

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE LA ALEACIÓN AA 6063-T6
PROCESADA MEDIANTE FRICCIÓN BATIDO

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico

que presenta el bachiller:

EDUARDO REYES ORÉ

ASESOR: **Francisco Rumiche**

Lima, diciembre de 2014

Resumen

El presente trabajo está dedicado a evaluar la resistencia a la corrosión de la aleación de aluminio AA6063-T6 procesada mediante fricción batido.

Para el desarrollo del trabajo se elaboraron probetas de 150 x 100 x 2.8 mm las cuales fueron procesadas por fricción batido con una misma velocidad de rotación (600 RPM) y con diferentes velocidades de avance (60, 100, 120, 160 y 200 mm/min).

Luego de que las probetas fueron fabricadas, se procedió a la inspección visual y a la realización de los ensayos microestructurales para ver si el proceso se había realizado adecuadamente y en que combinación de velocidades se obtenía una adecuada estructura; asimismo, para evaluar como la microestructura de las 3 zonas (Zona afectada por el calor, Zona termo mecánicamente afectada, Zona batida) variaba con respecto al metal base.

Además, se realizó un barrido de dureza en la zona transversal a un 1 mm de la superficie para analizar la variación de dureza en las 3 zonas del proceso con respecto al material base.

Por último, se realizaron los ensayos de corrosión. Los primeros ensayos fueron los de inmersión, donde se fabricaron 3 clases de muestras por cada probeta, una de la zona batida, la otra de la zona termo mecánicamente afectada y la última fue de una muestra de las 3 zonas con una parte del material base. Todas estas probetas fueron sumergidas en una solución de 1M HCl y pesadas luego de 72, 96 y 144 horas de haber sido sumergidas. Para corroborar los resultados obtenidos se realizaron ensayos electroquímicos. Se fabricaron muestras circulares de 15 mm de diámetro para cada probeta. A continuación se realizaron ensayos de potencial del circuito abierto y luego se procedió con los ensayos potenciodinámicos. Finalmente, las probetas sumergidas 144 horas fueron analizadas en un microscopio electrónico de barrido para evaluar el modo de corrosión.



Dedico este trabajo a mis padres Enervina y Manuel, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien.

Agradecimientos

La presente Tesis es fruto del apoyo directo e indirecto de muchas personas. Agradezco el apoyo incondicional de mis padres, a todos los profesores que me ayudaron a en mi formación profesional.

A mi asesor de tesis el Dr. Francisco Rumiche por los consejos, apoyo, ánimo brindado y sobre todo por su paciencia ante mi inconsistencia; le agradezco sus comentarios en todo el proceso de elaboración de la Tesis y sus atinadas correcciones.

Al Ing. Anibal Rosas Gallegos, por facilitarme el uso de las instalaciones del Laboratorio de Materiales de la Universidad.

Al Ing. Rolando Nuñez y Wilber Carrasco, por su apoyo en la inspección microestructural y ensayos de dureza de las probetas.

Al profesor Jose Brañez Zenteno, por su apoyo y paciencia en la fabricación de las probetas en el taller de manufactura.

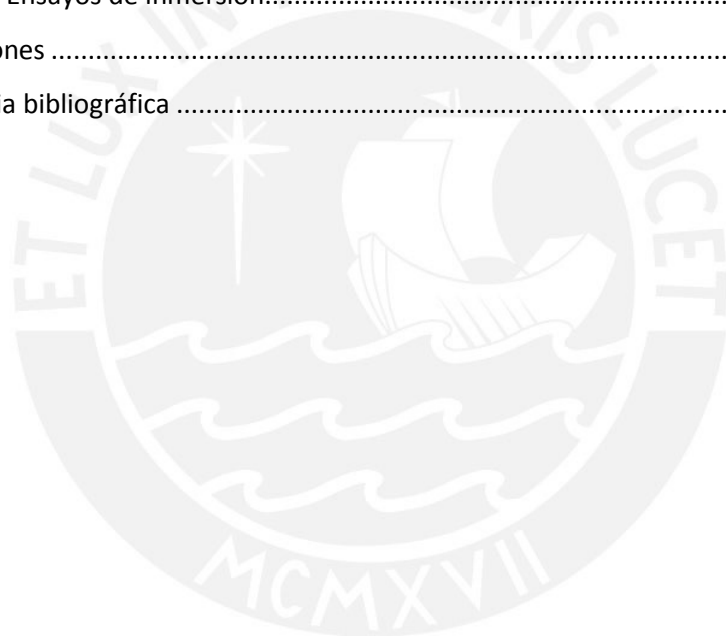
Mi entero agradecimiento a todos quienes trabajan en el Laboratorio de Materiales, por su amistad y por asistirme desinteresadamente durante los ensayos mecánicos.

Por último, deseo agradecer a todos mis familiares, por ser lo más grande que Dios me dio y por ser mi soporte anímico a lo largo de la carrera.

Índice

1. Fundamento teórico.....	4
1.1. Aluminio puro.....	4
1.1.1. Aleaciones de aluminio	5
1.1.2. Aleación de aluminio de serie 6xxx	7
1.2. Proceso de fricción batido (FSP)	8
1.2.1. Descripción del proceso	8
1.2.2. FSP en aleaciones de aluminio	12
1.2.3. Resistencia a la corrosión aleaciones de aluminio procesadas por FSP.....	17
2. Procedimiento experimental	28
2.1. Metodología de trabajo	28
2.2. Características del material a emplear	28
2.3. Ejecución del proceso de fricción batido	30
2.3.1. Parámetros usados en el proceso de fricción batido.....	30
2.4. Estudio de la corrosión la aleación de aluminio procesada por FSP.....	35
2.4.1. Ensayo de corrosión por inmersión	35
2.4.2. Caracterización electroquímica del material procesado.....	37
2.5. Caracterización mecánica del material ensayado.....	42
2.5.1. Ensayo de Dureza	42
2.5.2. Análisis micro estructurales	43
3. Obtención y análisis de resultados	46
3.1. Análisis microestructural.....	46
3.1.1. Probeta 1 (600 RPM, 60 mm/min)	51
3.1.2. Probeta 2 (600 RPM, 100 mm/min)	55
3.1.3. Probeta 3 (600 RPM, 120 mm/min)	58
3.1.4. Probeta 4 (600 RPM, 160 mm/min)	61
3.1.5. Probeta 5 (600 RPM, 200 mm/min)	64

3.2.	Ensayos de microdureza Vickers.....	67
3.2.1.	Probeta 1 (600 RPM, 60 mm/min).....	68
3.2.2.	Probeta 2 (600 RPM, 100 mm/min).....	70
3.2.3.	Probeta 3 (600 RPM, 120 mm/min).....	72
3.2.4.	Probeta 4 (600 RPM, 160 mm/min).....	74
3.2.5.	Probeta 5 (600 RPM, 200 mm/min).....	76
3.3.	Variación del potencial del circuito abierto (OCP).....	78
3.4.	Curvas de Tafel potenciodinámicas.....	80
3.5.	Ensayos de inmersión.....	84
	Conclusiones	97
	Referencia bibliográfica	100



ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO 1: FUNDAMENTO TEÓRICO

Figura 1. 1 Herramienta de trabajo de proceso de fricción batido.....	9
Figura 1. 2 Representación esquemática de soldadura por fricción batido y parámetros.....	10
Figura 1. 3 Canal realizado por el proceso de fricción batido.....	10
Figura 1. 4 Zonas del proceso de fricción batido	11
Figura 1. 5 Zona de avance y retroceso	12
Figura 1. 6 Efecto de la velocidad de rotación sobre la dureza y esfuerzo de tracción de I1050 procesado por fricción batido	13
Figura 1. 7 Efecto de parámetros de proceso de una aleación 7075Al-T651 procesada por fricción batidos con los parámetros (a) 350 rpm, 152 mm/min and (b) 400 rpm, 102 mm/min	14
Figura 1. 8 Efecto de la velocidad de deformación en el porcentaje de elongación obtenido.....	15
Figura 1. 9 Microestructura de una superficie compuesta con 5083Al de sustrato procesado por fricción batido a 300 RPM a una velocidad de avance de: 101.6mm/min 25.4mm/min, figura de izquierda y derecha, respectivamente.	16
Figura 1. 10 Zona de pasivación de aluminio	16
Figura 1. 11 Pérdida de peso en función del PH	17
Figura 1. 12 Curvas de calentamiento y enfriamiento de la aleación de aluminio AA7075 soldada mediante fricción batido	18
Figura 1. 13 Imágenes de la microestructura FSP con el microscopio SEM después de ser sometidos a ensayos de inmersión	19
Figura 1. 14 Curvas de Polarización en diferentes números de pasadas.....	20
Figura 1. 15 Diagrama de curvas de polarización tafel	21
Figura 1. 16 Curvas de Circuito de potencial abierto (OCP).....	22
Figura 1. 17 Curvas de polarización Tafel en las 3 regiones de la zona procesada.....	23
Figura 1. 18 Análisis macro de la zona procesada por fricción batido.....	23
Figura 1. 19 Curvas de polarización Tafel en probetas procesadas a velocidad de avance constante a)Zona batida b) Zona afectada por el calor.....	24
Figura 1. 20 Curvas de polarización Tafel en probetas procesadas a velocidad de rotación constante a) Zona batida b) Zona afectada por el calor.....	25
Figura 1. 21 Gráfico de pérdida de peso a) velocidad de avance constante b) Velocidad de rotación constante	26
Figura 1. 22 Velocidad de corrosión vs tiempo de exposición a la solución.....	27

CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Figura 2. 1 Planchas de aluminio AA 6063- T6	29
--	----

Figura 2. 2 Herramienta del proceso de fricción batido	30
Figura 2. 3 Tratamiento térmico a la herramienta del proceso de fricción batido	31
Figura 2. 4 Esquema del canal de soldadura.....	33
Figura 2. 5 Centro de mecanizado CNC marca MAZAK modelo VTC-16B.....	33
Figura 2. 6 Sujeción de probeta para el procesado de fricción batido	34
Figura 2. 7 Proceso de fricción batido.....	34
Figura 2.8 Canal de soldadura a 600RPM y 200 mm/min.....	35
Figura 2. 9 Probetas para inmersión 1) SZ 2) TMAZ.....	35
Figura 2. 10 Probeta para inmersión de todas las regiones.....	36
Figura 2. 11 Probetas sumergidas en 1M HCL	36
Figura 2. 12 Esquema del corte de las probetas para ensayos potenciodinámicos	37
Figura 2. 13 Porta muestras K105	38
Figura 2. 14 Potenciostato Reference 600	38
Figura 2. 15 Celda de corrosión modelo K47	39
Figura 2. 16 Universal Dummy Cell	40
Figura 2. 17 Esquema de celda electroquímica	40
Figura 2. 18 Probetas para ensayo de dureza	42
Figura 2. 19 Micro durómetro Vickers	43
Figura 2. 20 Probetas embriquetadas para ensayos metalográficos y macrográficos	44

CAPITULO 3: OBTENCIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS

Figura 3. 1 Esquema de la zona procesada	46
Figura 3. 2 Metal base 800X SEM (figura izquierda) Zona batida probeta 3 3000X SEM (figura derecha)	48
Figura 3. 3 Macrografía de la zona procesada probeta 1 (600RPM, 60mm/min)	52
Figura 3. 4 Zona batida (Probeta 1 500 X).....	53
Figura 3. 5 Metal base (100X)	53
Figura 3. 6 Partes de la zona procesada de probeta 1	54
Figura 3. 7 Macrografía de la zona procesada probeta 2 (600RPM, 100 mm/min)	56
Figura 3. 8 SZ Probeta 2 50X	57
Figura 3. 9 Partes de zona procesada probeta 2 (600 RPM y 100 mm/min)	57
Figura 3. 10 Macrografía de la zona procesada probeta 3 (600RPM, 120mm/min)	59
Figura 3. 11 Zona batida (Probeta 350X)	60
Figura 3. 12 Partes de la zona procesada probeta 3.....	60
Figura 3. 13 Macrografía de la zona procesada probeta 4 (600RPM, 160mm/min)	62
Figura 3. 14 Zona batida Probeta 4 50X.....	63
Figura 3. 15 Partes de la zona procesada probeta 4 (600 RPM y 160 mm/min)	63
Figura 3. 16 Macrografía de la zona procesada probeta 5 (600RPM, 200 mm/min)	65

