



INVESTIGACIÓN DE MAESTRIA

**EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DEL PROCESO DE
SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN DE LA ALEACIÓN
5052-H34 EN LA INDUSTRIA NAVAL**

Patricia González Mosquera

UNIVERSIDAD DEL VALLE

ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES

MAESTRIA DE INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN MATERIALES

Enero 2019



INVESTIGACIÓN DE MAESTRIA

**EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DEL PROCESO DE
SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN DE LA ALEACIÓN
5052-H34 EN LA INDUSTRIA NAVAL**

Director:

Dr. Fernando Franco Arenas

Codirectora:

Dra. Karen Johanna Quintana Cuellar

UNIVERSIDAD DEL VALLE

ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES

MAESTRÍA DE INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN MATERIALES

Enero de 2019

Tabla de contenido

Tabla de contenido	3
Listado de Figuras	5
Listado de tablas	7
Lista de anexos	8
Dedicatoria	9
Agradecimientos	10
Introducción	11
Objetivos	14
2.1 Objetivo General	14
2.2 Objetivos Específicos	14
Resumen	15
Summary	17
Marco conceptual	19
4.1 Proceso de Soldadura por fricción Agitación SFA (FSW, en inglés)	19
4.2 Influencia de las variables del proceso	21
4.3. Las propiedades mecánicas	22
4.3.1 Resistencia Mecánica, Ductilidad y Dureza.	22
4.4 La relación V_R / V_A	23
4.5 La microestructura	25
4.6 Las propiedades de resistencia a la corrosión	30
4.6.1 Curvas de Potencial Tafel	31
4.6.2 Potencial de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)	39
4.6.3 Determinación del potencial de picaduras	42
4.6.4 Correlación parámetros V_A , V_R , Fuerza axial máxima y torque.	44
Pregunta de investigación	45
Metodología	46
5.1 Revisión bibliográfica	46
5.2 Selección y caracterización de materiales	47
5.2.1 Metal base	47
5.2.2 Procedimientos de soldadura	49

5.2.3 Diseño experimental	52
5.3 Caracterización del material base y las uniones soldadas	56
5.3.1 Ensayos de tracción	56
5.3.2 Ensayo de macrodureza.....	57
5.3.3 Ensayo de Doblado.	57
5.3.4 Ensayo de Corrosión	58
5.3.5 Caracterización microestructural	60
Análisis de resultados	62
6.1 Ensayo de Resistencia a la tensión	62
6.2 Macrodureza.....	67
6.3 Curvas de Potencial Tafel	69
6.4 Potencial de EIS	72
6.5 Tamaño de grano.....	74
6.6 Microestructura	77
6.7 Correlación defectos de soldadura por fricción	81
6.8 Ensayo de Doblado.....	82
6.9 Correlación de ensayos con la relación V_R/V_A	82
6.10 Tipo de fractura.....	88
Conclusiones.....	91
Referencias Bibliográficas	93
Anexos	97

Listado de Figuras

Figura 1. Componentes del proceso SFA (Ávila, 2011).....	20
Figura 2. Esquema del proceso de SFA sobre juntas a tope (Ávila, 2011) ..	20
Figura 3. Zonas micro-estructurales de la SFA de la Aleación de Al 7075-T651 (Mishra & Ma, 2005)	27
Figura 4. Microestructura de las regiones de la SFA para AA6063-T5, a) metal base a 200X, b) zona termo mecánicamente afectada ZTMA a 500X, c) región de transición entre la ZTMA y la ZA a 200X d) Núcleo de la soldadura NS a 300X (Quintana, 2016)	28
Figura 5. Representación esquemática de la nucleación por collar durante el proceso de recristalización dinámica de pico simple (Doherty et al., 1997) .	30
Figura 6. Curvas de polarización anódica. (E-log i) (Genescá, n.d.)	32
Figura 7. Curvas de polarización catódica. (E-log i) (Genescá, n.d.).....	33
Figura 8. Diagrama de Evans (Genescá, n.d.)	34
Figura 9. Comportamiento lineal y logarítmico de una curva de polarización.(Gil, 1997).....	35
Figura 10. a) Curva de polarización en coordenadas aritméticas. b) Curva en coordenadas semilogarítmicas. (Gil, 1997)	37
Figura 11. Curva correspondiente a la polarización por activación. a) η vs i. b) η vs log (i) (Gil, 1997)	38
Figura 12. Diagrama de Nyquist del circuito simple, para diferentes valores de n .(Piratoba Morales et al., 2010)	41
Figura 13. Factor de Picadura (Gil, 1997).....	42
Figura 14. Formación de una picadura. (Gil, 1997)	43
Figura 15. Comportamiento del torque en función de la rotación para todas las velocidades de soldadura, con una velocidad de penetración de 8 mm/min. Torque en la fase de avance(Quintana, 2016).	44
Figura 16. Comportamiento de la fuerza axial máxima en función de la rotación para todas las velocidades de soldadura, con una velocidad de penetración de 8 mm/min. Fuerza en la fase de avance(Quintana, 2016).....	44
Figura 17. Esquema de la metodología experimental	46
Figura 18. Aspecto de las placas soldadas por fricción agitación.....	47

Figura 19. a) Dimensiones de la herramienta del proceso SFA dimensiones en mm (Ávila, 2011) b.) Montaje de las muestras experimentales en el Centro de mecanizado COPPE.....	50
Figura 20. a) Dimensiones de la herramienta del proceso SFA en mm b.) Montaje de las muestras experimentales.	51
Figura 21. Muestras unidas mediante SFA	51
Figura 22. Diagrama de proceso del diseño de experimentos.....	52
Figura 23. Esquema de corte de las muestras y placa obtenida al soldar....	53
Figura 24. Probeta para ensayos de tensión ASTM E8. Dimensiones en mm	57
Figura 25. Ensayo de doblado para la AA5052-H34	58
Figura 26. Resistencia a tensión para $V_R = 600 \text{ rpm}$, 900 rpm y 1200 rpm ; $V_A = 100 \text{ mm/min}$, 200 mm/min y 300 mm/min	63
Figura 27. Efecto del factor V_A y V_R sobre la tensión	64
Figura 28. Resultados de % Elongación para cada condición.....	66
Figura 29. Comportamiento de elongación comparado V_A y $V_R \text{ (rpm)}$	67
Figura 30. Puntos de toma de macrodureza en cada muestra.....	68
Figura 31. Distribución de la dureza Rockwell E en cada condición.....	69
Figura 32. Curvas Tafel para combinaciones de velocidad de rotación (V_R) y Velocidad de avance (V_A)	71
Figura 33. Interacción V_R , V_A y Velocidad de corrosión.....	72
Figura 34. Circuito eléctrico equivalente de <i>Randles</i> utilizado para simular.	73
Figura 35. Curvas de potencial de EIS para las diferentes condiciones de V_R y V_A	74
Figura 36. Tamaños de grano en metal base y zona termomecánicamente afectada.....	75
Figura 37. Interacción parámetros V_A y V_R con el tamaño de grano	76
Figura 38. Interacción V_a y V_R con el tamaño de grano en la zona de transición	77
Figura 39. Macrográficas Al5052H34.....	78
Figura 40. Micrográficas metal base aleación 5052-H34 tomadas con luz polarizante a 200X.....	78
Figura 41. Microestructuras zona de transición Aleación 5052H34, 200X ...	79
Figura 42. Micrográficas de la zona agitada aleación 5052-H34.....	80
Figura 43. Relación de defectos por cada condición aleación 5052-H34	81

Figura 44. Probetas ensayo de doblado AA5052-H34	82
Figura 45. Resistencia a Tensión Vs V_R/V_A	83
Figura 46. % Deformación unitaria Vs. V_R/V_A	84
Figura 47. Curva de polarización de Tafel y el cociente V_R/V_A	85
Figura 48. Defectos vs V_R/V_A	86
Figura 49. Tamaño de grano vs V_R/V_A para el metal base	87
Figura 50. Tamaño de grano vs V_R/V_A para la zona de transición	88
Figura 51. Macrografía superficie de fractura de la unión soldada por SFA, en prueba de tensión	89

Listado de tablas

Tabla 1. Comparación de parámetros de proceso distintas aleaciones de aluminio	24
Tabla 2. Composición química Aleación 5052-H34. (Dieguez & Svoboda, 2011) ...	47
Tabla 3. Propiedades mecánicas aleación 5052-H34. (Quintana, 2016)	47
Tabla 4. Condiciones fundamentales de las aleaciones del aluminio (Moreno Zavala, 2015)	48
Tabla 5. Clasificación de la condición H (Moreno Zavala, 2015)	48
Tabla 6. Niveles de dureza para el estado (Moreno Zavala, 2015)	49
Tabla 7. Características del Centro de mecanizado de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle	50
Tabla 8. Variables que influyen en el proceso	53
Tabla 10. Valores del SCerror varianza de la tensión y elongación	64
Tabla 11. Comparación por Resistencia a tensión. factor V_A	65
Tabla 12. Prueba postanova por Resistencia a tensión, factor V_R	65
Tabla 13. Prueba de Tukey elongación%, T	66
Tabla 14. Macro durezas HRE reportadas por variables de SFA	67
Tabla 15. Correlación de variables del proceso SFA y Densidades de corrosión ...	70
Tabla 16. Resistencia a Tensión Vs V_R/V_A	83
Tabla 17. % Deformación unitaria Vs. V_R/V_A	84
Tabla 18. Curva de polarización de Tafel y el cociente V_R/V_A	85
Tabla 19. Defectos vs V_R/V_A	86
Tabla 20. Tamaño de grano vs V_R/V_A	87

Lista de anexos

Anexo 1. Validación de supuestos.....	97
Anexo 2. Programa con el que se realizó el proceso de soldadura en el centro de mecanizado del taller de la escuela de Ingeniería mecánica.....	98
Anexo 3. Programa con que se realizó el proceso de preparación de las probetas para tensión en el centro de mecanizado.	98
Anexo 4. Utillaje para el mecanizado de las probetas para tensión	99
Anexo 5. Herramienta utilizada.....	99
Anexo 6. Montaje de las placas.....	100
Anexo 7. Soldaduras obtenidas.....	100
Anexo 8. Tabla valores de defectos	101

Dedicatoria

A mi amada familia, por su colaboración y apoyo en las diferentes etapas del proceso.

Agradecimientos

Al CEFCOM de la Universidad de Rio De Janeiro – Brasil en cabeza del profesor José Luís Lopes da Silveira por su colaboración, disposición y trabajo en equipo para intercambiar saberes y el aporte del material para desarrollar el trabajo.

Al Taller de Mecánica de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle por ser un facilitador de los diferentes procesos y disposición para proporcionar herramientas, equipos y conocimiento.

Al laboratorio de metalografía de la Escuela de Ingeniería de Materiales por su aporte constante en las diferentes etapas del proceso.

A Karen Johana Quintana Cuellar por su aportes acertados y exigentes en el proceso.

A mi director Fernando Franco Arenas, por su guía y aporte constante durante la investigación.

Introducción

La soldadura por fricción-agitación SFA, es un proceso que se realiza totalmente en estado sólido, el cual puede ser implementado en la unión de láminas de metal (hasta ahora principalmente para aluminio) sin llegar a su punto de fusión. "FSW" la soldadura por fricción (en inglés) ha sido inventada, patentada y desarrollada para su propósito industrial por TWI (The Welding Institute), en Cambridge, UK en 1991 (Threadgill, Leonard, Shercliff, & Withers, 2009)

En la soldadura por fricción-agitación, la herramienta de sección y un pin cilíndrico, son suavemente aproximados a las áreas a juntar las cuales son enfrentadas de tope. Las partes tienen que ser aseguradas a una mesa de respaldo para evitar que sean separadas por la fuerza a la que son sometidas. El calor de la fricción entre el cilindro rotatorio con un tratamiento H13 que garantiza poco desgaste durante el proceso, el hombro, y las piezas a ser soldadas causan que los materiales se ablanden sin llegar al punto de fusión permitiendo al hombro seguir la línea de soldadura a través de las piezas a trabajar. El material en estado plástico ha sido agitado por el pin y desplazado de una pieza a la otra facilitando de esta forma el flujo del mismo. Durante el avance, el cordón se forma por la velocidad de soldadura en la dirección de desplazamiento, el proceso deja a su paso un cordón de fase sólida entre las dos piezas.

La soldadura por fricción-agitación puede ser usada para unir láminas de aluminio y planchas sin la necesidad de usar material de aporte o ningún tipo de gases de protección; los materiales de un espesor de 1.6 hasta 30 mm pueden ser soldados con total penetración, sin porosidad o grietas internas; de esta manera se puede obtener exitosamente soldaduras sanas y de muy baja distorsión en la mayoría de las aleaciones de aluminio, incluyendo aquellas consideradas "difíciles de soldar" con las técnicas convencionales (Thornton, 1996), (Dehghani, 2013).

En la actualidad existe una gran variedad de procesos especiales de soldadura que vienen a llenar las necesidades de algún procedimiento específico. Las

aleaciones de Aluminio y Magnesio presentan baja relación resistencia-peso, alta resistencia a la corrosión y buena resistencia mecánica; características importantes al momento de seleccionarlas en aplicaciones aeronáuticas, en la industria automotriz (Mishra & Ma, 2005) y trabajos de conductividad eléctrica a largas distancias en el caso del aluminio; cualidades que la constituyen en una excelente alternativa dado que brinda propiedades mecánicas superiores a los métodos convencionales de soldadura (Mishra & Ma, 2005).

El proceso SFA, posee grandes ventajas como son: las temperaturas de trabajo no alcanzan el punto de fusión de los materiales, por tanto, los consumos de energía se disminuyen, los contaminantes provocados en el proceso son nulos y no se requiere de personal especializado. Diversos autores reportan que la SFA proporciona soldaduras sanas, control del tamaño de grano, buenas propiedades mecánicas, económicas, reproducibles y amigables con el medio ambiente (Ávila, 2011).

Entre los materiales que han sido soldados exitosamente por Fricción agitación, se incluye una gran variedad de aleaciones de aluminio (las series 2xxx, 5xxx, 7xxx, 8xxx), la unión de Plomo, Cobre, Magnesio, aleaciones de Titanio y las aleaciones Al-Li son las más recientes (Cabibbo, Forcellese, & Simoncini, 2016). Este proceso también ha demostrado ser efectivo en el soldado de aleaciones disímiles y aún materiales no metálicos (Moshwan, Yusof, Hassan, & Rahmat, 2015). De acuerdo al vertiginoso avance que ha tenido el estudio del proceso SFA con el paso del tiempo, se resalta su aplicación en tuberías; lo cual indica que no se limita solo a superficies lineales si no que abre un amplio abanico de posibilidades y permite además, hacer reparaciones en el sitio de producción generando así una gran ventaja a nivel de costos de proceso (Defalco & Steel, 2009).

La SFA, se ha utilizado de manera exitosa en la construcción de paneles para cubiertas, tanques, suelos, cascos y superestructuras (Urbano & Ávila, 2011). Las aleaciones de aluminio ampliamente utilizadas para aplicaciones marinas son series 5xxx (Shanavas & Dhas, 2017). Estas aleaciones están reemplazando el acero en muchas aplicaciones debido a su peso liviano,

buena soldabilidad, buena ductilidad, alta resistencia mecánica y alta resistencia a la corrosión. Entre las aleaciones de aluminio de la serie AA5xxx, las aleaciones de aluminio AA5052 presentan una alta resistencia a la corrosión y, por lo tanto, son especialmente adecuadas para aplicaciones en el entorno industrial y marino (Shanavas & Dhas, 2017).

El objetivo principal de esta propuesta ha sido evaluar la alternativa de utilizar las uniones soldadas por fricción agitación SFA de aleaciones de aluminio, al aplicarla en la soldadura de estructuras de embarcaciones pequeñas y demás implementos de la industria naval; donde actualmente ésta se realiza mediante el proceso convencional de soldadura por arco eléctrico, el cual genera altos costos, mayor gasto de energía y condiciones especiales. Se han comparado las propiedades mecánicas con las metalúrgicas a nivel microestructural y macroestructural, dejando de manifiesto las ventajas en este campo de aplicación gracias a la mejora en propiedades del proceso SFA y los análisis obtenidos pueden utilizarse como fuente de consulta para la puesta en marcha de proyectos a nivel industrial.

Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento mecánico y químico en relación con las transformaciones de fase de las aleaciones de aluminio 5052-H34 soldadas por el proceso de soldadura por fricción agitación para su uso en la industria naval.

2.2 Objetivos Específicos

- Establecer las condiciones de soldadura por fricción agitación óptimas para la obtención de uniones sanas.
- Evaluar la influencia de las variables del proceso de soldadura por fricción agitación sobre las transformaciones y la microestructura de las uniones soldadas de la aleación 5052-H34.
- Determinar el comportamiento mecánico y químico de las uniones soldadas por fricción agitación de la aleación 5052-H34.
- Establecer la relación entre el comportamiento mecánico y químico con la microestructura y las propiedades mecánicas de las uniones soldadas por fricción agitación de la aleación 5052-H34

Resumen

La aleación AA5052-H32 es una aleación de aluminio altamente resistente a la corrosión, utilizada para aplicaciones estructurales automotrices y marinas. En general, el bajo costo de producción y la alta resistencia a la corrosión en medios salinos, favorece el uso de los procesos de SFA en la industria naval para la unión de partes fabricadas en aleaciones de aluminio estructural (Gean, Westgate, Kucza, & Ehrstrom, 1999). Las propiedades mecánicas y sanidad de las uniones producidas resultan superiores a las obtenidas por procesos de arco convencionales (Cabot, Moglioni, & Carella, 2003).

En esta investigación se analizó el proceso de soldadura por fricción agitación (SFA) para la unión de placas de aluminio de la aleación 5052-H34 trabajada a 600, 900 y 1200 rpm con velocidades de avance de 100, 200 y 300 mm/min de acuerdo al trabajo reportado por (Quintana, 2016); para hacer una caracterización de su microestructura, valores de macrodureza, tipo de fractura, comportamiento mecánico, resistencia a la corrosión con la ayuda de curvas de potencial se determinó el comportamiento a corrosión mediante corrientes Tafel y EIS; así como al interacción de la relación V_R/V_A y, de esta manera evaluar su aplicación en ambientes marinos dadas las características de la misma. Para ello se planteó un diseño aleatorio completamente al azar con estructura factorial 3X3. Para medir de manera cualitativa la calidad de la soldadura se realizan pruebas de doblado y como un paso adicional de la investigación se correlacionó dicha caracterización con el comportamiento de la fuerza axial máxima y el torque obtenido por (Quintana, 2016) en su investigación doctoral

La revisión bibliográfica de la investigación se centró en las características y las propiedades mecánicas de uniones soldadas por el proceso de soldadura por fricción-agitación en aleaciones de aluminio, Se analizó la influencia de los diferentes parámetros del proceso sobre las propiedades mecánicas de las uniones soldadas, tal como el tipo de máquina utilizada, material de la herramienta, velocidades de rotación y velocidad de avance.

Palabras claves: Soldadura por fricción-agitación (SFA), aleaciones de aluminio, AA5052, macrodureza, doblado, resistencia a la corrosión, microestructura.

Summary

The AA5052-H32 aluminum alloy is an alloy highly resistant to corrosion and has been used in automotive and marine structural applications. Usually, the production cost and the high resistance in saline environments, encourage the use of FSW processes in the naval industry for joining parts, which are made of structural aluminum alloys (Gean et al, 1999). The mechanical properties and joints health produced are higher than the conventional current arc processes Cabot, Moglioni and Carella, 2003).

In this research, the friction stir welding process (FSW) was analyzed for joining aluminum alloy 5052-H34 plates, worked at 600, 900 and 1200 rpm with speed of advance at 100, 200 and 300mm/min to make a characterization of its microstructure, macrohardness values, type of fracture, mechanical behavior and corrosion resistance with the aid of potential curves, the corrosion behavior is determined by Tafel and EIS currents, as well as the interaction of the VR / VA ratio. By this way, it is tested its application on marine environments given its characteristics. To this end, was used a random design completely random with factorial structure random with 3x3 factorial. To qualitatively measure the quality of the welding, bending test were done and as an additional step in the research, this characterization was correlated with the behavior of the maximum axial force and the torque obtained by (Quintana, 2016) on his doctoral research.

The bibliographic review in the research was focused on the characteristics and mechanical properties of joints welded by the friction-stir welding process in aluminum alloys. It was analyzed the influence of the different parameters of the process on the mechanical properties of the welded joints. Such as the type of machine used, material of the tool, rotation speeds and speed of advance.

Keywords: Friction-stir welding (FSW), AA5052 aluminum alloys, macrohardness, bending, corrosion resistance, microstructure.

Marco conceptual

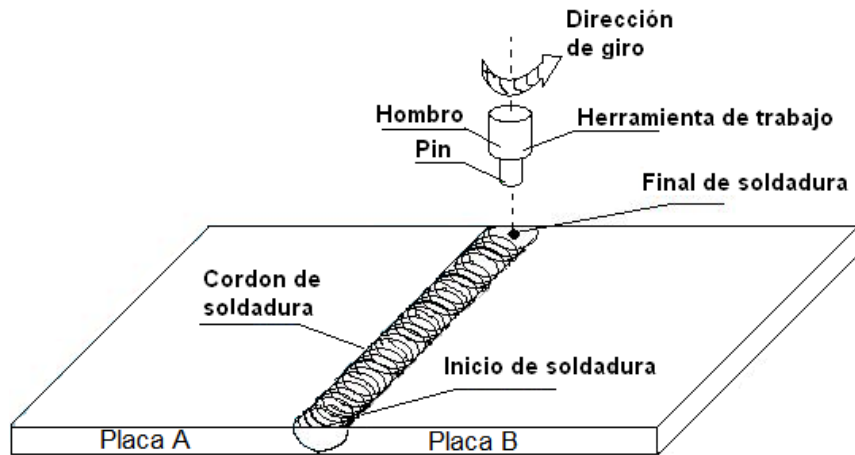
Al hacer la revisión bibliográfica encontramos que el número de autores que ya ha abordado el proceso de soldadura por fricción, ha ido mostrando un gran aumento, debido a los beneficios que éste proceso ofrece y el auge que va ganando en la industria el tipo de uniones soldadas mediante FSW durante la última década.

4.1 Proceso de Soldadura por fricción Agitación SFA (FSW, en inglés)

De acuerdo con Quintana (2016) La herramienta giratoria de trabajo ingresa en la línea de unión entre las dos placas, el pin penetra hasta que el hombro toca las superficies de las placas, todo esto sucede mientras las placas son calentadas por contacto entre las superficies (fricción). Cuando se ha alcanzado la profundidad y temperatura suficiente para la realización de la soldadura (sin llegar al punto de fusión) se procede a dar avance a la herramienta. La herramienta se desplaza combinando dos movimientos, uno lineal a lo largo de la unión a soldar y otro rotacional, estos movimientos propician el calentamiento del material por fricción con el hombro y el pin. El pin debido a su forma, favorece el desplazamiento de material de la placa B hacia la placa A y viceversa, de esta manera agita el material homogéneamente, dependiendo de la geometría, inclinación y sentido de giro de la herramienta, el material además de ser agitado circularmente puede ser desplazado hacia abajo o arriba, convirtiendo la línea de unión en un solo material (Mishra & Ma, 2005).

Todo este fenómeno de calentamiento de las piezas, movimiento del material y alta deformación plástica, son dependientes principalmente de los parámetros de velocidad de avance (V_A) y la velocidad de rotación (V_R); la combinación adecuada de estas variables produce soldaduras de alta calidad. La figura 1 muestra cada una de los componentes del proceso anteriormente explicado.

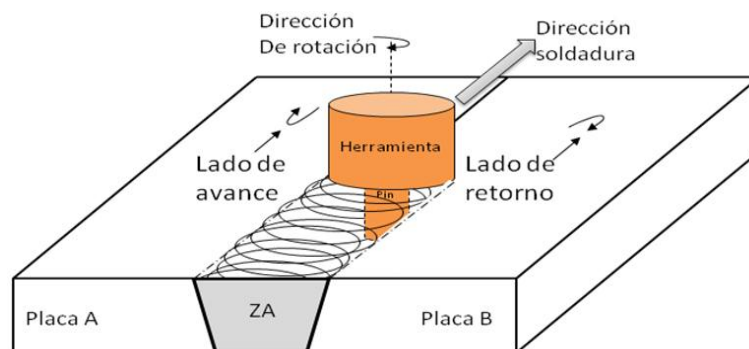
Figura 1. Componentes del proceso SFA (Ávila, 2011)



Como reporta (S.R. Ren, 2011), El SFA es un proceso en estado sólido, lo cual representa grandes ventajas a nivel de proceso, propiedades mecánicas, infraestructura, costos, baja tensión residual y distorsión y, reduce la ocurrencia de defectos.

En la figura 2 se observa la soldadura de SFA, lo cual muestra que no es simétrica, en el lado que coinciden la dirección de la velocidad tangencial debido a la rotación de la herramienta y la dirección de avance es denominado como lado de avance, el lado en dirección contraria es el lado de retorno o repliegue (Thomas, 2007)

Figura 2. Esquema del proceso de SFA sobre juntas a tope (Ávila, 2011)



La zona soldada sufre un proceso de estado sólido, promovido por el calor generado durante la fricción entre la herramienta al rotar y el metal a soldar. La zona plastificada, inducida en el material por la herramienta giratoria, se extruye desde lado de avance, hacia el lado de retroceso de la herramienta durante su traslación constante a lo largo de la línea de unión. No se requiere material de relleno ni gas de protección. Las temperaturas generadas están entre 50 – 100 °C por debajo del punto de fusión del metal, por lo tanto, no hay cambio de volumen durante el proceso. (Cabibbo et al., 2016).

