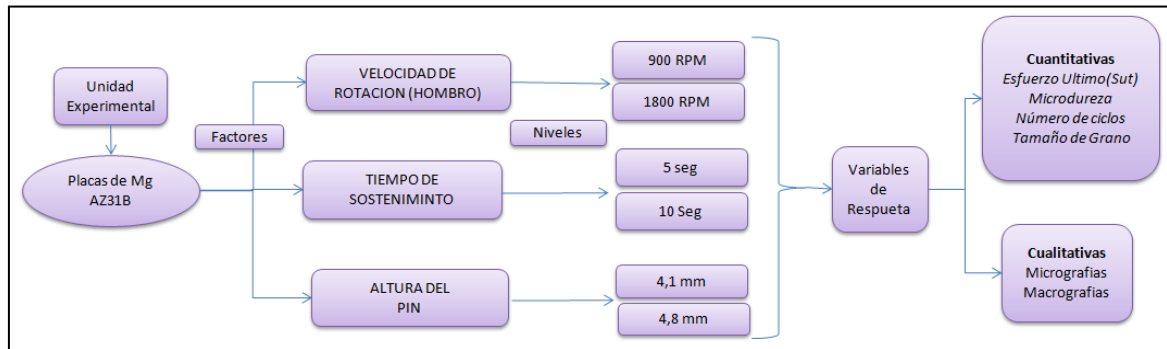


Figura 15. Diagrama de proceso del diseño experimental

- La unidad experimental consiste en láminas de Magnesio AZ31B traslapadas, unidas mediante FSSW, completamente homogéneas, donde se garantiza que las dimensiones y composición química de las placas son iguales en cualquier dirección.
- Como se muestra en la figura 15, el diseño de experimentos consta de tres factores, tiempo de sostenimiento, velocidad de giro de la herramienta y profundidad o altura del pin, de los cuales cada uno consta de dos niveles, para un total de 8 tratamientos diferentes para cada ensayo. La Tabla 8 muestra la codificación dada a cada tratamiento, en la, en la cual las tres primeras columnas corresponden al tiempo de sostenimiento, velocidad de giro, profundidad y la cuarta columna corresponde al número de la probeta escogida al azar.

Tabla 8. Codificación de los tratamientos

Tiempo de exposición	Velocidad de rotación	Altura del pin	Número de probeta
$T_1: 5_{\text{seg}}$ $T_2: 10_{\text{seg}}$	$\omega_1: 900\text{rpm}$ $\omega_2: 1800\text{rpm}$	$P_1: 4,1\text{mm}, 50\%$ $P_2: 4,8\text{mm}, 75\%$	#
1	1	1	Especimen escogido aleatoriamente para los ensayos de tensión y fatiga
2	1	1	
1	2	1	
2	2	1	
1	1	2	
2	1	2	
1	2	2	
2	2	2	

Descripción, entonces la probeta 2123 tendrá los siguientes parámetros de fabricación.

Tiempo de exposición (t): 10 segundos (dwell time)
Velocidad de rotación (ω): 900 rpm
Altura del pin (p): 4,8 mm para una penetración del 75%
Numero de probeta (#): 3

La única variable que se mantuvo invariante en el proceso fue la velocidad de penetración de la herramienta de 6,25 mm/min.

Es importante aclarar que se hará la comparación de soldaduras realizadas en la máquina especializada sacada de un artículo de procedencia científica reconocida [77], material de estudio con características similares AZ61, tiempo de sostenimiento, profundidad y velocidad; se trabajó con un solo tratamiento, ya que el objetivo era únicamente validar el procedimiento de soldadura realizado en la fresadora convencional, el tratamiento estudiado fue el (112), correspondiente a un tiempo de sostenimiento de 5s ,900rpm y 4,8mm de profundidad para una penetración.

- Variables de respuesta cuantitativas: Son las obtenidas a partir de los ensayos para la caracterización de las soldaduras, en este caso son microdureza (Hv), carga máxima (N) y resistencia a la fatiga (S_r)
- Variables de respuesta cualitativas: Estas variables aportan de manera descriptiva a las respuestas obtenidas en las variables cuantitativas, en este caso corresponden a los análisis de macro y micrografías y al fractográfico.

5 CARACTERIZACIÓN

Para determinar la calidad y propiedades mecánicas de los puntos de soldadura por fricción-agitación, se realizó un análisis macro-gráfico de las probetas, donde se pudo observar la geometría de los puntos de soldadura, la sanidad de las uniones soldadas y la factibilidad realizar la investigación; contiguamente se realizó un análisis microestructural a partir de las metalografías con las cuales se estudió las propiedades mecánicas de los puntos de soldadura mediante los ensayos de micro-dureza, tensión y fatiga.

5.1 Análisis metalográfico.

Objetivo: Visualizar y estudiar la micro-estructura de las diferentes zonas de la SFAP afectadas por el proceso de soldadura.

Características del equipo y procedimiento: Se escogió al azar una probeta de cada uno de los tratamientos realizados en la fresadora, se cortó una muestra muy bien refrigerada de la sección transversal del punto de soldadura, y perpendicular a la dirección de extrucción del material, se montó en baquelita en una montadora Buehler Simpliment 2000 como se muestra en la Figura 1, se realizó un desbaste con papel lija desde un grano 80 hasta la 2200 y posteriormente, se realizó el proceso de pulido en una pulidora de paños Buehler Beta a una velocidad de 250 rpm con alúmina de 1 μm luego con 0,03 μm y silica coloidal para dar el acabado tipo espejo. Para debelar la micro-estructura las probetas fueron atacadas con un reactivo compuesto que contiene 5 ml de ácido acético, 5 g de ácido pícrico, 10 ml de agua destilada y 100 ml de solución de metanol al 95% durante 35s de acuerdo con la norma E407-07 [52].

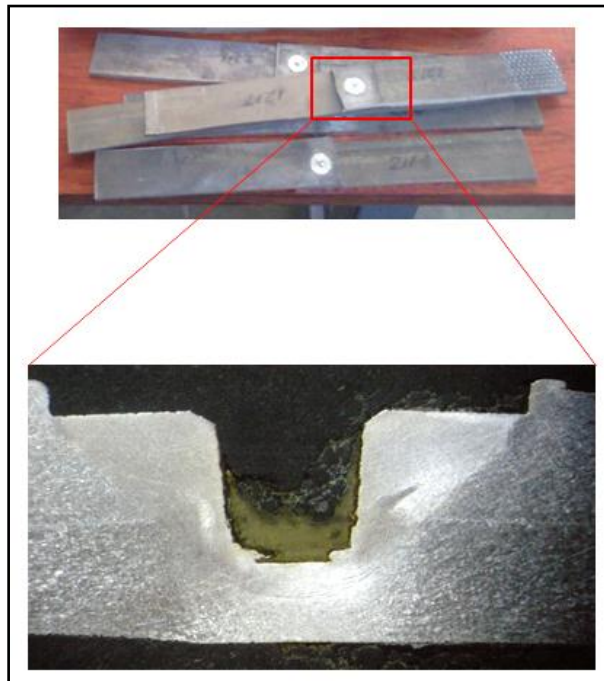


Figura 16. Escogencia al azar y montaje de la sección transversal del punto de soldadura para el análisis metalográfico.

El análisis metalográfico se realizó en un **microscopio Olympus GX41** de platina invertida, las mediciones del tamaño de grano se realizaron utilizando el software **IQ matetrial**s de acuerdo a la norma ASTM E112 aplicando el método de intercepción con círculos concéntricos.

Para realizar el estudio de las superficies de fractura de los ensayos de tensión y fatiga, se utilizó el microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6490LV.

Resultado esperado: Encontrar la forma del grano en las zonas características de la SFAP en la AZ31B producidas por el efecto de la técnica de soldadura.

5.2 Mapas de micro-dureza.

Objetivo: Evaluar la variación de las propiedades mecánicas en las diferentes zonas del punto de soldadura, realizado en fresadora convencional.

Características del equipo y procedimiento: Las mediciones de micro-dureza se realizaron sobre la sección transversal del punto de soldadura, aprovechando la simetría que presentan los puntos de soldadura realizados por fricción-agitación se tomó únicamente el lado derecho de la probeta, para la toma de los datos se utilizó el micro-durómetro automatizado Wilson Instruments model 401 MVD en escala Hv, con una carga de 50 g y un tiempo de sostenimiento de 15 s [19].

Resultado esperado: Determinar los valores de micro-dureza en la ZA y ZATM, y correlacionarlos con los del metal base.



Figura 17. Micro-durómetro utilizado

5.3 Ensayo de tensión.

Objetivo: Evaluar el comportamiento estático de las soldaduras por fricción-agitación de punto en la AZ31B realizadas en fresadora convencional.

Características del equipo y procedimiento: El ensayo de tensión uniaxial se realizó en una máquina Instron 3369 a una velocidad de 1mm/min y con la carga aplicada en la dirección del sentido de flujo de los granos de extrusión de la lámina de Magnesio AZ31B según norma B557M-10[31].

Resultado esperado: Determinar la carga máxima soportada por todos los tratamientos de la SFAP y de las uniones remachadas.

5.4 Ensayo de fatiga.

Objetivo: Evaluar el comportamiento bajo cargas cíclicas de las soldaduras por fricción-agitación de punto en la AZ31B, realizadas en fresadora convencional y para las uniones remachadas.

Características del equipo y procedimiento: El ensayo de fatiga se realizó en una máquina servo-hidráulica Hung Ta SF-310 para ensayos dinámicos, utilizando onda tipo sinusoidal, una frecuencia de 10 Hz y un factor R de 0,1. Los ensayos se realizaron para todos los tratamientos estudiados, a un valor de 0,5 de la carga máxima obtenida en el ensayo de tensión, y posteriormente se realizó la curva completa al tratamiento que reportó el mejor comportamiento, evaluándola a 0,7, 0,5, 0,3 y 0,2; por efecto de la gran duración de los ensayos a 0,3 y 0,2 solo se realizó un ensayo para cada uno, para 0,7 y 0,5 se obtuvieron tres ensayos cada uno.

Resultado esperado: Obtener el comportamiento a fatiga de todas las SFAP realizadas en fresadora convencional, evaluadas al 0,5 de la carga de tensión y las curvas de carga versus el número de ciclos del mejor tratamiento de SFAP realizados en la fresadora convencional y las uniones remachadas.

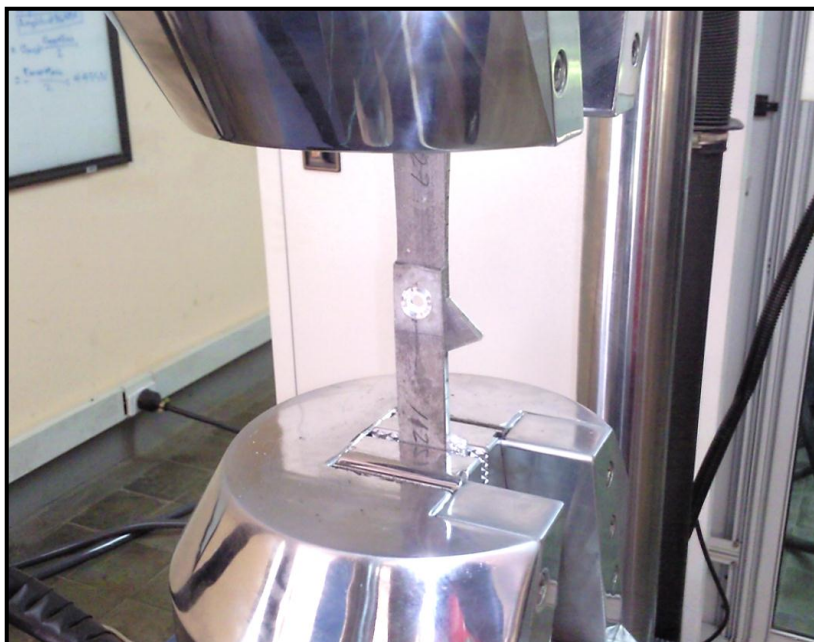


Figura 18. Prueba de fatiga a 10 Hz y R=0,2

6 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos destructivos realizados a las soldaduras de punto por fricción-agitación, de acuerdo con el diseño experimental planteado anteriormente. Las tablas y gráficas facilitaran el análisis y brindara una mejor explicación del comportamiento de los puntos de soldadura.

6.1 Análisis metalográfico. Estas imágenes muestran la geometría y la micro-estructura de los puntos de soldadura, así como los resultados obtenidos para las mediciones de los tamaños de grano realizados en cada tratamiento.

Geometría de los puntos de soldadura. La Figura 20 muestra la sección transversal de los puntos de soldadura obtenidos en cada tratamiento, resaltando una geometría en forma de cono en la zona agitada, característica de los puntos de soldadura por fricción-agitación. La sección transversal de la Figura 19) corresponde a la SFAP realizada en la máquina estándar en la que se destaca la ZA. Se pueden apreciar diferencias notables en la geometría de los puntos realizados a 1800 rpm y los realizados a 900 rpm, como lo muestra la Figura 20-a), d), e), h) correspondientes a los tratamientos 111, 212, 112, 211 los cuales se hicieron a 900 rpm respectivamente, la geometría de la zona agitada se caracteriza por tener una forma cilíndrica y redondeada en la parte inferior de la zona agitada, mientras que la Figura 20-b), c), f) y g), correspondientes a los tratamientos 121, 122, 221 y 222 se hicieron a 1800 rpm, se puede observar una terminación en forma de cono en la zona agitada, mostrando una mayor zona de agitación, este comportamiento es atribuido al incremento de calor generado por una mayor velocidad de la herramienta.

Comportamientos similares han sido encontrados por diferentes autores en aleaciones no ferrosas de Magnesio y Aluminio, en las cuales el tamaño de la zona agitada incrementa en la medida que se aumenta la velocidad de rotación [19, [-53]. En las probetas a, d y h se puede observar una separación entre la lámina superior e inferior, lo cual puede ser atribuido a la falta de precarga al momento de sujetar las dos láminas a soldar; en la probeta g se puede apreciar la formación de un gancho, lo cual es atribuible a altas velocidades y bajos tiempos de sostenimiento, ya que el hombro ejerce una fuerza descendente sobre el material adyacente calentado por la fricción el pin mezcla este material y lo empuja hacia arriba en este ciclo material de las dos laminas es arrastrado hacia arriba y por efecto del corto tiempo de sostenimiento el material no es totalmente fundido y lo que hace es alejarse de la zona agitada, esta región de formación de gancho se ubica entre la ZATM y la ZAC [1].