Figura 3. 17 Zona batida (Probeta 50X)	66
Figura 3. 18 Partes de la zona procesada probeta 5	66
Figura 3. 19 Gráfico de barrido de dureza probeta 1.....	69
Figura 3. 20 Sentido de distancia con respecto al centro	69
Figura 3. 21 Gráfico de barrido de dureza probeta 2.....	71
Figura 3. 22 Gráfico de barrido de dureza probeta 3.....	73
Figura 3. 23 Gráfico de barrido de dureza probeta 4.....	75
Figura 3. 24 Gráfico de barrido de dureza probeta.	77
Figura 3. 25 Esquema de corrosión en medios acuosos	78
Figura 3. 26 Ensayos del potencial de circuito abierto (OCP)	79
Figura 3. 27 Variación de Ecorr vs la velocidad de avance.....	80
Figura 3. 28 Gráficos potencio dinámicos	81
Figura 3. 29 Variación de Icorr con respecto a la velocidad de avance	82
Figura 3. 30 Curva potenciodinámica probeta 1 (600 RPM, 60 mm/min)	82
Figura 3. 31 Curva potenciodinámica probeta 2 (600 RPM, 100 mm/min)	82
Figura 3. 32 Curva potenciodinámica probeta 3 (600 RPM, 120 mm/min)	83
Figura 3. 33 Curva potenciodinámica probeta 4 (600 RPM, 160 mm/min)	83
Figura 3. 34 Curva potenciodinámica probeta 5 (600 RPM, 200 mm/min)	83
Figura 3. 35 Curva potenciodinámica probeta 6 (BM)	84
Figura 3. 36 Velocidad de corrosión versus velocidad de avance en las 3 zonas del proceso.....	86
Figura 3. 37 Velocidad de corrosión vs horas de inmersión (SZ)	87
Figura 3. 38 Velocidad de corrosión vs horas de inmersión (TMAZ).....	88
Figura 3. 39 PROBETA 1 (600 RPM, 60 mm/min) después de 144 horas sumergidas en HCl.....	89
Figura 3. 40 PROBETA 3 (600 RPM, 120 mm/min) después de 144 horas sumergidas en HCl.....	90
Figura 3. 41 PROBETA 2 (600 RPM, 100 mm/min) después de 144 horas sumergidas en HCl.....	90
Figura 3. 42 PROBETA 5 (600 RPM, 200 mm/min) después de 144 horas sumergidas en HCl.....	91
Figura 3. 43 PROBETA 4 (600 RPM, 160 mm/min) después de 144 horas sumergidas en HCl.....	91
Figura 3. 44 Metal Base (144 horas 1M HCl), microscopio SEM 50X.....	92
Figura 3. 45 Metal base (144 horas 1M HCl), microscopio SEM 200X.....	93
Figura 3. 46 Probeta 2 (600RPM, 100 mm/min) lado de avance (144 horas 1M HCl) microscopio SEM	94
Figura 3. 47 Probeta 2 (600RPM, 100 mm/min) lado de retroceso (144 horas 1M HCl), microscopio SEM	94
Figura 3. 48 Probeta 2 (600RPM, 100 mm/min) SZ (144 horas 1M HCl), microscopio SEM.....	95
Figura 3. 49 Probeta 3 (600RPM, 120 mm/min) lado de avance (144 horas 1M HCl), microscopio SEM	96
Figura 3. 50 Probeta 3 (600RPM, 120 mm/min) lado de retroceso (144 horas 1M HCl), microscopio SEM	96

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1: FUNDAMENTO TEÓRICO

Tabla 1. 1 Propiedades del aluminio	5
Tabla 1. 2 Series de Aluminio	6
Tabla 1. 3 . Influencia de elementos de aleación en el aluminio	6
Tabla 1. 4 Composición química de aleaciones de aleaciones de aluminio.....	7
Tabla 1. 5 Propiedades mecánicas de las aleaciones de serie 6xxx	8
Tabla 1. 6 Velocidad De rotación versus tamaño de grano	13
Tabla 1. 7 Efecto de los parámetros del proceso 5083Al-SiC.....	15
Tabla 1. 8 Velocidad de pérdida de peso, potencial de corrosión y corriente de corrosión	20
Tabla 1. 9 Voltaje de corrosión y densidad de corriente eléctrica.....	21
Tabla 1. 10 Potencial de corrosión y corriente de corrosión (velocidad de rotación constante)....	25
Tabla 1. 11 Potencial de corrosión y corriente de corrosión	26

CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Tabla 2. 1 Composición química del aluminio AA6063	29
Tabla 2. 2 Propiedades mecánicas del aluminio AA6063.....	29
Tabla 2. 3 Parámetros de procesamiento de cada probeta.....	32

CAPITULO 3: OBTENCIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS

Tabla 3. 1 Medidas de la zona procesada con relación de velocidades.....	46
Tabla 3. 2 Composición química de precipitado 1 Metal base	49
Tabla 3. 3 Composición química de precipitado 2 Metal base	49
Tabla 3. 4 Composición química de precipitado 3 Metal base	49
Tabla 3. 5 Composición química de precipitado 1 Zona batida	49
Tabla 3. 6 Composición química de precipitado 2 Zona batida	50
Tabla 3. 7 Dureza promedio de probetas.....	68
Tabla 3. 8 Datos obtenidos barrido de dureza probeta 1	68
Tabla 3. 9 Datos obtenidos barrido de dureza probeta 2	70
Tabla 3. 10 Datos obtenidos barrido de dureza probeta 3	72
Tabla 3. 11 Datos obtenidos barrido de dureza probeta 4	74
Tabla 3. 12 Datos obtenidos barrido de dureza probeta 5	76
Tabla 3. 13 Datos del Ecorr y su variación en el tiempo	79
Tabla 3. 14 Datos de Icorr y Ecorr	81
Tabla 3. 15 Pérdida de peso de las probetas en 144 horas	84
Tabla 3. 16 Velocidad de corrosión una vez transcurridos 144 horas	85
Tabla 3. 17 Datos velocidad de corrosión vs horas de inmersión (SZ).....	87
Tabla 3. 18 Datos velocidad de corrosión vs horas de inmersión (TMAZ)	88

Introducción

Los avances tecnológicos en el campo de los materiales están orientados a obtener materiales con mejores propiedades mecánicas, más ligeros, más resistentes, y más económicos que los materiales con los que contamos actualmente. Por ejemplo, ciertos materiales metálicos y poliméricos vienen reemplazando al acero, el cual es el metal más usado, debido a que éste tiene una densidad muy alta, que dificulta su uso en ciertas aplicaciones como por ejemplo, en las estructuras de los aviones y de los vehículos terrestres. Los metales no ferrosos tales como el bronce, cobre, aluminio, níquel y titanio surgen como una posible solución debido a que estos materiales con ciertos tratamientos térmicos o procesos pueden igualar o hasta llegar a tener mejores propiedades mecánicas que el acero.

Una de las características que mejora las propiedades de los materiales es el afinamiento de grano en su microestructura, lo cual se puede lograr con diferentes métodos de deformación plástica tales como:

- Equal channel angular pressing (ECAP)
- Accumulative roll bonding (ARB)
- High pressure torsion
- Proceso de fricción batido (FSP)

El proceso de fricción batido (FSP), es muy versátil y se ha implementado recientemente, se basa en el principio de funcionamiento del proceso de soldadura por fricción batido (FSW) el cual es un método de unión que fue inventado por el instituto de soldadura (TWI). FSW se basa en el movimiento de una herramienta a lo largo de toda la pieza a soldar para generar calor que suaviza el material base con el objetivo que se genere un flujo de material alrededor de la herramienta de trabajo mientras esta avanza longitudinalmente, dejando como resultado un canal ya mecanizado en el caso de FSP o una unión en el caso de FSW. Estos procesos tienen por característica que no consumen mucha energía como otros procesos, no contaminan y se puede controlar los resultados de la microestructura a obtener variando ciertos parámetros tales como la velocidad de rotación y de avance de la herramienta.