4.2 Influencia de las variables del proceso

(Cárdenas, Franco, Ávila, & Jaramillo, 2011) realizó una exploración experimental de la calidad y la resistencia mecánica de las soldaduras por fricción agitación, SFA, de la aleación de Aluminio-Magnesio 5052-H38, en este estudio fueron utilizadas diversas condiciones de velocidad de rotación y soldadura, con el objetivo de obtener uniones soldadas con mejores propiedades mecánicas para una aplicación estructural; los autores encontraron que las juntas obtenidas con mayor velocidad de rotación presentan mejores resultados y que con el aumento de la velocidad de soldadura incremento la eficiencia mecánica, en un 75%.

La velocidad de rotación tiene incidencia sobre el calor generado; con respecto a esto (Urbano & Ávila, 2011) encontraron que, a mayores velocidades de rotación, es mayor la cantidad de calor localizado alrededor de la herramienta lo cual facilita el flujo del material plástico, además, para altas rotaciones, el aumento en la velocidad de soldadura reduce el ingreso de calor por unidad de

longitud y afectan en menor medida el material alrededor de la junta. Esto genera mejores propiedades mecánicas de la junta debido a una óptima mezcla o agitación del material bajo el hombro de la herramienta y una reducción del tamaño de la zona afectada por el calor –ZAC y la zona termomecánicamente afectada – ZTMA.

4.3. Las propiedades mecánicas

La SFA, generalmente garantiza mejores propiedades de tracción, elongación y fatiga que la soldadura por fusión (Cabibbo et al., 2016). por lo que ha sido usada en gran variedad de aplicaciones en el caso del aluminio, como son: tanques de combustible, ferrocarriles y en poca medida en puentes. Otras aplicaciones interesantes son en la industria aeroespacial, estructural y naval. En general las propiedades mecánicas y de sanidad de las uniones producidas por SFA resultan superiores a las obtenidas por procesos de arco convencionales (Cabot et al., 2003)

Durante el proceso de SFA, se observa el efecto de los parámetros en las propiedades presentadas a continuación.

4.3.1 Resistencia Mecánica, Ductilidad y Dureza.

Según el estudio realizado por D'Urso (2017), quien evaluó el efecto de los parámetros del proceso SFA en las propiedades mecánicas y el comportamiento a la corrosión, la mejor condición en términos de resistencia mecánica se obtuvo usando una velocidad de rotación igual a 1500 rpm; en esta investigación no se trabajó con este valor debido a que ensayos preliminares se obtuvo mayores defectos para esta condición, el valor 35 mm/min para la velocidad de avance puede considerarse también una condición óptima entre los valores analizados. D'Urso por su experiencia afirma que las mejores condiciones se logran cuando los parámetros del proceso dan como resultado una alta relación V_R/V_A , lo cual es proporcionado por velocidad

de rotación alta por una baja velocidad de avance, lo que significa una mayor contribución térmica a la región soldada.

La dureza en la región soldada es significativamente menor con respecto al material de base); donde la alta temperatura alcanzada durante el proceso SFA puede considerarse como la principal causa de este efecto suavizante dado que se da un crecimiento de grano se favorece un aumento en la ductilidad. Algunos análisis de microdureza (D'Urso, Giardini, Lorenzi, Cabrini, & Pastore, 2017) permiten afirmar que el ancho de la región ablandada y los valores de microdureza registrados en la misma zona están influenciados por los parámetros del proceso de soldadura. En particular, un aumento en la contribución térmica (por ejemplo, alta velocidad de rotación y baja velocidad de avance) da como resultado una región de ablandamiento más ancha y menores valores de dureza.

4.4 La relación V_R / V_A

(Ren, Ma, & Chen, 2007) encontraron que los picos de temperatura obtenidos en SFA aumentan con la razón de avance y rotación de la herramienta, V_R/V_A , así mismo anotó, que el incremento en la dureza de la zona agitada se debe a altas razones de rotación; también la resistencia y elongación de la aleación 6061Al-T651 disminuye con el decrecimiento de la velocidad de avance y aumenta con la velocidad de rotación. La relación V_R/V_A en la Tabla 1 reporta las relaciones encontradas por varios autores es una forma apropiada de determinar las propiedades de los elementos soldados.

De la relación V_R/V_A (ELANGO VAN, K.; BALASUBRAMANIAN, V.; BABU, 2009) dice que a mayores velocidades de rotación habrá mayor cantidad de calor en torno a la herramienta generando un mayor flujo plástico, adicionalmente una mayor velocidad de avance disminuye el ingreso de calor por unidad de longitud y esto produce una menor modificación del material alrededor de la unión; lo cual proporciona una mejora en las propiedades mecánicas de la junta permitiendo que el pin realice una mejor agitación del material debajo del hombro a su vez que se logra una reducción del tamaño de la ZAC y la ZTMA (Urbano & Ávila, 2011).

En la tabla 1, se presentan diferentes relaciones V_R/V_A de estudios previos que generan propiedades características en cada una de las aleaciones trabajadas.

Tabla 1. Comparación de parámetros de proceso distintas aleaciones de aluminio

Año	Aleación	Material de la herramienta	Velocidad de rotación V _R (RPM)	Velocidad de avance V _A (mm/min)	Relación V _R / V _A (r/mm)	Ref.
2007	AA7075-T7351	H13	200 - 800	127 - 279	1,57 - 6,30	(PEW, J. W., NELSON, T. W., SORENSEN, 2007)
	AA5083-H32		200 - 700	127 - 279	1,57 - 2,51	
	AA2024-T3		175 - 350	51- 152	3,43 - 2,30	
2010	7050-T7451	H13	150 - 1000	102 - 612	1,47 - 1,63	(UPADHYAY, P., REYNOLDS, 2010)
2010	AA356	H13	63 - 1400	28 - 450	5,36 - 2,29	(CUI, S., CHEN, Z. W., ROBSON, 2010)
2012	AA5083-H111		300 - 1100	50 - 700	6 - 1,57	(LEITÃO, C., LOURO, R., RODRIGUES, 2012)
	AA6082-T6		300 - 1300	200 - 1100	1,5 - 1,18	
2012	AA5083-H112	H13	420 - 500	80, 120	5,25 - 4,17	(KUMAR, R., SINGH, K., PANDEY, 2012)
2013	AA2024-T4		600 - 1000	40 - 120	15 - 8,33	(SU, H., WU, C., PITTNER, A., 2013)
2014	AA5052-H32 AA5754-H22		1120	50	22,4	(Kesharwani, Panda, & Pal, 2014)
			1120	125	8,96	
			1120	200	5,6	
			1400	50	28	

			1400	125	11,2	
			1400	200	7	
			1800	50	36	
			1800	125	14,4	
			1800	200	9	
2017	AA5052	H13	800	30	26,7	(Bodaghi & Dehghani, 2017)
			1000	50	20	
			1250	80	15,6	

De la misma forma (Mishra & Ma, 2005) y (Nandan, Debroy, & Bhadeshia, 2008) hacen un compendio de investigaciones donde se demuestran las bajas temperaturas alcanzadas en la SFA en comparación con métodos convencionales. Como se presenta en la expresión abajo relacionada, el pseudo índice (RH) brinda una indicación del calor que ingresa a la unión soldada, donde la velocidad de rotación es el factor determinante en la generación de calor en la SFA, debido a que este se encuentra al cuadrado.

$$RH = \frac{V_R^2}{V_A}$$

4.5 La microestructura

Debido a la generación de calor del proceso, se generan cambios microestructurales; dadas las zonas claramente definidas por la distribución del calor en la soldadura SFA se encuentra que la deformación plástica excesiva y las temperaturas del proceso de SFA permiten recrystalización dinámica y desarrollo de texturas dentro de la zona de la soldadura. En la figura 3 se presenta la clasificación general establecida por diferentes autores (Betancourt, 2009), (Mishra & Ma, 2005) y (Nandan et al., 2008) quienes plantean la existencia de tres zonas microestructurales además del metal base (MB) la zona agitada (ZA) o *nugget*; la zona termo-mecánicamente afectada (ZTMA) y la zona térmicamente afectada (ZTA).

(Sato et al., 2004) reportan que el material base en la aleación 5052 tiene una estructura de grano grueso alargada, mientras que las zonas de agitación consistían en estructuras de grano equiaxiales. El tamaño del grano en la zona de agitación aumentó con el incremento en el aporte de calor durante el proceso de SFA. Sato et al. (2004), indican que las aleaciones de Aluminio generalmente se vuelven frágiles con el incremento en el tamaño de grano debido a que la fractura intergranular se produce más fácilmente. Los autores examinaron la deformación en la zona de agitación de la aleación de Al 5052, la cual aumentó con el aumento del tamaño de grano de hasta 10 μm , más allá del cual disminuyó. Tanto el mayor tamaño de grano como la menor densidad de dislocaciones y sub-límites son las características microestructurales necesarias para obtener una adecuada deformación plana en la zona de agitación de la aleación de Aluminio 5052. (Sato et al., 2004)

Para las aleaciones de aluminio, (Ren et al., 2007) caracterizaron cada una de las zonas, y encontraron que la ZTA presenta la afectación de un ciclo térmico, pero no soporta ninguna deformación plástica. Mahoney et al. (2007), argumentan que en la ZTA de una aleación Al-Mg-Si se pueden alcanzar temperaturas por encima de 250° C propiciando un tratamiento térmico en la zona, la ZTA muestra la más baja dureza y resistencia, ocurriendo en la mayoría de los casos la fractura por esta zona.

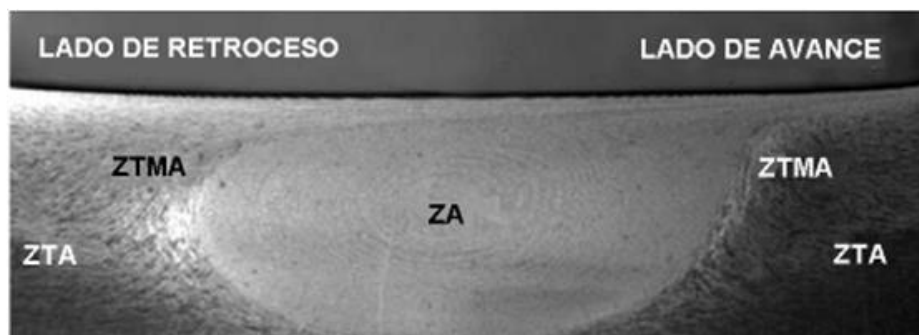
(Ávila, 2011) encontró que en el análisis microestructural de la aleación AZ31B se observan granos equiaxiales en la zona agitada para la SFA con reducción del 88% con respecto al material base. Las uniones por GTAW en la zona fundida presentaron segunda fase precipitada de Al_xMg_y en borde de grano; los granos presentan una forma equiaxial con reducción en su tamaño del 62% con respecto al material base.

(Cabibbo et al., 2016) afirman que las modificaciones de la microestructura que ocurren en la zona central de la SFA, por lo general, son atribuidas al fenómeno de recrystalización dinámica que da lugar a la formación de granos equiaxiales finos. En esta zona recrystalizada se puede dar una ligera reducción de las propiedades mecánicas de la aleación soldada. Debido a esto, es necesario hacer una selección precisa de los parámetros del proceso

(velocidad de rotación, velocidad de soldadura, ángulo de inclinación y profundidad de penetración) y de la geometría de la herramienta (geometría y tamaño del pin y del hombro). Cabbibo Asegura también que en general, aumentando la velocidad de rotación de la herramienta y disminuyendo la velocidad de soldadura, las propiedades mecánicas de la aleación se pueden optimizar (Kumbhar, Sahoo, Samajdar, Dey, & Bhanumurthy, 2011), esto podría presentarse debido a que a pesar de que se genera más calor no habrá el tiempo suficiente para que se presente la interacción.

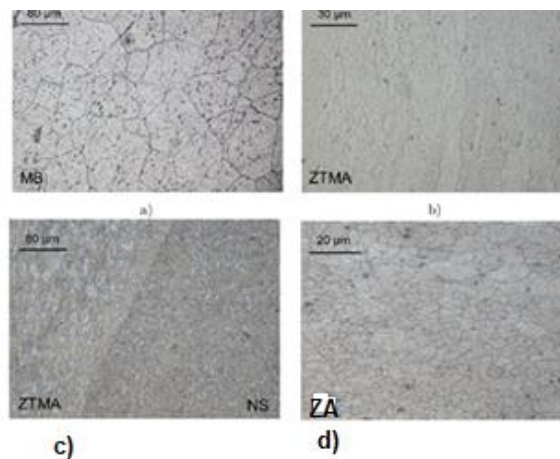
El proceso de SFA produce agitación y recristalización dinámica del material (Quintana, 2016) que se refleja en una microestructura fina y equiaxial, producto del refinamiento del grano, en la zona agitada. En la figura 3 es posible apreciar que a medida que se avanza desde el metal base hasta la zona agitada se presenta un refinamiento del tamaño de grano en el material.

Figura 3. Zonas micro-estructurales de la SFA de la Aleación de Al 7075-T651 (Mishra & Ma, 2005)



En la figura 4 se observa la microestructura característica en el proceso SFA de la aleación de Aluminio AA6063-T5, en la Figura 4a., Se observan granos grandes, de tamaño variable y levemente orientados en la dirección de extrusión del material. En la Figura 4b se muestran granos altamente deformados y orientados en la dirección del flujo del material. La figura 4c. exhibe la variación del tamaño de grano entre las regiones: granos deformados y de diferentes tamaños en la ZTMA y, en la figura 4d. se presentan granos finos y equiaxiales como consecuencia del fenómeno de recristalización dinámica, propio del proceso de SFA.

Figura 4. Microestructura de las regiones de la SFA para AA6063-T5, a) metal base a 200X, b) zona termo mecánicamente afectada ZTMA a 500X, c) región de transición entre la ZTMA y la ZA a 200X d) Núcleo de la soldadura NS a 300X (Quintana, 2016)



Otro efecto que se presenta a nivel de microestructura es la reducción de tamaño de grano debido a la recrystalización dinámica dependiente del grado de deformación y de la temperatura del proceso. La disminución del tamaño de grano favorece el aumento de la dureza, el límite elástico, la resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga. (Betancourt., 2008) (Dieter, 1998.)

La bibliografía reporta que los procesos que controlan el tamaño de grano resultante son la recrystalización estática y dinámica, (Poliak & Jonass, 1996) (Ahlblom, 1982) , los cuales dependen a su vez de la microestructura de partida del material, su composición química y de las condiciones de deformación (temperatura, velocidad de deformación y el grado de deformación solicitada). La recrystalización dinámica continua (Gourdet & Montheillet, 2000), (Doherty et al., 1997), de acuerdo a estos autores el

término “dinámica” hace referencia a que la recrystalización empieza y termina con el proceso de conformado todavía en marcha, lo que no ocurre en el caso de la recrystalización estática donde la recrystalización ocurre durante el recocido después de pasar por un proceso (o varios) de conformado en frío. Cuando se habla de “continuo” se refiere a que el proceso de formación de nuevos granos se consigue de forma continua y progresiva con la deformación.

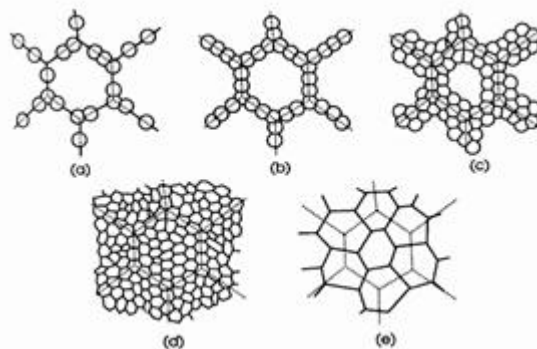
La recrystalización dinámica también tiene una manifestación tanto mecánica como microestructural. Dado que, durante la misma, se presenta la nucleación y el crecimiento de nuevos granos que permiten eliminar una parte de las dislocaciones generadas durante la etapa de endurecimiento y restauración dinámica. Dicho fenómeno asegura su continuidad hasta el estado de saturación puesto que los primeros núcleos formados son susceptibles de endurecer dando lugar a nuevos núcleos, propiciando así el comienzo de otra ola de recrystalización, la cual está compuesta de dos procesos fundamentales: nucleación y crecimiento.

El proceso de nucleación es un factor crítico en la determinación del tamaño y la orientación de los granos resultantes. El mecanismo de migración del límite de grano inducido por deformación (Gourdet & Montheillet, 2000) es uno de los mecanismos reconocidos para la explicación del proceso de nucleación y consiste en una migración de una parte del borde de grano de alto ángulo de desorientación. En esta migración genera detrás de él un área libre de dislocaciones y luego ocurre la coalescencia de subgranos. La orientación de los nuevos granos es similar a la orientación de los granos de donde proceden, sobre todo en bajos valores de deformación.

El fenómeno de recrystalización dinámica se produce por la heterogeneidad de deformación en la microestructura; las zonas de alto grado de heterogeneidad pueden generarse durante el proceso de deformación como ocurre cuando hay presencia de partículas de segunda fase, o bien ser el resultado del propio proceso de deformación como la migración del límite de grano inducido por deformación. La orientación de los nuevos granos recrystalizados se asocia a los sitios de nucleación donde la recrystalización dinámica se da, lo cual

afectará la textura resultante. Los bordes de granos iniciales se consideran un sitio de nucleación preferencial como muestra la figura 5, porque separan regiones de clara diferencia de orientación (Peczak, 1995).

Figura 5. Representación esquemática de la nucleación por collar durante el proceso de recrystalización dinámica de pico simple (Doherty et al., 1997)



En la recrystalización estática, los nuevos granos crecen hasta ocupar toda la estructura deformada. Además, la estructura resultante está totalmente recrystalizada y sin tensión interna. En cambio, en la recrystalización dinámica, los nuevos granos formados endurecen y crecen simultáneamente afectando tanto al comportamiento mecánico como la microestructura. La microestructura resultante de la recrystalización dinámica de pico simple es mucho más fina que la obtenida en la recrystalización estática, debido a que la nucleación es más intensa y continua, mientras el crecimiento está frenado por el endurecimiento (Doherty et al., 1997).

4.6 Las propiedades de resistencia a la corrosión

Las aleaciones de aluminio ampliamente utilizadas para aplicaciones marinas son las de la serie 5xxx donde el principal elemento de aleación es el magnesio. Estas aleaciones se utilizan ahora como una alternativa al acero en muchas aplicaciones debido a su peso ligero, buena soldabilidad, buena conformabilidad, alta resistencia y alta resistencia a la corrosión (Anon, 1994). De la serie de AA5xxx, las aleaciones de aluminio AA5052-H32 son

excelentes en resistencia a la corrosión y, debido a esto son especialmente adecuadas para aplicaciones en el entorno industrial, aplicaciones estructurales automotrices y marinas (Kesharwani et al., 2014).

De otro lado (Bodaghi & Dehghani, 2017) afirma que la aleación AA5052 es ampliamente utilizado en la industria de la construcción, automovilística, aeroespacial y marina; debido a su excelente resistencia a la corrosión, soldabilidad, alta resistencia a la fatiga y resistencia moderada.

Actualmente los estudios sobre SFA de las aleaciones de aluminio de la serie 5XXX aún están en progreso, se usan como alternativa al acero en muchas aplicaciones debido a su peso ligero, buena soldabilidad, buena conformabilidad, buena resistencia y resistencia a la corrosión (Moshwan et al., 2015).

La aleación AA5052 tiene la mayor resistencia a condiciones ligeramente alcalinas comunes a las aleaciones de la serie 5000 y una excelente resistencia a la corrosión en atmósferas superando la de 5005, por ello se usa frecuentemente en aplicaciones marinas, también es conocido que se puede anodizar para mejorar la resistencia a la corrosión haciendo más robusta la película protectora de la superficie (Architecture, Composition, & Mechanical, n.d.)

Para determinar la resistencia a la corrosión de la aleación 5052-H34, se realizarán pruebas de Curvas de polarización Tafel, Potencial de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) y determinación del potencial de picaduras que permitirán conocer la velocidad de corrosión para cada una de las condiciones en estudio.

4.6.1 Curvas de Potencial Tafel

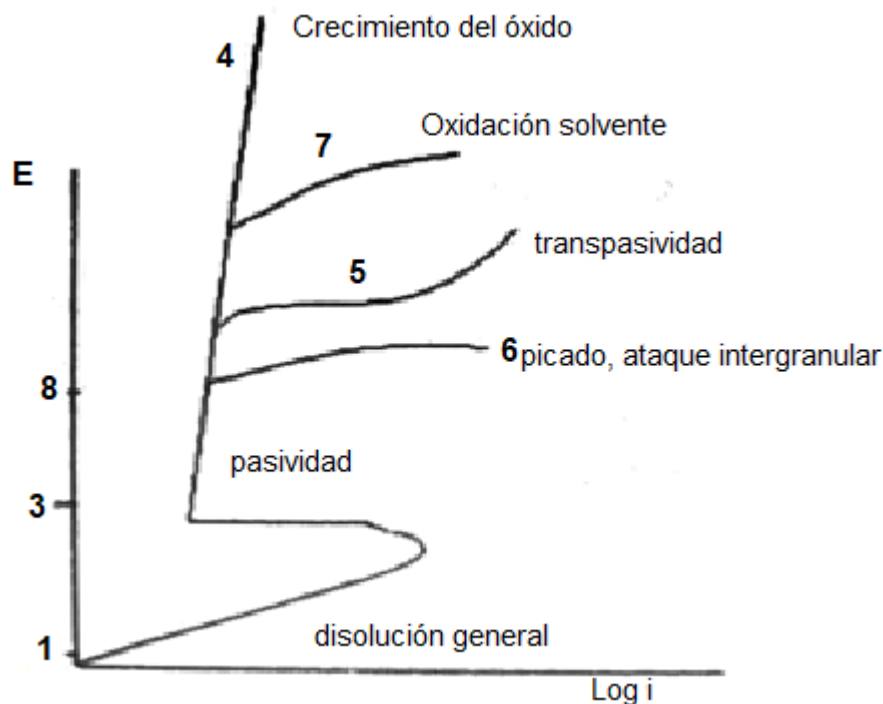
Con la ayuda de esta prueba se evalúa la velocidad con la que se produce la corrosión de tipo generalizada. Este es un ensayo no destructivo, siempre y cuando se trabaje con los potenciales apropiados. Para obtener dicha velocidad se utilizan las curvas de TAFEL, el equipo utilizado generalmente es un potenciómetro, con el cual se mide la conductividad y la respuesta ante corrosión inducida de un material. Para la realización del ensayo, se construye

una celda de tres electrodos, de manera que el electrodo de trabajo se conecta a la propia muestra, el electrodo de referencia a un electrodo de plata Ag/AgCl y como contra-electrodo se utiliza un hilo de platino de altísima pureza (Pérez de Ciriza Gárriz, 2017).

Las curvas de polarización muestran la interdependencia entre el potencial de electrodo y la intensidad de corriente (relaciones i vs. E), pueden determinarse aplicando una corriente constante y midiendo el potencial, se repite este procedimiento para diferentes valores de corriente y se mide en cada caso el nuevo potencial alcanzado.

También se puede determinar la relación i - E al aplicar un potencial constante y determinar la forma en que varía la corriente. En la figura 6 se puede observar las características de la curva de polarización anódica.

Figura 6. Curvas de polarización anódica. (E -log i) (Genescá, n.d.)

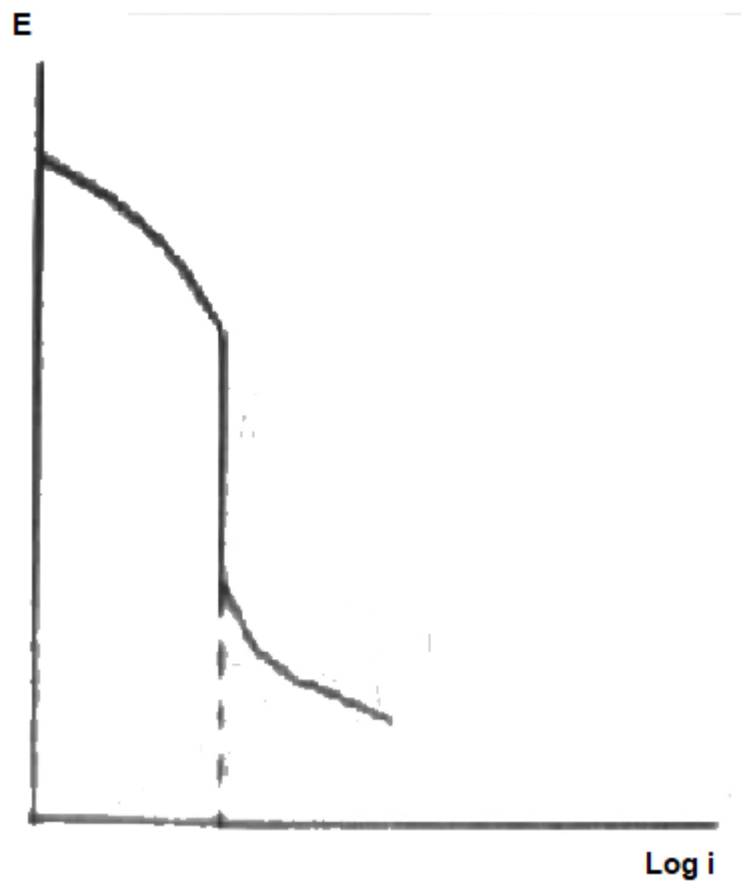


En la zona 1-2 de la figura 6 se observa que el metal se disuelve en forma activa esto se da si la sobretensión es pequeña se suele presentar una relación lineal entre la sobretensión y el logaritmo de la corriente. Para la zona 2-3 aparece una zona de pasividad (sobre el metal se forma una película muy

delgada de óxido que impide su disolución). Si la película pasivante es aisladora, al aumentar el potencial el óxido pasivante va aumentando su espesor sin que haya un aumento notorio de la corriente, es la zona 3-4. (por ejemplo: Al, Zr, Te, etc). Para la curva 5 se puede decir que cuando la película pasivante está formada por elementos que pueden oxidarse a una valencia mayor y dar productos solubles, se aprecia también un aumento de corriente acompañado por disolución del metal. Situación que se conoce como transpasividad, y está presente en elementos tales como el cromo, o el manganeso y sus aleaciones. En la curva 6 se da que por encima de cierto potencial cuando hay presentes ciertos iones "agresivos" cloruros, nitratos, bromuros, etc. la película pasivante puede perder estabilidad y se produce un fenómeno de corrosión localizada, el picado que lo exhiben metales tales como el hierro, cromo, etc.