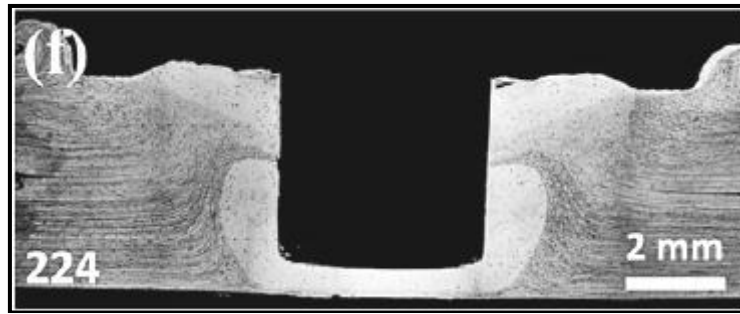


Figura 19. Soldadura realizada en máquina especializada

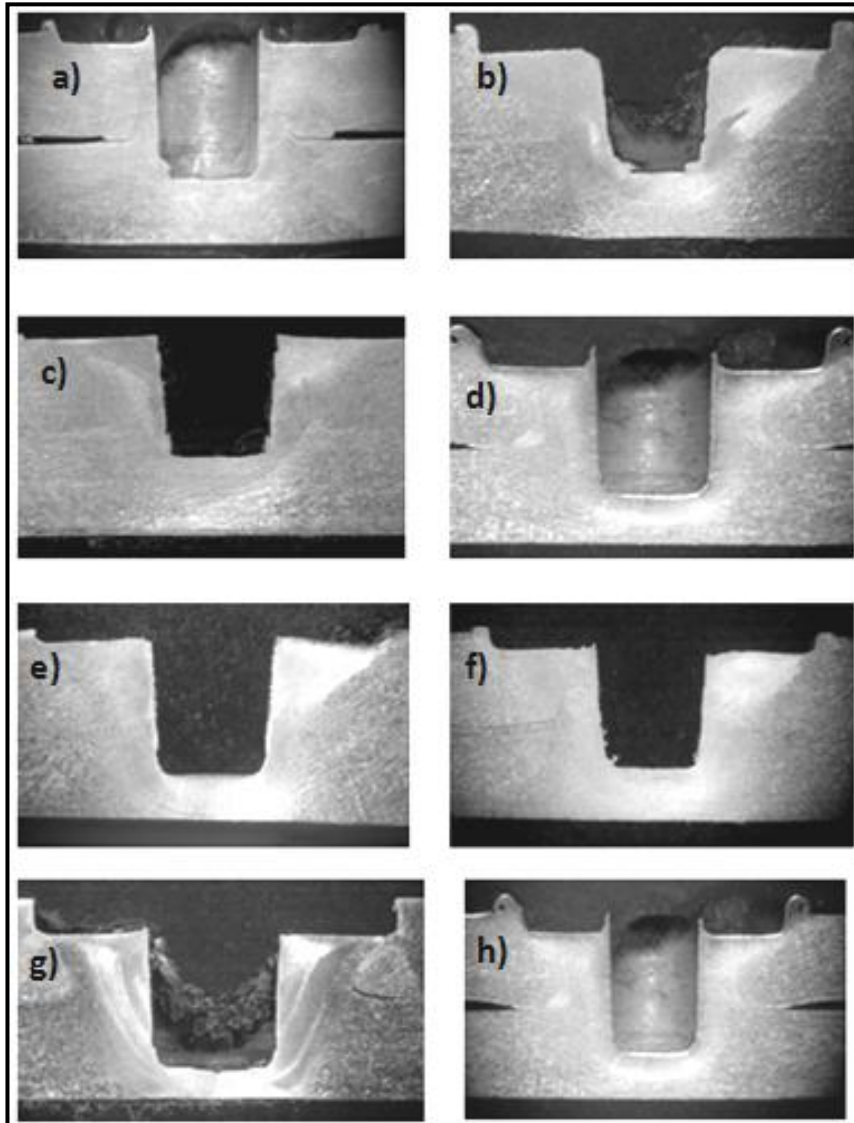


Figura 20. Geometría de los puntos por fricción-agitación de los diferentes tratamientos

a) 111, b) 121, c) 122, d) 212, e) 112, f) 221, g) 222, h) 211

En la macrografía de la sección transversal del punto de soldadura mostrada en la Figura), se pueden identificar las zonas características de la soldadura por fricción-agitación, las cuales son: la zona agitada (ZA) correspondiente al área deformada plásticamente por la acción de la fricción y agitación de la herramienta de soldadura, la zona afectada termo-mecánicamente (ZATM),

correspondiente a la región adyacente a la zona agitada, en la cual ocurre una deformación plástica en menor magnitud y se generan defectos por la temperatura alcanzada en el proceso de soldadura, de manera seguida se encuentra la zona afectada térmicamente ZAC, en la cual el material se ve afectado únicamente por la transferencia del calor generado por el proceso y finalmente se encuentra el metal base MB, este corresponde al material que no ha sido afectado por el proceso de soldadura; la zona de unión entre las láminas superior, inferior, ZA y ZATM es propicia para generación y propagación de una grieta, debido a que en esta zona, se generan regiones diferentes de micro-dureza donde pueden aparecer esfuerzos residuales ya que hay cambios en la dirección del flujo del material deformado plásticamente durante el proceso de soldadura.

Las flechas muestran la dirección del flujo del material en la zona agitada, donde se puede apreciar la dirección del flujo ascendente del material hasta la parte superior del punto, luego por acción del hombro y el pin roscado de la herramienta el material es dirigido nuevamente hacia el interior de la zona agitada [7].

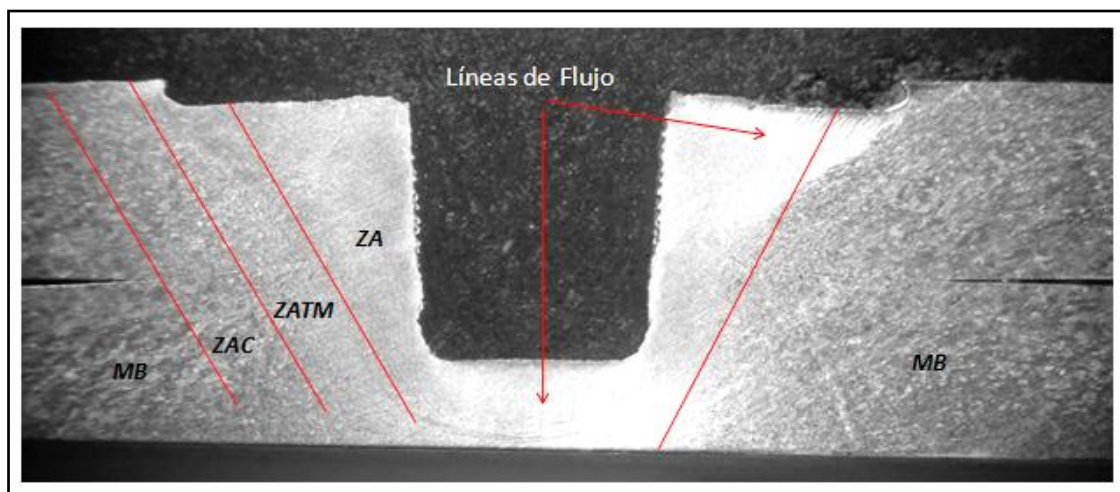


Figura 21. Macrografías de la sección transversal de la soldadura pro fricción-agitación de punto, a) Identificación de las zonas de soldadura, b) Detalle de la zona agitada a 50X.

Micro estructura de los puntos de soldadura. En la micrografía mostrada en la Figura -a) se puede apreciar el metal base de la aleación de Magnesio AZ31B, caracterizada por tener granos grandes y ligeramente alargados, con un tamaño de grano promedio de $80\mu\text{m}$, teniendo un tamaño de grano promedio de $10\mu\text{m}$. La ZAC es la zona más difícil de detectar debido a que el aumento del tamaño de grano no fue significativo. La micro-estructura de la ZATM mostrada en la Figura -b), permite detectar fácilmente granos alargados y fuertemente orientados en la dirección del flujo del material; la zona de transición entre la ZATM y la ZA se muestra en la Figura -c), en la que se evidencia con claridad el cambio de los granos alargados, de diferentes tamaños y orientados en la dirección del flujo del material correspondientes a la ZATM a granos finos correspondientes a la ZA; la Figura -d) muestra la micro estructura característica de la ZA por la presencia de granos finos y equiaxiales, con un tamaño promedio menor de $7\mu\text{m}$ [54]; es posible notar el refinamiento del tamaño de grano a medida que se avanza desde el metal base hasta la ZA, debido a la agitación y re-cristalización dinámica del material tal

como se comprobó con las mediciones de tamaño de grano realizadas desde MB hasta la ZA para cada tratamiento; este comportamiento ha sido reportado por diferentes autores [7, [25, [55-[57]. En la Tabla 9 se presentan los valores del tamaño de grano para los diferentes tratamientos en la ZA.

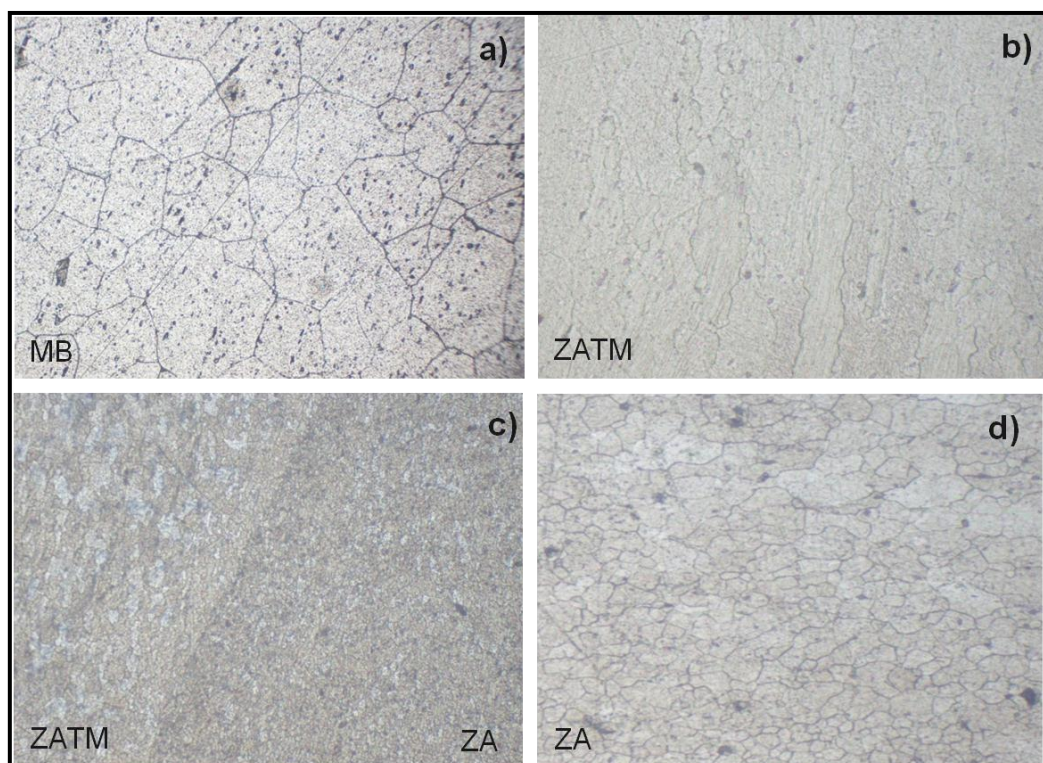


Figura 22. Micrografías de las zonas SFAP a) Metal base a 200X, b) Zona afectada termo-mecánicamente a 500X, c) Región de transición entre la ZATM y la ZA a 200X y d) Zona agitada a 300X. [78]

Tabla 9. Tamaño de grano promedio de la ZA para cada tratamiento.

Determinación de tamaño de Grano en ZA y Metal Base				
Zona Agitada			Promedio Metal Base	
Tratamiento (t,ω,p)	Ø (μm)	Tamaño ASTM	Ø (μm)	Tamaño ASTM
111	4,3	12,5	79,2	3,4
211	5,4	11,8		
121	5,8	11,6		
221	6,0	11,5		
112	3,3	13,2		
212	6,7	11,2		
122	9,2	10,2		
222	9,0	10		

De acuerdo a los resultados reportados en la Tabla 9, el tamaño de grano promedio en la ZA aumenta en la medida que se incrementa la velocidad de rotación, este comportamiento ha sido observado por diferentes autores [14-[12], en aleaciones de magnesio y aluminio; y es atribuido al exceso de calor aportado por el incremento en la velocidad de rotación de la herramienta, el

cual aumenta la temperatura del proceso y genera una sobre-cristalización en el material. Las mediciones de tamaño de grano realizadas en cada tratamiento se presentan en el Anexo A.

Medición de la carga axial y Temperatura. La carga axial del proceso de soldadura se midió utilizando una celda de carga marca Hung Ta inc. Modelo HT-8336 con capacidad de 50KN, La temperatura de cada soldadura se registró con una termocupla de punta de tungsteno conectada a un Pirómetro marca Autonics Modelo TZ4ST24C con un rango de temperaturas (0°C a 1100°C); instalados en un dispositivo fabricado para este proceso, que permite alinear los centros de la herramienta, el soporte y la celda de carga, de tal forma que la celda de carga registre únicamente la fuerza axial (Compresión) generada por la penetración de la herramienta, y la termocupla la temperatura máxima alcanzada en el proceso de soldadura; en la Figura se observa el montaje del dispositivo utilizado.