Con el FSP se pueden mejorar propiedades específicas del material, principalmente, se puede lograr un afinamiento del grano, homogenizar la microestructura de la superficie y en el caso del aluminio se puede realzar las propiedades de sus aleaciones fundidas. Si bien es cierto que se consigue mejorar las propiedades mecánicas es importante analizar que ocurre con propiedades tales como la resistencia a la corrosión o la resistencia al desgaste.

Estudios preliminares indican que varios materiales pueden ser fácilmente trabajados por este método, por ejemplo níquel, magnesio, aleaciones de aluminio, bronce y titanio. En recientes estudios se menciona que la resistencia a la tracción, dureza y superplasticidad del aluminio puede ser mejorada significativamente; esto se debe a que el tamaño de grano disminuye aproximadamente unas 10-100 veces con respecto al tamaño de grano del material base original.

Debido a todos estos estudios se ha visto como una opción muy interesante el uso de aleaciones de aluminio procesadas por fricción batido. Además, el bajo costo del material y del proceso lo hace más atractivo. El presente documento tendrá como objetivo evaluar la resistencia a la corrosión de la aleación de aluminio AA 6063-T6 procesada por fricción batido variando los parámetros del proceso (velocidad de avance). Esta aleación contiene magnesio y silicio. Los métodos empleados para evaluar la resistencia a la corrosión son ensayos electroquímicos y ensayos de inmersión. Estos ensayos se realizan en diferentes zonas ya que no todas las zonas son afectadas por la misma intensidad de calor, pues los picos de temperatura están por arriba y debajo de la transición β . Esto hace que la región afectada se divida en 2 zonas básicamente: Zona batida (SZ) y Zona termo mecánicamente afectada (TMAZ).

Objetivo general

- Evaluar la resistencia a la corrosión de la aleación de aluminio AA 6063 – T6 procesada mediante fricción batido.

Objetivos específicos

- Determinar los parámetros óptimos de procesamiento para la aleación de aluminio en estudio.
- Fabricar probetas mediante procesamiento por fricción batido.
- Realizar barridos de dureza en la sección transversal de las probetas.
- Analizar la microestructura de las probetas.
- Realizar los ensayos de inmersión y electroquímicos para verificar la resistencia a la corrosión de las probetas.
- Comparar resultados obtenidos con los de otras investigaciones

1. Fundamento teórico

1.1. Aluminio puro

El aluminio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre. En los últimos tiempos se ha convertido en un metal muy utilizado para aplicaciones ingenieriles debido a su bajo costo y sus características únicas que se pueden lograr con este metal. Esto lo hace indispensable para muchos tipos de industrias en la actualidad.

El aluminio tiene un bajo peso, buena conductividad de calor, es buen conductor de electricidad (aproximadamente 60% de la conductividad del cobre), posee unas aceptables propiedades mecánicas que comparadas con el acero tienen ventaja, puesto que ofrece una mejor relación resistencia/peso debido a que la densidad del aluminio es, aproximadamente, la tercera parte que la del acero. Asimismo, se puede lograr un incremento de la resistencia mecánica través del deformado en frío.

Además, para mejorar ciertas propiedades específicas el aluminio puede ser mezclado con los siguientes elementos: Silicio, Cromo, Tungsteno, Manganeso, Níquel, Zinc, Cobre, Magnesio, Titanio, Circonio, Hierro, Litio, Estaño y Boro; depende de la aplicación que se le quiere dar.

Puesto que el aluminio reacciona con el oxígeno de la atmosfera, se forma una fina capa gris mate de alúmina Al_2O_3 que recubre el material y lo protegen en contra de la corrosión.

Tabla 1. 1 Propiedades del aluminio

Densidad	ρ	2.709 g/cm ³
Esfuerzo último de tracción	σ_t	69-130Mpa
Esfuerzo fluencia	σ_f	28-125Mpa
Punto de fusión	T	660°C
Dureza	HB	19-35
Deformación de rotura	δ	43-6 %

Debido a todas estas propiedades mencionadas anteriormente, el aluminio está siendo usado en la industria automotriz, aeronáutica donde se emplea en la fabricación de la estructura de los aviones; otros usos son para usos militares como la fabricación de misiles e incluso para uso aeroespacial como material predominante en los satélites que orbitan la tierra.

1.1.1. Aleaciones de aluminio

Para mejorar las propiedades mecánicas del aluminio puro se le agregan ciertos elementos de aleación. De acuerdo al elemento usado se clasifican en series (Tabla1.2). Con la ayuda de estos elementos sus propiedades mecánicas hasta pueden superar a las propiedades mecánicas de ciertas clases de acero. Por lo general, los porcentajes de estos elementos son bajos. Cada elemento de aleación tiene la función de modificar cierta característica del aluminio (Tabla 1.3)

Tabla 1. 2 Series de Aluminio

Serie	Elemento de aleación
1xxx	Ninguno
2xxx	Cobre
3xxx	Manganeso
4xxx	Silicio
5xxx	Magnesio
6xxx	Magnesio -Silicio
7xxx	Zinc
8xxx	Estaño - litio
9xxx	Elementos particulares

Tabla 1. 3 . Influencia de elementos de aleación en el aluminio

Elementos de aleación	Cambios a la aleación de aluminio
Mn	Mejora la resistencia a la corrosión atmosférica. Aumenta resistencia mecánica y ductilidad
Zn	Aumenta resistencia y dureza
Cu	Produce una aleación tratable térmicamente. Resistencia y dureza aumentadas. Disminuye su resistencia a la corrosión y ductilidad.
Si	Mejora la fluidez, disminuye el coeficiente de dilatación en estado sólido, empeora la ductilidad y la tenacidad. Combinado con Mg produce una aleación tratable térmicamente
Mg	Resistencia mecánica y Dureza aumentan. Brinda una buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos. Además, se incrementa la soldabilidad.

Como se puede haber apreciado, existen varios tipos de aleaciones de aluminio, una de las más usadas en la actualidad es la serie 6xxx debido a sus buenas propiedades que ofrece.

1.1.2. Aleación de aluminio de serie 6xxx

Este tipo de aleación pertenece al grupo de las aleaciones de aluminio tratables térmicamente. Sus principales elementos de aleación son el magnesio y silicio; su rango de composición químico de interés técnico dentro de esta serie es de 0.2% hasta 1.6% en el Si y del Mg es de 0.3% a 1.5%.

Esta serie de aluminio se caracteriza por tener buena formabilidad, la cual es aprovechada para la fabricación de piezas de extrusión; buena maquinabilidad, buena resistencia a la corrosión y relativamente buena soldabilidad.

El magnesio le da una buena resistencia a la corrosión y debido al silicio es que esta aleación se puede tratar térmicamente; además, la resistencia mecánica y límite elástico aumentan cuando la aleación se satura de Si.