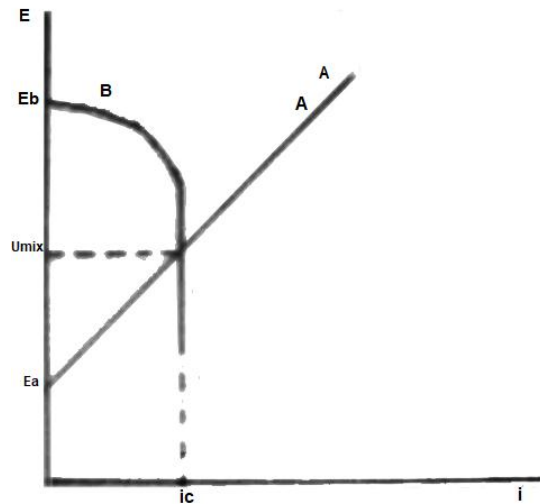
En la curva 7 se da que, si el óxido pasivante es buen conductor de electrones una vez alcanzado el potencial de desprendimiento de oxígeno, la solución comenzará a descomponerse y se notará aumento en la corriente de corrosión. Si el potencial se puede mantener entre los valores 3 y 8 la corrosión será despreciable y se dice que hay protección anódica. Por debajo de 1 también la corrosión se torna imposible. En la figura 7 se presentan las características más frecuentes de las curvas de polarización catódica (Genescá, n.d.)

Figura 7. Curvas de polarización catódica. (E-log i) (Genescá, n.d.)



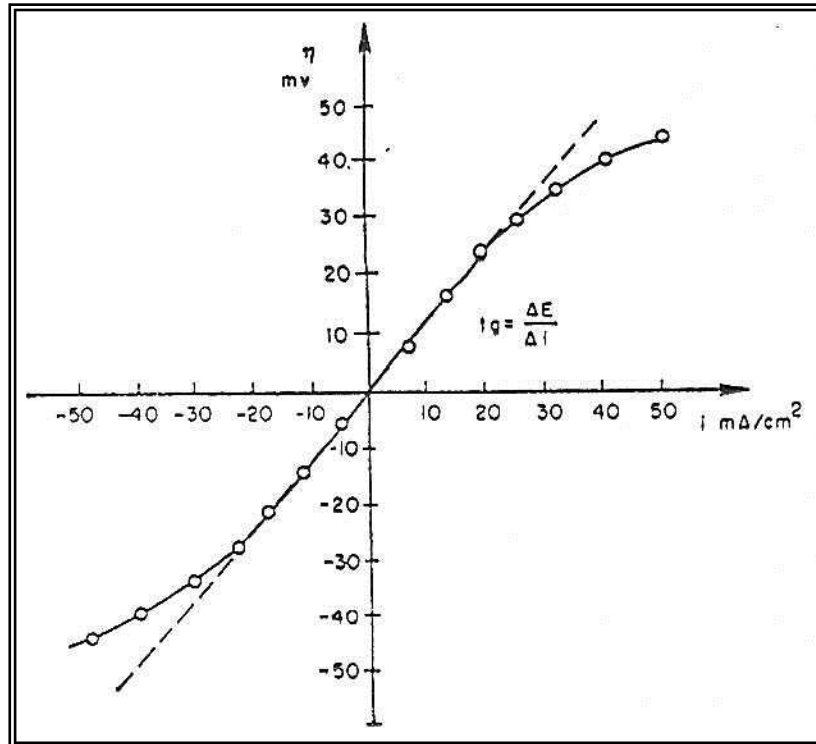
En la figura 8 se observa el diagrama de Evans y sus zonas características donde A es la curva de polarización anódica, B es la curva de polarización catódica, E_a es el potencial de equilibrio de la reacción anódica, E_b es el potencial de equilibrio de la reacción catódica, E_{mix} es el Potencial de corrosión e I_c es la corriente de corrosión. Se representan para un material sobre un mismo diagrama las curvas de polarización anódica y catódica. (Genescá, n.d.). Donde se cortan las dos curvas queda determinado el potencial de corrosión y la intensidad de corriente de corrosión.

Figura 8. Diagrama de Evans (Genescá, n.d.)



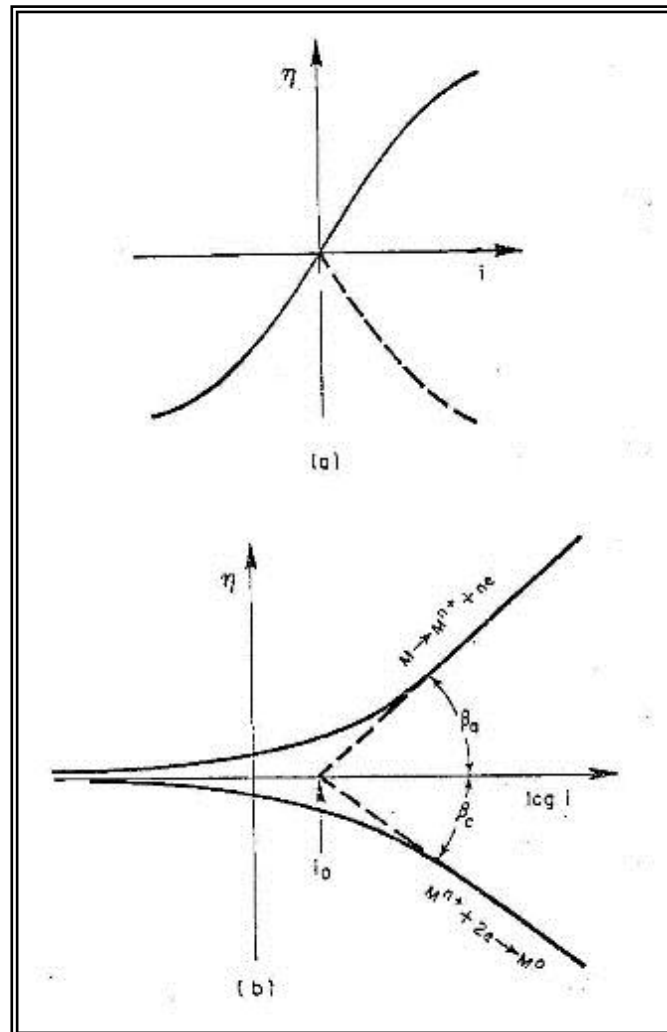
En la figura 9 se presenta el comportamiento lineal y logarítmico de una curva de polarización, es importante anotar que la parte logarítmica de la curva es de gran importancia para el estudio de sistemas corrosivos electroquímicos dado que la mayoría de estos sistemas se encuentran a potenciales de corrosión muy alejados del equilibrio y para los cuales sus cinéticas se guían por la ley logarítmica.

Figura 9. Comportamiento lineal y logarítmico de una curva de polarización.(Gil, 1997)



Al representar la curva de figura 9 en escala semilogarítmica es decir, $\eta = f(\log i)$, se da el comportamiento mostrado en la figura 10.

Figura 10. a) Curva de polarización en coordenadas aritméticas. b) Curva en coordenadas semilogarítmicas. (Gil, 1997)



La expresión matemática de la cinética del proceso se representa por las siguientes ecuaciones

$$\beta a = \frac{\eta_a}{\log i - \log i_0} = \frac{\eta_a}{\log i/i_0}$$

o bien

$$\eta_a = \beta a \log\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad \text{para la reacción anódica.}$$

y:

$$\eta_c = -\beta a \log\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad \text{para la reacción catódica.}$$

en general

$$\eta = \pm \beta a \log\left(\frac{i}{i_0}\right)$$

Al graficar las expresiones anteriores se obtiene La curva de la figura 11, donde se observa que para pequeños sobre voltajes ($\eta < 0.01$ v) la ecuación se simplifica a:

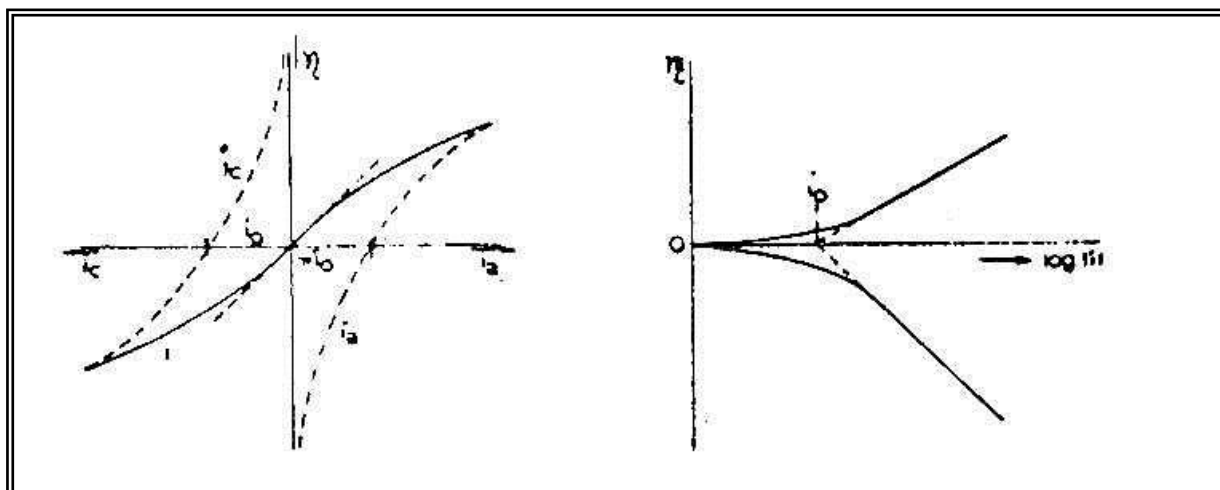
$$i = i_0 \left(\frac{nF}{RT}\right) \eta \quad \text{o} \quad \eta = \frac{i}{i_0} \left(\frac{RT}{nF}\right)$$

donde ésta ecuación se cumple para regiones muy cercanas al origen. El factor $i_0 \left(\frac{RT}{nF}\right)$ tiene dimensiones de resistencia y se le denomina Resistencia de Polarización (R_p). Para grandes sobrevoltajes ($\eta > 0.1$ v) uno de los términos en la ecuación puede despreciarse y la ecuación puede ser escrita como:

$$\eta = \beta \log\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad \text{Ecuación de Tafel}$$

Con $\beta = 2.3\left(\frac{RT}{\alpha nF}\right)$ para una reacción anódica y $\beta = -2.3\left(\frac{RT}{(1-\alpha)nF}\right)$ para la reacción catódica. Se observa que el sobrevoltaje es relativamente grande al graficar η vs $\log |i|$ obtenido en la figura 10b. De aquí también puede deducirse que al extrapolar la parte recta de la curva para $\eta = 0$ se obtiene que $i = i_0$ como era de esperarse mostrado en la figura 11(Gil, 1997).

Figura 11. Curva correspondiente a la polarización por activación. a) η vs i . b) η vs $\log (i)$ (Gil, 1997)



4.6.2 Potencial de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)

De acuerdo a (Soediono et al., 2014), la técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés), es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, el cual consiste en el uso de una señal de corriente alterna (CA) la cual es aplicada a un electrodo (metal en corrosión) determinando la respuesta correspondiente. Se aplica una pequeña señal de potencial (E) a un electrodo y se mide su respuesta en corriente (I) a diferentes frecuencias. Sin embargo, en determinadas condiciones, es posible aplicar una señal pequeña de corriente y medir la respuesta en potencial del sistema. De este modo, el equipo electrónico usado procesa las mediciones de potencial - tiempo y corriente - tiempo, dando como resultado una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia estudiada. Esta relación de valores de impedancia y frecuencia se denomina “espectro de impedancias”. Estos suelen ser analizados mediante circuitos eléctricos, compuestos por componentes tales como resistencias (R), capacitancias (C), inductancias (L), etc. Cuya combinación apropiada puede reproducir los espectros de impedancia medidos. Estos circuitos eléctricos son denominados “circuitos eléctricos equivalentes”. La impedancia es un término que describe la resistencia eléctrica (R), utilizado en circuitos de corriente alterna (CA). En un

circuito de corriente directa (CD) la relación entre la corriente (I) y el potencial (E) está regida por la ley de ohm.

$$E = IR$$

En donde E es en volts, I en amperes y R en ohms. En el caso de una señal alterna la expresión equivalente es la siguiente.

$$E = IZ$$

En la segunda ecuación, Z representa la impedancia del circuito, con unidades de ohm. Es importante tener en cuenta que, a diferencia de la resistencia, la impedancia de un circuito de CA depende de la frecuencia de la señal que sea aplicada. La frecuencia (f) de un sistema de CA se expresa en unidades de hertz (Hz) o número de ciclos por segundo (s-1).

Así, se puede definir la admitancia (Y) de un circuito de CA. La admitancia es el recíproco de la impedancia y es un parámetro importante en los cálculos matemáticos que involucra la técnica y, por otra parte, los equipos usados en estudios de EIS miden en realidad la admitancia.

$$Y = 1/Z = 1/E$$

La impedancia de un sistema a cada frecuencia está definida por, la razón entre la amplitud de la señal de corriente alterna y la amplitud de la señal de potencial alterno y el ángulo de fase (Soediono et al., 2014). El método de impedancia permite conocer el comportamiento de la interfaz metal solución, proporcionando una visión completa de los fenómenos corrosivos que se presentan (Aperador, Neira, & Ruiz, 2012).

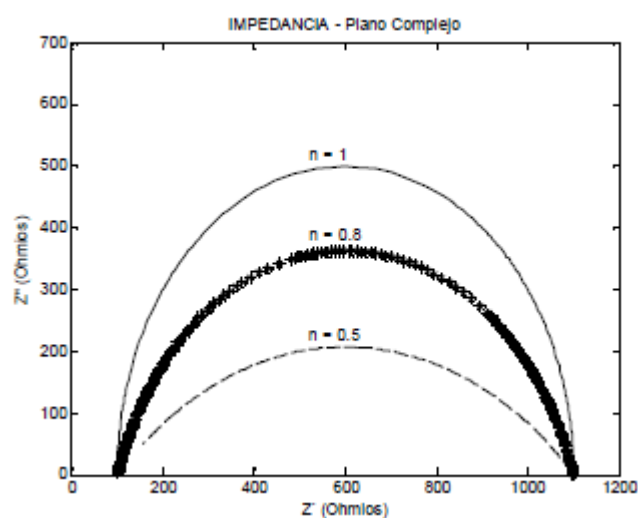
Según (Piratoba Morales, Ortiz Otálvaro, & López Vera, 2010), esta técnica tiene aplicaciones importantes en la evaluación del desempeño de metales desnudos o recubiertos en diferentes ambientes, el seguimiento de procesos electroquímicos y la evaluación de su cinética, o en el estudio procesos de interés tecnológico y científico como los de electro catálisis, la obtención de productos electro depositados, la corrosión entre otros.

4.6.2.1 Representación de interfaces mediante circuitos equivalentes

Mediante el potenciostato se puede aplicar un potencial programado al circuito y detectar su corriente. Para estudiar solo una de las interfaces electrolito-electrodo (conocido como electrodo de trabajo), el otro electrodo conviene que sea un dispositivo estándar, llamado electrodo de referencia. Generalmente se introduce un tercer electrodo, de platino o grafito y denominado contra-electrodo, para que por él circule la mayor parte de la corriente aplicada a la interface de interés y no por el electrodo de referencia.

Los procesos de difusión o migración se pueden presentar dentro del electrolito, o a través de recubrimientos aislantes, de capas pasivas o de productos de corrosión. La función de transferencia entre la señal armónica de voltaje aplicada y la corriente de respuesta en estos casos, exhibe una dependencia típica de los elementos de Warburg. Las 3 impedancias de Warburg W , O o T , se diferencian en los recorridos de reactantes y productos de corrosión, desde una región de concentración constante al sitio en la superficie donde transfieren su carga (Piratoba Morales et al., 2010).

Figura 12. Diagrama de Nyquist del circuito simple, para diferentes valores de n . (Piratoba Morales et al., 2010)



4.6.3 Determinación del potencial de picaduras

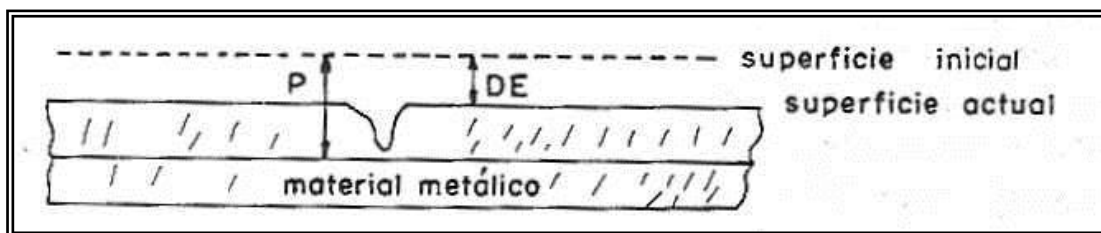
Una característica de este tipo de corrosión es producir agujeros de pequeño diámetro y cierta profundidad en el material metálico. De esta forma este ataque causa el fallo de tuberías y equipos por perforación con pérdidas metálicas relativamente pequeñas. Constantemente es difícil descubrir las picaduras, debido a su pequeño diámetro y a que generalmente están cubiertas de productos de corrosión.

Debido a que la pérdida de material metálico ocasionado por las picaduras suele ser pequeña, la velocidad de este ataque reportada en la forma de corrosión uniforme no suele dar una idea real de la peligrosidad del mismo. En la actualidad se manejan técnicas microscópicas que permiten estimar el promedio de picaduras por unidad de superficie, como también la profundidad promedio de las mismas. Por esta causa se ha definido el factor de picadura F_p como el cociente entre la profundidad máxima de las picaduras designada por P , y la velocidad de corrosión uniforme expresada como pérdida de espesor DE , es decir:

$$F_p = P/DE$$

La figura 13 muestra en forma esquemática los términos expresados anteriormente. (Gil, 1997)

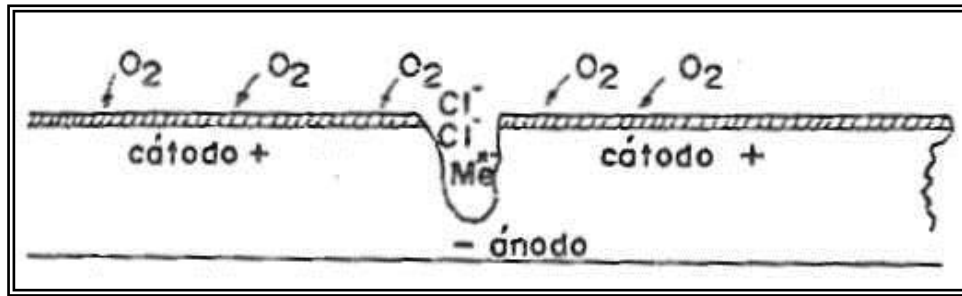
Figura 13. Factor de Picadura (Gil, 1997)



Debido a que las picaduras requieren un período de inducción o iniciación antes de que se hagan visibles dependiendo de la concentración de iones cloruros, la temperatura y la presencia de sustancias acelerantes o depolarizadores, una vez iniciado el ataque de las picaduras estas proliferan y a una alta velocidad de corrosión. La figura 14 muestra la forma cómo aparece dicho ataque en una superficie metálica pasiva. (Gil, 1997)

De los materiales que sufren este ataque, el aluminio es el que menos se pica en presencia de iones cloruros, y la velocidad de crecimiento de las picaduras es menor que en otros materiales pasivos, esto dado que la capa pasiva del aluminio tiene una baja conductividad eléctrica, lo que dificulta el establecimiento de celdas de localización. (Gil, 1997)

Figura 14. Formación de una picadura. (Gil, 1997)

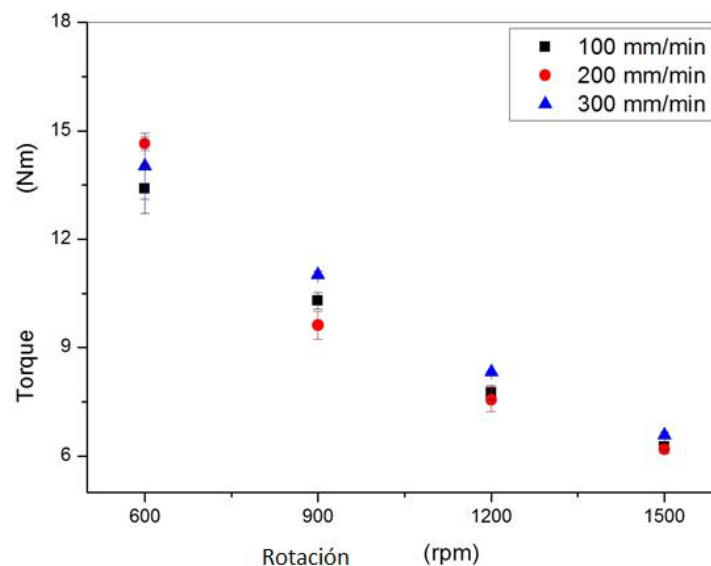


La película de óxido formada sobre su superficie permite que con el tiempo su velocidad de corrosión disminuya, incluso en atmósferas industriales muy contaminadas (AlCan, 1986). A pesar de ello, cuando el aluminio se encuentra en contacto con otros metales, especialmente en atmósfera marina y en una menor área expuesta, puede sufrir corrosión por picaduras y galvánica, ocasionando fallos prematuros. La causa fundamental de la corrosión por picaduras se atribuye a la rotura localizada de la película pasiva formada, (Alúmina) característica del aluminio y sus aleaciones, lo que produce una disolución del material. Debido a esto, la resistencia a la corrosión por picaduras estaría gobernada por la estabilidad electroquímica de la película y por su capacidad para regenerarse en el medio agresivo. Algunos estudios realizados han demostrado que la densidad de picaduras aumenta linealmente con el tiempo de exposición, principalmente en atmósferas contaminadas con sustancias que contienen azufre y cloruros. De otro lado, ensayos de corrosión realizados en Japón sobre alambres de aluminio usados como conductores evidenciaron un gran efecto acelerador (Vera, Schrebler, Orellana, & Olguín, 1998)

4.6.4 Correlación parámetros V_A , V_R , Fuerza axial máxima y torque.

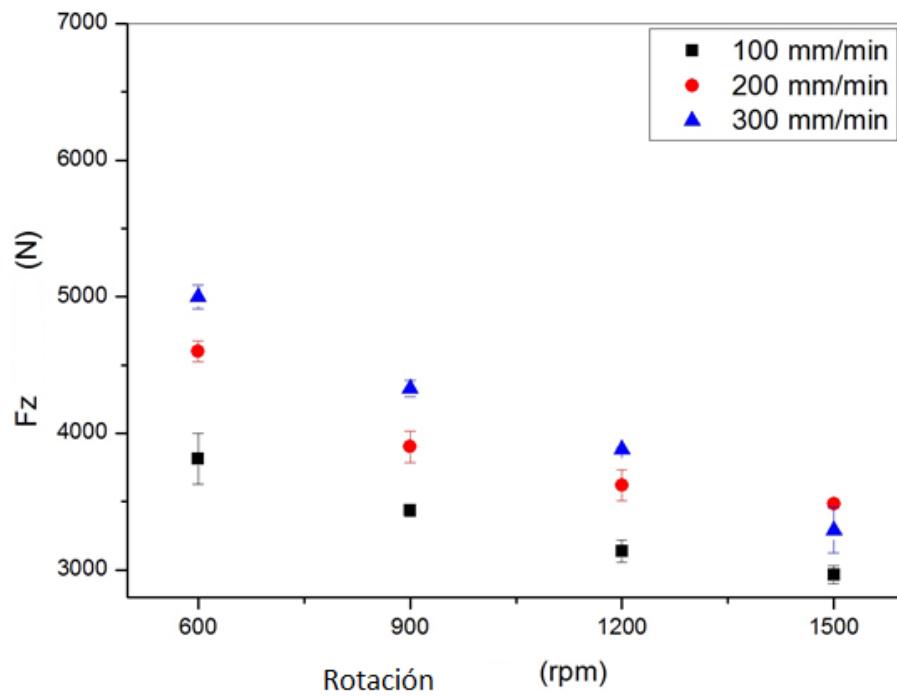
Por lo reportado por (Quintana, 2016), se analiza el comportamiento de cada uno de los parámetros de soldadura a la vez que se aplica una fuerza determinada y se mide el torque en cada una de las condiciones. Figura 15, muestra el comportamiento del torque en cada condición.

Figura 15. Comportamiento del torque en función de la rotación para todas las velocidades de soldadura, con una velocidad de penetración de 8 mm/min. Torque en la fase de avance(Quintana, 2016).



De la misma forma se realiza el comportamiento de las fuerzas con cada una de los parámetros y las fuerzas como se muestra en la figura16.

Figura 16. Comportamiento de la fuerza axial máxima en función de la rotación para todas las velocidades de soldadura, con una velocidad de penetración de 8 mm/min. Fuerza en la fase de avance(Quintana, 2016).