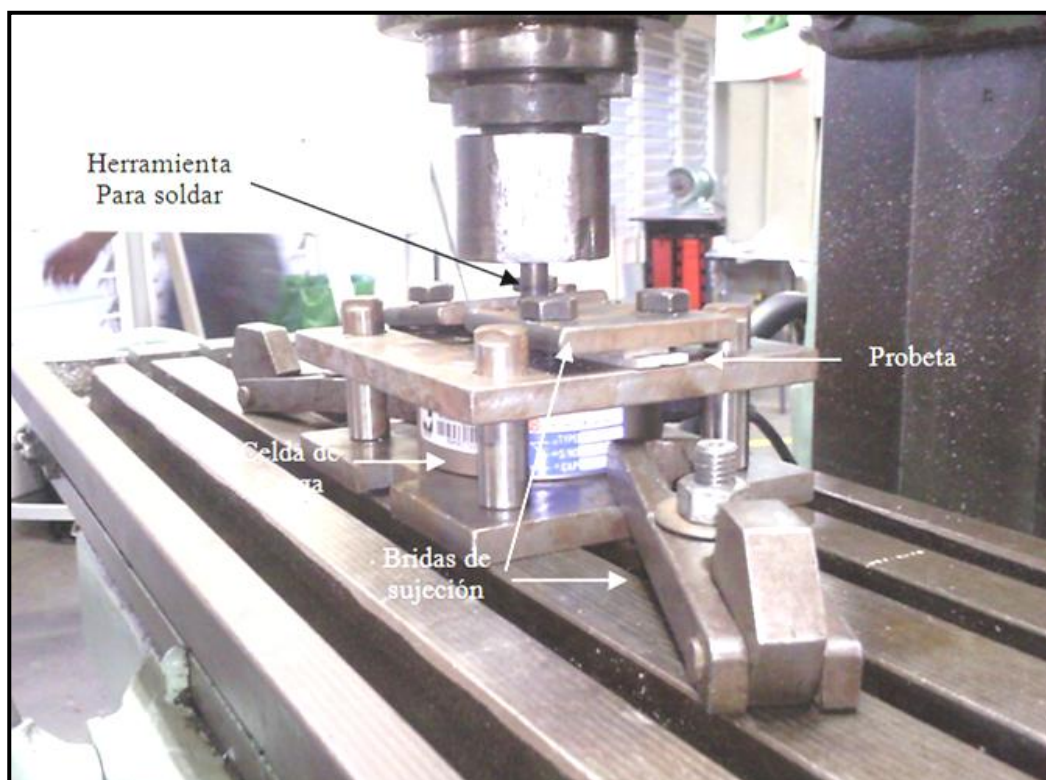


Figura 23. Medición de carga axial y Temperaturas del proceso de SFAP

En el proceso de soldadura se observó que la carga aumenta considerablemente desde el contacto del pin de la herramienta con la superficie de la lámina superior, hasta llegar a la lámina inferior donde se aprecia un sostenimiento de la carga, luego alcanza el valor máximo ya que el hombro entra en contacto con la lámina superior. Este pico se mantiene por corto tiempo, debido al mayor aporte de calor generado por la fricción entre las áreas de contacto, el material se ablanda y como consecuencia la carga disminuye con el tiempo de sostenimiento y finalmente cae con el retiro de la herramienta, como se puede observar en la Figura 24

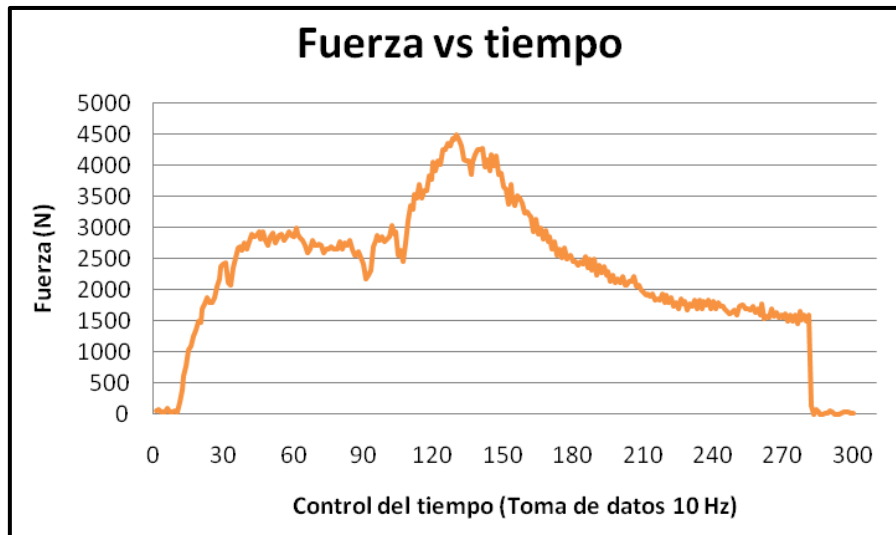


Figura 24. Comportamiento de la carga en el proceso FSSW.

La Tabla 10 muestra los resultados de carga axial y temperatura para todos los tratamientos, puede notarse que a mayor velocidad de rotación de la herramienta, el valor de la carga axial disminuye [15], sin presentar variaciones significativas para los diferentes tiempos de sostenimiento; a lo que podría atribuirse que una cantidad mayor de energía aportada por el incremento de la velocidad en la herramienta facilita la penetración del material. La Tabla 10 muestra que el valor de carga axial arrojado por la máquina estándar es acorde con los medidos con el dispositivo, aportando confiabilidad y validez al proceso realizado en la fresadora convencional.

Las medidas de temperaturas se realizaron en la interfaz de las dos láminas, se realizó un agujero de diámetro $\varnothing 1/16''$ a una distancia de 5mm del centro del agujero dejado por el pin, se introdujo la termocupla de punta de tungsteno para tomar los datos de temperatura como lo muestra la figura 25 en algunos casos donde el aporte de calor era mayor la punta se quedaba adherida a la probeta por el aumento del tamaño de la zona agitada



Figura 25. Esquema de disposición para toma de temperaturas

Tabla 10. Carga axial y temperatura para cada tratamiento.

Fuerza Axial (N) y Temperaturas		
Tratamiento (t,ω,p)	Fuerza Max (N)	Temperatura °C
111	4229,2	248
211	4606,5	283
121	3111,3	345
221	3312,1	335
112	4959,1	245
212	4480,4	257
122	2797,4	322
222	2645,5	365
Máquina Standard	4142,3	

Aporte de calor de las SFAP. Fregaad *et al.* [9-10] Proponen el modelo numérico mostrado en la Ecuación 15, para determinar el aporte de calor en el proceso de soldadura por fricción-agitación, relacionando la velocidad de rotación y el radio del hombro de la herramienta, el coeficiente de fricción entre el hombro y el material de AZ31B tomado como 0,12 y la presión del proceso de soldadura, correspondiente a la acción de la carga axial en el área concerniente al hombro de la herramienta.

$$q_0 = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P \omega R^3 \quad [w] \quad (14)$$

Dónde:

q_0 : Energía aportada (W)

μ : Coeficiente de fricción

P : Presión (Pa)

ω : Velocidad de rotación de la herramienta (rot/s)

R : Radio de la herramienta (m)

La Tabla 11 presenta los resultados del aporte de calor neto del proceso de SFAP para cada tratamiento en unidades de energía (J), obtenidos a partir de la Ecuación 15. Mostrando que el aporte de calor en el proceso de soldadura incrementa en la medida que aumenta el tiempo de sostenimiento y la velocidad de rotación de la herramienta, estos resultados son consistentes con los tamaños de grano encontrados en la ZA para cada tratamiento.

Tabla 11. Aporte de calor para cada tratamiento

Aporte de calor		
Tratamiento	(W)	(J)
111	159,4	797,2
211	173,7	1736,6
121	234,6	1172,9
221	249,7	2497,2
112	186,9	934,7
212	168,9	1689,0
122	210,9	1054,6
222	199,5	1994,6

6.2 Mapas de micro-dureza. Los valores medidos en el metal base presentan una pequeña variación, lo que puede atribuirse a la presencia de impurezas o material escogido de diferentes lotes de producción, se obtuvo un valor promedio de 56 Hv acorde a los 64 Hv establecidos para la AZ31B [52].

En la Figura 26 se muestra el barrido de los mapas de dureza correspondientes a las soldaduras realizadas con las diferentes alturas del pin; tomando las medidas de micro-dureza a 0,5mm de la interfaz entre el pin y la zona agitada y a 1,5mm de la lámina superior hacia la lámina inferior, posteriormente se realizó la toma de datos cada 0,65mm hasta llegar a la zona sin soldar o metal base.

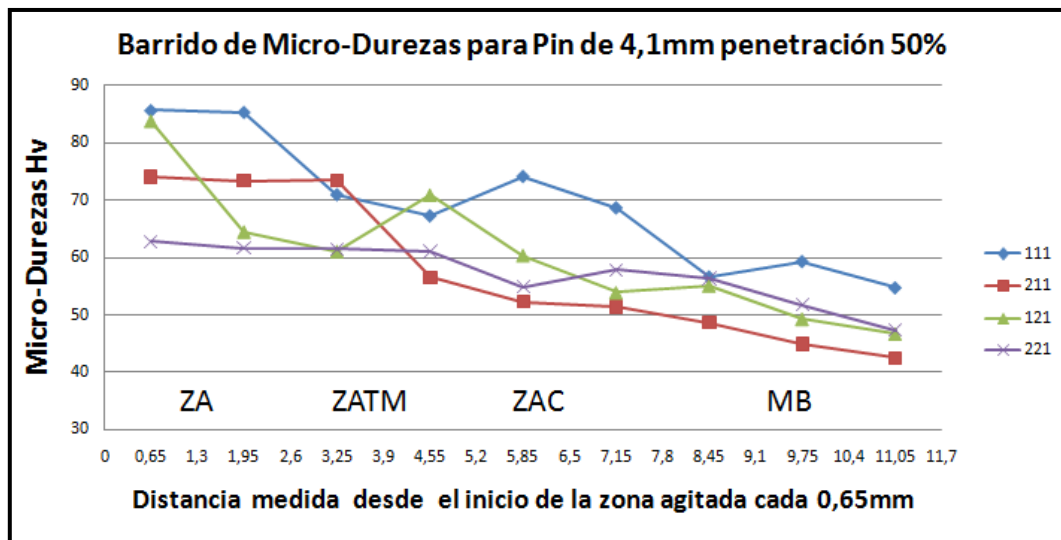


Figura 26 a) barrido de micro-durezas para pin de 4,1mm

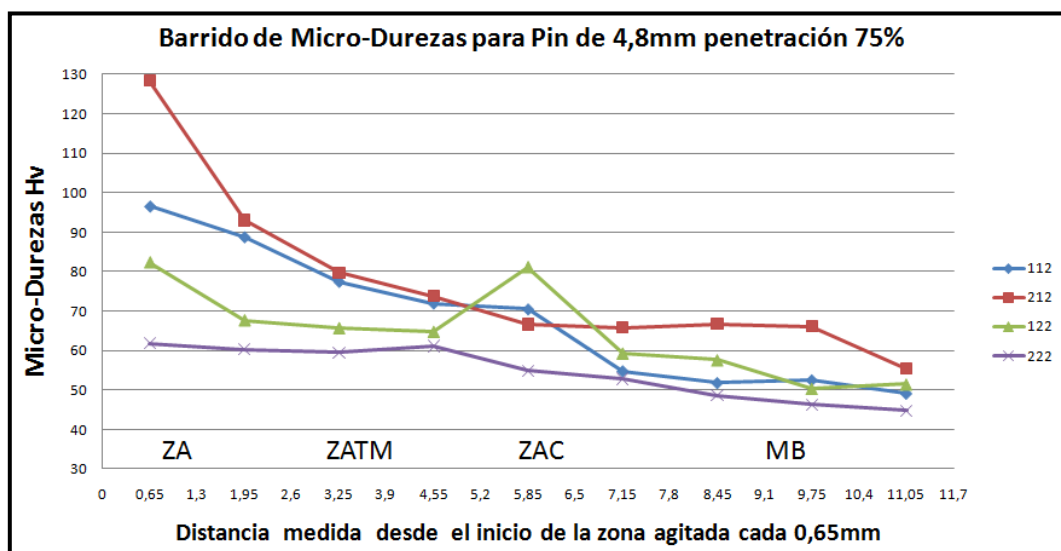


Figura 26 b) barrido de micro-durezas para pin de 4,8mm

Las gráficas de barrido de micro-durezas muestran que en todos los tratamientos la ZA presenta el valor máximo y una caída en el valor de la micro-dureza en la ZATM, un seguido decaimiento de la Microdureza se presenta en la ZAC producto de la temperatura; este comportamiento ha sido reportado por diferentes autores [9, 13,24,26,54,60] que han realizado perfiles de dureza a soldadura por fricción-agitación en aleaciones de magnesio y aluminio, este fenómeno es atribuido a los granos finos y equiaxiales, esta relación se ve reflejada con los altos valores de micro-dureza que se presentan en la ZA. S. Thoppul *et al* [13] encontró que en aleaciones de aluminio y magnesio tiempos de sostenimiento mayores a 2 s elevan los valores de micro-dureza en la ZA; mientras que en la ZATM la variedad de tamaños y formas de los granos ocasionan la disminución de la micro-dureza en el material.

Los valores de micro-dureza obtenidos en la ZA son comparables con los del MB el cual presenta una dureza promedio de 66 Hv; de acuerdo a las mediciones de tamaño de grano realizadas en la ZA, se esperaría que esta zona presentara valores de micro-dureza altamente superiores al MB, sin

embargo este fenómeno puede ser contrarrestado por la eliminación del tratamiento superficial de envejecimiento del MB producto del proceso de soldadura.

La Tabla 12 relaciona los valores de tamaño de grano encontrados en la ZA y ZATM con la micro-dureza para cada tratamiento, mostrando que se obtienen mejores propiedades mecánicas con tamaños de grano menores; los puntos de soldadura realizados en la fresadora convencional presentan una superioridad de 26 Hv [19] aproximadamente frente al mismo tratamiento realizado en la máquina para SFA, el cual también es acorde con el tamaño de grano encontrada en los dos tratamientos.