Tabla 1. 4 Composición química de aleaciones de aluminio

Nomenclatura AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Otros		Aluminio
										Cada uno	Total	
6061	0.40 - 0.80	0.70	0.15 - 0.4	0.15	0.80 - 1.20	0.04 0.35	-	0.25	0.15	0.05	0.15	El resto
6063	0.20 - 0.60	0.35	0.10	0.10	0.45 - 0.90	0.10	-	0.10	0.10	0.05	0.15	El resto
6082	0.70 - 1.30	0.50	0.20	0.4 - 1.0	0.60 - 1.20	0.20	-	0.20	0.10	0.05	0.15	El resto

Las propiedades mecánicas de este tipo de aleación son medias, puesto que el magnesio se usa para conseguir reforzamiento en solución sólida. En la tabla 1.5 se aprecia propiedades mecánicas de aleaciones de serie 6 más usadas.

Tabla 1. 5 Propiedades mecánicas de las aleaciones de serie 6xxx

Aleación	Estado	Esfuerzo máx (MPa)	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Alargamiento (%)	Dureza HB
AA6060	O	100	50	27	25
	T5	220	185	13	75
AA6061	O	125	55	27	30
	T6	310	270	14	95
AA6063	O	100	50	27	25
	T6	245	210	14	75
AA6082	O	130	60	27	35
	T6	340	310	11	95

Comercialmente se puede encontrar el metal base de la serie 6xxx en el mercado en su condición de T6; es decir, tratamiento térmico inicial seguido de un envejecimiento artificial.

Las aplicaciones de las aleaciones de aluminio son diversas entre las más conocidas tenemos a las AA6063 usadas para la fabricación de perfiles, AA6082 empleada para construcciones ligeras como por ejemplo vagones de ferrocarril, plataformas marinas, puentes, bicicletas accesorios y sistemas hidráulicos.

1.2. Proceso de fricción batido (FSP)

1.2.1. Descripción del proceso

Se basa en el principio de funcionamiento del proceso de soldadura por fricción (FSW) el cual es un método de unión que fue inventado por el Instituto de Soldadura (TWI) en 1991. FSW es un nuevo método de unión de sólidos que se creó en un principio para hacer fuertes uniones en aleaciones de aluminio, aunque posteriormente se implementó por Mishra el Proceso de fricción batido (FSP) con la finalidad de cambiar las propiedades mecánicas de los metales variándoles su microestructura molecular. Estos procesos tienen por característica que no consumen mucha energía como otros procesos, no contaminan y se puede controlar

los resultados de la microestructura a obtener variando ciertos parámetros de operación tales como la velocidad de rotación y la velocidad de avance, principalmente.

FSP es un proceso que se basa en el movimiento giratorio de una herramienta, constituida por un pin y hombro (Figura 1.1), que avanza linealmente a lo largo de toda la pieza que se desea procesar. Esta operación genera un calor localizado por la fricción del pin y el hombro con la pieza de trabajo, este calor localizado da inicio a una deformación plástica que ablanda el material base. El ablandamiento del material combinado con el movimiento de rotación y traslación de la herramienta genera un flujo de material de la parte frontal a la parte posterior del pin. Este flujo de material depende estrechamente de la geometría de la herramienta que se esté usando, generalmente se usa un hombro cóncavo y un pin cilíndrico roscado (Figura 1.1).

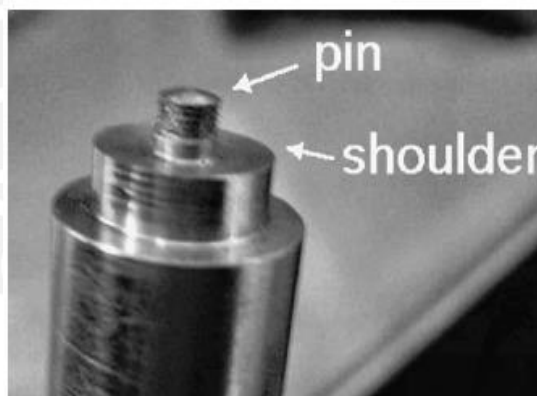


Figura 1. 1 Herramienta de trabajo del proceso de fricción batido

Este proceso es muy versátil, ya que se puede modificar la microestructura de acuerdo a nuestra conveniencia de acuerdo a lo que se necesite. Esto lo conseguimos variando los parámetros del proceso, los cuales son:

- Velocidad de rotación de la herramienta (RPM)
- Velocidad de avance (mm/min)

- La geometría de la herramientas

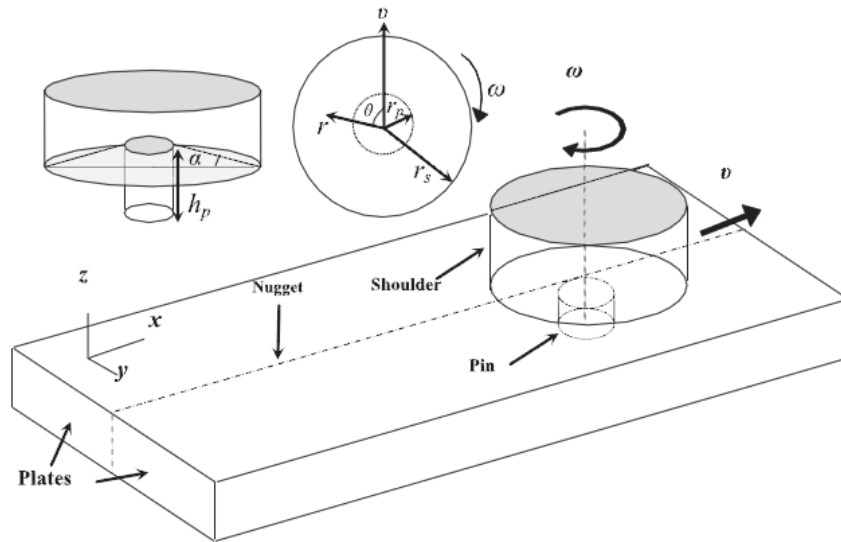


Figura 1. 2 Representación esquemática de la soldadura por fricción batido y parámetros

Este proceso genera un canal ya mecanizado (figura 1.3), en el caso del proceso de fricción batido con una microestructura diferente y por ende unas propiedades diferentes a la del material base.