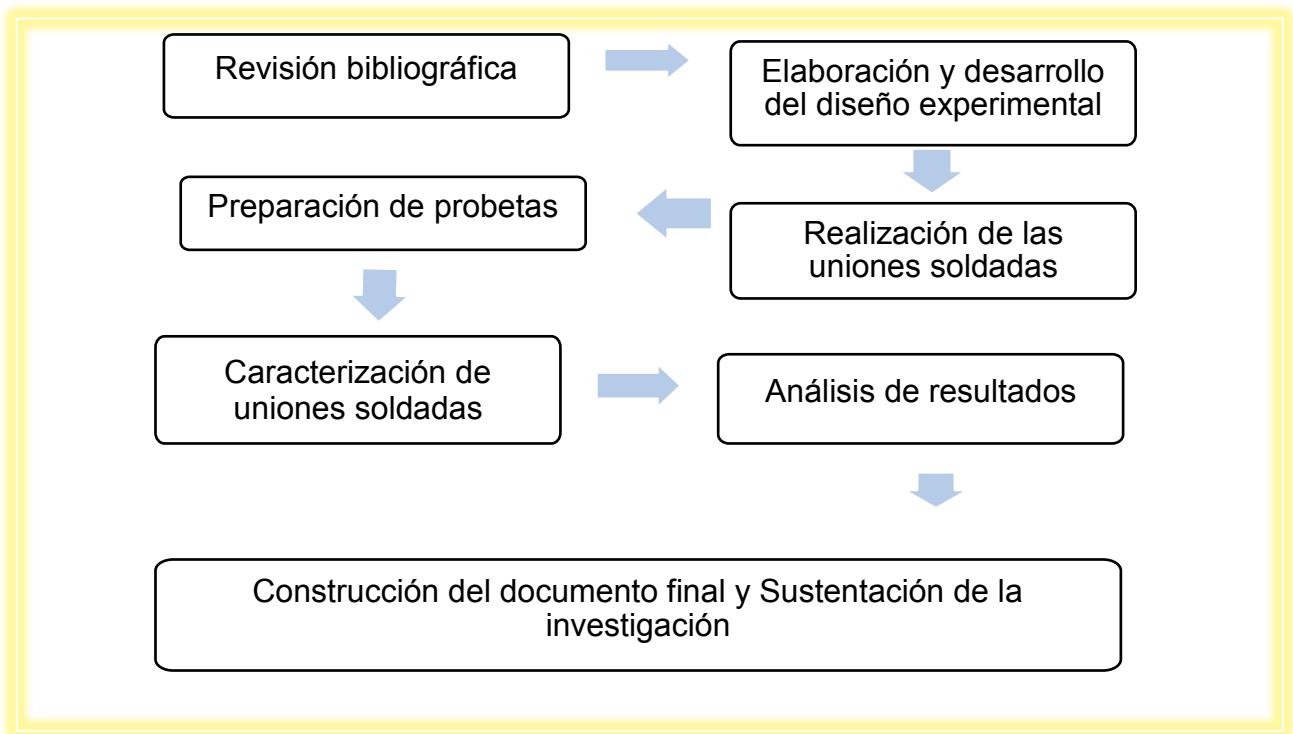
Pregunta de investigación

¿Es posible usar la aleación Al5052-H34 soldada mediante el proceso de soldadura por fricción agitación en la industria naval en embarcaciones pequeñas?

Metodología

La metodología propuesta para la realización de la presente investigación se realiza con la secuencia mostrada en la figura 17.

Figura 17. Esquema de la metodología experimental



5.1 Revisión bibliográfica

Para esta revisión bibliográfica se utilizan diferentes bases de datos nacionales e internacionales. De acuerdo a los resultados de las búsquedas anteriores, se consultan artículos a través de las bibliotecas de la Universidad del Valle (Colombia) y demás bases de datos de la Web, buscando estar al tanto del proceso en todas las aplicaciones y actualizando constantemente la información.

5.2 Selección y caracterización de materiales

Basado en la revisión bibliográfica y la experiencia previa de Quintana (2016), se ha seleccionado como unidad experimental placas de aluminio 5052-H34 (Al- Mg, endurecido por trabajo en frío) unidas mediante el proceso de SFA, completamente homogéneas, con composición química igual en cualquier dirección e iguales dimensiones.

5.2.1 Metal base.

Se cuenta con una aleación de Aluminio 5052-H34, cuya composición se presenta en la tabla 2 y se referencian sus propiedades mecánicas en la tabla 3. Esta aleación tiene endurecimiento por trabajo en frío y el aspecto general de la unión de las placas se presenta en la figura 18.

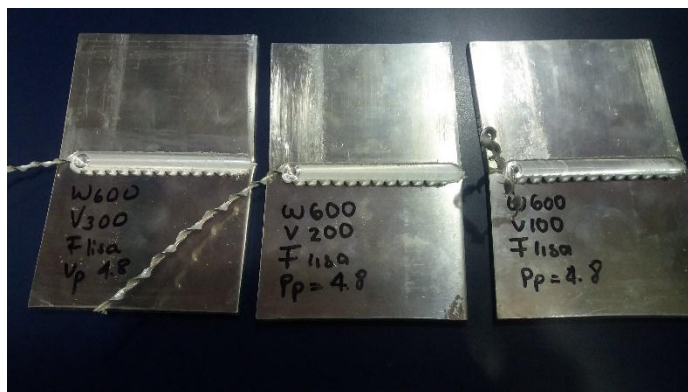
Tabla 2. Composición química Aleación 5052-H34. (Dieguez & Svoboda, 2011)

Aleación	Mg	Si	Zn	Cu	Fe	Mn	Ti	Cr	Zr	Al
5052	2.20 - 2.80	0.25	0.10	0.10	0.40	0.10	-	0.15 - 0.35	-	Bal

Tabla 3. Propiedades mecánicas aleación 5052-H34. (Quintana, 2016)

Resistencia a la tracción (Mpa)	Límite de fluencia (Mpa)	Módulo de elasticidad (Gpa)	Deformación (%)
235 - 285	180	70	6-12

Figura 18. Aspecto de las placas soldadas por fricción agitación



La designación de las aleaciones de aluminio se hace mediante una nomenclatura característica para identificar plenamente el material; de esta manera, la letra H identifica una condición de producción y el tratamiento térmico y los números seguidos de ésta dan cuenta acerca del grado de endurecimiento. En la tabla 4, se identifica el significado de cada letra.

Tabla 4. Condiciones fundamentales de las aleaciones del aluminio (Moreno Zavala, 2015)

Símbolo	Definición
F	Estado bruto de fabricación. Tal como salen del proceso de fabricación y no hay garantía de sus propiedades mecánicas
O	Estado recocido. Es generalmente el estado más dúctil que se puede obtener. Es aplicado a los semi-productos para obtener el estado más bajo de resistencia.
H	Estado endurecido: Se aplica a los productos endurecidos por deformación en frío con o sin ablandamiento posterior.
W	Estado templado no estabilizado: Es un estado metalúrgico inestable. Se aplica a las aleaciones que han sufrido una inmersión en solución, seguida de temple.
T	Estado endurecido por tratamiento térmico: Están sometidos a todos o parte de los siguientes tratamientos: puesta en solución, temple, envejecimiento y revenido.

El grado H muestra subdivisiones, designándose mediante dos cifras, la primera por la forma en cómo se endureció, la cual se relaciona en la tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de la condición H (Moreno Zavala, 2015)

Símbolo	Definición
H1	Estado endurecido por deformación: Se aplica a los productos endurecidos por deformación hasta un nivel previsto, sin ablandamiento posterior
H2	Estado endurecido por deformación y parcialmente ablandado: Se aplica a los productos endurecidos por deformación hasta un nivel superior al previsto, y después ablandados parcialmente
H3	Estado endurecido por deformación y estabilizado: Se aplica a las aleaciones que se van ablandando espontáneamente a temperatura ambiente después de haber sido endurecidos por Deformación (caso de aleaciones Al-Mg) y que deben estabilizarse por mantenimiento a una

	temperatura adecuada.
--	-----------------------

A su vez, la segunda cifra toma valores entre 2, 4, 6, 8 ó 9 y corresponde al nivel de dureza adquirido en el procesamiento, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Niveles de dureza para el estado (Moreno Zavala, 2015)

Nivel Un cuarto de dureza	H12-H22-H32
Nivel semi - duro	H14 - H24 - H34
Nivel tres cuartos de dureza	H16 - H26 - H36
Nivel duro	H18 - H28 - H38
Nivel extra duro	H19 - H29 - H39

Por tanto, esta aleación puede ser endurecida significativamente mediante el trabajo en frío y luego un proceso térmico para su ablandamiento como el recocido. En este caso al ser H34, representa que la aleación es semidura, es decir que la aleación ha tenido un ablandamiento para alcanzar un estado estable.

5.2.2 Procedimientos de soldadura

El proceso de soldadura se realizó en 2 bloques, lo cual no afecta la reproducibilidad dado que lo importante es conservar los parámetros de soldadura, material y dimensiones de la herramienta, un primer desarrollo realizado en el Instituto de Alberto Luiz Coímbra de posgrado e investigación en ingeniería (COPPE) de la Universidad Federal de Rio de Janeiro (COPPE) en un centro de mecanizado CNC Polaris V400 de fabricante ROMI adaptado para este proceso de soldadura. En la figura 19 se muestra las dimensiones de la herramienta, el equipo y montaje de las placas con las cuales se realizó la unión soldada por fricción agitación.

El segundo bloque de probetas se realizó en el taller de mecánica de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, con el centro de mecanizado Leadwell V-20i, Marca/Fabricante: Leadwell CNC Machines MFG., corp. cuyas características se muestran en la Tabla 7.

Figura 19. a) Dimensiones de la herramienta del proceso SFA dimensiones en mm (Ávila, 2011) b.) Montaje de las muestras experimentales en el Centro de mecanizado COPPE.

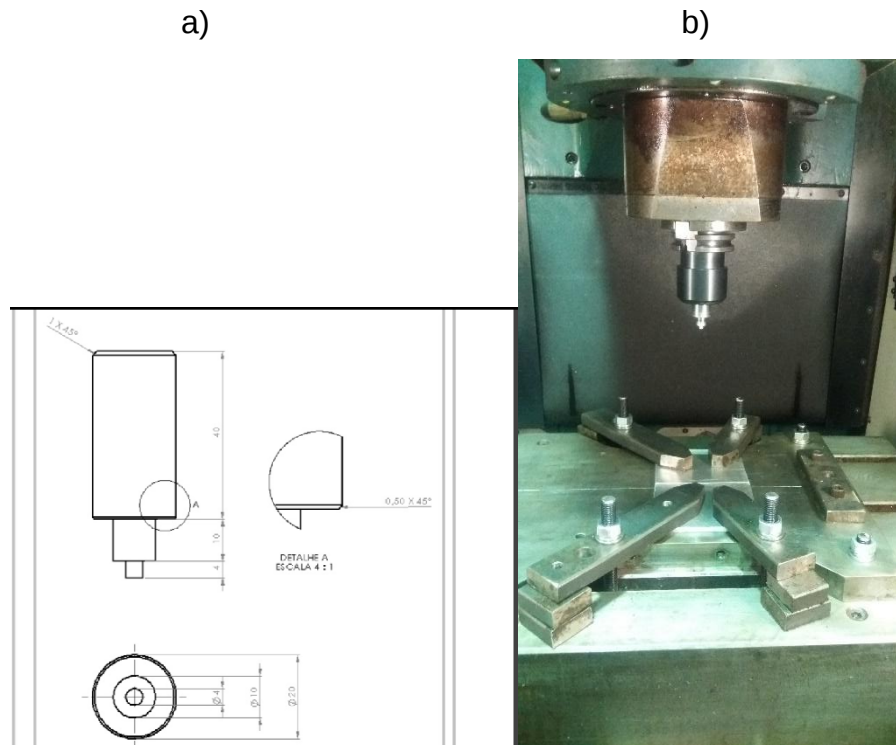


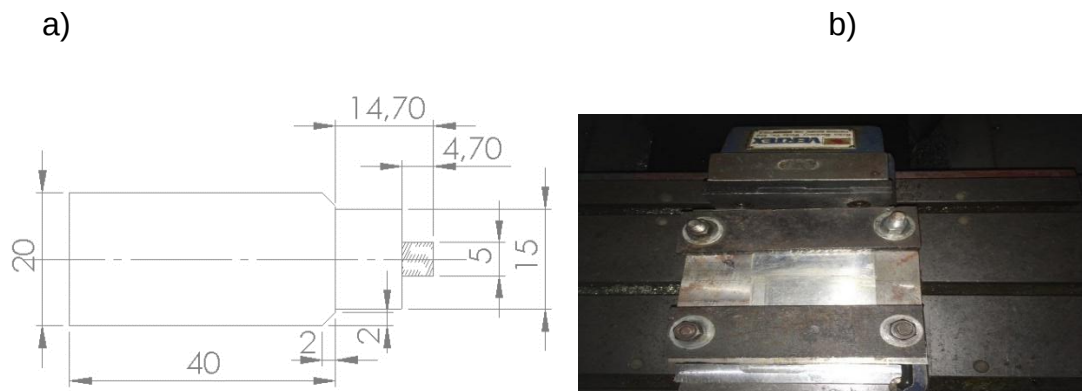
Tabla 7. Características del Centro de mecanizado de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle

CAPACIDAD
Recorrido eje X: 510 mm
Recorrido eje Y: 350 mm
Recorrido eje Z: 400 mm
Máximo peso de carga 200 kg
Velocidad máxima 8000 rpm
Avance en rápido ejes X e Y 24000 mm / min
Avance en rápido eje Z 20000 mm / min
Máximo avance en velocidad de corte 1000 mm/min

Este centro de mecanizado fue acondicionado para el proceso de soldadura mediante el acoplamiento de una platina de respaldo y otras dos con dimensiones ligeramente mayores a las placas a soldar las cuales van ubicadas sobre estas para facilitar la sujeción durante el proceso de SFA. En la figura 20 se muestra el montaje de soldadura utilizado y las dimensiones de la herramienta usada.

Figura 20. a) Dimensiones de la herramienta del proceso SFA en mm b.)

Montaje de las muestras experimentales.



Para la realización de las soldaduras en ambos casos las placas con dimensiones de 100 x 80 x 5 mm, cortadas de una lámina de aluminio 5052-H34 adquirida por el COPPE, se unieron a tope, en posición plana. Dichos procedimientos sobre la aleación de aluminio 5052-H34 se realizaron modificando dos variables, la velocidad de rotación (VR) con tres valores: 600, 900 y 1200 rpm; la velocidad de avance (VA) con 100, 200 y 300 mm/s. En la figura 21 se presentan las diferentes placas soldadas mediante el proceso.

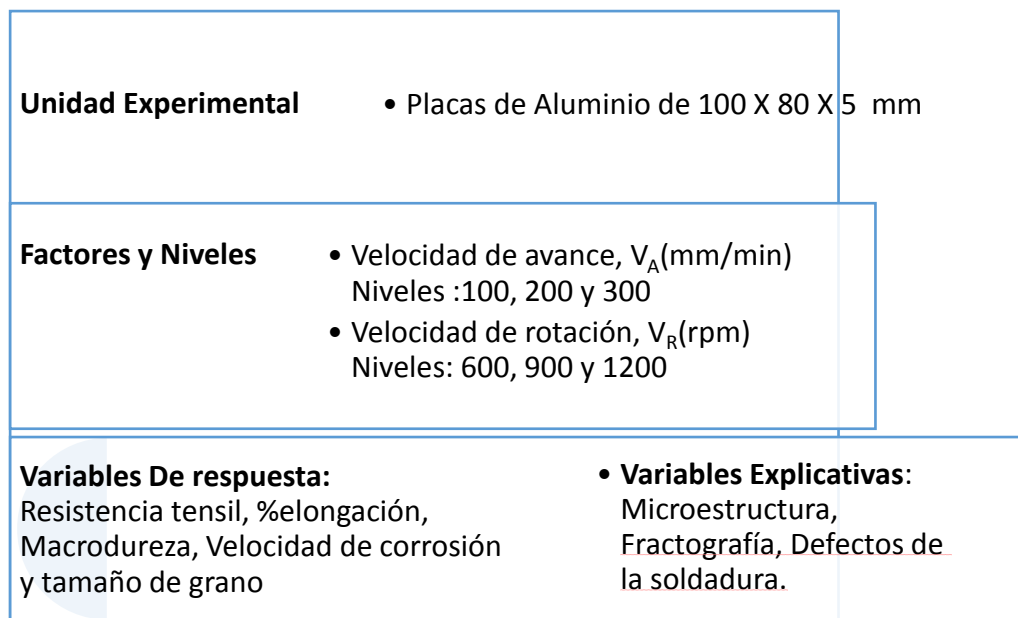
Figura 21. Muestras unidas mediante SFA



5.2.3 Diseño experimental

En este trabajo se tiene como propósito establecer la relación existente entre las variables Velocidad de avance, V_A , y velocidad de rotación, V_R , sobre la resistencia a la tensión, % de elongación, Velocidad de corrosión, tamaño de grano y macrodureza, y poder establecer una relación con la fuerza axial máxima y el torque obtenidos por Quintana (2016) en su tesis doctoral. El diseño de experimento se explica mediante la figura 22.

Figura 22. Diagrama de proceso del diseño de experimentos



5.2.3.2 Factores, niveles y tratamientos experimentales.

Los factores considerados fueron la velocidad de avance (V_A) y la velocidad de rotación (V_R); Se mantuvieron fijas las variables geometría de la herramienta, sentido de rotación de la herramienta (sentido horario), avance de la herramienta (lineal simple), profundidad de la penetración de la herramienta (4,7 mm) para el primer bloque de muestras y 5.3 para el segundo bloque, que deben ser diferente debido a que el tamaño del pin varió, Velocidad de penetración de la herramienta (8 mm/min) y material de la herramienta acero W302 (Equivalente H13) bonificado. Los extremos de las uniones soldadas

tanto al inicio como al final fueron descartados para eliminar fuentes de error en las mediciones. Los factores y niveles se presentan en la figura 22 y en la tabla de 8 se muestran las condiciones de fabricación de las uniones.

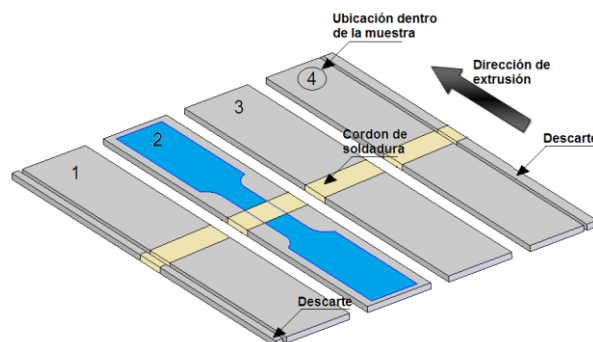
Tabla 8. Variables que influyen en el proceso

Velocidad de rotación V_R (RPM)	Velocidad de avance V_A (mm/min)	Relación V_R/V_A (rpm/mm)
600	100	6
	200	3
	300	2
900	100	9
	200	4,5
	300	3
1200	100	12
	200	6
	300	4

5.2.3.1 Unidad experimental.

La muestra a soldar está constituida por 2 placas de la aleación de aluminio 5052-H34, cuyas dimensiones son de 100 x 80 x 5 mm, a las cuales se les aplicó la soldadura de fricción-agitación con los tratamientos experimentales correspondientes a los diferentes factores y niveles. Las placas soldadas se cortaron para sacar las probetas necesarias y mecanizarlas de acuerdo a la necesidad según lo indique la norma ASTM, el esquema de corte se muestra en la figura 23.

Figura 23. Esquema de corte de las muestras y placa obtenida al soldar



5.2.3.4 Variables de respuesta.

Estas son el resultado de las pruebas de caracterización de las uniones soldadas, como la resistencia a tensión, % de elongación, Macro dureza Rockwell E, Velocidad de corrosión y tamaño de grano.

5.2.3.5 Variables explicativas

Mediante estas se pueden explicar las respuestas obtenidas y corresponden a resultados de microestructura, tamaño de defecto, doblado y características de la fractura mediante SEM.

5.2.3.6 Aleatorización.

Este es un diseño totalmente al azar dado que todos los ensayos se realizaron de manera aleatoria DCA.

5.2.3.7 Tamaño del experimento.

A partir de la obtención de las uniones soldadas, una por cada tratamiento por la limitada disponibilidad del material, para la prueba de tensión se realizaron tres, (3) repeticiones, para los análisis de macro dureza una (1) repetición y para la velocidad de corrosión una, (1) repetición.

5.2.3.8 Modelo del diseño

Para lograr establecer el efecto de las variables velocidad de rotación V_R y velocidad de avance V_A sobre las variables de respuesta se implementó un diseño completamente al azar (DCA) con estructura factorial 3x3

Mediante la siguiente expresión se presenta el modelo experimental:

$$y_{ij} = \mu + Z_i + \alpha_j + (Z\alpha)_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

$$i = 1, 2, 3 \quad j = 1, 2, 3$$

Donde:

y_{ij} : Valor aleatorio que toma la variable respuesta en la j-exima replica que ha sido expuesta al j-eximo nivel del factor V_R y al i-eximo nivel del factor V_A .

μ : Parámetro de centralidad o efecto medio general

Z_i : Efecto del i-eximo nivel del factor V_A

α_j : Efecto del j-eximo nivel del factor V_R

$(Z\alpha)_{ij}$: Efecto debido a la interacción de primer orden entre los factores V_A y V_R .

ε_{ijk} : Efecto debido al error experimental

H_0 : Hipótesis nula

H_a : Hipótesis alterna

σ : Varianza

5.2.3.8.1 Supuestos sobre el error

Supuesto de normalidad

H_0 : ε_{ij} se distribuye normal

H_a : ε_{ij} no se distribuye normal

Homogeneidad de varianza

H_0 : $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_n^2$

H_a : $\sigma^2 > 0$

Supuesto de independencia

$\text{Cov}(\varepsilon_{ij}, \varepsilon_{i'j'}) = 0 \quad \forall i \neq i'; j \neq j'$

5.2.3.8.2 Hipótesis de interacción.

H_0 : $(Z\alpha)_{ij} = 0 \rightarrow$ No hay efecto de interacción entre los factores V_A y V_R

H_a : $(Z\alpha)_{ij} \neq 0 \rightarrow$ Si hay interacción entre los factores V_A y V_R

5.2.3.8.3 Hipótesis de efectos principales.

$H_0: Z_1 = Z_2 = \dots Z_a = Z$. La velocidad de avance no tiene efecto sobre cada una de las variables de repuesta de la unión soldada.

$H_a: Z_i \neq Z_i' \quad \forall i \neq i'$. La velocidad de avance si tiene efecto sobre cada una de las variables de repuesta de la unión soldada.

$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots \alpha_b = \alpha$. La velocidad de rotación no tiene efecto sobre cada una de las variables de repuesta de la unión soldada.

$H_a: \alpha_j \neq \alpha_j' \quad \forall j \neq j'$. La velocidad de rotación si tiene efecto sobre cada una de las variables de repuesta de la unión soldada

En el Anexo A, se realiza un análisis de varianza para probar las hipótesis planteadas, se construyeron gráficos de interacción que se muestran en el análisis de resultados para ello, se utiliza el software estadístico Minitab.

5.3 Caracterización del material base y las uniones soldadas

Los ensayos realizados brindarán el sustento práctico para garantizar el comportamiento en servicio de la aleación. Como prueba de la calidad de la soldadura se hizo el análisis macrográfico para determinar la geometría del cordón y la presencia de defectos, lo cual mostraba que el proceso era viable. Más adelante se realizó la caracterización de la microestructura mediante análisis metalográfico y análisis de las propiedades mecánicas de las soldaduras realizadas mediante las pruebas de macrodureza, pruebas de tensión y pruebas de corrosión, como se describen a continuación.

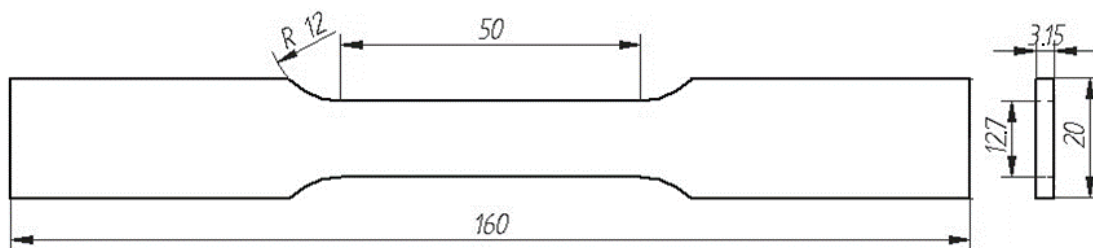
5.3.1 Ensayos de tracción

Este se realizó con base en la norma ASTM E8M – 00, con el objeto de determinar la resistencia a la tensión, y Ductilidad del material soldado. La Información importante que arroja la gráfica de resistencia a la tensión, es el

esfuerzo último y el porcentaje de elongación, puesto que da cuenta de las características mecánicas del material.

Los ensayos se realizaron en la máquina universal que tiene una capacidad de 50 KN, con probetas de espesor de 5.1mm y una longitud de 160 mm a una velocidad de ensayo de 3mm/min. En la figura 24 se observa las dimensiones de la probeta para ensayos de tensión según la norma. Los ensayos de Macro dureza, tensión, metalografía y SEM; se realizaron en los laboratorios de la escuela de Ingeniería de Materiales (EIMAT) de la Universidad del Valle.