Tabla 12. Correlación entre los tamaños de grano y los valores de micro-dureza de las SFAP

Valores promedio de Micro-Dureza en ZA y ZATM			
Tratamiento	ZA ϕ (μm)	ZA Micro-Dureza	ZATM Micro-Dureza
111	4,3	85,5	67,3
211	5,4	73,7	56,5
121	5,8	62,8	60,4
221	6,0	62,3	61,1
112	3,3	92,7	72,1
212	6,7	76,8	73,8
122	9,2	66,1	64,8
222	9,0	57,6	54,9
Máquina Estándar	6,3	76	

6.3 Resultados de tensión. La Figura 27 presenta los resultados del ensayo de tensión para todos los tratamientos y las uniones remachadas. Los valores de cada ensayo de tensión se presentan en el anexo B. En la figura 27 se puede apreciar como las SFAP hechas a mayor velocidad de rotación de la herramienta presentan mayor resistencia mecánica a la tracción, y que el comportamiento de esta propiedad frente al tiempo de sostenimiento muestra una relación directa con la velocidad de rotación de la herramienta, los máximos valores de fuerza se presentan para velocidades de rotación de 1800 rpm y un tiempo de sostenimiento de 10 s, y para velocidades de 900 rpm se observa una disminución de la fuerza en un 40% de las hechas a 1800 rpm. Diferentes autores [6][24][34] confirman que la fuerza a tensión, en SFAP realizadas en aleaciones de aluminio series 6XXX y 5XXX, es superior para menores velocidades de rotación. Z Zhang *et al.* [6] y D. Choit *et al.* [68], encontraron que independiente de la velocidad de rotación de la herramienta, hay una tendencia a la estabilización del valor de la fuerza a tensión en SFAP realizadas en láminas de aluminio para tiempos de sostenimiento entre 5 y 15s. y Yuan-Ching Lin [13] reportó que en aleaciones de magnesio AZ61 el incremento de la velocidad y el tiempo de sostenimiento aumenta la resistencia a la tensión.

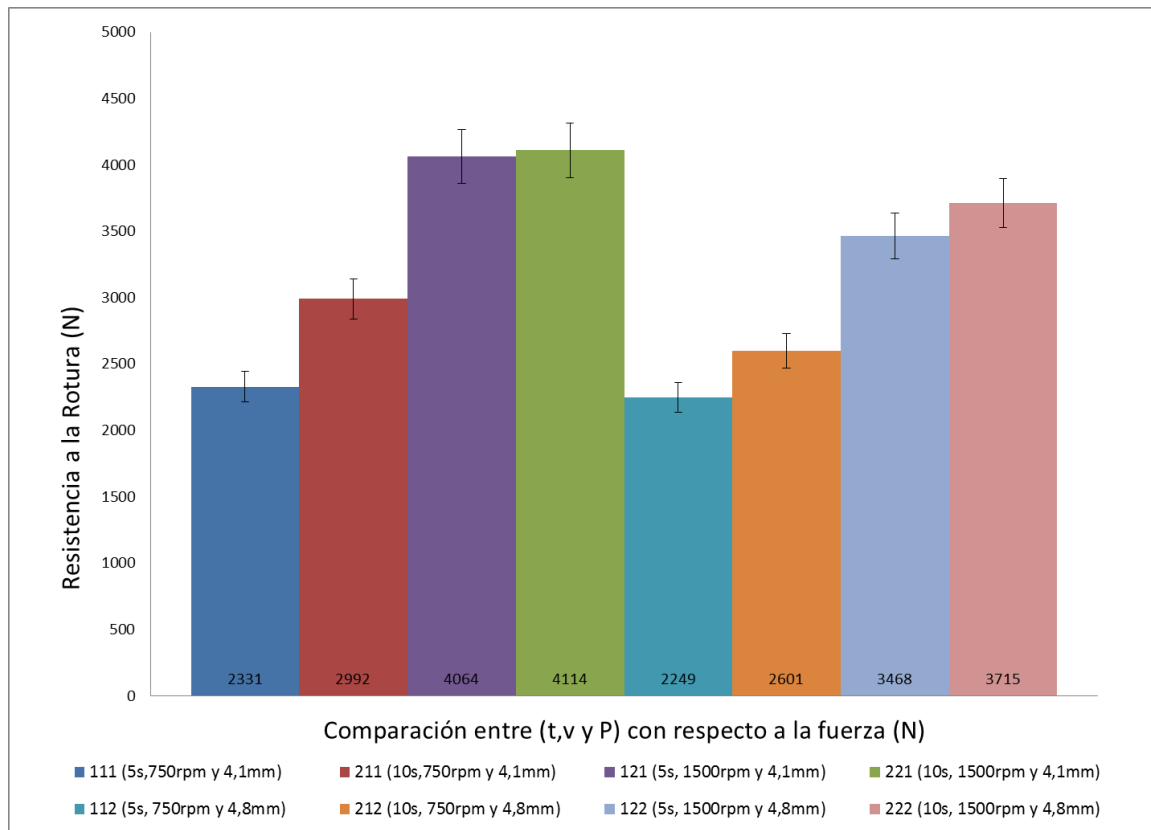


Figura 27. Fuerza máxima a tensión para la SFAP y los remaches

Los valores de fuerza a tensión encontrados para las soldaduras son consistentes con el comportamiento de micro-dureza; se observa una ligera superioridad de las soldaduras realizadas en la máquina estándar, esta diferencia es atribuida al control de la profundidad de penetración; Y. Tozaki *et al.* [3] encontró que existe una fuerte influencia de esta variable del proceso en el comportamiento a tensión de las SFAP.

La Figura 7 muestra que la resistencia a tensión de las SFAP es claramente superior comparada con los resultados de los remaches; el tratamiento 112, correspondiente al valor más bajo de resistencia a tensión, este presenta un incremento del 27% para un factor de seguridad de 1,4 respecto a la técnica de remachado, empleada frecuentemente para realizar uniones a traslape. Estos resultados dan confiabilidad para el uso de esta técnica de soldadura en aplicaciones estructurales de aleaciones de magnesio; además de su bajo costo de operación y versatilidad en el proceso frente a las técnicas convencionales empleadas para realizar este tipo de unión.

Fractura a tensión de las SFAP. El fenómeno de falla a tensión para las SFAP se caracterizó por ser igual en todas, presentando un comportamiento de fractura interfacial, con desprendimiento total de una porción del botón de soldadura por la ZATM [15, [69]. La Figura presenta las macrografías de la fractura a tensión, las flechas muestran la dirección de aplicación de la carga en el ensayo de tensión. La Figura 8-a) muestra la fractura en la lámina inferior, en la que parte del botón de soldadura queda adherido, aquí se puede identificar la ZATM, en la Figura 8-b) se puede observar el orificio dejado por el

desprendimiento del botón en la lámina superior, La Figura 8-c) muestra la fractura en la lámina superior, en la que se aprecia el desprendimiento de una porción del botón de soldadura y la deformación del orificio en sentido de aplicación de la carga, la Figura 28-d) muestra la línea de interface entre las láminas superior e inferior, la Figura 28-e) muestra el corte de la probeta para posterior análisis en el SEM.

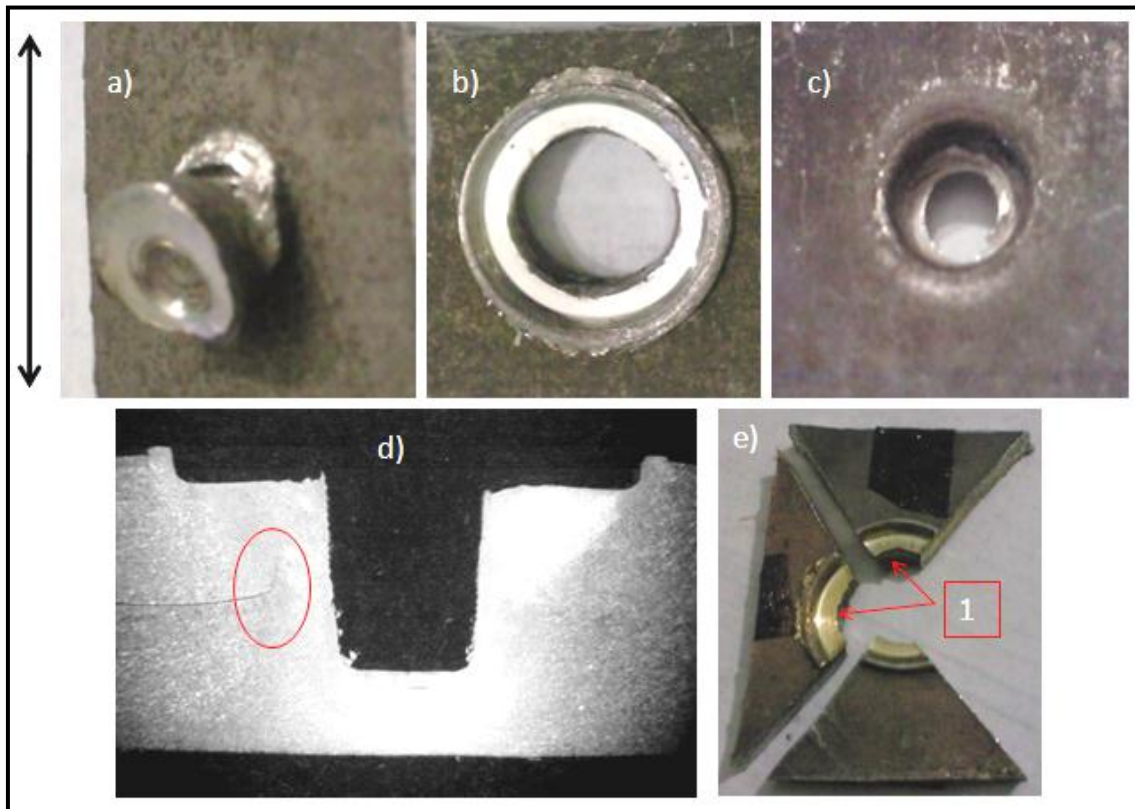


Figura 28. Fractura a tensión de las SFAP, a) Vista superior de la lámina inferior, b) Vista superior de la lámina superior, c) vista posterior de la lámina superior, d) línea de interface, e) Corte para análisis en SEM.

Se puede observar que la aparición de fallas en el ensayo de tensión en las SFAP, es atribuible a la propagación de la línea de mezcla de las láminas superior e inferior; el diámetro del botón corresponde al área de fractura, y podría estar ubicado en la ZATM, en la que convergen las dos láminas. Por lo tanto, la grieta proveniente de la interface de las láminas, se propaga inicialmente de forma transversal atravesando la ZA, hasta alcanzar la superficie del punto de soldadura y posteriormente se propaga de forma circular hasta que produce el desprendimiento del botón y posterior la ruptura de la probeta. Los bajos valores de micro-dureza en la ZATM, podrían facilitar la propagación de la grieta hasta la superficie del punto de soldadura.

La Figura 28-e) es el despiece de la Figura 28-b) en esta se muestra un recuadro marcado con el número 1 y fue analizada por Microscopia Electrónica de Barrido (SEM), donde se muestra la posible zona de propagación de la grieta en el punto de soldadura. En la Figura 28-c) Se aprecia una considerable deformación, característica del tipo de falla que presentan los materiales dúctiles tales como la AZ31B. La Figura-a) muestra un detalle de la figura 28-e) donde se aprecian partículas no-metálicas dispersas, correspondientes a la

película de óxido de magnesio de la capa protectora que se encontraba inicialmente presente en la superficie de las láminas previo al proceso de soldadura, ya que los perfiles fueron tomados y no se les realizó alguna limpieza previa, la capa fue fracturada, introducida y mezclada con el metal base en el área de adhesión de las láminas, en Tabla 13 se lista la composición de las partículas producto del análisis EDS realizado sobre ellas.

La Figura -b) se identifica como la zona de fractura en el ensayo de tensión, se observa una región con muestras de desgarramiento de material localizada entre la ZATM y ZA, debido al cambio de la micro-dureza producto de la variación del tamaño de grano; se ven partes lisas ocasionadas por el deslizamiento relativo de la porción del punto y la lámina superior, además algunas depresiones características de una fractura en un material dúctil.

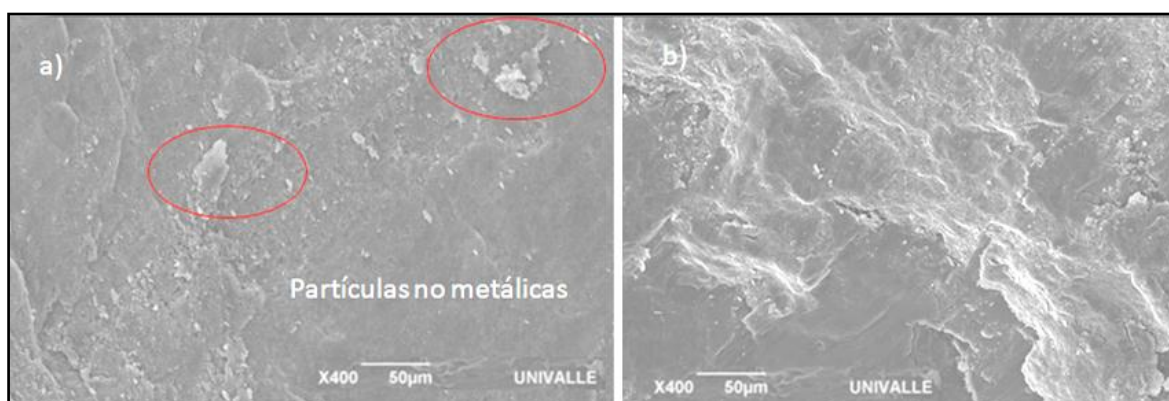


Figura 29. Imágenes MEB de la fractura a tensión de las SFAP, a) Superficie de la región 1 marcada en la Figura 27-e b) Zona de desgarramiento de material.

Tabla 13. Composición química de las partículas no-metálicas, datos en % en peso.

Espectro	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K
1	60.95	3.36	10.59	7.45	10.63	3.14	3.89
2	18.11		80.08	1.82			
3	6.13		93.87				
4	11.85		88.15				

Fractura a tensión de los remaches. La fractura en las uniones remachadas se presentó por cortante en la sección transversal del remache. La Figura 30-a) corresponde a la superficie de fractura del remache, la cual es característica de una fractura tipo dúctil, mostrando deformación plástica y fibrosidad en la superficie, la Figura 30-b) y c) corresponden a la vista superior de la lámina superior, y posterior de la lámina inferior, respectivamente; la flecha mostrada en la Figura 30 indica la dirección de aplicación de la carga en el ensayo de tensión. Sun *et al.* [49] atribuyó este tipo de falla a la variación en la distribución de esfuerzos en la región circundante del remache.