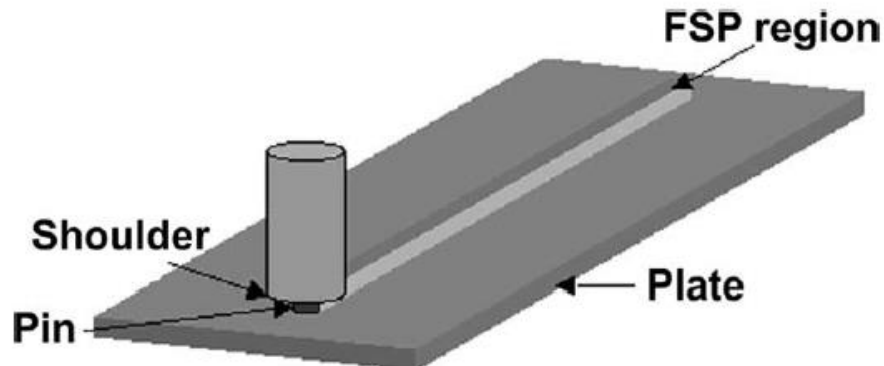


Figura 1. 3 Canal realizado por el proceso de fricción batido

Las zonas obtenidas en el proceso de fricción batido se pueden dividir en 3 zonas por las características microestructurales del grano y sus precipitaciones.

La primera zona sería Zona Batida (SZ) o Nugget que es propiamente la zona donde se realiza el trabajo, ósea donde la herramienta interactúa con el material directamente, por ende se llega a alcanzar temperaturas muy altas y altas deformaciones del material que se está procesando, además es aquí donde ocurre la recristalización dinámica de los granos.

La segunda zona analizada sería la zona termo mecánicamente afectada (TMAZ). Esta zona se encuentra entre el material base y la zona batida. Como su nombre lo dice, es la zona afectada por el calor y donde también pasa el flujo del material generado durante el proceso, haciendo una analogía con el proceso de soldadura esta sería la zona afectada térmicamente (ZTA), aquí es donde ocurre deformación plástica mas no una recristalización de los granos.

La última zona es la Zona Afectada por el Calor (HAZ). Esta zona es la que solo es afectada por el calor generado durante el proceso. En esta zona no ocurre deformación plástica.

Además, existen 2 lados en la zona procesada. Se llamará lado de avance (advancing zone) a la zona donde la velocidad de rotación y la velocidad de avance tienen el mismo sentido y lado del retroceso (retreating zone) a donde las velocidades de rotación y de avance tienen sentidos diferentes. (Figura 1.4 y 1.5).

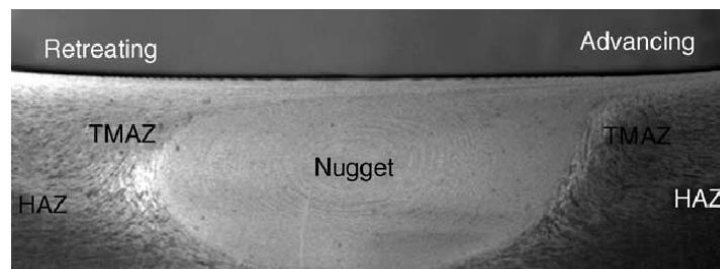


Figura 1. 4 Zonas del proceso de fricción batido

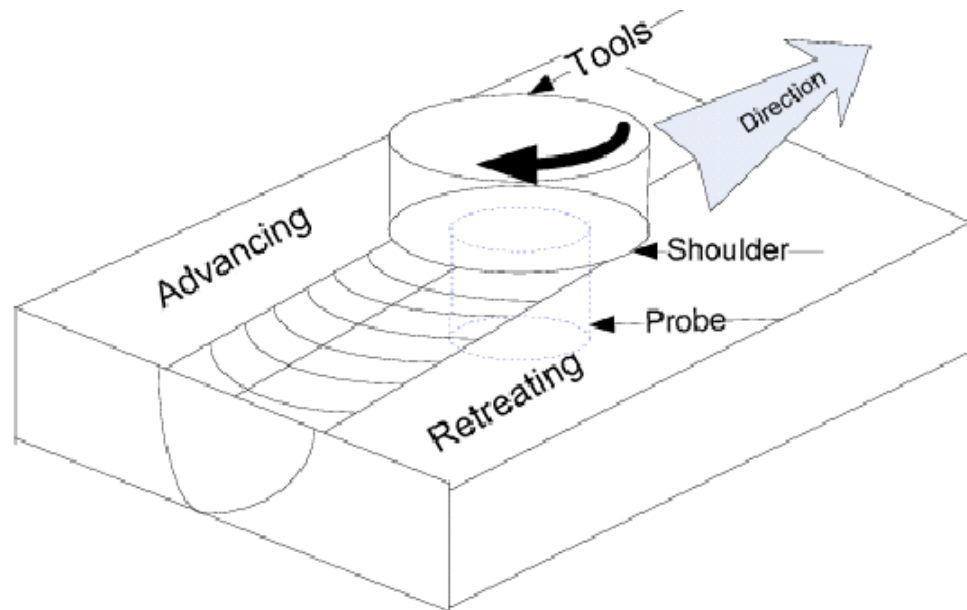


Figura 1. 5 Zona de avance y retroceso

1.2.2. FSP en aleaciones de aluminio

Hoy en día los materiales más usados para este proceso son las aleaciones de aluminio. El proceso de fricción batido fue desarrollado por Mishra con el objetivo de desarrollar microestructura fina con el tamaño de grano de entre 0.1- 1.8 μm . El tamaño de grano llega a ser desde 10 a 100 veces más pequeño que el tamaño de grano del material original. Esto se consigue, puesto que las temperaturas obtenidas en este proceso son muy altas. Una investigación hecha por Murr demuestra que la temperatura en una aleación de aluminio AA6061 procesada por fricción batido llega a tener un pico de temperatura en su zona más crítica de unos 500°C aproximadamente.

Las principales aplicaciones del proceso de fricción batido en las aleaciones de aluminio son las siguientes:

- Mejorar la resistencia mecánica
- Mejorar la superplasticidad y la velocidad de deformación
- Producir superficies compuestas con sustrato de aluminio

Las propiedades mecánicas están íntimamente relacionadas con el tamaño de grano obtenido en la microestructura. Este a su vez depende de los parámetros de proceso que usemos especialmente de la velocidad de giro y la velocidad de avance empleada. Según investigaciones realizadas por Y.J. Kwon, I. Shigematsu y N. Saito, podemos reducir el tamaño del grano reduciendo la velocidad de rotación manteniendo la velocidad de avance constante. Esto se traduce en un aumento de la resistencia mecánica y la dureza (Figura 1.6)