Figura 24. Probeta para ensayos de tensión ASTM E8. Dimensiones en mm



5.3.2 Ensayo de macrodureza.

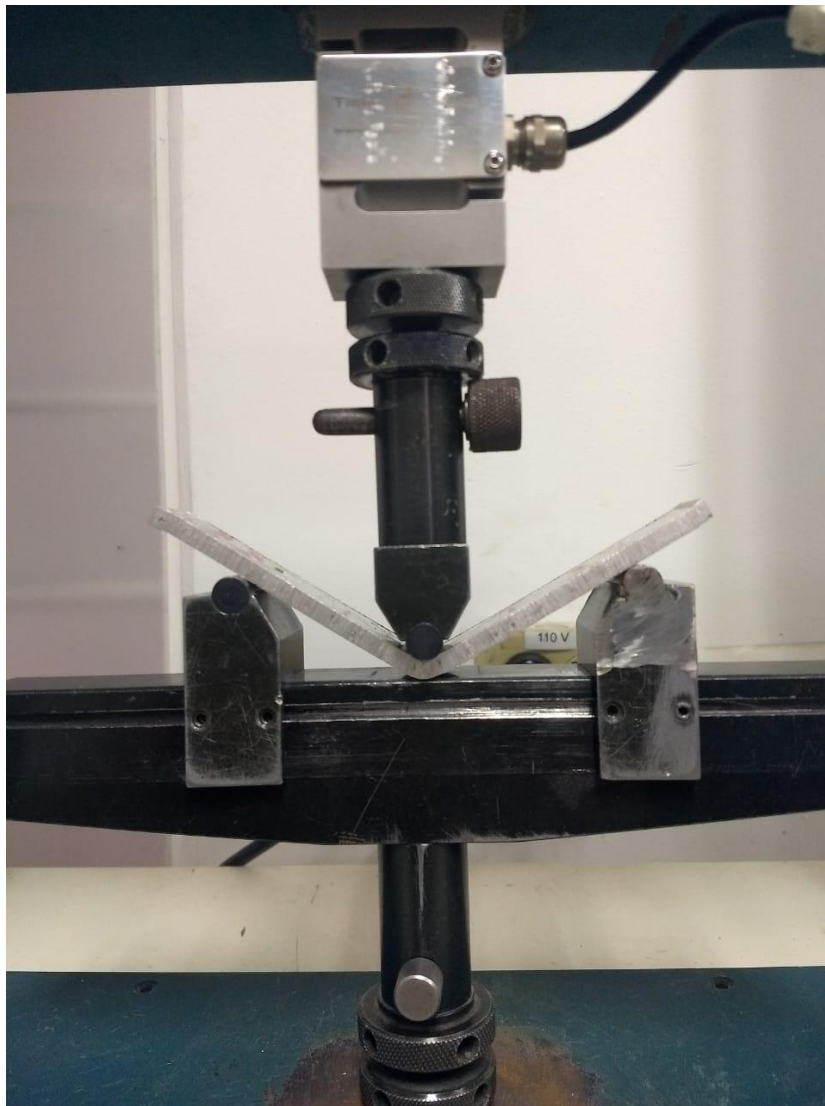
Este ensayo se realizó bajo la norma ASTM E18-03, con una carga de 100 Kg-f y un indentador de diámetro 3,175 mm (1/8 de pulgada), a una muestra de dimensiones 30X5x5 mm con el objetivo de hacer un barrido de durezas en tres zonas determinantes una vez aplicada la soldadura. Se hizo 2 repeticiones en metal base, zona de termomecánicamente afectada (ZTMA) y zona agitada.

5.3.3 Ensayo de Doblado.

Este ensayo se realiza con base en la norma ASTM E290, este proporciona una indicación visual cualitativa de la ductilidad del material. Se hace con el fin de conocer la calidad de la soldadura, se sometió a esta prueba las probetas con la condición de una $V_R 900 - V_A 100$ y $V_R 1200 - V_A 300$ por ser las que presentaban un cordón con mejor apariencia a la inspección visual, la probeta se muestra en la figura 25. Se realizó mediante doblado hasta un ángulo

predeterminado para verificar defectos, grietas o discontinuidades en la cara o la raíz de la soldadura. Este ensayo se realizó en la máquina universal que tiene una capacidad de 50 KN, se pueden ensayar probetas de 25 mm de ancho, 140 mm de largo y un espesor de 5.1 mm a una velocidad de 10mm/min.

Figura 25. Ensayo de doblado para la AA5052-H34



5.3.4 Ensayo de Corrosión

Dado que el material soldado es susceptible a sufrir corrosión y debido al ambiente marino donde se desempeña, el cual es considerado un ambiente

agresivo por la presencia de iones sulfatos, cloruros y demás elementos que aceleran el proceso de corrosión en los metales, es de vital importancia hacer un análisis del comportamiento de las uniones soldadas en dicho ambiente. La Norma ASTM G48 cubre los procedimientos de ensayos de laboratorio para la determinación de la resistencia a la corrosión por picaduras y grietas de aleaciones cuando son expuestos a ambientes que contienen cloruro. Las pruebas de corrosión se realizaron en el laboratorio de corrosión de la Universidad Militar en Bogotá.

5.3.4.1. Determinación del potencial de picaduras

El potencial de picadura indica la tendencia termodinámica de la aleación a sufrir corrosión por picado. Para la aplicación de esta técnica, se hace un barrido de potencial en corriente continua, midiendo cada vez la corriente de equilibrio para un cierto potencial. Como resultado se obtienen curvas de polarización que muestran una zona de pasivación y su cambio a una zona de picaduras. La norma ASTM G61 y ASTM G59 describe la técnica de barrido potenciodinámico utilizada para determinar el potencial de corrosión E_{corr} , de picadura E_p y el repasivación E_{rp} .

5.3.4.2 Ensayos electroquímicos.

Como complemento a las pruebas anteriores, se realizan ensayos electroquímicos los cuales son menos perturbadores del mecanismo de corrosión y permiten realizar las curvas de potencial para materiales sometidos a ambientes marinos.

5.3.4.2.1. Curvas de polarización (Tafel)

Se utilizó la técnica de curvas de polarización, aplicando un barrido del potencial de $\pm 250\text{mV}$ vs Potencial de corrosión que fue medido a una velocidad de barrido de 1mV/min ; como electrodo de referencia se empleó uno Plata cloruro de plata, y un electrodo auxiliar de platino, utilizando para ello un

equipo de corrosión electroquímica Potenciostato/Galvanostato/ZRA marca Solartron referencia 273.

5.3.3.4.2 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)

La técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), por sus siglas en inglés), es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna (CA) que es aplicada a un electrodo (metal en corrosión) y determinando la respuesta correspondiente. (Soediono et al., 2014)

La caracterización electroquímica se realizó en un potenciostato galvanostato mediante las técnicas de EIS y curvas de polarización Tafel, a temperatura ambiente, empleando una celda compuesta por el electrodo de trabajo con un área expuesta de 1 cm^2 , un electrodo de referencia de Ag/AgCl y un alambre de Platino como contra electrodo en una solución de cloruro de sodio, NaCl al 3.5% w/v, se eligió esta solución debido a que simula una solución marina además corroe metales activos formando los cloruros sobre el metal. Los diagramas de Nyquist se obtuvieron realizando barridos de frecuencia en el rango de 0.001 Hz hasta 500 kHz, empleando una amplitud de la señal sinusoidal de 5 mV. Los diagramas de Tafel se obtuvieron a una velocidad de barrido de 0.125 mV/s en un rango de voltajes de -0.25 V a 1.25 V empleando un área expuesta de 1 cm^2 .

5.3.5 Caracterización microestructural

5.3.5.1 Análisis Metalográfico.

Se hace a todas las probetas de cada condición con el fin de determinar las microestructuras resultantes, tamaños de grano y la presencia de precipitados en función de las variables del proceso, de acuerdo a la norma ASTM E407. Para su realización se tomó la sección longitudinal a la dirección de laminado en las juntas soldadas y el metal base, de tal modo que la soldadura se ubica

en la sección perpendicular, se realizó el pulido de la superficie desde lijas 80 hasta 2000 y se pasó por paños para alcanzar una apariencia espejo. Posteriormente se atacó las muestras con un reactivo (Zhang et al., 2011) que contiene 60 ml de H_2SO_4 , 30 ml de H_3PO_4 , 10 ml de HNO_3 10 ml a 100 °C durante 3 minutos. Se tomaron macrográficas en el estéreo microscopio Nikon SMZ1000 para lo cual las muestras se sometieron a mayores tiempos de reactivo para sobre-atacarlas y tomar imágenes mejor definidas. Las micrográficas se tomaron con microscopio Olympus BX60 a diferentes aumentos, identificando las microestructuras generadas y tamaños de grano alcanzados en la zona agitada (ZA), zona termomecánicamente afectada (TMAZ), la zona térmicamente afectada (ZTA) y metal base (MB), con ayuda del software IQMaterials.

5.3.5.2 Microscopia electrónica de barrido (SEM).*

Se usó el microscopio electrónico de barrido (Jeol JSM6490LV), con una sonda para microanálisis químico (INCAPenta FETx3), con sistemas de recubrimiento de muestras (oro) utilizó el modo de electrones retro dispersados y un voltaje de aceleración de 20kV. Se utilizó esta prueba para analizar el mecanismo de fractura en una muestra de la mejor condición con cada V_R manejada, de esta manera se analizó 3 probetas con las siguientes condiciones $V_{R600} - V_{A100}$, $V_{R900} - V_{A200}$ y $V_{R1200} - V_{A200}$.

5.3.5.3 Defectos de soldadura

Las uniones soldadas por fricción agitación pueden exhibir tres, (3) tipos de defectos por efectos de la carga aplicada, profundidad de la penetración o sentido de la rotación (Svoboda, 2009). En el caso de la aleación estudiada y las pruebas realizadas se encontró un defecto en todas las muestras y a lo largo de todo el cordón de soldadura conocido como defecto de túnel. El área de cada uno de estos fue medida con ayuda de la aplicación ImageJ.

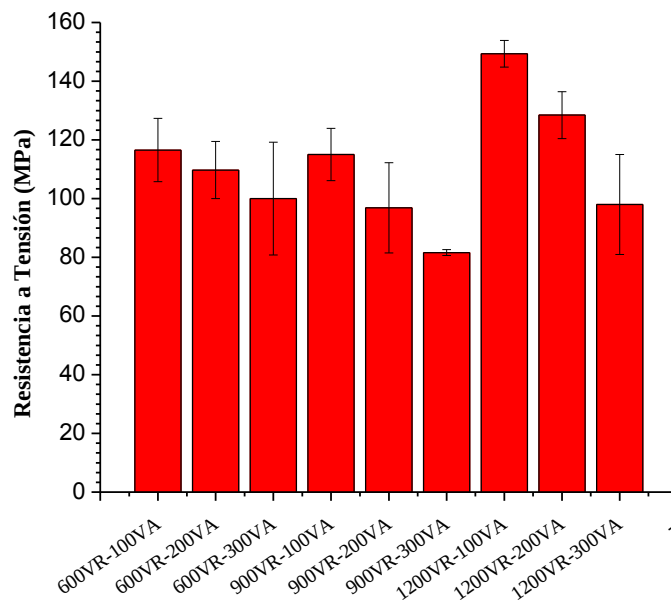
Análisis de resultados

Los resultados obtenidos durante la caracterización de las probetas son analizados evaluando el efecto de cada una de las variables sobre la microestructura y las propiedades mecánicas y químicas y así mismo correlacionarlo con el torque y la fuerza generados en el proceso en el trabajo de (Quintana,2016). La discusión central girará en torno al efecto de la relación V_R/V_A sobre las propiedades mecánicas y microestructurales de la soldadura por fricción agitación de la aleación de Al 5052-H34.

6.1 Ensayo de Resistencia a la tensión

En la figura 26 se muestra los valores de Resistencia a tensión correspondientes a V_R de 600 rpm, 900rpm y 1200 rpm, así como también las V_A de 100mm/min, 200 mm/min y 300 mm/min. En algunas muestras se observa una baja resistencia a la tensión debido a la presencia del defecto que se acentúa más en unas muestras que en otras. En la figura 27 se determina la interacción entre dichas variables, donde se observa una tendencia de una disminución de la Resistencia a tensión a medida que V_A aumenta y crecimiento de la Resistencia a tensión cuando V_R aumenta; por tanto, la Resistencia a tensión es directamente proporcional a V_R e inversamente proporcional a V_A . Esto podría explicarse a nivel microestructural porque el calor generado aumenta a medida que aumenta V_R pero cuando aumenta V_A no hay tiempo suficiente para su difusión, efecto que podría generar un cambio en tamaño y cantidad de los granos puesto que se da un refinamiento de grano.

Figura 26. Resistencia a tensión para $V_R = 600$ rpm, 900 rpm y 1200 rpm; $V_A = 100$ mm/min, 200 mm/min y 300 mm/min



Tanto la Resistencia a tensión como la elongación cumplen con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas sobre el error del modelo a niveles de significancia mayores de 0.09. (Anexo 1)

En ambos modelos se halló que los factores V_A y V_R aportan más que los errores, esto es la $ScV_A + scV_R + scV_A * V_R$ es mayor que la $sc_{errores}$ (3553 de la tensión y 112 la elongación). Este resultado también se evidencia en los r^2 de cada variable.

También se encontró que: para la tensión, no existe interacción entre los factores V_A y V_R a un nivel de significancia del 0.148, lo cual indica que no hay dependencia entre ellos, por tanto, pueden ser analizados de manera independiente como se muestra en la tabla 10. Con respecto a la elongación se halló que efectivamente si hay interacción entre la V_A y el V_R a un nivel de significancia del 0.000, lo cual indica que estos efectos se deben analizar de manera conjunta.

Figura 27. Efecto del factor V_A y V_R sobre la tensión

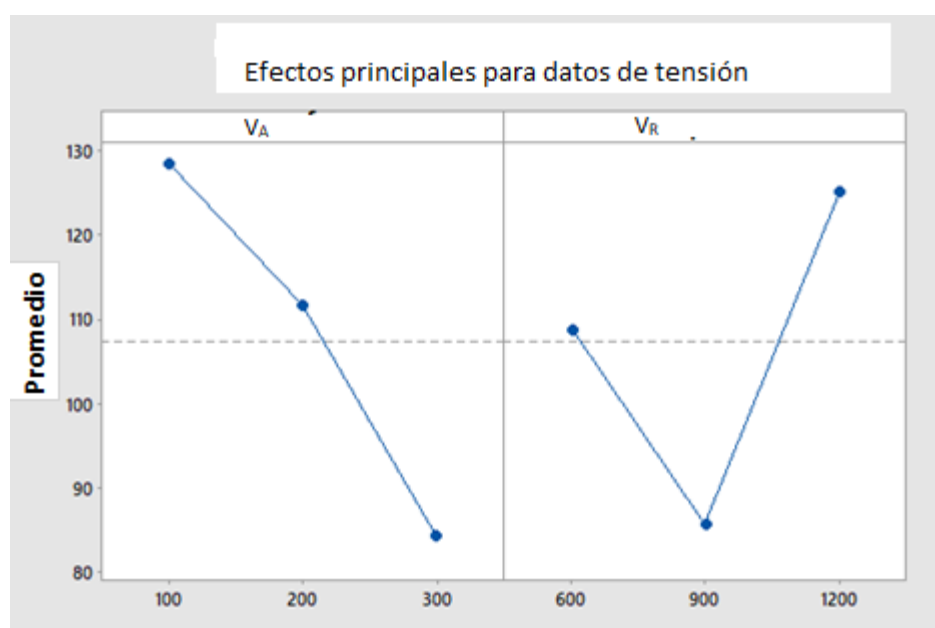


Tabla 9. Valores del SCError varianza de la tensión y elongación

	R. TENSION R2=81.73%			ELONGACION R2=94.73%		
Fuente de variación	SC	F	P-VALOR	SC	F	P-VALOR
VF	7845	18.77	0.000	126	9.56	0.000
RPM	5448	13.03	0.000	1135	86.14	0.000
VF*RPM	1629	1.95	0.148	695	26.36	0.000
ERROR	3553			112		
TOTAL	19445			2047		

Dado que se obtuvo un resultado de no interacción en la tensión, las pruebas postanova se realizan de manera independiente (tabla 10, figura 27), en la cual se obtuvo que las velocidades 100 y 200 tienen el mismo efecto sobre la tensión, mientras que la velocidad 300 es distinta a las demás, a un nivel de significancia del 5%, esto podría deberse a que con una menor velocidad de avance, se da mayor tiempo de generación de calor lo cual se hace significativo una vez se triplica la velocidad de avance V_A . Cuando se trata del factor V_R , se obtuvo que los niveles 1200 y 600 son estadísticamente iguales sus efectos sobre la tensión, mientras que el efecto 900 tiene un comportamiento distinto (tabla 9 y figura15). Se obtuvieron valores similares a

los reportados por (Arroba-Arroba, Vaca-ortega, Peña-jordán, Núñez-núñez, & Taopanta-Bautista, 2017) y (Cao, M. Wang, L. Kong, and L. Guo, 2016) quienes encontraron valores de 135,61 MPa para 1500 rpm y 2 mm de espesor. De esta forma se puede decir que la condición con la que se obtiene una mejor resistencia a la tensión es con $V_R1200-V_A100$.

Tabla 10. Comparación por Resistencia a tensión. factor V_A

V_A	N	Agrupación principal	
100	8	126,967	A
200	9	111,656	A
300	9	84,451	B

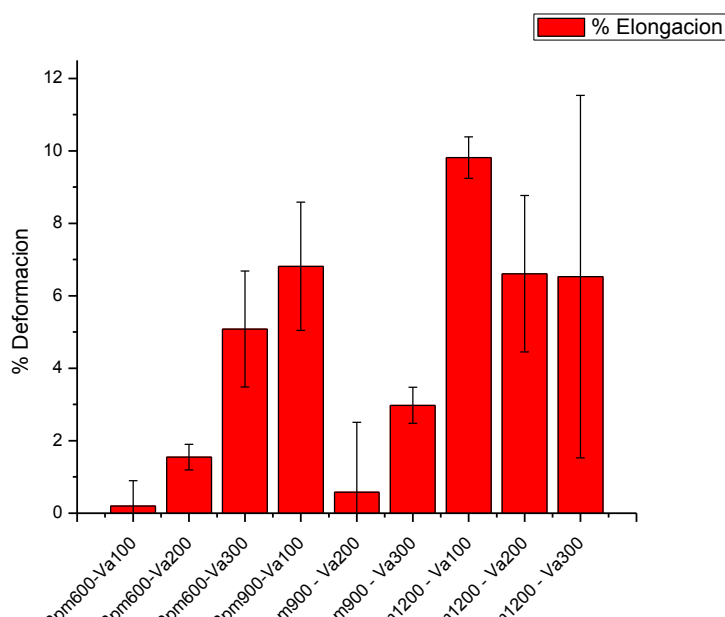
En la tabla 12 se presenta los valores resultantes de las pruebas postanova para en la variable V_R

Tabla 11. Prueba postanova por Resistencia a tensión, factor V_R

V_R	N	Agrupación principal	
1200	9	125,267	A
600	9	108,756	A
900	8	89,051	B

En la figura 28 se observa el comportamiento de V_R y V_A con respecto a la deformación, de donde se tiene que la variable %elongación mostró una clara dependencia entre los niveles de los factores, el cual se refleja tanto en la figura 26 y la tabla 12. La V_A 100 mm/min con V_R 1200 rpm es distinta a todas las demás, con la mayor elongación promedio (9,64) coherente con lo reportado en la norma (ASTM Standard B928/B928M, 2009); así mismo se encuentran interacciones con promedios entre 5.53 y 7,17, las más bajas elongaciones la presentó la interacción V_A 100 mm/min - V_R 600 y V_A 200mm/min - V_R 600 rpm, lo cual es coherente con una estructura que presenta mayor grado de dureza por efecto del tratamiento de endurecimiento en frio que tiene el metal base y con el calor generado no ha sido suficiente para bajar este efecto lo cual hace que sea la menos dúctil.

Figura 28. Resultados de % Elongación para cada condición



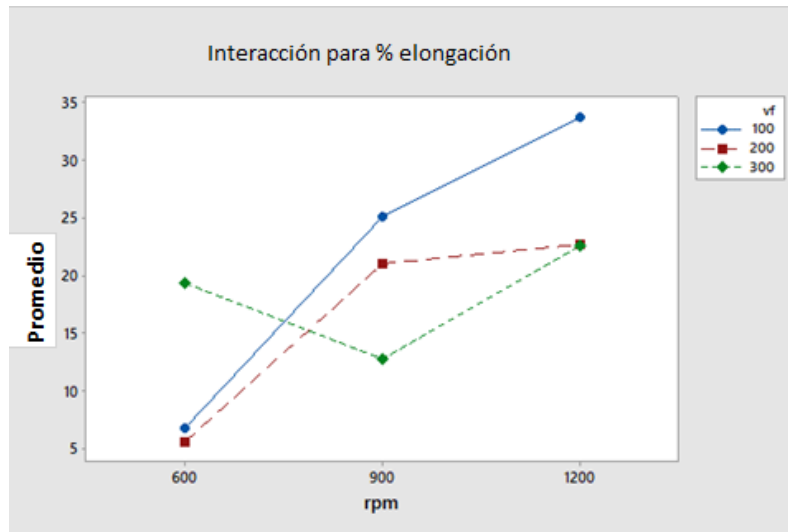
De otro lado, la V_R de 1200 generará mayor cantidad de calor y esto propicia un cambio en la microestructura ablandando el material haciéndolo más dúctil, aquí se evidencia un aumento tamaño de grano mayor ductilidad). A nivel de elongación la mejor condición fue VR1200-VA100.

Tabla 12. Prueba de Tukey elongación%, T

$V_A * V_R$	N	Agrupamiento promedio		
100- 1200	3	33,7933	A	
100- 900	2	25,1000	B	
200- 1200	3	22,6933	B	
300- 1200	3	22,5867	B	
200- 900	3	21,0167	B	
300- 600	3	19,3667	B C	
300 900	3	12,7367	C D	
100 600	3	6,6867	D	
200 600	3	5,5400	D	

En la figura 29 se presenta el comportamiento de la interacción generada entre las variables V_A y V_R para la elongación donde se observa la interacción existente entre dichas variables.

Figura 29. Comportamiento de elongación comparado V_A y V_R (rpm)



6.2 Macro dureza

Para determinar los valores de dureza HRE, a lo largo de la muestra se tomaron medidas en los mismos puntos en todas las probetas como se muestra en la figura 30 correspondientes a metal base, zona de transición (ZTMA) y zona agitada. Para elaborar la tabla 14 se tomó el promedio de dos mediciones que presentan una desviación estándar de 4,2, 4,2 y 8.3 en cada una de los sectores medidos respectivamente. Las posiciones reportadas en la tabla correspondiente a -1.3 y 1,3 son en metal base; -0.3 y 0.3 pertenecen a ZTMA y 0 es en la ZA.

Tabla 13. Macro durezas HRE reportadas por variables de SFA

Condición	V_R600-V_A100	V_R600-V_A200	V_R600-V_A300	V_R900-V_A100	V_R900-V_A200	V_R900-V_A300	$V_R1200-V_A100$	$V_R1200-V_A200$	$V_R1200-V_A300$
Posiciones Macro dureza									
-1,3	78	79	74	71	70	76	65	70	71
-0,3	63	64	57	57	65	65	54	59	67
0	45	31	32	50	52	55	49	53	49
0,3	63	58	55	56	69	65	58	57	56
1,3	74	79	78	75	75	77	75	76	72

Esta distribución de valores permite analizar el comportamiento de las variables V_A y V_R de manera cualitativa y se observa que la dureza es inversamente proporcional a V_A y directamente proporcional a V_R ,

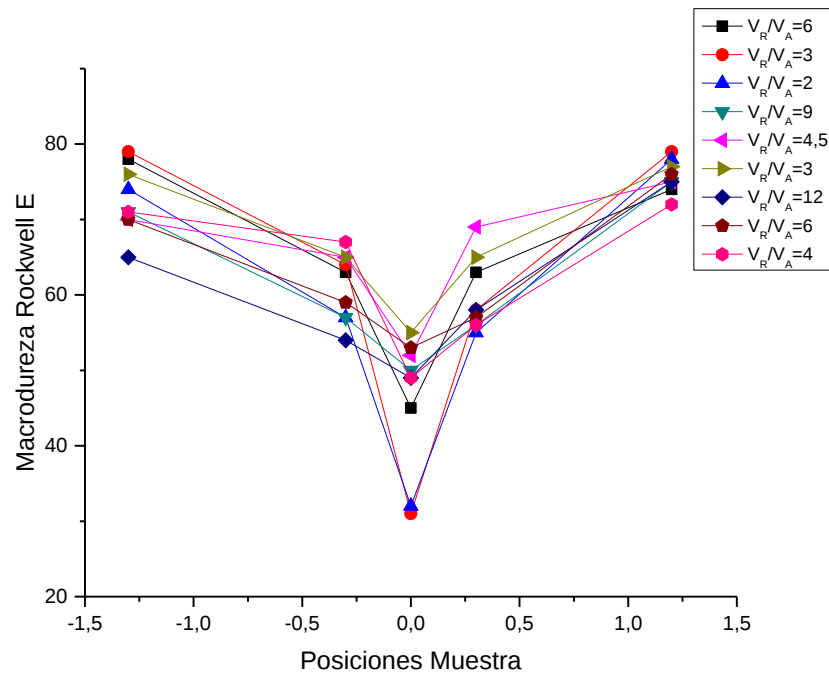
Figura 30. Puntos de toma de macrodureza en cada muestra



El comportamiento de la macrodureza se observa en la figura 31, donde se muestra que a medida que se acerca a la zona afectada térmicamente los valores decrecen al aproximarse a la zona de unión, resultado contrario a lo encontrado por (López G, 2013) quien reporta que los valores de la dureza se incrementan en la zona afectada térmicamente, donde alcanza un máximo de 98,5 HRC para un acero 1045. Este comportamiento puede ser producto del defecto de túnel presentado en dicha zona, lo cual genera una disminución en propiedades considerable y cambia el rendimiento esperado; de este modo, la condición $V_{R900}-V_{A300}$ es la que presente un mayor valor, así como $V_{R1200}-V_{A100}$ y $V_{R1200} - V_{A300}$ presentan los menores valores.