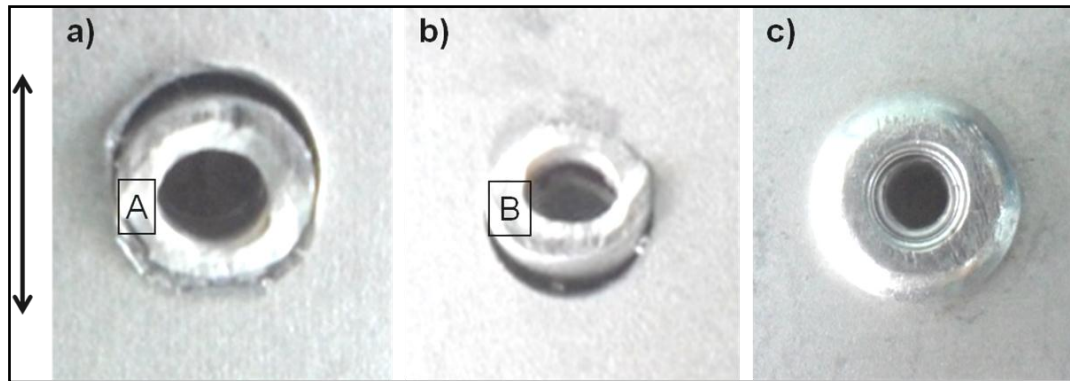


Figura 30. Fractura a tensión de los remaches, a) Vista posterior de la lámina superior, b) Vista superior de la lámina inferior, c) Vista superior de la lámina superior [78].

La Figura muestra imágenes SEM de las superficies de fractura de las uniones remachadas, las figuras a) y b) corresponden a la superficie de fractura de la lámina superior, identificada como región A en la Figura 30-a), y las figuras c) y d) corresponden a la superficie de fractura de la lámina inferior, identificada como región B en la Figura -b). Las imágenes muestran superficies de fractura con deformaciones, y se evidencian *dimples* deformados y orientados en la dirección de la carga, patrón característico de falla a cortante. En las Figura a) y c), se aprecian regiones con superficies planas, las cuales se atribuyen al contacto o deslizamiento entre las superficies de las láminas en el momento de la falla a tensión.

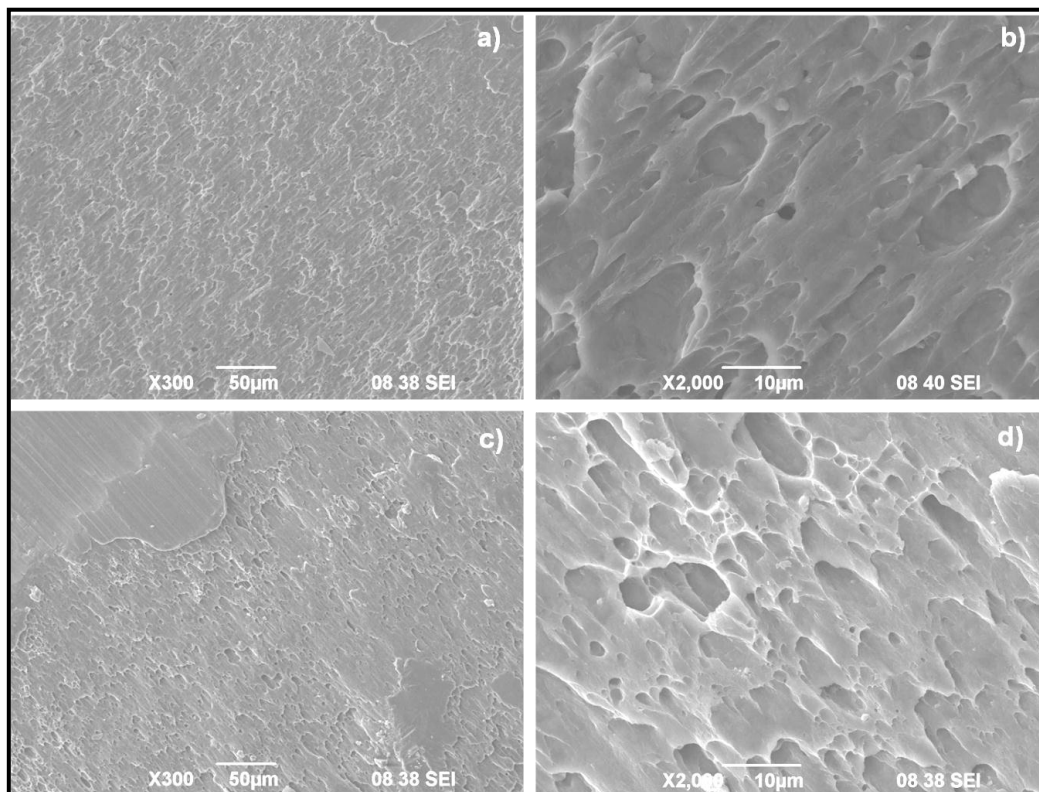


Figura 31. Imágenes MEB de la fractura de los remaches a tensión, a) Superficie de fractura de la lámina superior, b) detalle de la superficie de fractura de la lámina superior, c) Superficie de fractura de la lámina inferior, d) detalle de la superficie de fractura de la lámina inferior [78].

6.4 Resultados de Fatiga. Los resultados del comportamiento a fatiga de las SFAP evaluadas al 0,5 de la carga máxima de tensión, se presentan en la Figura . El rango de carga se evaluó entre 1124 y 2057 N de acuerdo a los resultados de tensión obtenidos en cada tratamiento, los datos obtenidos en el ensayo de fatiga para cada tratamiento se presentan en el Anexo .

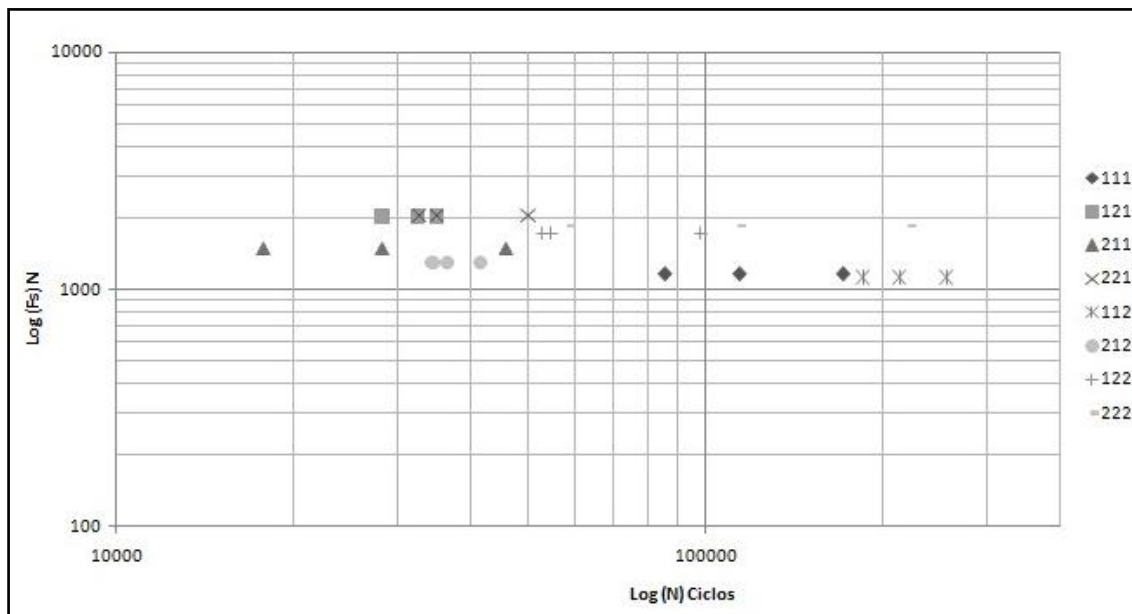


Figura 32. Comportamiento a fatiga de las SFAP al 0.5 de la carga máxima.

La Figura muestra que, contrario al comportamiento de tensión, la disminución de la velocidad de giro de la herramienta y el aumento de la profundidad del pin aumenta el número de ciclos soportado por los puntos de soldadura. Los tratamientos 111 y 112 presentaron el mejor comportamiento a fatiga con ciclajes promedios de 123446 y 218332 respectivamente, a pesar de que el tratamiento 112 tuvo la resistencia a la tensión más baja. El tratamiento 222 tuvo 131242 ciclos superando al 111 pero teniendo datos muy dispersos; los tratamientos 121 y 221 que tuvieron la máxima resistencia a tensión reportaron un bajo comportamiento en el ensayo de fatiga con ciclajes promedio de 31938 y 39250 ciclos respectivamente. La variación en el comportamiento de fatiga frente al de tensión, es atribuida principalmente a las propiedades micro-estructurales de los puntos de soldadura [] aunque la resistencia y comportamiento a la fatiga son dos propiedades que van muy ligadas para este tipo de configuración de junta difiere un poco.

Curva completa de la SFAP realizada en fresadora convencional.

Con los resultados obtenidos del comportamiento a fatiga de todos los tratamientos evaluados a 0,5 de la carga máxima a tensión, se seleccionó el tratamiento **112** el cual tuvo el mayor número de ciclos para realizar la curva completa a fatiga, con valores del 0,2 0,3 0,5 y 0,7 de la carga máxima a tensión, teniendo un rango de carga entre 449,8 y 1574,3 N. Los valores de número ciclos de vida a fatiga de todos los porcentajes del ensayo de fatiga para el tratamiento **112** se recopilaron en el Anexo .

La Figura 33 corresponde a la curva completa de carga versus el número de ciclos de la SFAP realizada en fresadora convencional con una velocidad de

rotación de la herramienta de 900 rpm y 5 s de sostenimiento. Los resultados muestran una curva con una pendiente negativa de 2,768, en la cual, las probetas ensayadas a un rango de carga de 449,8 N, correspondiente al 0,2 de la carga de tensión, superaron los 10^6 ciclos; de acuerdo a Dieter, G. [35] quien establece que se considera vida infinita una vez superados los 10^6 ciclos, podría interpretarse que, para rangos de carga iguales o menores a 449,8 N se obtiene un comportamiento de vida infinita para estas SFAP, y por tanto este valor puede identificarse como el límite a la fatiga. Los valores de los coeficientes de Basquin, y los valores de las curvas media y de diseño para esta curva de fatiga, se presentan en el Anexo H.

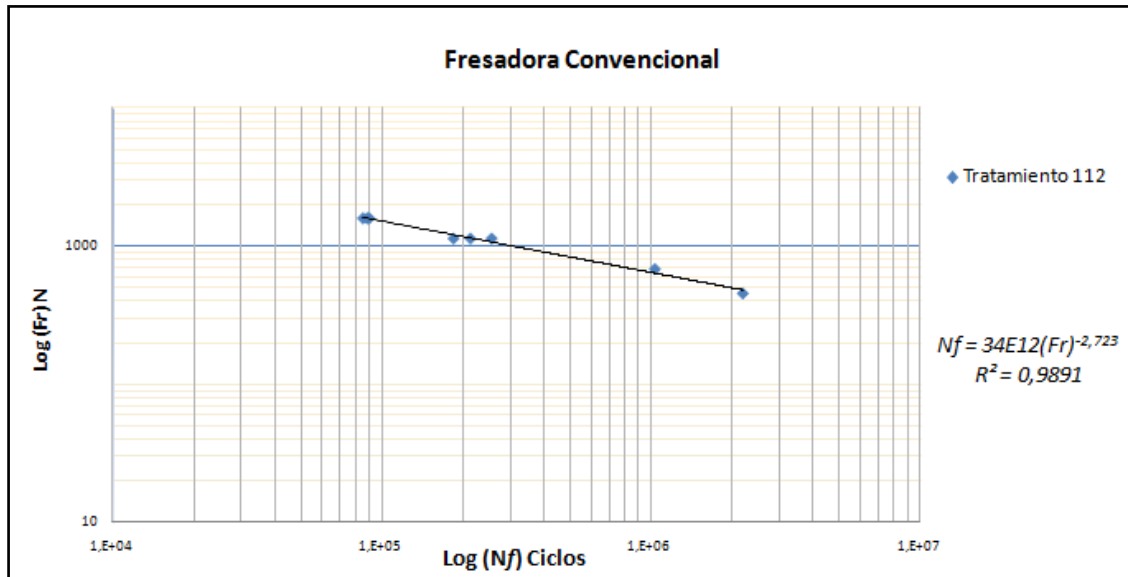


Figura 33. Curva carga-ciclos para SFAP realizada en fresadora convencional

Curva completa de las uniones remachadas. Se estudió el comportamiento a fatiga de uniones remachadas, utilizadas convencionalmente para realizar las uniones en este tipo de material; para tal fin se realizó la curva de fatiga de las uniones remachadas para el 0,2 0,3 0,5 y 0,7 de la carga a tensión, para un rango de carga entre 295 y 1034 N. Todos los resultados de los ensayos de fatiga realizados para la obtención de esta curva, se presentan en el Anexo .

La Figura 34 muestra el comportamiento a fatiga de las uniones remachadas, en la que se aprecia una curva de pendiente negativa de 1,414, con valores superiores a los 10^6 ciclos para un rango de carga de 295 N, correspondiente a 0,2 de la carga a tensión. El valor de resistencia a fatiga para la curva de diseño evaluados a $1,1 \times 10^6$ ciclos es de 103 N. Los valores de los coeficientes de Basquin, y las curvas media y de diseño para esta curva de fatiga se presentan en el Anexo H

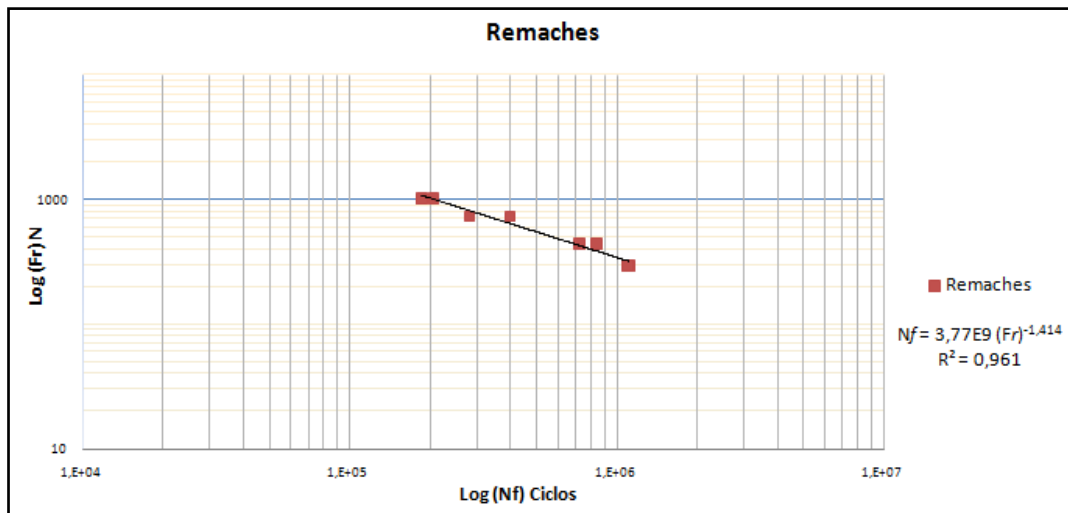


Figura 34. Curva Carga- ciclos para las uniones remachadas

Comparación de las curvas de fatiga. La Figura 35 muestra las curvas completas del comportamiento a fatiga de las SFAP realizadas en fresadora convencional y de las uniones remachadas; es clara la superioridad de las SFAP frente a las uniones remachadas, el valor de la pendiente negativa de las SFAP es el doble del valor de la pendiente negativa de las uniones remachadas; esto indica que en la medida en la que se disminuye el rango de carga las SFAP soportan más ciclos que las uniones remachadas, de acuerdo con los resultados de tensión las SFAP para un valor de ciclos dado estas soportan mayor carga que las uniones remachadas, lo que se ve reflejado en los límites a fatiga, con valores de 398 N para las soldaduras realizadas en fresadora convencional, frente a 103 N para las uniones remachadas.