Tabla 1. 6 Velocidad De rotación versus tamaño de grano

RPM	Tamaño de grano
1840	3-4 μ m
560	0.5 μ m

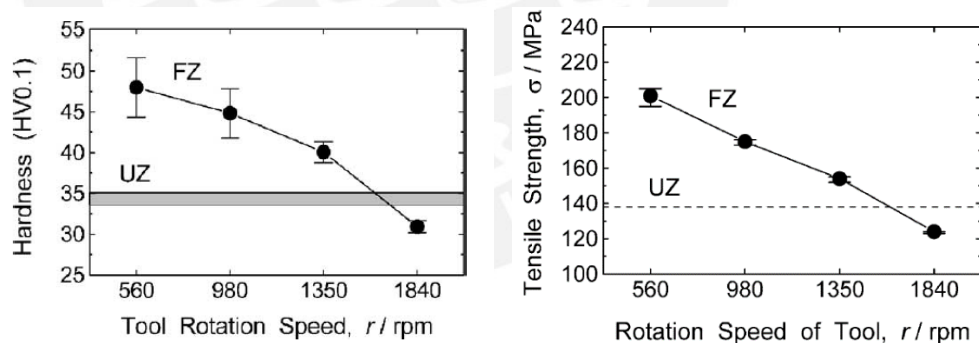


Figura 1. 6 Efecto de la velocidad de rotación sobre la dureza y esfuerzo de tracción de I1050 procesado por fricción batido

La misma reducción de grano se puede conseguir al reducir la relación velocidad de rotación/ velocidad de avance. Mishra lo demostró en una aleación 7075Al-T651 usando diferentes relaciones de velocidad de giro y avance (figura 1.7).

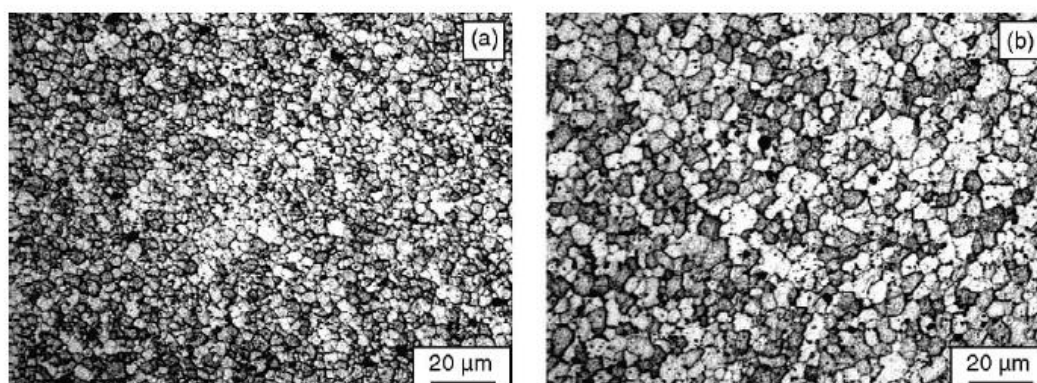


Figura 1. 7 Efecto de parámetros de proceso de una aleación 7075Al-T651 procesada por fricción batidos con los parámetros (a) 350 rpm, 152 mm/min and (b) 400 rpm, 102 mm/min

Otra aplicación importante del proceso de fricción batido en las aleaciones de aluminio es la superplasticidad, la cual se usa para el conformado de ciertas piezas para aplicaciones comerciales, como es el caso de la industria automotriz.

Para la buena superplasticidad es necesario que la microestructura del material a tratar sea estable a altas temperaturas y a la vez que tenga granos finos. Esto también lo podemos conseguir mediante Thermo – mechanical processing (TMP) que consiste en un tratamiento de la solución por sobre envejecimiento con múltiples pasos de rolling a una temperatura de unos 200 – 220°C. Sin embargo, este tratamiento puede llegar a ser muy costoso y demanda mucho tiempo su elaboración y no consiguen los resultados de elongación que se pueden obtener mediante el proceso de fricción batido (Figura 1.8).

Debido a esto el proceso de fricción batido se ha vuelto muy atractivo para esta aplicación, además también porque se puede llegar a velocidades de deformación muy altas (HSRS) superiores a $10^{-2}s^{-1}$.

Mishra ensayó la aleación de aluminio AA 7075 procesada mediante fricción batido donde obtuvo un grano promedio de $3.3\mu m$ y se notó una HSRS con una elongación superior al 1000% a una temperatura de 490°C. Asimismo, la elongación la podemos controlar dependiendo de la velocidad de deformación (Figura 1.8).

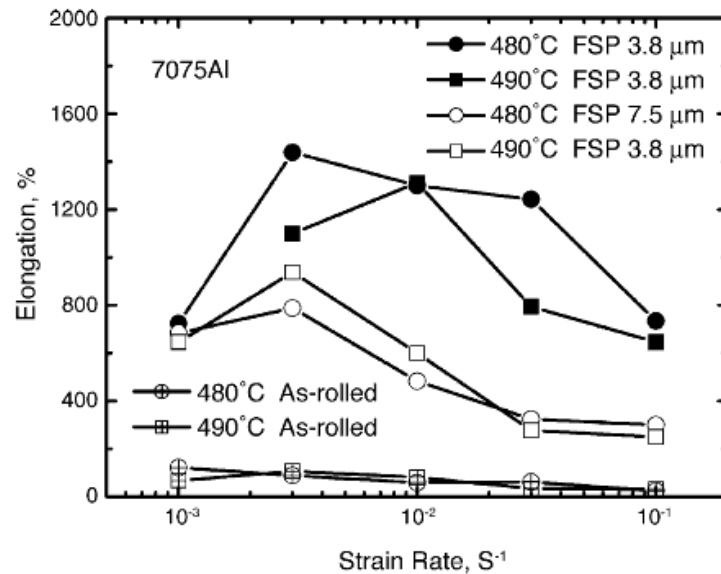


Figura 1. 8 Efecto de la velocidad de deformación en el porcentaje de elongación obtenido

El proceso de fricción batido también puede ser usado para generar superficies compuestas. Esto se hace con el objetivo de mejorar la capa superficial del compuesto con el fin de mejorar ciertas propiedades mecánicas. Mishra incorporó partículas de cerámica a la capa de superficial de 5083 Al y A356.

Tabla 1. 7 Efecto de los parámetros del proceso 5083Al-SiC

Target depth (mm)	Tool traverse speed (mm/min)	
	25.4	101.6
1.78	No particles was incorporated into aluminum	-
2.03	Surface composite was formed with well-distributed particles and very good bonding with metal substrate	Surface composite has poor bonding with metal substrate
2.28	No particles was incorporated into aluminum	-

Como podemos apreciar en este caso importa la profundidad de penetración (Target depth) y las velocidades de procesamiento. La correcta mezcla del material base y las partículas depende de la velocidad de avance. A mayor velocidad de avance la mezcla será menos homogénea (Figura1.9).