El comportamiento de la zona agitada cambia

Figura 31. Distribución de la dureza Rockwell E en cada condición



6.3 Curvas de Potencial Tafel

Los diagramas de Tafel se obtuvieron a una velocidad de barrido de 0.125 mV/s en un rango de voltajes de -0.25 V a 1.25 V empleando un área expuesta de 1 cm², se observa que a medida que disminuye la velocidad de avance V_A la densidad de corriente no presenta una tendencia en el comportamiento así como tampoco con respecto a la Velocidad de rotación V_R .

Se analizan los eventos de manera independiente y se observa que los menores valores de densidad de corriente se obtiene para V_A 200 generando así una velocidad de corrosión mas baja en orden de magnitud para 600 y 900 rpm respectivamente aunque para el caso 1200 rpm, se observa la mayor velocidad de todas las muestras analizadas como se puede comparar en la tabla 15.

En términos generales presentan velocidades de corrosión del orden de 10^{-1} mpy pero, para el caso de V_R 1200 y V_A 200 $3,89 \times 10^{-3}$ mpy similar a los reportados por (Pérez de Ciriza Gárriz, 2017), quien estudió la aleación Al Si10MnMg (Fe) y encontró valores de velocidad de corrosión entre $0,1 \times 10^{-3}$ y $0,6 \times 10^{-3}$ mpy. Se puede concluir que la que mejor resisitencia muestra es la condición con V_R 600 independientemente del V_A utilizado.

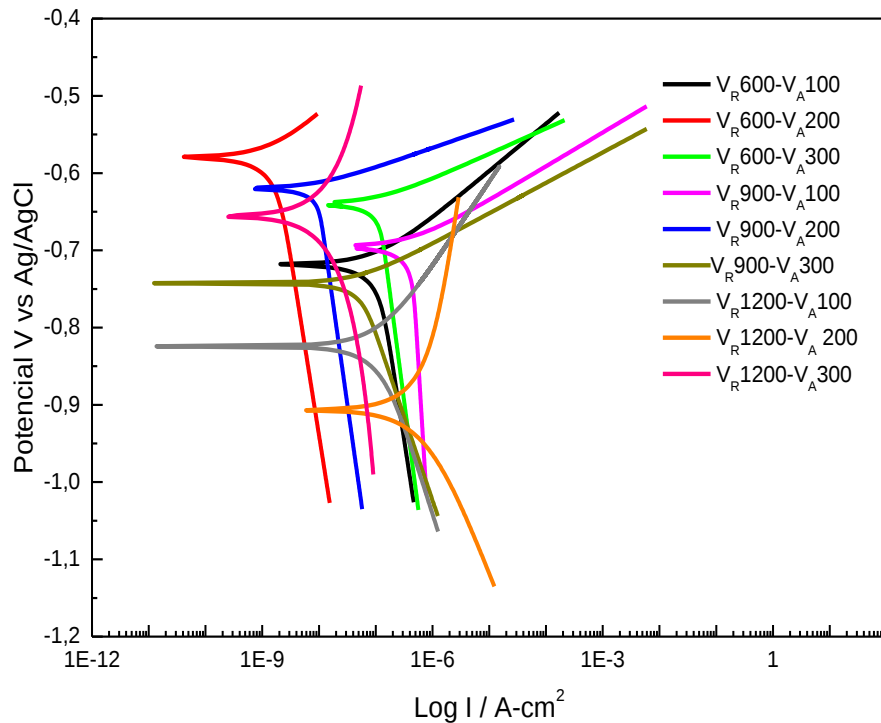
Tabla 14. Correlación de variables del proceso SFA y Densidades de corrosión

Corrosión Tafel			
Condición	I _{corr} (nA)	E _{corr} (mV)	Corrosión Rate (mpy)
V _R 600-V _A 100	106	-718	2,47x10 ⁻¹
V _R 600- V _A 200	424	-695	9,87 X 10 ⁻¹
V _R 600- V _A 300	116	-824	2,70 X10 ⁻¹
V _R 900- V _A 100	1,67	-580	3,89 X 10 ⁻³
V _R 900 - V _A 200	9,15	-620	2,13 x 10 ⁻²
V _R 900 - V _A 300	806	-907	1,875
V _R 1200 - V _A 100	111	-640	2,58 X 10 ⁻¹
V _R 1200 - V _A 200	50,7	-742	1,18 X 10 ⁻¹
V _R 1200 - V _A 300	215	-656	4,99 X 10 ⁻¹
Metal base	388	-701	1,951

Para determinar la velocidad de corrosión en cada una de las muestras, se analiza el corte de las rectas en la gráfica de cada condición y se encuentra una mayor dispersión de puntos al pasar de la zona anódica a la zona catódica, lo cual es de esperarse en la presente aleación. Para hallar la velocidad de corrosión se debe tomar puntos en ambas zonas, anódica y catódica, para generar dichas rectas, así ésta se encuentra en el punto de intersección, como lo muestra la figura 32.

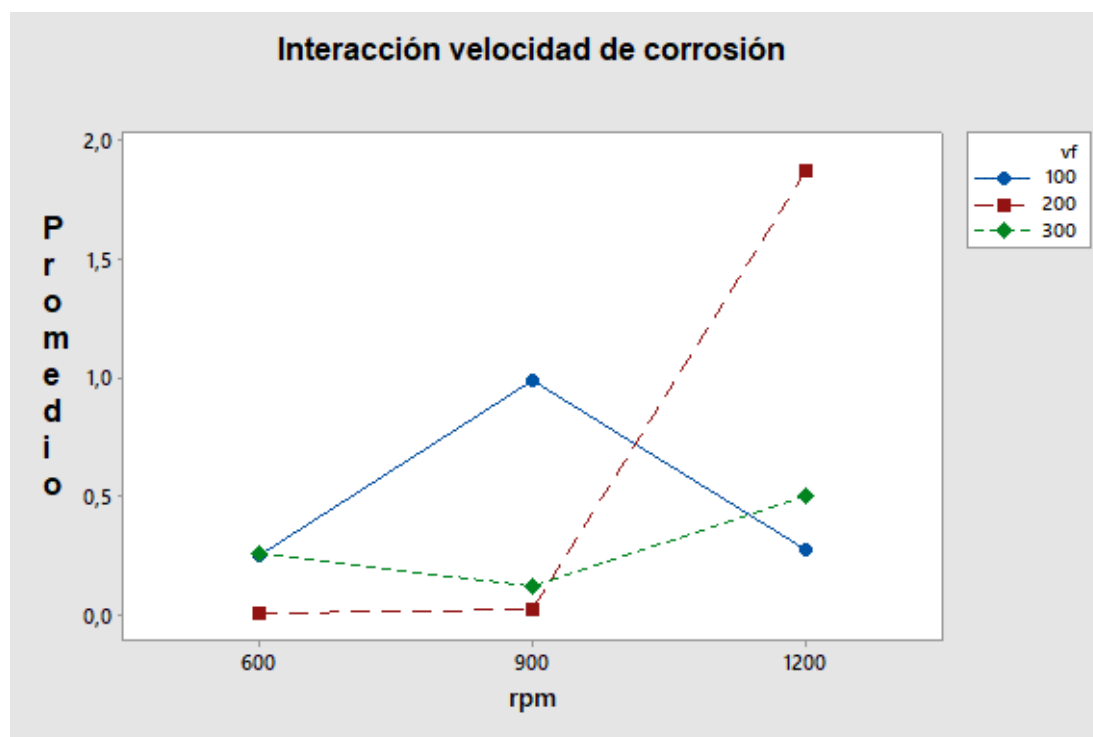
Con base en dichas gráficas se observa que la condición que presenta una menor velocidad de corrosión es V_R600-V_A200 y la mayor velocidad de corrosión está dada para es VR1200-V_A200 este comportamiento puede presentarse posiblemente al calor generado producto de que en el primer caso se genera una cantidad de calor menor correspondiente a la mitad del que se genere en el segundo caso.

Figura 32. Curvas Tafel para combinaciones de velocidad de rotación (V_R) y Velocidad de avance (V_A)



La figura 33, muestran una clara interacción o dependencia entre la velocidad de avance V_A y las velocidades de rotación V_R utilizadas, se halló que cuando V_A es 100, la mejor V_R es 600 y 1200, donde se presenta las menores corrosiones. Cuando la V_A es 200 las mejores V_R son 600 y 900. Cuando la V_A es 300 las mejores V_R son 600 y 900.

Figura 33. Interacción V_R , V_A y Velocidad de corrosión



6.4 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)

La caracterización electroquímica se realizó en un potenciostato galvanostato mediante las técnicas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) y curvas de polarización Tafel, a temperatura ambiente, empleando una celda compuesta por el electrodo de trabajo con un área expuesta de 1 cm^2 , un electrodo de referencia de Ag/AgCl y un alambre de Platino como contra electrodo en una solución de cloruro de sodio, NaCl al 3.5% w/v, se eligió esta solución debido a que simula una solución marina además corroe metales activos formando los cloruros sobre el metal. Los diagramas de Nyquist se obtuvieron realizando barridos de frecuencia en el rango de 0.001 Hz hasta 500 kHz, empleando una amplitud de la señal sinusoidal de 5 mV.

Los datos se ajustan mediante un circuito eléctrico equivalente de la figura 34, propuesto por *Randles* y los parámetros indicados inicialmente. R_s es la resistencia del electrolito, C_{dl} es la capacidad de la doble capa electroquímica,

R_{ct} es la resistencia de transferencia de carga y Z_W es la impedancia de *Warburg*. El parámetro Z_W está relacionado con el coeficiente de *Warburg* (σ)

El valor de R_s se puede obtener del punto de corte del semicírculo con el eje de abscisas a $\omega \rightarrow \infty$, $R_s \sim 12 \Omega \text{ cm}^2$. El valor de R_{ct} y que, en general, también se puede denominar R_p (Resistencia de Polarización) se obtiene de la extrapolación del diámetro del semicírculo figura 35. El semicírculo de la Figura de EIS se puede asociar con la velocidad de corrosión de la aleación. Se puede asumir, como una aproximación, que el parámetro R_{ct} , o R_p , es inversamente proporcional a la densidad de corriente del proceso de corrosión (i_{corr}). De acuerdo con la ecuación de *Stern y Geary* $i_{corr} = B/R_p$ donde $B = \beta_a \beta_c / 2,3(\beta_a + \beta_c)$, β_a y β_c son las pendientes anódica y catódica de *Tafel*, respectivamente, obtenidas mediante el trazado completo de una curva de polarización de corriente continua. La determinación de la Recta a diferentes tiempos de ensayo permite hacer una evaluación de la velocidad de corrosión.

Figura 34. Circuito eléctrico equivalente de *Randles* utilizado para simular los datos de impedancia

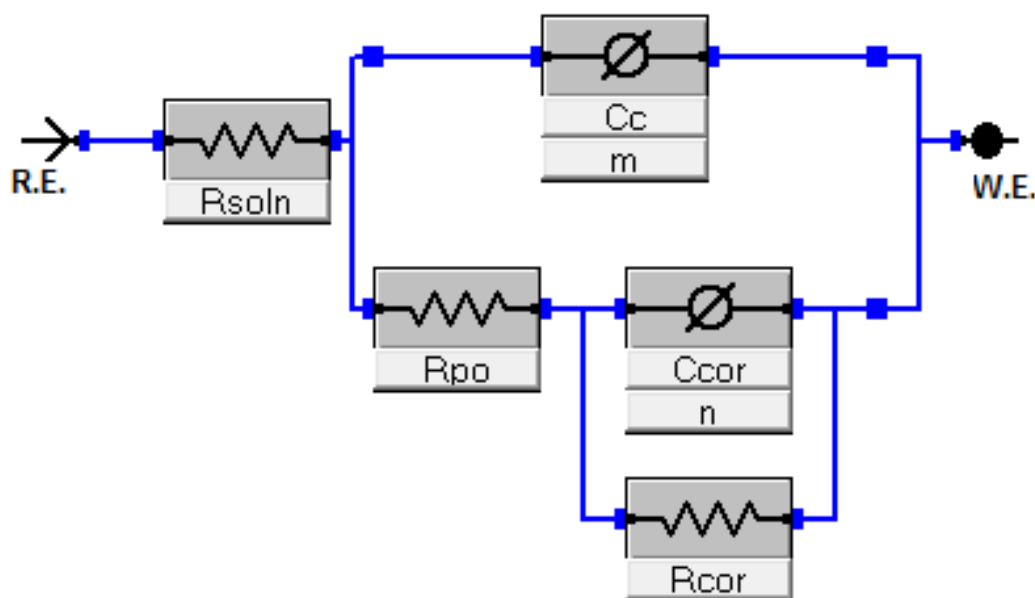
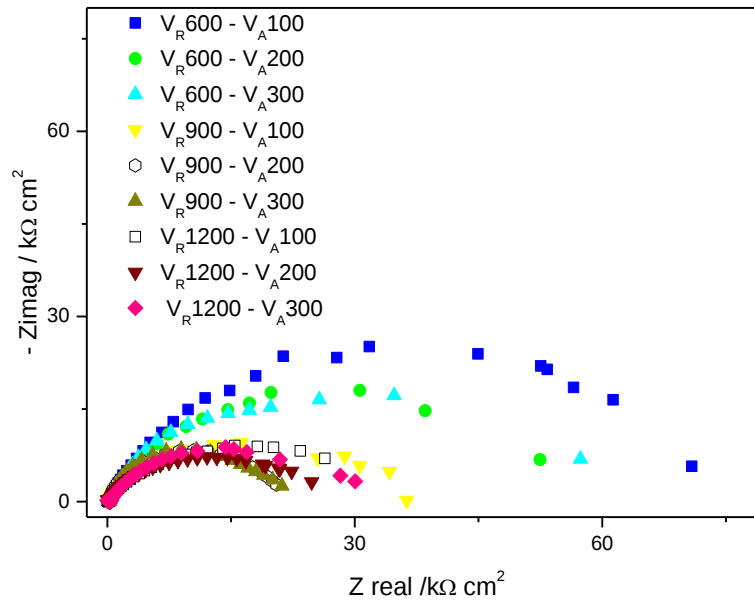


Figura 35. Curvas de potencial de EIS para las diferentes condiciones de V_R y V_A

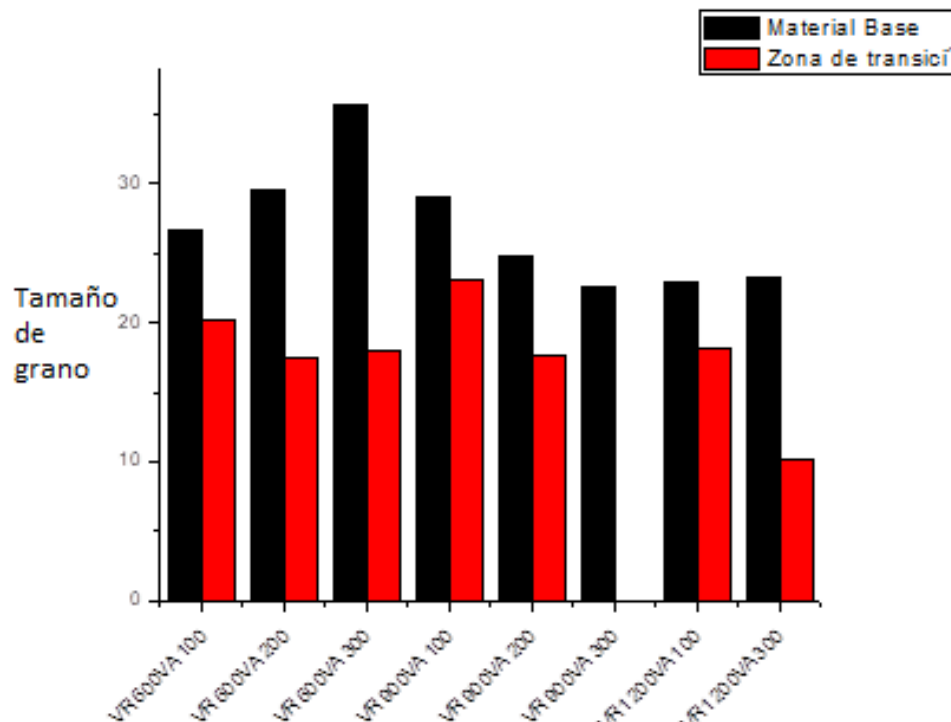


De la figura 35 se puede concluir que la condición que presenta menor velocidad de corrosión es $V_R 600 - V_A 100$ debido a que es la que presenta el semicírculo de mayor radio por tanto soporta mejor la degradación; En general se evidencia que los 3 semicírculos superiores corresponden a $V_R 600$ por tanto esa condición presenta mejor resistencia a la corrosión, a altas frecuencias los valores de impedancia son bajos a bajas frecuencias los valores de impedancia son elevados, la velocidad de corrosión es inversamente proporcional a la resistencia a la polarización ver ecuación de Butler Volmer (Ecuación de Tafel), esto posiblemente se da por ser la que ha generado menor calor haciendo que las propiedades del metal base no cambien y esta aleación en su condición inicial presenta una alta resistencia a la corrosión como varios autores reportan de acuerdo a lo relacionado en el marco teórico.

6.5 Tamaño de grano

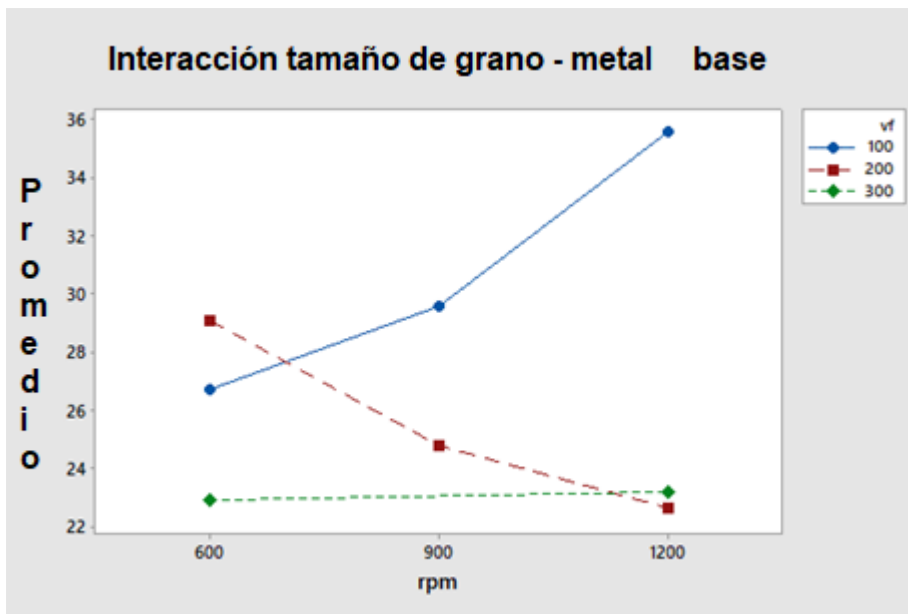
En la figura 36 se muestran los resultados de tamaño de grano medidos para cada una de las condiciones de soldadura, para el caso de $V_R 1200 - V_A 200$ no se pudo analizar puesto que la micrografía no permitió detallar los valores. Estas mediciones se realizaron con la ayuda del software IQmaterials.

Figura 36. Tamaños de grano en metal base y zona termomecánicamente afectada



Cuando la V_A es 100, la mejor V_R es 600 y 900 donde se presenta los menores tamaños de grano. Cuando la V_A es 200 los mejores V_R son 900 y 1200. Cuando la V_A es 300 el tamaño de grano para el metal base es el mismo en cualquier V_R como se observa en la figura 37. Aunque las variaciones son pequeñas como es de esperarse puesto que no se presentan cambios significativos en el metal base. Sin embargo, no se obtienen los mismos tamaños de grano en todos los casos posiblemente por condiciones propias de la aleación y su configuración estructural durante el proceso de laminación o, por falta de nitidez en algunas micrografías dado que las aleaciones de aluminio que han sido sometidas a un tratamiento térmico de endurecimiento presentan dificultad para revelar su microestructura al ser atacadas con los diferentes reactivos.

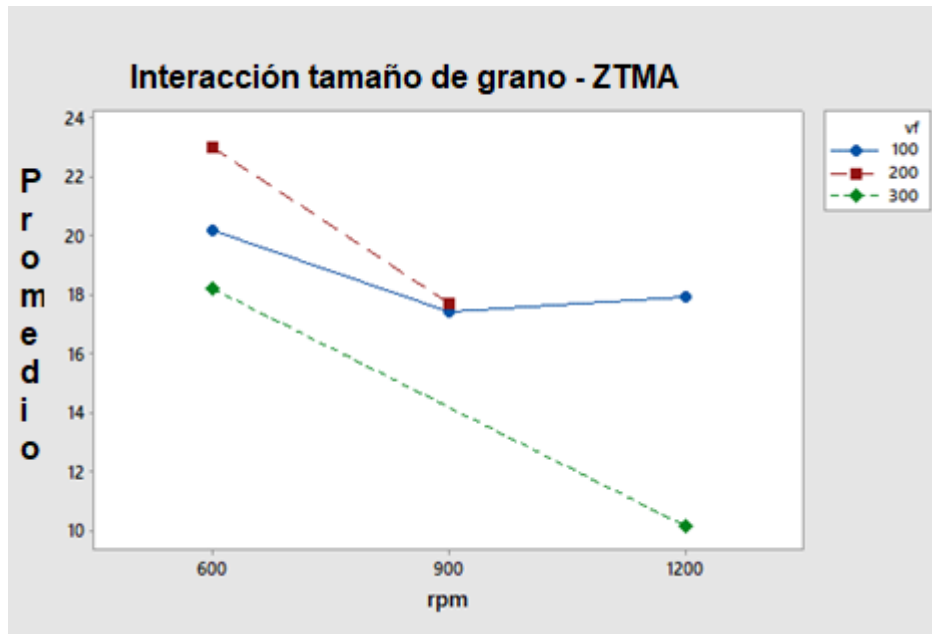
Figura 37. Interacción parámetros V_A y V_R con el tamaño de grano



Para la zona de termomecánicamente afectada (ZTMA) se determinó un valor del tamaño de grano entre 10 y 20 micras, aquí se observa que cuando V_A es 100, los menores tamaños de grano se dan para V_R 900 y 1200. Cuando V_A es 200 el menor tamaño de grano se da para una V_R de 900. Cuando la velocidad es 300 el menor tamaño de grano se da para V_R 1200 como se muestra en la figura 38.

Puede decirse que esta región presenta un comportamiento típico debido a que unos granos están más propensos a sufrir la acción mecánica y otros sufren el efecto térmico en esta zona y de esta manera unos quedan alargados otros más pequeños, por ello se presenta una gran variación de tamaño y no puede predecirse un comportamiento homogéneo en la zona. En general gráficamente puede observarse que los menores tamaños de grano se presentan para la condición de V_R a 1200, lo cual podría asociarse con unas mejores propiedades mecánicas puesto que hay un aumento de la dureza por tener tamaño de grano fino, aumenta la resistencia mecánica y disminuye la ductilidad.

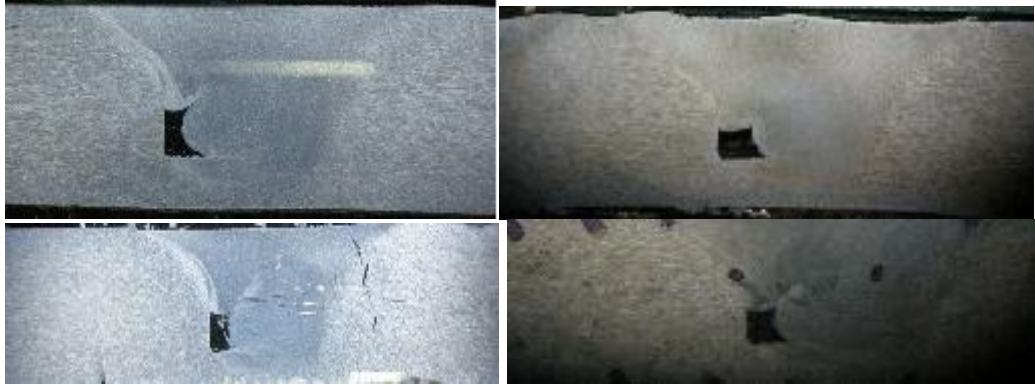
Figura 38. Interacción Va y VR con el tamaño de grano en la zona de transición (ZTMA)



6.6 Microestructura

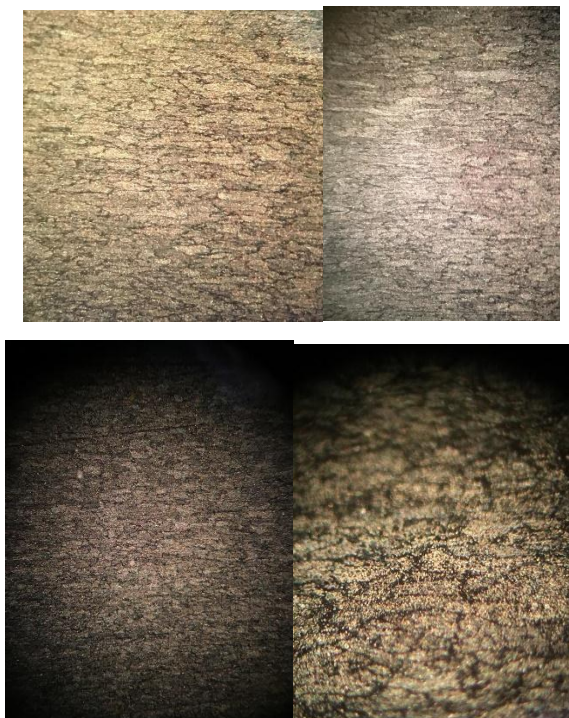
En la figura 39 se aprecia la microestructura en la unión soldada con las diferentes regiones características Metal base (MB), zona termomecánicamente afectada (ZTMA), Zona térmicamente afectada (ZTA) y la zona agitada (ZA). El proceso de SFA produce agitación y recrystalización dinámica del material (Davis, 2011), que se refleja en una microestructura fina y equiaxial, producto del refinamiento del grano, en la zona agitada. Es posible apreciar que a medida que se avanza desde el metal base hasta la zona agitada se presenta un refinamiento del tamaño de grano en el material (DAVIS, T. A., SHIN, Y. C., YAO, 2011). En dicha región se presenta una gran homogeneidad de granos finos y en todos los casos se ha generado el defecto de túnel.