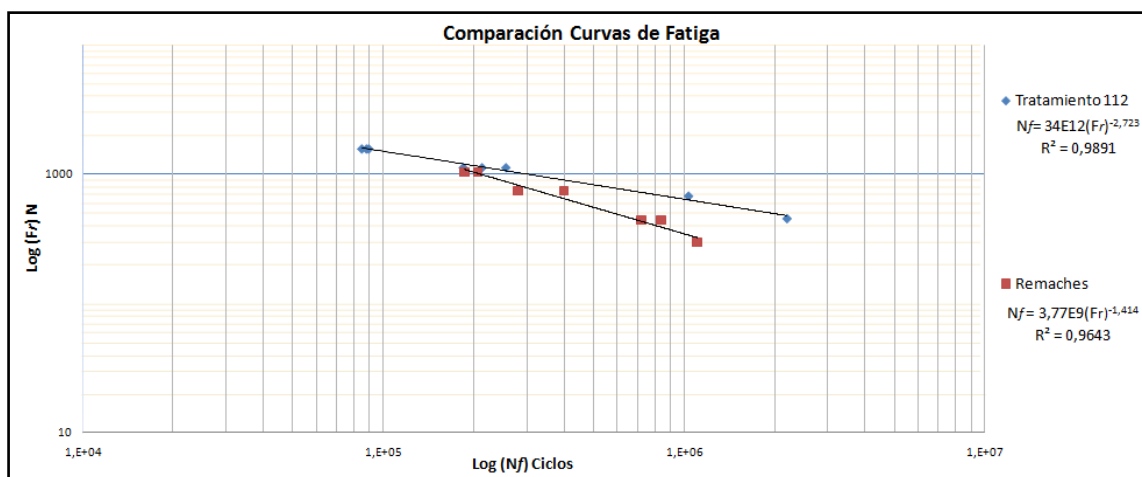


Figura 35. Curvas carga-ciclos de las SFAP realizadas en fresadora convencional y en máquina estándar y de las uniones remachadas.

Fractura a fatiga en las SFAP. Al igual que en los ensayos de tensión ocurrió una falla por la ZATM, atribuida a la propagación de la grieta proveniente de la interface de las láminas superior e inferior, sin embargo, hubo diferencia en la fractura presentada para las probetas evaluadas a cargas altas y bajas. La fractura presentada en los ensayos de fatiga realizados a valores del 0,5 y 0,7 de la carga máxima a tensión, ocurrió en la lámina inferior, en la dirección transversal a la aplicación de la carga; de acuerdo a lo reportado por varios

autores [43, [47] este tipo de fractura se atribuye a la propagación de una grieta adicional, proveniente de la interface entre las láminas, que avanza a través del ancho de la lámina hasta llevarla a la fractura. Por otra parte, los ensayos realizados a 0,3 de la carga de tensión presentaron una fractura interfacial similar a la encontrada en el ensayo de tensión, en la que se desprendió parte del punto de soldadura, quedando adherido a la lámina inferior.

La Figura muestra la fractura de fatiga de las SFAP, donde la flecha indica la dirección de aplicación de la carga; en la Figura 6-a,d) se presenta la fractura ocurrida a cargas bajas (0,3 de la carga de tensión); la figura a) corresponde al instante en el cual ocurre la fractura, la figura b) muestra la lámina inferior, donde se evidencia que parte del botón de soldadura ha sido retirado producto de la fractura por cortante, en la figura c) se presenta la parte posterior de la lámina superior y en la figura d) se muestra la vista superior de la lámina superior, en la cual se aprecia la porción del botón de soldadura que fue removida y quedo adherida a esta lámina producto de la fractura del ensayo de fatiga.

La Figura37-a,d) muestra la fractura de fatiga de las SFAP a cargas altas (0,5 y 0,7 de la carga de tensión); la figura a) muestra la vista superior de la lámina superior, en la que se evidencia una falla interfacial en el punto de soldadura, atribuida a la propagación de la grieta proveniente de la interface entre las dos láminas, sin embargo no hubo desprendimiento total del botón de soldadura, la figura b) corresponde a la vista posterior de la lámina superior, en la que se aprecia una porción de la lámina inferior, mostrando la propagación de la fractura a través del ancho de esta en dirección perpendicular a la aplicación de la carga, de igual manera, como se indica en el círculo de la figura, se observa que hubo un desprendimiento parcial de una porción del botón de soldadura, la figura c) muestra la vista superior de la lámina inferior, siendo posible apreciar la contraparte de la fractura ocurrida en esta lámina. De acuerdo a lo observado en las figuras b) y c) cabe notar que la fractura ocurrió en la zona circundante al punto de soldadura, como se indica en el círculo de la figura c), en la zona correspondiente al punto de soldadura, se aprecia la forma circular propia de este.

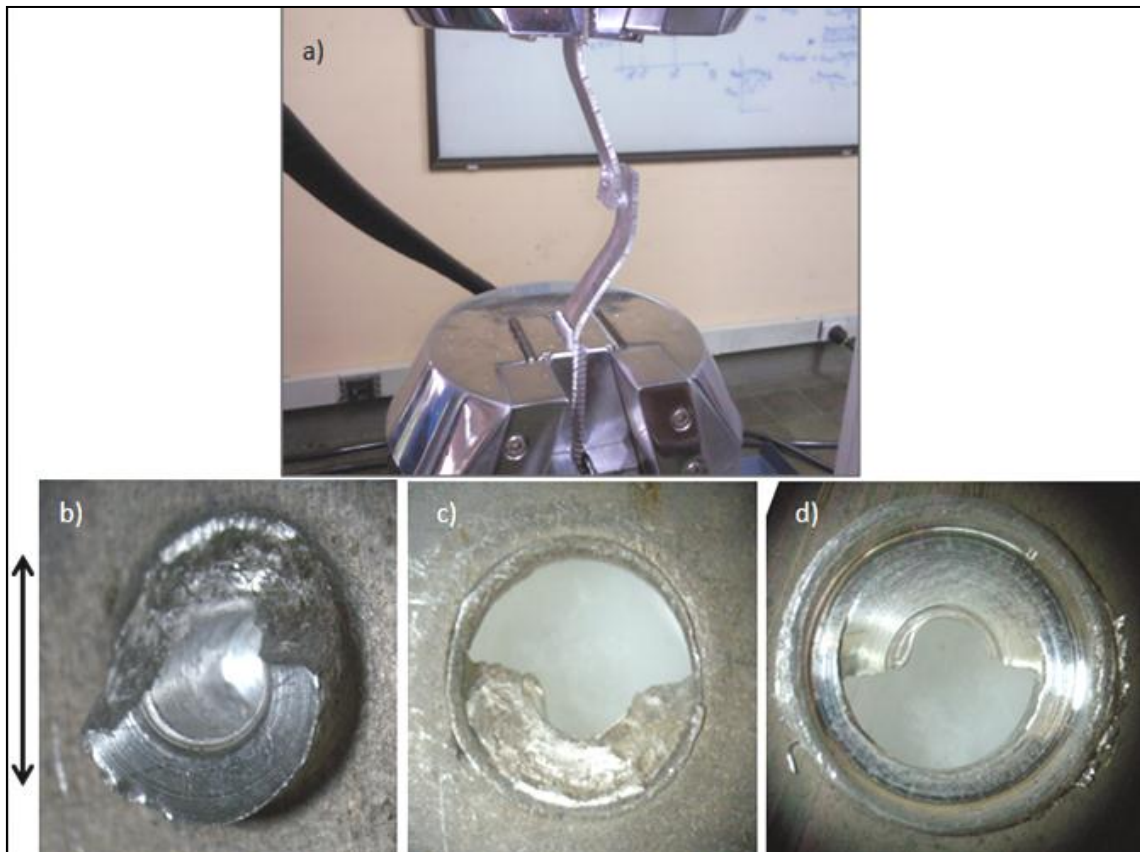


Figura 36. Macrografías de la fractura a fatiga de las SFAP a cargas bajas, a) Vista de la lámina inferior, b) vista posterior de la lámina superior, c) vista de la lámina superior.

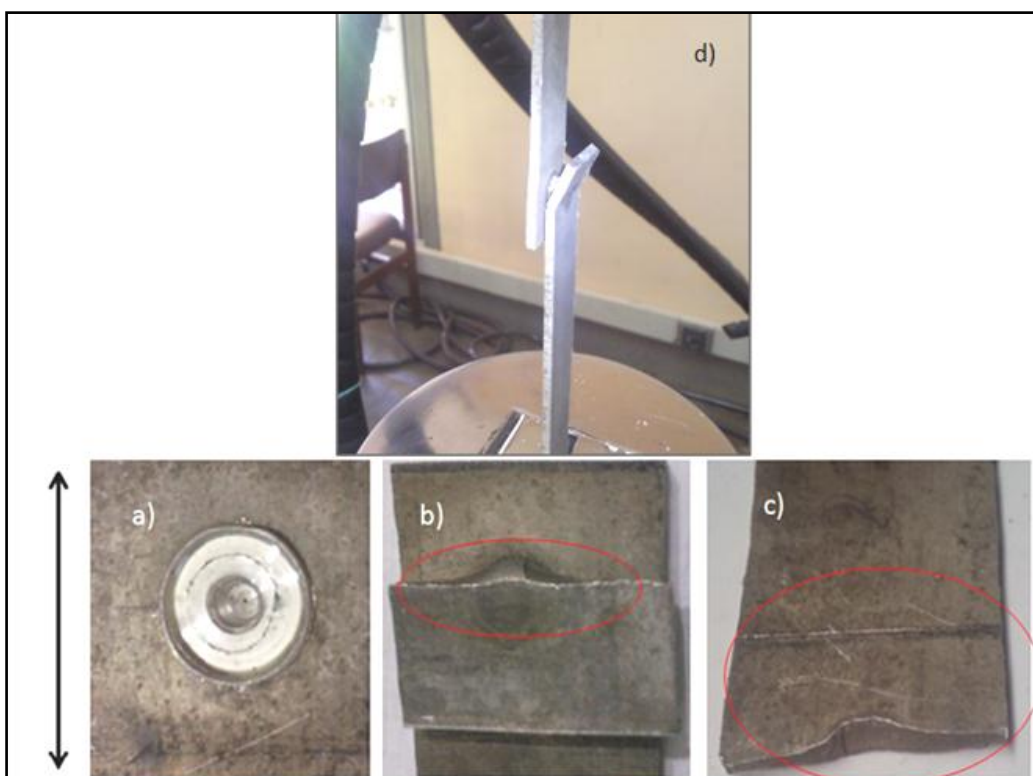


Figura 37. Macrografías de la fractura a fatiga de las SFAP a cargas altas, a) Vista superior de la lámina superior, b) vista posterior de la lámina superior, c) vista superior de la lámina inferior.

Las imágenes mostradas en la Figura 38 corresponden a la superficie de fractura a fatiga de las SFAP del tratamiento 112 realizado a 900 rpm, 5 s de sostenimiento y 48mm de profundidad; la Figura-a), corresponde a la lámina inferior la cual sufrió falla por fatiga la figura 38-b) muestra la zona de iniciación de la falla y propagación de la grieta, en la porción del botón de soldadura parcialmente desprendido, y a la zona de fractura, respectivamente. La Figura 38-b1) muestra las marcas de playa correspondiente a la región en la que se propaga la grieta, las marcas de playa, son características de una fractura cíclica [70], es posible apreciar una propagación circunferencial en el punto de soldadura.

Las micrografías MEB mostradas en la figura 37 corresponden a la zona de fractura, identificada como región b(1 y 2) en la Figura 1) se aprecian marcas de playa bien pronunciadas y alta deformación plástica en el material, con una medida promedio de 200 micras, la figura 38-2 muestra el desgarramiento del material producto de la intensificación del esfuerzo producido por la reducción del área resistente y finalmente la fractura por fatiga del material dúctil. Si se hubiera tomado una foto perpendicular a las marcas de playa, se observaría la profundidad de los “escalones” de las marcas de playa en la superficie de fractura de las SFAP, característicos de una fractura a fatiga de acuerdo a lo establecido por el *Handbook* de fractografía [70].

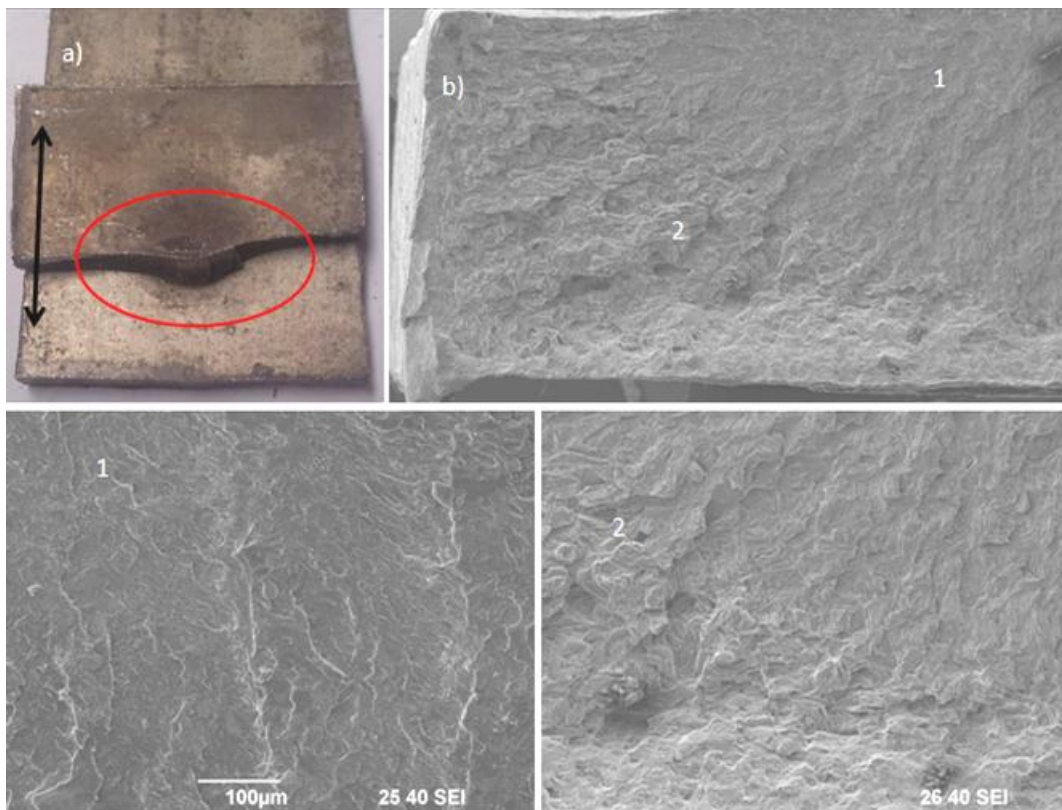


Figura 38. Imágenes de la fractura a fatiga, a) Macrografía de la fractura, b) zona de propagación identificada como región A en la imagen a), c) detalle de la micrografía b).

Fractura a fatiga en los remaches. La fractura en las uniones remachadas, al igual que en los ensayos de tensión, se presentó en el remache, como muestran las macrográficas de la Figura 39, sin presentar variaciones significativas respecto del número de ciclos. La Figura 39-a) muestra la vista posterior de la lámina superior, en la que se aprecia la superficie de fractura en la sección transversal del remache, se aprecian dos zonas correspondientes a la región de propagación de la grieta de fatiga y a la región de fractura a fatiga. En la Figura 39-b) se muestra la superficie de fractura de la lámina inferior, en la que se identifican las dos zonas descritas anteriormente, como las regiones A y B, siendo A la zona de propagación y B la zona de fractura a fatiga.

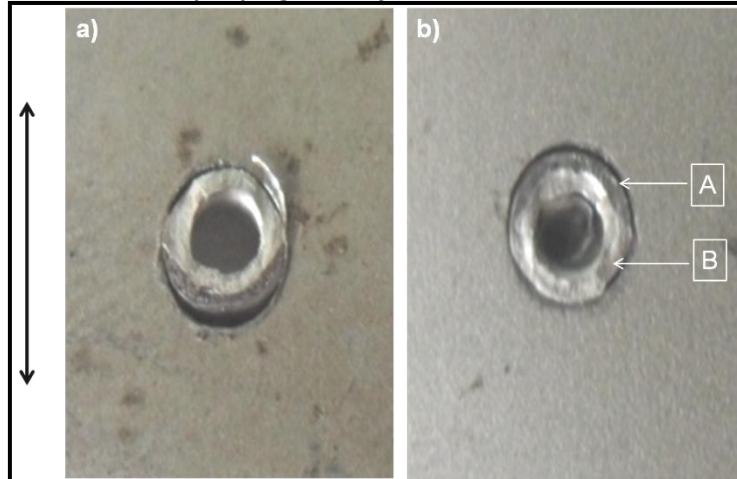


Figura 39. Macrográficas de la fractura a fatiga de las uniones remachadas. a) Vista posterior de la lámina superior, b) Vista superior de la lámina inferior. [78]

Las micrográficas MEB mostradas en la Figura 40 corresponden a la superficie de fractura a fatiga de las uniones remachadas, la Figura 40-a) muestra la zona de transición entre la región de propagación de la grieta de fatiga y la zona de fractura a fatiga. La Figura 40-b) muestra un detalle de la región de propagación, caracterizada por las marcas de playa propias de una falla por fatiga, y la Figura 40-c) muestra en detalle la zona de fractura en la que se aprecian *dimples* abiertos y altamente deformados en lo que podrían ser marcas de playa.

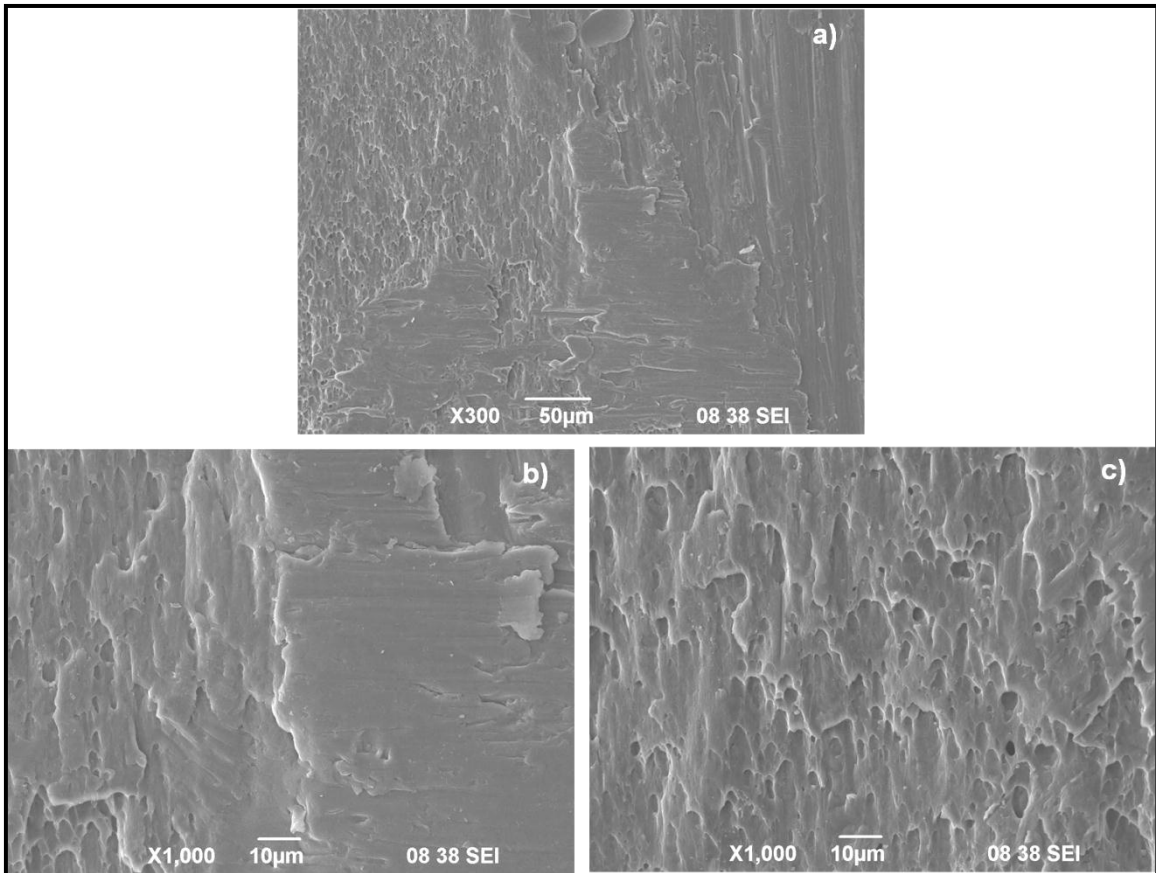


Figura 40. Micrografías MEB de la superficie de fractura de las uniones remachadas. a) zona de transición entre la propagación de la grieta y la superficie de fractura, b) detalle de la propagación de la grieta, c) detalle de la fractura a fatiga [78]

7 CONCLUSIONES

- ✓ Se comprueba que las SFAP producen refinamiento del tamaño de grano en la ZA, debido a la re-cristalización dinámica propia del proceso. La velocidad de rotación es parámetro fundamental en el crecimiento del tamaño de grano en la ZA producto del exceso de calor aportado en el proceso.
- ✓ Los valores de micro-dureza en las distintas zonas generadas por la re-cristalización dinámica y el aporte de calor hacen que los valores en la ZA sean comparables con los del metal base, al contrario que se presenta una caída en los valores de la micro-dureza en la ZATM producto de la variación de formas y tamaños de grano de esta zona.
- ✓ La velocidad de rotación mayor favoreció a la resistencia a tensión los tiempos de sostenimiento no fueron determinantes, puesto que tanto para 5s y 10s se vio una tendencia a la estabilización de la resistencia mecánica de las soldaduras, presentando valores de dureza muy similares, este comportamiento se vio también para las dos alturas del pin.
- ✓ La falla a tensión en las SFAP se atribuyó a la propagación de la grieta proveniente de la línea de mezcla por la ZATM, presentando una fractura de tipo interfacial, ya que se encontró una disminución en los valores de micro-dureza esto es propicio para el crecimiento de la falla.
- ✓ En la comparación de valores de resistencia a tensión entre las SFAP y las uniones remachadas, las SFAP superaron entre un 140 % y 250% las uniones remachadas que tuvieron falla por cizallamiento en la sección transversal del cuerpo del remache.
- ✓ Al contrario de la resistencia a la tensión el factor tiempo fue determinante en el comportamiento a fatiga de las SFAP, donde fue superior para las soldaduras realizadas con la menor velocidad de rotación, y presentando como tiempo óptimo 5 s de sostenimiento.
- ✓ El comportamiento a la fatiga de las SFAP fue superior al presentado por las uniones remachadas, el valor de la pendiente negativa para las SFAP presento el doble del valor de pendiente de las uniones remachadas.
- ✓ La falla a fatiga en las SFAP depende del valor de la carga empleada en el ensayo, a niveles de cargas altas, las juntas presentaron falla de tipo interfacial en el botón de soldadura, sin embargo la fractura ocurrió por la lámina inferior, en la región circundante al punto de soldadura y de manera perpendicular a la dirección de aplicación de la carga; mientras que para cargas bajas la fractura fue de tipo interfacial, similar a la encontrada en el ensayo de tensión.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hook formation and mechanical properties in AZ31 friction stir spot welds
Y.H. Yin, N. Sun, T.H. North, S.S. Hu
Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) 2062–2070
- [2] A. Gean, S. Westgate, J. Kucza, J. Ehrstorm. Static and fatigue behavior of spot welded 5182-0 aluminium alloy sheet. En: Weld Journal. Vol. 75, 1999, p. 80-86.
- [3] Tozaki Y, Uematsu Y, Tokaji K. A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance. En: Journal of Materials Processing Tech. Vol. 210, 2010, p. 844-851.
- [4] R. Sakano, K. Murakami, K. Yamashita, T. Hyoe, M. Fujimoto, M. Inuzuka, U. Nagao, H. Kashiki. Development of spot FSW robot system for automobile body members. En: Proceedings of the Third International Symposium of Friction Stir Welding, Kobe, Japan, 2001.
- [5] T. Iwashita, “Method and apparatus for joining”. Patente 6601751 B2, US, 2003.
- [6] Z. Zhang, X. Yang, J. Zhang, G. Zhou, X. Xu, B. Zou. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. En: Materials and Design. Vol. 32; 2011, p. 4461-4470.
- [7] D. Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch
S.M. Chowdhury, D.L. Chen, S.D. Bhole, X. Cao
Materials Science and Engineering A 527 (2010) 6064–6075
- [8] M. F. Gittos, Welding Al-Mg-Si Alloys. The Welding Institute, Reprinted from The Welding Institute Research Bulletin, Vol. 27, 1986.
- [9] O. Frigaad, O. Grong, O.T. Midling, Metallurgical Materials. Trans. A 32 (2001) 1189.
- [10] Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method
Shigeki Hirasawa, Harsha Badarinarayan, Kazutaka Okamoto, Toshio Tomimura, Tsuyoshi Kawanamia
Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) 1455–1463
- [11] H. Schmidt, J. Hattel, J. Wert, Model. Simul. Mater. Sci. Eng. 12 (2004) 143.
- [12] Y.J. Kwon, I. Shigematsu, N. Saito, Scripta Mater. 49 (2003) 785

- [13] Effects of process parameters on strength of Mg alloy AZ61 friction stir spot welds
Yuan-Ching Lin, Ju-Jen Liu, Ben-Yuan Lin, Chun-Ming Lin, Hsien-Lung Tsai
En: Materials and design pag 350-357.
- [14] Y. Li, L.E. Murr, J.C. McClure, Mater. Sci. Eng. A 271 (1999) 213.
- [15] S. Lathabai, M. Painter, G. Cantin, V. Tyagi. Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy. En: Scripta Materiala. Vol. 55, 2006, p. 899-902.
- [16] A. Addison, A. Robelou. Paper 2005-01-1255. En: SAE Special Publication SP-1959, SAE International, Warrendale, PA, 2005.
- [17] M. Fujimoto, M. Inuzuka, S. Koga, Y. Seta. Proceedings of IIW Preassembly Meeting at Nagoya, IIW Doc. III-1296-04, Japan, 2004.
- [18] T. Pan, A. Joaquin, D. Wilkosz, L. Reatherford, J. Nicholson, Z. Feng, M. Santella. Proceedings of the Fifth International FSW Symposium, September 2004, Metz, France, TWI, Abington, 2004.
- [19] G. Padmanaban, V. Balasubramanian Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy. An experimental approach, Materials and Design 30 (2009) 2647–2656
- [20] F. Hinrichs, C. Smith, B. Orsini, R. DeGeorge, B. Smale, P. Ruehl. Proceedings of the Fifth International FSW Symposium, September 2004, Metz, France, TWI, Abington, 2004.
- [21] A. Addison, A. Robelou. Proceedings of the fifth International FSW Symposium, September 2004, Metz, France, TWI, Abington, 2004.
- [22] P. Su, A. Gerlich, T. North. Paper 2005-01-1255. En: SAE Special Publication SP-1959, SAE International, Warrendale, PA, 2005.
- [23] S. Arul, T. Pan, P. Lin, J. Pan, Z. Feng, M. Santella. Paper 2005-01-1256. En: SAE Special Publication SP-1959, SAE International, Warrendale, PA, 2005.
- [24] Y. J Kwon, I. Shigematsu, N. Saito. Mechanical properties of fine-grained aluminum alloy produced by friction stir process. En: Scripta materialia. Vol. 49, 2003, p. 785 – 789.
- [25] H. Liu, H. Fujii, M. Maeda, K. Nogi. Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminium alloy. En: Journal Materials and processing. Technol. Vol. 142, 2003, p. 692-696.
- [26] L. Karthiketyan, V. S. Senthilkumar, K. A. Padmanabhan. On the role of process variables in the friction stir processing of cast aluminum A319 alloy. En: Materials and design. Vol 31, 2010, p. 761 – 771.