Figura 39. Macrográficas AA5052-H34



En la figura 40 se puede apreciar tamaños y bordes de grano en el metal base el cual presenta una microestructura de granos grandes y alargados coherente con un proceso laminar, el efecto térmico no produjo cambios apreciables (Cabot et al., 2003). Para la obtención de estas micrográficas fue necesario una vez estaban pulidas las muestras hasta superficie espejo, observarlas en un microscopio con luz polarizante, puesto que en el de luz reflejada normal no podía apreciarse la microestructura.

Figura 40. Micrográficas metal base aleación 5052-H34 tomadas con luz polarizante a 200X



En la figura 41 se observa una microestructura con reorientación de los granos y cambios en el tamaño, conocido como zona de transición, posiblemente producto del efecto de la recristalización referida por (Cabot et al., 2003). Esta zona sufre cambios estructurales producto del calor generado en la zona agitada.

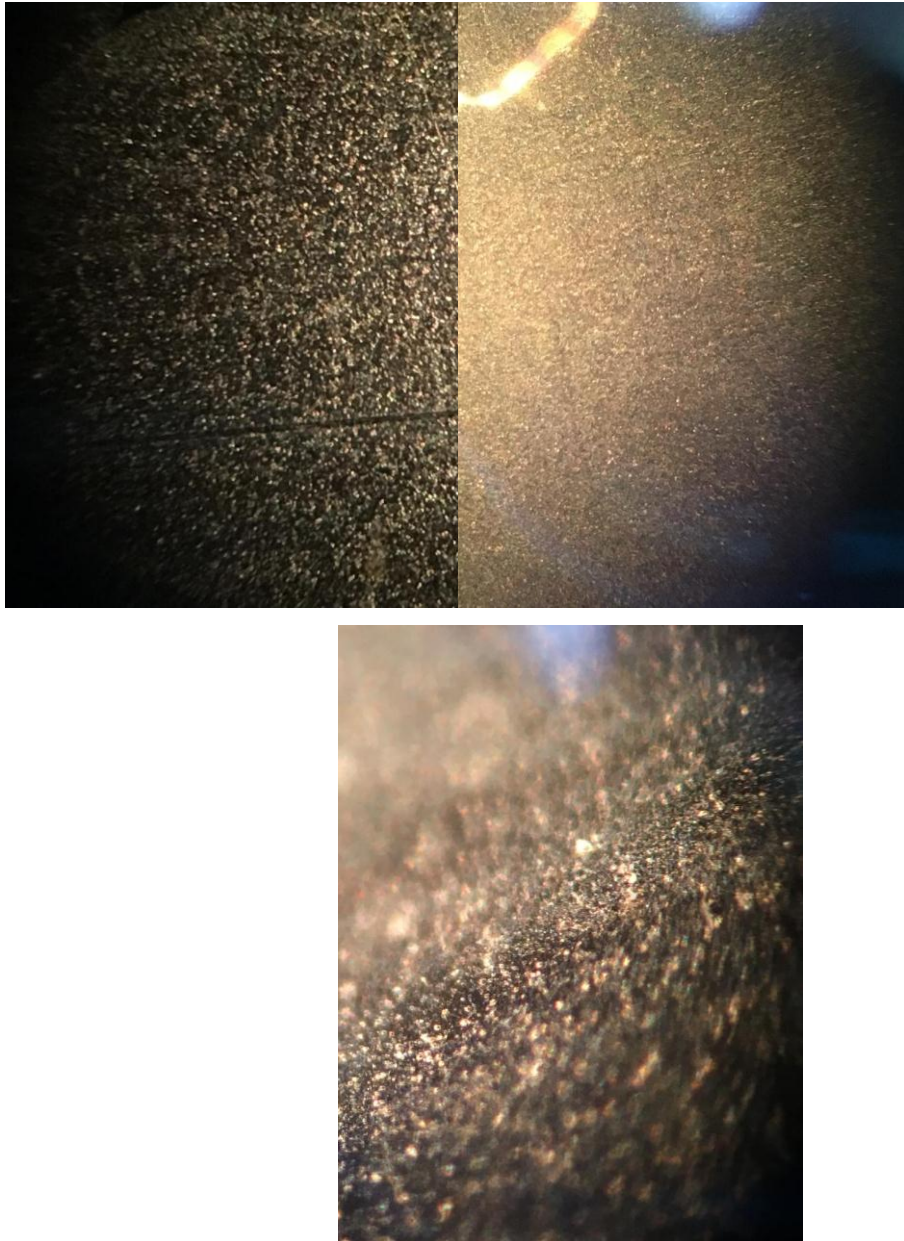
Figura 41. Microestructuras zona de transición Aleación 5052H34, 200X



En la zona central o zona agitada se observa en la figura 42, aquí se presenta una microestructura de granos equiaxiales muy finos este fuerte refinamiento

producto del fenómeno de recristalización (Dieguez & Svoboda, 2011), en este caso el tamaño de grano no pudo determinarse por falta de nitidez y definición en los bordes de grano.

Figura 42. Micrografías de la zona agitada aleación 5052-H34

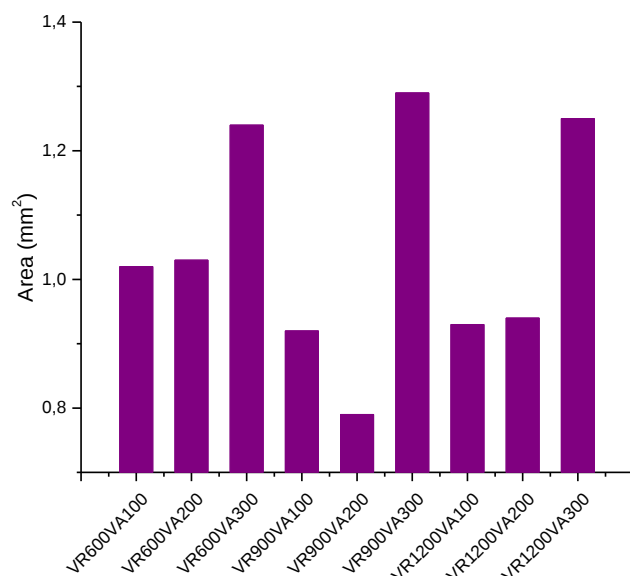


Para todas las condiciones de soldadura, se observa la formación de granos equiaxiales recristalizados, debido a la alta deformación plástica generada y a la ocurrencia de la recristalización dinámica (Bodaghi & Dehghani, 2017).

6.7 Correlación defectos de soldadura por fricción

Al analizar las superficies de los cordones soldados en cada condición se observa homogeneidad, no hay grupos y la superficie es continua, al hacer un corte transversal, en el interior de cada una de las placas soldadas se encuentra el defecto túnel que en todos los casos presenta ubicación central en mayor o menor tamaño. En la figura 43 se observa el comportamiento de la presencia de dichos defectos con los parámetros. Pese a las múltiples pruebas y ajustes realizados para eliminarlos no fue posible. En el Anexo 8 se muestra la tabla de valores de los defectos encontrados

Figura 43. Relación de defectos por cada condición aleación 5052-H34



De acuerdo a los datos obtenidos puede decirse que la condición con un tamaño de defectos más grande es la de V_R 600 a cualquier V_A . Para la VR 900 se encuentra que en V_A 300 se da el defecto más grande de todas las muestras, pero para V_A 100 y 200 se obtiene el menor de los defectos. Independientemente del valor de V_R utilizado, puede decirse que para V_A de 300 se presenta el mayor valor de defecto. La condición con menor tamaño de defecto en conjunto es al de V_R 1200.

6.8 Ensayo de Doblado

El objetivo de realizar esta prueba es conocer la calidad de la soldadura. Se observan unas probetas que no presentan fisuras y exhiben un buen comportamiento. Dado el su buen desempeño y el elevado ángulo de doblado que se manejó no se consideró necesario llevarlo hasta la ruptura debido a que presentan un resultado satisfactorio similar a lo encontrado por (Arroba-Arroba et al., 2017). La figura 44 muestra una buena unión entre las placas indicando que el proceso de soldadura por fricción fue efectivo en la aleación 5052-H34.

Figura 44. Probetas ensayo de doblado AA5052-H34



6.9 Correlación de ensayos con la relación V_R/V_A

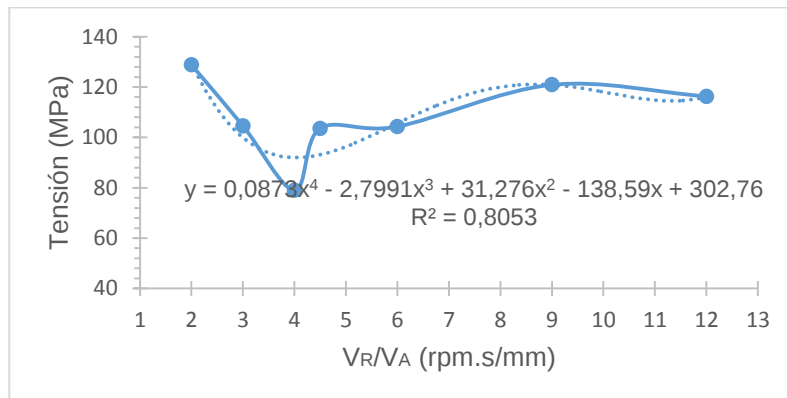
Cada uno de los ensayos realizados se compara con la relación V_R/V_A para determinar la incidencia de dicha razón.

Al analizar el comportamiento del ensayo de tensión, en la tabla 16 se presentan los valores de estos dos parámetros y, en la figura 46 se muestra la interacción y el comportamiento de los mismos.

Tabla 15. Resistencia a Tensión Vs V_R/V_A

Condición	Relación V_R/V_A (rpm/mm)	Tensión MPa
$V_R 600 - V_A 300$	2	128,8
$V_R 900 - V_A 300$	3	104,6
$V_R 1200 - V_A 300$	4	79
$V_R 900 - V_A 200$	4,5	103,6
$V_R 1200 - V_A 200$	6	104,3
$V_R 900 - V_A 100$	9	120,9
$V_R 1200 - V_A 100$	12	116,3

Figura 45. Resistencia a Tensión Vs V_R/V_A



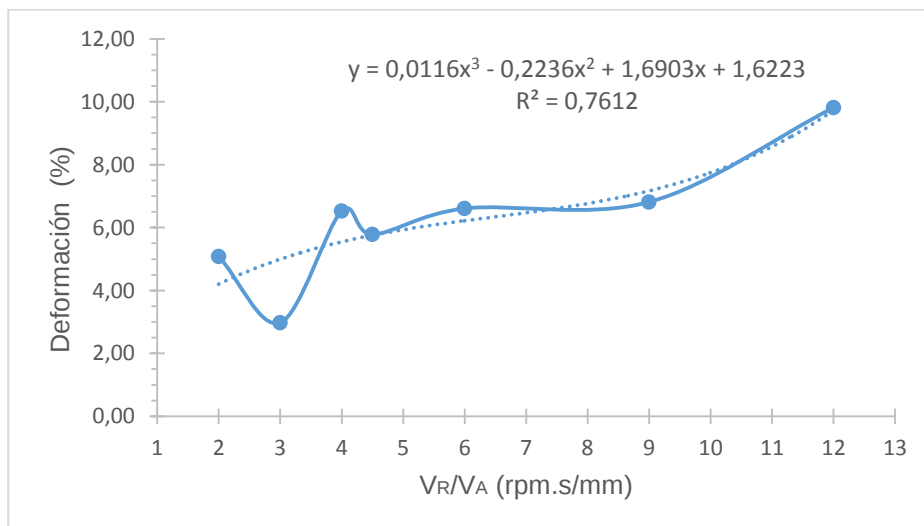
En la figura 45 puede observarse que a medida que el cociente V_R/V_A aumenta, la tensión presenta una disminución, aunque tienden a estabilizarse alrededor de un valor promedio de 100 MPa. En esta ocasión el mayor valor de tensión se ha obtenido para la menor relación V_R/V_A , situación producto de la alta generación de calor que varía con V_R al cuadrado como se presenta en la teoría, así a medida que se aumentan los valores de V_R se presenta un aumento de temperatura lo cual puede ocasionar una recristalización dinámica y un aumento en el tamaño de grano, de este modo se da un tratamiento término de ablandamiento del material y esto hace que se presenten menores valores de resistencia al tensión.

Ahora si se analiza el comportamiento del cociente V_R/V_A y el % deformación unitaria, se presentan los valores en la tabla 17 así como su interacción en la figura 46.

Tabla 16. % Deformación unitaria Vs. V_R/V_A

% Deformación Unitaria		
Condición	Relación V_R/V_A (rpm/mm)	% Deform.
$V_R 600 - V_A 300$	2	5,08
$V_R 900 - V_A 300$	3	2,98
$V_R 1200 - V_A 300$	4	6,53
$V_R 900 - V_A 200$	4,5	5,78
$V_R 1200 - V_A 200$	6	6,61
$V_R 900 - V_A 100$	9	6,81
$V_R 1200 - V_A 100$	12	9,81

Figura 46. % Deformación unitaria Vs. V_R/V_A



En la figura 46 se puede observar que a medida que el cociente V_R/V_A aumenta, el % de deformación unitaria aumenta por tanto se observa un comportamiento directamente proporcional, el mayor valor está relacionado con una mayor velocidad de giro y una menor velocidad de avance, puede decirse que el calor generado tiene el tiempo suficiente para ablandar el

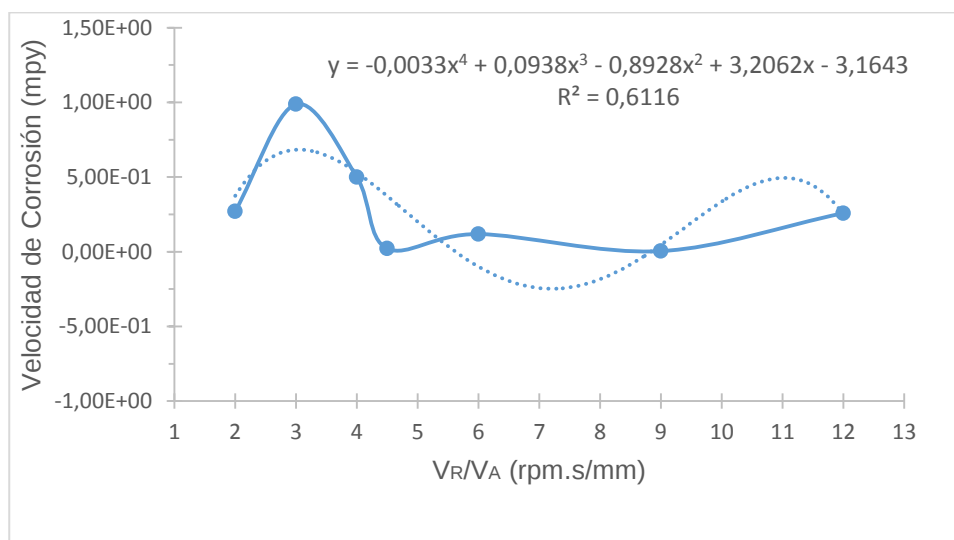
material y aumentar la ductilidad ocasionando por tanto una mayor deformación.

Siguiendo el análisis para la curva de polarización de Tafel y el cociente V_R/V_A , se observan los valores en la tabla 18 y su comportamiento en la figura 48.

Tabla 17. Curva de polarización de Tafel y el cociente V_R/V_A

Curva de polarización de Tafel		
Condición	Relación V_R/V_A (rpm/mm)	Velocidad de Corrosión (mpy)
$0V_R600 - V_A$ 300	2	2,70E-01
$V_R600 - V_A$ 200	3	9,87E-01
V_R 1200 - V_A 300	4	4,99E-01
V_R 900 - V_A 200	4,5	2,13E-02
V_R 1200 - V_A 200	6	1,18E-01
V_R 900- V_A 100	9	3,89E-03
V_R 1200 - V_A 100	12	2,58E-01

Figura 47. Curva de polarización de Tafel y el cociente V_R/V_A



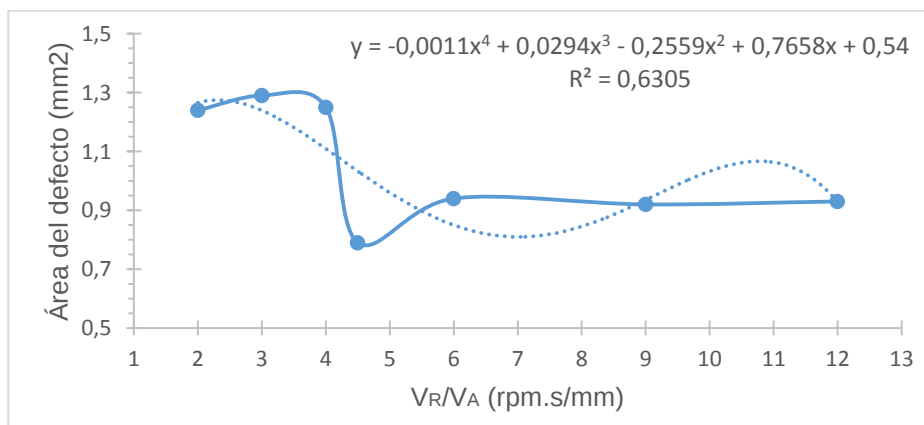
De la figura 47 se puede deducir que a medida que aumenta el cociente V_R/V_A se disminuye la velocidad de corrosión, aunque la mayoría de datos se mantiene en un valor promedio en el mismo rango alrededor de 0, con lo cual podría decirse que la razón V_R/V_A no incide sobre la velocidad de corrosión.

A continuación, en la tabla 19 se lista el tamaño de los defectos correlacionados con la razón V_R/V_A y en la figura 50 se muestra su tendencia.

Tabla 18. Defectos vs V_R/V_A

Defectos		
Condición	Relación V_R/V_A (rpm/mm)	Area mm2
$V_R 600 - V_A 300$	2	1,24
$V_R 900 - V_A 300$	3	1,29
$V_R 1200 - V_A 300$	4	1,25
$V_R 900 - V_A 200$	4,5	0,79
$V_R 1200 - V_A 200$	6	0,94
$V_R 900 - V_A 100$	9	0,92
$V_R 1200 - V_A 100$	12	0,93

Figura 48. Defectos vs V_R/V_A



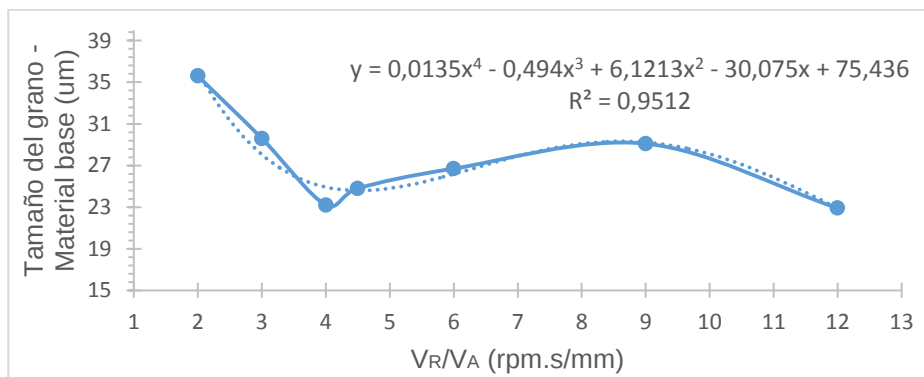
Una vez más se observa que a medida que crece la relación V_R/V_A , el área del defecto disminuye situación que se aprecia en la figura 48; es notorio que el menor tamaño se registra cuando se trabaja a 900 rpm y 200 mm/min. Se observa que el mayor defecto se obtiene a una menor velocidad de rotación y la mayor velocidad de avance, es decir a 600 rpm y 300 mm/min. Esto podría ser resultado de un poco calor generado y menor tiempo para que haya algún efecto de este proceso sobre la microestructura.

Finalmente, en la tabla 20 se muestran los valores que relacionan el cociente V_R/V_A y el tamaño de grano, la figura 49 muestra la interacción para el metal base y la figura 50 para la zona termomecánicamente afectada.

Tabla 19. Tamaño de grano vs V_R/V_A

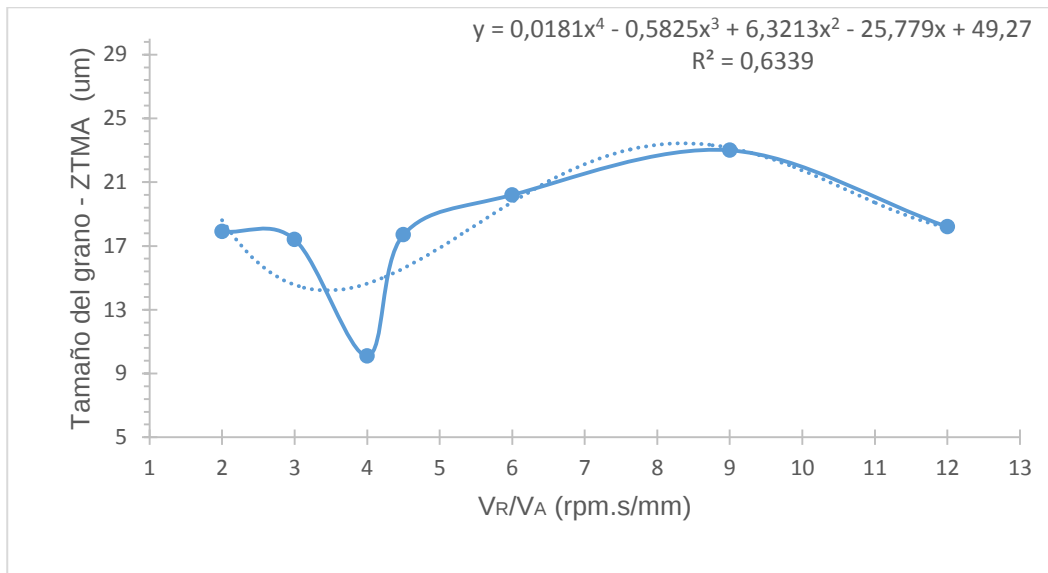
Tamaño de grano			
Identificación Muestra	Relación V_R/V_A (rpm/mm)	Material Base (μm)	Zona de Transición (μm)
$V_R600 - V_A 300$	2	35,6	17,9
$V_R600 - V_A 200$	3	29,6	17,4
$V_R 1200 - V_A 300$	4	23,2	10,1
$V_R 900 - V_A 200$	4,5	24,8	17,7
$V_R600 - V_A100$	6	26,7	20,2
$V_R 900 - V_A 100$	9	29,1	23
$V_R1200 - V_A100$	12	22,9	18,2

Figura 49. Tamaño de grano vs V_R/V_A para el metal base



En el caso del metal base se observa una disminución del tamaño de grano a medida que el cociente V_R/V_A aumenta. Esta situación es atípica debido a que se esperaría que el metal base presente valores similares, aquí se encuentran valores entre 22,9 y 35,6 micras. Esto se presenta probablemente por un error en las mediciones producto de la calidad de las micrografías obtenidas.

Figura 50. Tamaño de grano vs V_R/V_A para la zona de transición

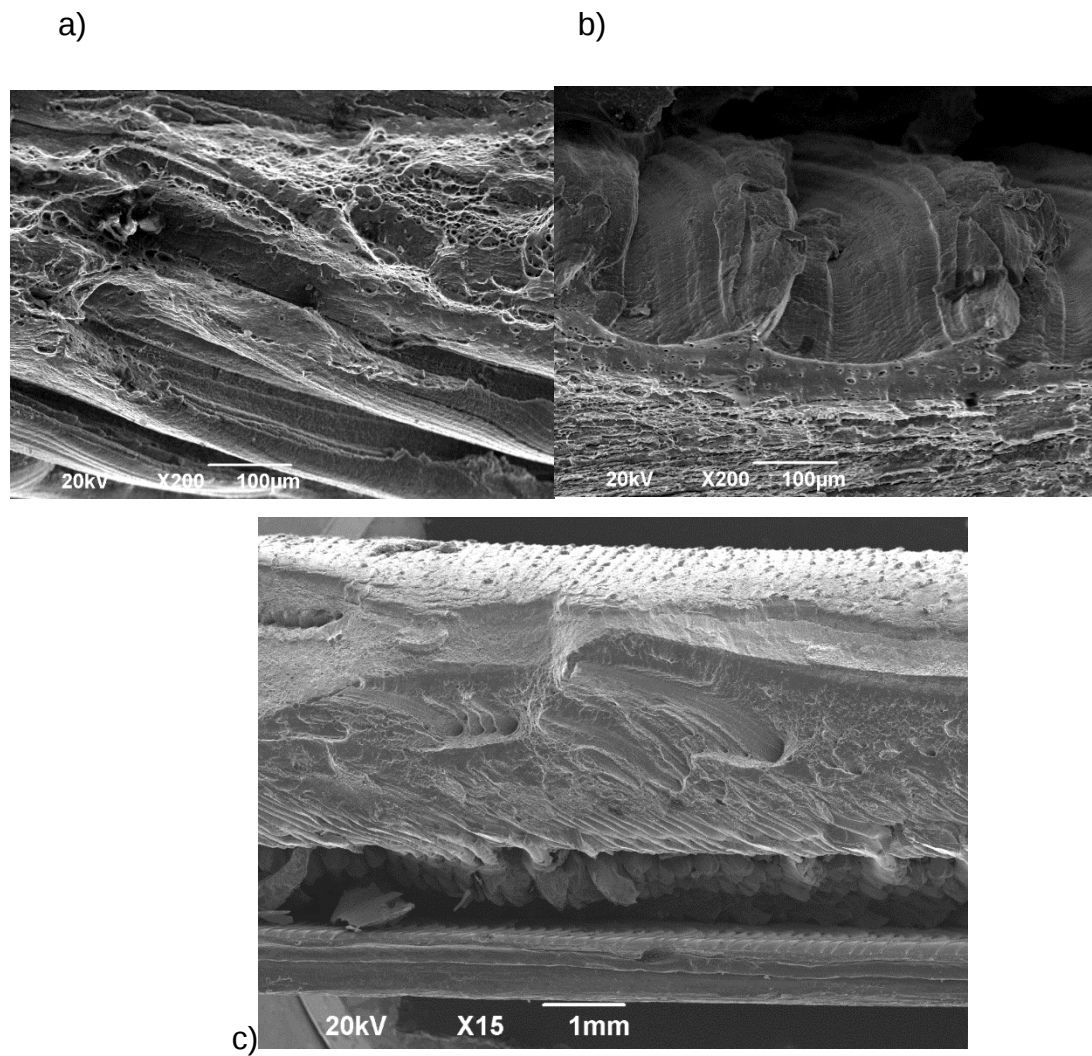


En el caso de la ZTMA, se observa una disminución de tamaño de grano comparado con el metal base, donde los valores fluctúan entre 17 y 23 micras comparables a los encontrados por (Bodaghi & Dehghani, 2017). Se observa que a medida que aumente la relación V_R/V_A , se da un aumento del tamaño de grano producto del calor generado posiblemente.