- [27] N.T. Kumbhar, S.K. Sahoo, I. Samajdar, G.K. Dey, K. Bhanumurthy. Microstructure and microtextural studies of friction stir welded aluminium alloy 5052. En: Materials and design. Vol. 32, 2011, p. 1657 – 1666.
- [28] G. Liu, L. Murr, C. Niou, J. McClure, F. Vega. Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminium. En: Scripta Materialia. Vol. 37, 1997, p. 355-361.
- [29] L. Murr, G. Liu, J. McClure. A TEM study of precipitation and related microstructures in friction-stir-welded 6061 aluminium. En: Journal Materials and Science. Vol. 33, 1998, p. 1243-1251.
- [30] M. Boz, A. Kurt. The influence of stirrer geometry on bonding and mechanical properties in friction stir welding process. En: Materials Design. Vol. 25, 2004, p. 343-347.
- [31] Standard Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products (Metric)¹ Designation: B557M – 10
- [32] P. Lin, S. Lin, J. Pan. Modeling of plastic deformation and failure near spot welds in lap shear specimens. SAE Technical paper No. 2004-01-0817. En: Society of automotive Engineering, Warrendale, PA, 2004.
- [33] W. Chien, J. Pan, S. Tang. A combined necking and shear localization analysis for aluminium sheets under biaxial stretching conditions. En: Int. J. Plast. Vol. 20, 2004, p. 1953-1981.
- [34] S. Bozzi, A. Helbert-Etter, T. Baudin, V. Klosek, J. Kerbiguet, B. Criqui. Influence of FSSW parameters on fracture mechanisms of 5182 aluminium welds. En: Journal of Materials Processing Technology. Vol. 210, 2010, p. 1429 – 1435.
- [35] Dieter, G. Mechanical Metallurgy, Singapore: McGraw-Hill Book Co, 1988. 751 p.
- [36] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. E466-07, West Conshohocken.: ASTM, 2007. p. 1-5.
- [37] Shigley, J.E. y Mitchell, L.D. Diseño en ingeniería mecánica. 3 ed. Col. Granjas Esmeralda: McGraw-Hill, 1985. 915 p.
- [38] Radaj, D.; Sonsino, C.M. y Fricke W. Fatigue assessment of welded joints by local approaches. 2 ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 2006. p.22
- [39] Y. L. Lee, J. Pan, R.B. Hathaway, M.E. Barkey. Fatigue Testing and Analysis. En: Burlington: Elsevier Butterworth–Heinemann, 2005. 414 p.

- [40] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard practice for statistical analysis of linear or linearized stress-life (S–N) and strain-life (e-N) fatigue data. E739-91, West Conshohocken.: ASTM, 2004. p. 1-7
- [41] T. L. M. Morgado, C. Branco, M. V. Infante. Previsão de vida à fadiga dos engates (rabetas) dos vagões de Transporte de carvão. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Mecânica Experimental. 2007, Vol 14, p. 35-43.
- [42] BRITISH STANDARD. Fatigue Design and Assessment of Steel Structures. BS 7608, London: British Standards Institution, 1993, 88 p.
- [43] P. Lin, J. Pan, T. Pan. Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welding in lap-shear specimens of aluminium 6111-T4 sheets. Part 2: Welds made by a flat tool. En: International journal of fatigue. Vol. 30, 2008, p. 90-105.
- [44] V. Tran, J. Pan, T. Pan. Fatigue behavior of aluminum 5754-O and 6111-T4 spot friction welds in lap-shear specimens. En: International Journal of fatigue. Vol. 30, 2008, p. 2175 – 2190.
- [45] D. Wang, C. Chen. Fatigue lives of friction stir spot welds in aluminum 6061-T6 sheets. In: Journal of materials processing technology. Vol. 209, 2009, p. 367-375.
- [46] Y. Uematsu, K. Tokaji, Y. Tozaki, Y. Nakashima. Fatigue behaviour of dissimilar friction stir spot weld between A6061 and SPCC welded by a scrolled groove shoulder tool. En: Procedia engineering. Vol. 2, 2010 p. 193 – 201.
- [47] Y. Uematsu, K. Tokaji, Y. Tozaki, T. Kurita, S. Murata. Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behavior of friction stir spot welded joints in Al–Mg–Si alloy. En: International journal of fatigue. Vol. 30, 2008, p. 1956 – 1966.
- [48] M. Fu, P. Mallick. Fatigue of self-piercing riveted joints in aluminum alloy 6111. En: International journal of fatigue. Vol. 25, 2003, p. 183-189.
- [49] X. Sun, E. Stephens, M. Khaleel. Fatigue behaviors of self-piercing rivets joining similar and dissimilar sheet metals. En: International journal of fatigue. Vol. 29, 2007, p. 370-386.
- [50] B. Li, A. Fatemi. An experimental investigation of deformation and fatigue behavior of coach peel riveted joints. En: International journal of fatigue. Vol. 28, 2006, p. 9-18.
- [51] R. Kuehl. Diseño de experimentos, Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación. 2. ed. Thomson Editores, S.A, 2001
- [52] Standard Practice for micro-etching metals and alloys E407-07.

- [54] Ávila J. Comportamiento a la fatiga de las uniones soldadas por fricción-agitación de la aleación de magnesio AZ31B, Tesis Maestría. Cali (Colombia): Universidad del Valle, 2011
- [53] Z.Y. Ma, R.S. Mishra, M.W. Mahoney, in: K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, T. Lienert (Eds.). Friction Stir Welding and Processing II, TMS, 2003, pp. 221–230.
- [54] Y.S. Sato, M. Urata, H. Kokawa, Metall. Mater. Trans. A 33 (2002) 625.
- [55] B. Heinz, B. Skrotzki, Metall. Mater. Trans. B 33 (6) (2002) 489.
- [56] Y.S. Sato, S.H.C. Park, H. Kokawa, Metall. Mater. Trans. A 32 (2001) 3023.
- [57] S.H. Kazi, L.E. Murr, K.V. Jata, M.W. Mahoney, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, D.P. Field (Eds.). Friction Stir Welding and Processing, TMS, Warrendale, PA, USA, 2001, p. 139
- [58] N. T. Kumbhar, S. K. Sahoo, I. Samajdar, G. K. Dey, K. Bhanumurthy. Microstructure and microtextural studies of friction stir welded aluminum alloy 5052. En: Materials and design. Vol. 32, 2011 p. 1657 – 1666.
- [59] A.K Gupta, D.J, Lloyd, Court S.A. Precipitation hardening in Al–Mg–Si alloys with and without excess Si. En: Materials Science and Engineering A. Vol. 316 (2001), p. 11–17.
- [60] M.R.W.S. Abdalab, J.C. Garcia de Blasb, C. Barbosa, O. Acsehrad. Thermoelectrical power analysis of precipitation in 6013 aluminum alloy. En: Materials characterizations. Vol. 59, 2008, p 21 – 277
- [61] D.J. Chakrabartia, David E. Laughlin. Phase relations and precipitation in Al–Mg–Si alloys with Cu additions. En: Progress in Materials Science. Vol. 49, 2004, p. 389–410.
- [62] Structure and properties of magnesium cast alloys
L.A. Dobrzański, T. Tański, L. Cizek, Z. Brytan
Journal of Materials Processing Technology 192–193 (2007) 567–574
- [63] H. Shin, Y. Jung. Characteristics of dissimilar friction stir spot welding of bulk metallic glass to lightweight crystalline metals. En: Intermetallics. Vol. 18, 2010, p. 2000–2004.
- [64] G. Liu, L.E. Murr, C.S. Niou, J.C. McClure, F.R. Vega, Scripta Mater. 37 (1997), 355.
- [65] L.E. Murr, G. Liu, J.C. McClure, J. Mater. Sci. 33 (1998) 1243.
- [66] Y.S. Sato, H. Kokawa, M. Enmoto, S. Jogan, Metall. Mater. Trans. A 30 (1999), 2429.

[67] M. Merzoug, M. Mazari, L. Berrahal, A. Imad. Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys. En: Materials and design. Vol. 31, 2010, p. 3023-3028.

[68] D Choi, B. Ahn, C. Lee, Y. Yeon, K. Song, S. Jung. Formation of intermetallic compounds in Al and Mg alloy interface during friction stir spot welding. In: Intermetallics. Vol. 19, 2011, p. 125 – 130.

[69] D. Mitlin, V. Radmilovic, T. Pan, J. Chen, Z. Feng, Santella M. Structure–properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminum. En: Materials science and engineering A. Vol. 441, 2006, p. 79 – 96.

[70] ASM International. Handbook fractography. Vol 12. ASM Handbook Committee. 1987. 857 p.

[74] Congress Magnesium Alloys and their Application

[75] Microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium alloy recycled by solid-state process from different size chips
ShuyanWu, Zesheng Ji, Tielei Zhang

[76] Soldadura por fricción-agitación de aleaciones ligeras una alternativa a nuestro alcance

[77] Effects of process parameters on strength of Mg alloy AZ61 friction stir spot welds
Yuan-Ching Lin, Ju-Jen Liu, Ben-Yuan Lin, Chun-Ming Lin, Hsien-Lung Tsai

[78] Quintana K. comportamiento a fatiga de soldaduras por fricción-agitación de punto de aleación de aluminio estructural, Tesis Maestría. Cali (Colombia): Universidad Del Valle, 2012

[79] ASM Metals HandBook Volume 9 - Metallography and Microstructures

ANEXOS

Anexo A. Medición de tamaño de grano en la ZA de las SFAP y en el MB.

Determinación de tamaño de Grano en ZA y Metal Base				
Zona Agitada			Promedio Metal Base	
Tratamiento	$\varnothing$ (μm)	Tamaño ASTM	$\varnothing$ (μm)	Tamaño ASTM
111	4,3	12,5	49,2	5,4
211	5,4	11,8		
121	5,8	11,6		
221	6,0	11,5		
112	3,3	13,2		
212	6,7	11,2		
122	9,2	10,2		
222	9,0	10		

Anexo D. Resultados del ensayo de fatiga para las SFAP realizadas a 5s, 900rpm y 4,8mm con penetración del 75% en fresadora convencional 0,7 y 0,2 de la carga máxima.

Resistencia a la rotura 2249 (N)	Datos curva S-N				
	Resistencia (%)	Carga Media (N)	Amplitud (N)	Carga Max (N)	N Ciclos
	0,7	865,5	708,1	1573,6	88300
	0,5	618,2	505,8	1124	218332
	0,3	370,9	303,5	674,4	1036000
	0,2	247,3	202,3	449,6	2000000

Anexo E. Resultados de barrido de Micro-Durezas.

Datos de Micro-Dureza a 1,3mm De La Placa Superior y a 0,65mm del Borde del agujero (Zona Agitada)								
Distancia (mm)	Tratamiento							
	111	211	121	221	112	212	122	222
0,65	85,7	74,1	83,8	62,8	96,6	128,4	82,3	61,8
1,95	85,4	73,4	64,5	61,7	88,8	93,0	67,7	60,3
3,25	71,0	73,5	61,1	61,5	77,5	79,7	65,7	59,5
4,55	67,3	56,5	70,9	61,1	72,0	73,8	64,8	61,1
5,85	74,2	52,3	60,4	54,9	70,5	66,6	81,1	54,9
7,15	68,7	51,4	53,9	57,8	54,8	65,8	59,3	52,8
8,45	56,6	48,6	55,1	56,4	51,8	66,7	57,6	48,6
9,75	59,3	44,9	49,3	51,8	52,5	66,1	50,4	46,3
11,05	54,7	42,5	46,7	47,3	49,1	55,4	51,5	44,8

Anexo F. Resultados de carga Axial y Temperaturas

Fuerza Axial (N)		
Tratamiento	Fuerza Max (N)	Temperatura °C
111	4229,2	248
211	4606,5	283
121	3111,3	345
221	3312,1	335
112	4959,1	245
212	4480,4	257
122	2797,4	322
222	2645,5	365

Anexo G. Determinación del S_{ut} del Material Base

Determinación Del S_{ut} Del Material Base				
Tick (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	S_{ut} (Mpa)	Fuerza (N)
3,1	9,6	29,76	215,7	6419,2
3,1	10,1	31,31	189,7	5939,5
3,1	9,75	30,225	210,4	6359,3
		Promedio (Mpa)	205,3	6239,4

Anexo B. Resultados del ensayo de tensión para las SFAP y las uniones remachadas

Resistencia A la Rotura		
Tratamiento	Tensión(N)	Promedio
1116	2680	
1117	2133	2331
1118	2180	
1214	3828	
1215	3980	4064
1216	4385	
2114	3000	
2115	2984	2992
2116	2992	
2211	4180	
2212	4365	4114
2213	3796	
1127	2375	
1129	2448	
112(16)	2362	2249
112(11)	1810	
2125	2643	
2123	2441	
212(14)	2927	2601
2126	2392	
122(13)	3355	
1224	2596	
122(11)	3882	3468
1227	4039	
222(11)	3663	
2226	3819	
2228	3666	3715
2223	3713	

Uniones Remachadas		
Probeta	Tensión N	Promedio
UR -1	1703,26	1640,53
UR -2	1556,06	
UR -3	1662,28	

Anexo C. Resultados del ensayo de fatiga para las SFAP, evaluadas al 0,5 de la carga máxima.

Fatiga Nº Ciclos		
Tratamiento	Ciclos (n)	promedio
1115	170873	123446
111(15)	114126	
1112	85338	
1211	28291	31938
1212	35000	
1218	32524	
211(n6)	17836	30666
2117	45846	
211(11)	28315	
2215	35000	39250
2217	50000	
2218	32750	
112(14)	184992	218332
1125	213628	
112(15)	256377	
2121	36541	37525
212(13)	34429	
212(10)	41606	
1222	54777	68696
122(14)	98308	
1226	53004	
222(15)	114074	131242
2222	58447	
2227	221206	