6.10 Tipo de fractura

Se observa un tipo de fractura frágil en las micrografías SEM analizadas en la figura 51, posiblemente por tratarse de una aleación con endurecimiento en frío y estructura laminar. Se detecta zonas con huellas de la rosca del pin de la herramienta y en algunas zonas se presenta muestras de fractura dúctil principalmente en la ZA producto del calor generado.

Figura 51. Macrografía superficie de fractura de la unión soldada por SFA, en prueba de tensión



En la figura 51.a se observan las marcas del pin dejadas en el proceso de rotación como producto del ablandamiento del material debido al calor generado durante la fricción. En la figura 51.b se muestra una zona más estrecha, ubicada hacia el lado raíz de la soldadura presenta una condición fibrosa, caracterizada por grandes deformaciones consecuente con el

comportamiento del material con tamaños de grano más grande similar a lo que reporta (Ávila, 2011).

Es evidente el defecto de túnel presente en la raíz de la soldadura apreciable en la figura 51.c, durante la prueba de tensión produjo una gran baja en dicho valor, ocasionando un menor valor que el metal base y propiciando la falla en dicha zona.

Conclusiones

Con los rangos de valores de Velocidad de Rotación de la herramienta y velocidad de avance se pudo generar soldaduras por el proceso SFA que presentan un buen acabado superficial y una aceptable calidad. Sin embargo, se requiere hacer un ajuste en los otros parámetros operativos para mejorar la calidad de las uniones soldadas y las correspondientes propiedades mecánicas.

.

Las variables del proceso de soldadura por fricción agitación juegan un papel importante a nivel transformaciones de fase y microestructura de las uniones soldadas siendo V_R , velocidad de rotación, la más determinante dado que se encarga de generar el calor suficiente para producir el efecto necesario sobre el material y además varía de manera cuadrática, esto permite evidenciar que a mayores velocidades de rotación se genera mayor cantidad de calor lo cual propicia mayor facilidad de la agitación y puede incidir de manera positiva en la calidad de la soldadura en determinados rangos ocasionando así una mejora en las propiedades mecánicas.

La resistencia a la tensión en todas las probetas indica tendencia ascendente correspondiente a relaciones V_R/V_A ascendentes, lo cual puede relacionarse con el incremento del calor generado a medida que aumenta las velocidades de rotación, aumenta la plastificación del material y se mejora la calidad de la junta soldada. La falla en los ensayos de tracción de las probetas se produjo en la zona afectada térmicamente, lo que indica que a pesar de tener el defecto túnel, este no fue la causa principal de la falla de las probetas.

En todos los casos se presenta buena resistencia a la corrosión donde el mejor comportamiento se obtiene cuando V_R es 600, esto debido a que el calor generado no afecta esta característica del metal base, dada la alta resistencia presentada por la aleación 5052. Sin embargo, comparado con el metal base, las uniones soldadas presentan un comportamiento aceptable lo cual sugiere que es posible utilizarse en aplicaciones navales donde el material estaría expuesto a ambientes altamente corrosivos.

Recomendaciones

- Ajustan las condiciones del proceso de soldadura, por ejemplo, el ángulo de inclinación para soldaduras en un centro de mecanizado (1°-2°)
- Hacer evaluación más completa de resistencia a la corrosión e incluso realizar pruebas de corrosión bajo tensión.
- Proyectar el estudio hacia evaluar las propiedades dinámicas como fatiga.

Referencias Bibliográficas

- AlCan. (1986). Research and Development Limited. Corrosión considerations in overhead aluminum conductors.
- Anon. (1994). Marine Applications of Aluminum Alloys. Key to metals database. Available at: Retrieved from www.keytometals.com/Article99.htm
- Aperador, W., Neira, G. H., & Ruiz, J. H. B.-. (2012). Evaluación de la corrosión de la aleación de aluminio 6063 protegida mediante el proceso de anodizado duro, 9(1), 39–49.
- Architecture, T. A., Composition, C., & Mechanical, S. (n.d.). *Aluminium 5052 Aluminium Alloys Aluminium Grade 5052*.
- Arroba-Arroba, C., Vaca-ortega, W., Peña-jordán, F., Núñez-núñez, D., & Taopanta-Bautista, R. (2017). DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSW) EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN LA SOLDADURA POR FRICCIÓN- JUNTA DE ALUMINIO 6061.
- ASTM Standard B928/B928M. (2009). Standard Specification for High Magnesium Aluminum-Alloy Sheet and Plate for Marine Service and Similar Environments. *ASTM Book of Standards*, (February 2004), 1–12. <https://doi.org/10.1520/B0928>
- Ávila, J. A. (2011). *Comportamiento a la fatiga de las uniones soldadas por fricción agitación de la aleación de magnesio AZ31B*. Universidad del Valle. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/307113454_Comportamiento_a_la_fatiga_de_las_unionessoldadas_por_friccion_agitacion_de_la_aleacion_de_magnesio_AZ31B
- Bodaghi, M., & Dehghani, K. (2017). Friction stir welding of AA5052 : the effects of SiC nano-particles addition, 2651–2660. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8959-8>
- Cabibbo, M., Forcellese, A., & Simoncini, M. (2016). New Approaches to the Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. In M. Ishak (Ed.), *Joining Technologies*. CC BY 3.0 license. <https://doi.org/10.5772/64523>
- Cabot, P., Moglioni, A., & Carella, E. (2003). Soldadura Por Friccion Agitacion (FSW) De AA 6061 T6, 8, 187–195.
- Cao, M. Wang, L. Kong, and L. Guo. (2016). “Hook formation and mechanical properties of friction spot welding in alloy 6061-t6,.” *Journal of Materials Processing Technology*, 230, 254–262. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.026>
- Cárdenas, H. F., Franco, F., Ávila, J. A., & Jaramillo, H. E. (2011). Evaluación de la resistencia a la tensión de uniones soldadas por fricción agitación de la aleación de aluminio. *El Hombre y La Máquina*, 36.
- CUI, S., CHEN, Z. W., ROBSON, J. D. (2010). A model relating tool torque and its associated power and specic energy to rotation and forward speeds during friction stir welding/processing. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINE TOOLS & MANUFACTURE*, 50(12), 1023–1030. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.09.005>.

- D'Urso, G., Giardini, C., Lorenzi, S., Cabrini, M., & Pastore, T. (2017). The Effects of Process Parameters on Mechanical Properties and Corrosion Behavior in Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. *Procedia Engineering*, 183, 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.038>
- DAVIS, T. A., SHIN, Y. C., YAO, B. (2011). Observer-Based Adaptive Robust Control of Friction StirWelding Axial Force. *Observer- IEEE-ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, 16(6), 1032–1039. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2010.2071417>
- Defalco, J., & Steel, R. (2009). Proceso de fricción agitación ahora suelda tubería de acero. *WELDING JOURNAL*, 32–36.
- Dieguez, T., & Svoboda, H. (2011). Estabilidad térmica de aleaciones de Aluminio procesadas por fricción. *LatinAm. Metal. Mat*, 32(1), 6–9.
- Doherty, R. D., Hughes, D. A., Humphreys, F. J., Jonas, J. J., Jensen, D. J., Kassner, M. E., ... Rollett, A. D. (1997). Current issues in recrystallization: a review. *Materials Science and Engineering: A*, 238(2), 219–274. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00424-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00424-3)
- ELANGO VAN, K.; BALASUBRAMANIAN, V.; BABU, S. (2009). Predicting tensile strength of friction stir welded AA6061 aluminium alloy joints by a mathematical model. *En: Materials and Design.*, 30, 188–193.
- Gean, A., Westgate, S. A., Kucza, J. C., & Ehrstrom, J. C. (1999, March). Static and Fatigue Behavior of Spot-Welded 5182-0 Aluminum Alloy Sheet, pp. 80–86. Retrieved from <http://files.aws.org/wj/supplement/Gean/ARTICLE2.pdf>
- Genescá, J. (n.d.). *Técnicas electroquímicas de corriente directa para la determinación de la velocidad de corrosión*. México.
- Gil, L. (1997). CURSO_CORROSION. In *Corrosion* (p. 206).
- Gourdet, S., & Montheillet, F. (2000). An experimental study of the recrystallization mechanism during hot deformation of aluminium. *Materials Science and Engineering: A*, 283(1–2), 274–288. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00733-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00733-4)
- Kesharwani, R. K., Panda, S. K., & Pal, S. K. (2014). Multi Objective Optimization of Friction Stir Welding Parameters for Joining of Two Dissimilar Thin Aluminum Sheets. *Procedia Materials Science*, 6(Icmpc), 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.022>
- KUMAR, R., SINGH, K., PANDEY, S. (2012). Process forces and heat input as function of process parameters in AA5083 friction stir welds v. 22, n. 2, pp. 288_298, 2012. ISSN: 1003-6326. doi: *TRAN- SACTIONS OF NONFERROUS METALS SOCIETY OF CHINA*, 22(2), 288–298. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\) 61173-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11) 61173-4)
- Kumbhar, N. T., Sahoo, S. K., Samajdar, I., Dey, G. K., & Bhanumurthy, K. (2011). Microstructure and microtextural studies of friction stir welded aluminium alloy 5052. *Materials & Design*, 32(3), 1657–1666. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.010>
- LEITÃO, C., LOURO, R., RODRIGUES, D. M. (2012). Using torque sensitivity analysis in accessing Friction StirWelding/Processing conditions. *JOUR-*

NAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, 212(10), 2051_2057. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.05.009>

López G, R. (2013). *Soldadura por fricción*.

Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing, 50, 1–78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>

Moreno Zavala, A. G. (2015). *ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE LA UNIÓN DISIMILAR DE UN ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36 CON UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA5052-H34*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Moshwan, R., Yusof, F., Hassan, M. A., & Rahmat, S. M. (2015). Effect of tool rotational speed on force generation, microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al?Mg?Cr?Mn (AA 5052-O) alloy. *Materials & Design (1980-2015)*, 66, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.043>

Nandan, R., Debroy, T., & Bhadeshia, H. (2008). Recent advances in friction-stir welding ? Process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, 53(6), 980–1023. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.05.001>

Peczak, P. (1995). A monte carlo study of influence of deformation temperature on dynamic. *Acta Metall, Mater*, 43(3).

Pérez de Ciriza Gárriz, A. (2017). *Estudio del comportamiento frente a corrosión de una nueva aleación secundaria AlSi10MnMg (Fe)*. PUBLICA UNIVERSITAS NAVARRENSIS.

PEW, J. W., NELSON, T. W., SORENSEN, C. D. (2007). Torque based weld power model for friction stir welding. *SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WELDING AND JOINING*, 12(4), 341–347. <https://doi.org/10.1179/174329307X197601>

Piratoba Morales, U., Ortiz Otálvaro, C., & López Vera, E. (2010). ASPECTOS BÁSICOS EN LA INTERPRETACIÓN DE DIAGRAMAS DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA. *DYNA*, 77(162), 13–19.

Poliak, E. I., & Jonass, J. . (1996). A ONE-PARAMETER APPROACH TO DETERMINING THE CRITICAL CONDITIONS FOR THE INITIATION OF DYNAMIC RECRYSTALLIZATION, 44(1), 127–136.

Quintana, K. J. (2016). Modelos para forças e torque na soldagem por atrito-mistura, 100.

Ren, S. R., Ma, Z. Y., & Chen, L. Q. (2007). Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al – Mg – Si alloy, 56, 69–72. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.08.054>

Sato, Y. S., Sugiura, Y., Shoji, Y., Park, S. H. C., Kokawa, H., & Ikeda, K. (2004). Post-weld formability of friction stir welded Al alloy 5052. *Materials Science and Engineering: A*, 369(1–2), 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.11.035>

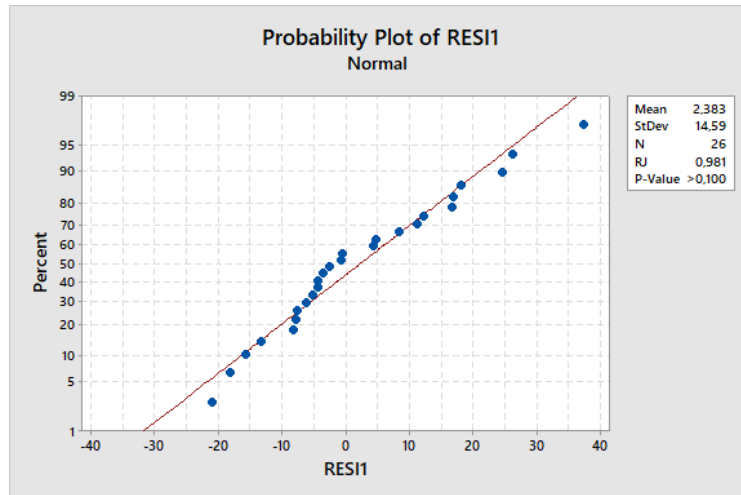
Shanavas, S., & Dhas, J. E. R. (2017). Parametric optimization of friction stir welding parameters of marine grade aluminium alloy using response surface methodology. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*,

- 27(11), 2334–2344. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60259-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60259-0)
- Soediono, B., Biologia, E. D. E., Camargo, A., Aperador, W., Rios, A., Ortiz, C., ... Lasia, A. (2014). Espectroscopía De Impedancia Electroquímica En Corrosión. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 41(7), 3–5. <https://doi.org/10.3989/collectbot.1989.v17.143>
- SU, H., WU, C., PITTNER, A., et al. (2013). Simultaneous measurement of tool torque, traverse force and axial force in friction stir welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(4), 495–500. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.09.001>.
- Svoboda, G. (2009). *Proceso de Soldadura por Fricción-Agitación*. Buenos Aires, Argentina.
- Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R., & Withers, P. J. (2009). Friction stir welding of aluminium alloys. *International Materials Reviews*, 54(2), 49–93. Retrieved from <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-stir-welding-of-aluminium-alloys/>
- UPADHYAY, P., REYNOLDS, A. P. (2010). . _E_ects of thermal boundary conditions in friction stir welded AA7050-T7. *MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING A-STRUCTURAL MATERIALS PROPERTIES MICROSTRUCTURE AND PROCESSING*, 527(61), 1537–1543. <https://doi.org/{10.1016/j.msea.2009.10.039}>.
- Urbano, L., & Ávila, J. A. (2011). Evaluación de la resistencia a la tensión de las juntas soldadas de la aleación de aluminio 6261-T5 por el proceso de soldadura por fricción-agitación, (June).
- Vera, R., Schrebler, R., Orellana, G. L. F., & Olguín, A. (1998). Corrosión por picaduras del aluminio y de la aleación Al-6201 en soluciones de NaCK *). *Rev. Metal. Madrid*, 34(3), 1–6. Retrieved from <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es>
- Zhang, Z., Yang, X., Zhang, J., Zhou, G., Xu, X., & Zou, B. (2011). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy. *Materials & Design*, 32(8–9), 4461–4470. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.058>

Anexos

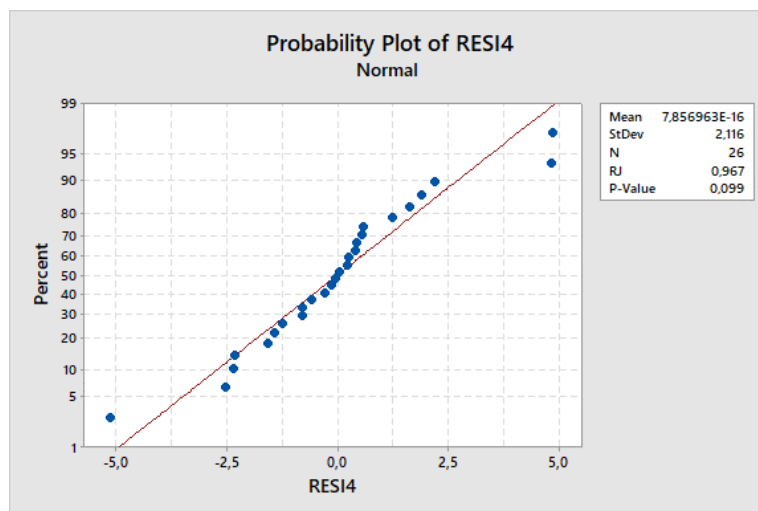
Anexo 1. Validación de supuestos

NORMALIDAD



TENSION

ELONGACIÓN



Validación de supuesto de homogeneidad de varianzas

Tensión

Test for Equal Variances: tension versus vf; rpm

Null hypothesis All variances are equal

Alternative hypothesis At least one variance is different

Significance level $\alpha = 0,05$

Test

Method	Statistic	P-Value
Levene	0,44	0,882

Test for Equal Variances: elonga% versus vf; rpm

Tests

Test		
Method	Statistic	P-Value
Levene	0,85	0,571

Anexo 2. Programa con el que se realizó el proceso de soldadura en el centro de mecanizado del taller de la escuela de Ingeniería mecánica.

O1000;

N10 G21 G90;

N30 M6 T10;

N40 S600 M3;

N50 G0 Z100 X0 Y0;

N60 G1 Z – 4.6 F100;

N70 G1 X30 F100;

N80 G1 Z20;

N85 Z100;

N100 M30;

%

Anexo 3. Programa con que se realizó el proceso de preparación de las probetas para tensión en el centro de mecanizado.

G1 Z-5.5 F100

G1 X – 35 Y20

G1 X - 35 Y-14 F100

G1 X35 Y14

G1 X35,792 Y14,74

G2 X31 Y12,35 R12

G1 X – 31 Y12,35

G2 X – 35,792 Y14,74 R12

G1 Z5 F300

G1 X - 35 Y-20

G1 Z-5.5

G1 X-35 Y-14 F100

G1 X35 Y-14

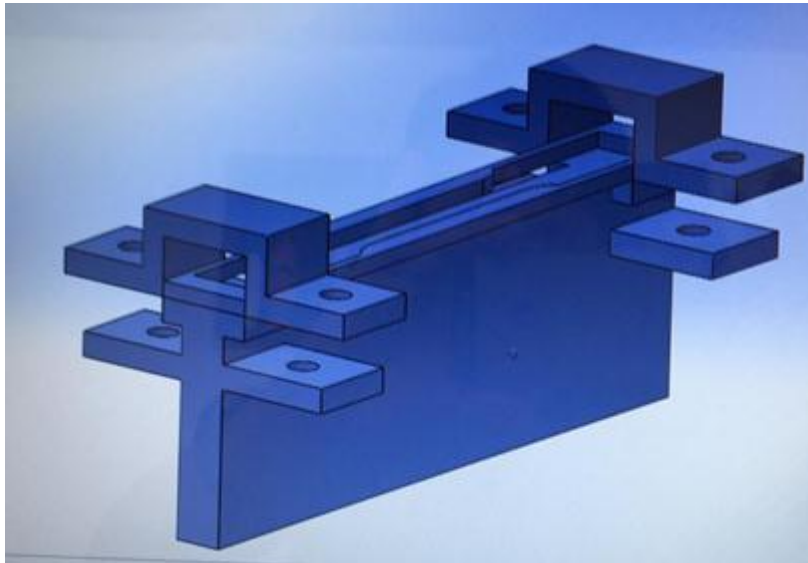
G1 X35,792 Y – 14,74 R12

G3 X31 Y-12,35 R12

G1 X – 31 Y-12,35

G3 X – 35,792 Y-4,74 R12
G1 Z50 F300

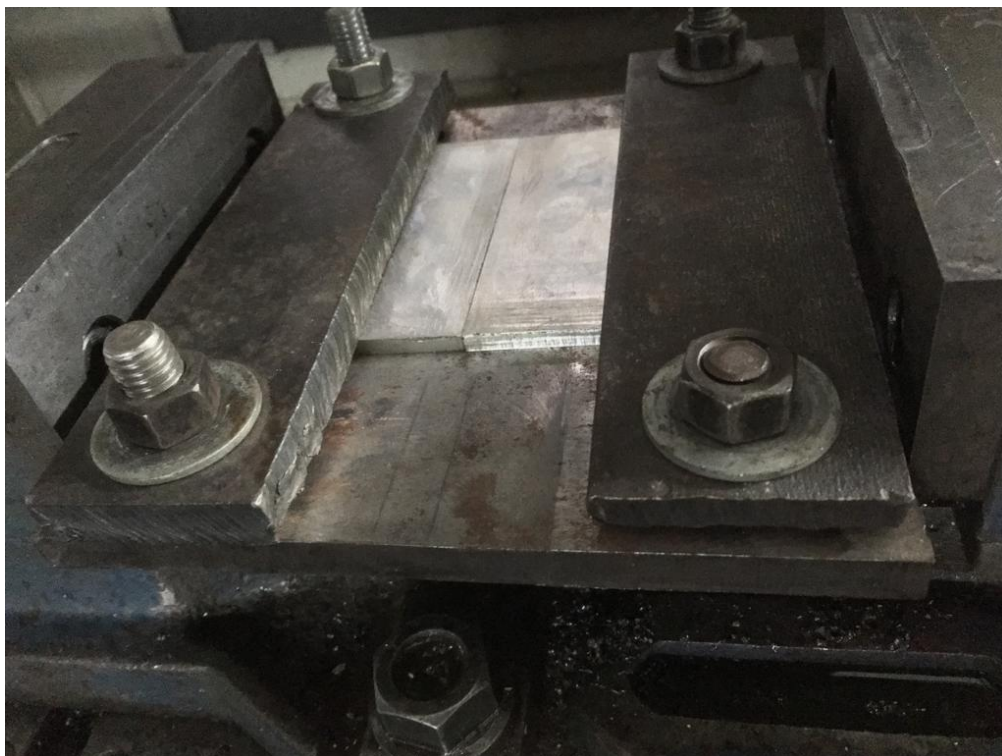
Anexo 4. Utillaje para el mecanizado de las probetas para tensión



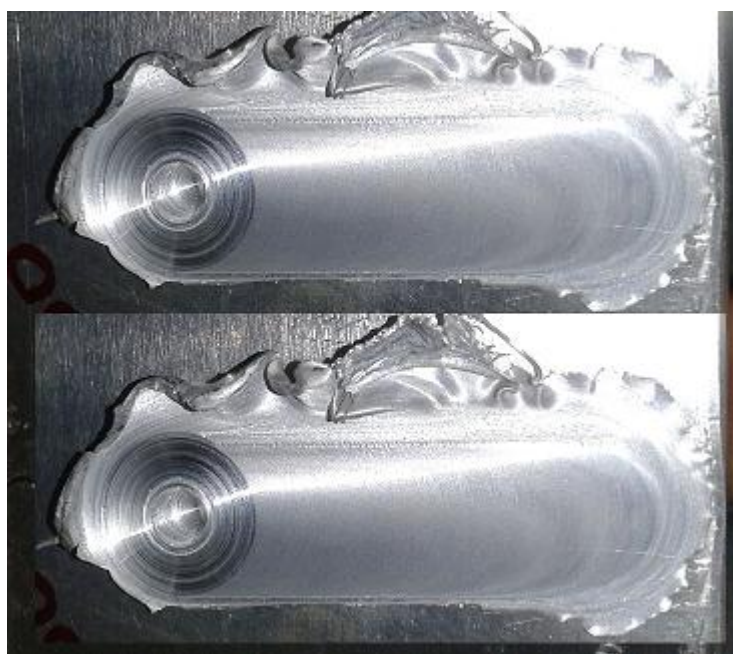
Anexo 5. Herramienta utilizada



Anexo 6. Montaje de las placas



Anexo 7. Soldaduras obtenidas



Anexo 8. Tabla valores de defectos

Defectos probetas			
Condición	Pixeles Base	Pixeles Medidos	Area mm2
V_R600-V_A100	19040	19408	1,02
$V_R600- V_A 200$	17424	17978	1,03
$V_R600- V_A 300$	93600	116008	1,24
$V_R 900- V_A 100$	17424	16099	0,92
$V_R 900 - V_A 200$	89936	70921	0,79
$V_R 900 - V_A 300$	99840	128523	1,29
$V_R 1200 - V_A 100$	16384	15183	0,93
$V_R 1200 - V_A 200$	2209	2077	0,94
$V_R 1200 - V_A 300$	84096	104764	1,25