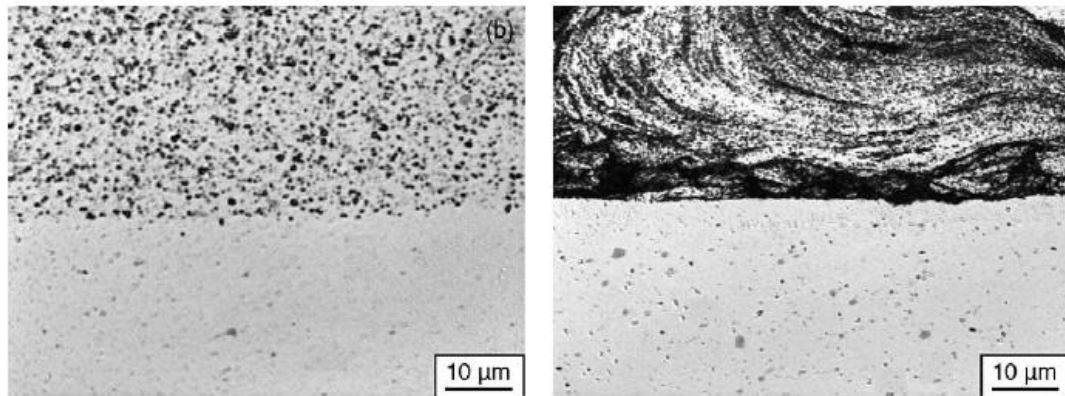


Figura 1. 9 Microestructura de una superficie compuesta con 5083Al de sustrato procesado por fricción batido a 300 RPM a una velocidad de avance de: 101.6mm/min 25.4mm/min, figura de izquierda y derecha, respectivamente.

1.1 Resistencia a la corrosión de Aluminio

El aluminio es uno de los elementos que puede ofrecer mejor resistencia a la corrosión y es usado como uno de los principales materiales para generar capas de óxido para que se proteja así mismo contra la corrosión, estas capas están fuertemente pegadas con la superficie y si son dañadas, se recupera rápidamente en casi todas las atmosferas.

En la figura 1.10 se presenta el diagrama de Pourbaix del aluminio donde se puede apreciar que el aluminio es protegido por su oxido (en el rango pasivo) entre rangos de PH entre 4 a 8.5. En la figura 1.11 podemos apreciar la pérdida de peso que tiene el aluminio fuera de su rango pasivo, puesto que fuera de ese rango sus óxidos son solubles a los ácidos y las bases.



Figura 1. 10 Zona de pasivación de aluminio

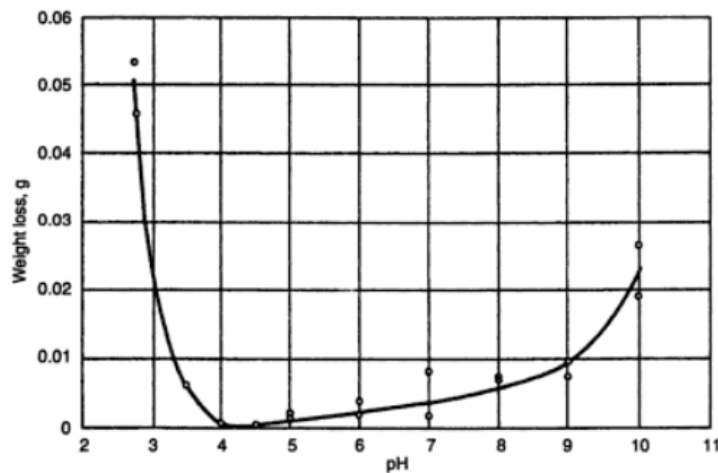


Figura 1. 11 Pérdida de peso en función del PH

Las aleaciones de aluminio de serie 6xxx tienen buena resistencia a la corrosión debido a esto es su variedad de usos que se presentan en la construcción de envases para químicos, para comidas. Cuando contiene más de 3% de Mg bajo condiciones que el Al_3Mg_5 se precipite, puede ser susceptible a la exfoliación o a la corrosión bajo tensión.

1.2.3. Resistencia a la corrosión aleaciones de aluminio procesadas por FSP

Como se sabe las propiedades de resistencia a la corrosión del aluminio dependen fundamentalmente de su microestructura. Como el FSP y el FSW generan un cambio en la microestructura, la resistencia a la corrosión puede cambiar.

En el proceso de fricción batido se crea un gradiente de temperatura desde la Zona batida hasta una pequeña distancia del material base. En la zona conocida como TMAZ se llega a un pico de temperatura de $500^{\circ}C$ el cual dura unos cuantos segundos para después enfriarse en un periodo relativamente rápido. La figura 1.12 se muestra como varía la temperatura en el tiempo con respecto a la distancia que se encuentra del medio de la zona procesada.

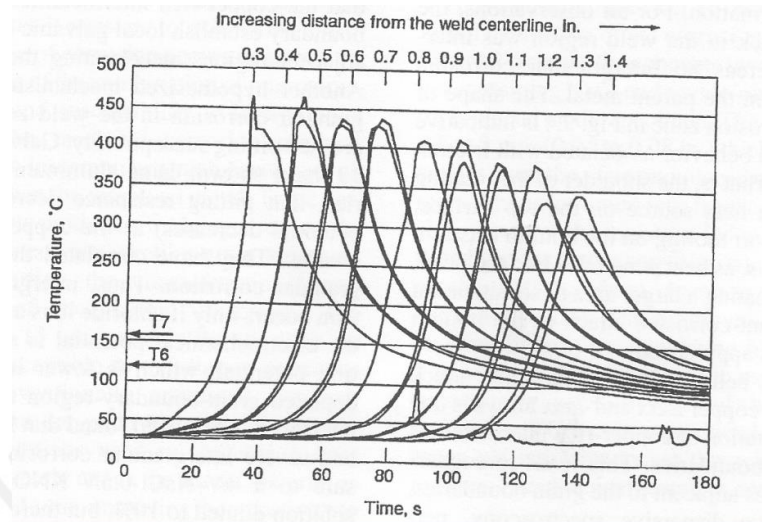


Figura 1. 12 Curvas de calentamiento y enfriamiento de la aleación de aluminio AA7075 soldada mediante fricción batido

Se puede apreciar que las temperaturas son suficientemente altas y los tiempos son prolongados, suficientes para generar nucleaciones, precipitaciones, etc. Todo esto favorece a generar las condiciones para que el material se ponga sensible, donde la corrosión intergranular puede llevarse a cabo. Asimismo, también puede aparecer la corrosión por pitting en los aluminios procesados por fricción batido; debido a esto, se realizan ensayos electroquímicos y ensayo de inmersión.

Surekha investigó la susceptibilidad a la corrosión intergranular de la aleación de aluminio AA 2219 procesada mediante fricción batido, para esto la muestra fue sometida al método de inmersión por 6 horas en una solución que contiene 57 g/l, NaCl y 10 ml/l H_2O_2 (30 vol.%). La figura 1.13 muestra la microestructura después de la inmersión. Se demostró que el número de pasos es el principal factor que influye en la velocidad de corrosión, puesto que la corrosión ataca menos a la muestra MS3, ya que tiene más pases. Solo en el elemento base (BM) es el único en el que se ve corrosión intergranular mientras que en las otras muestras se ve apenas pequeñas picaduras.

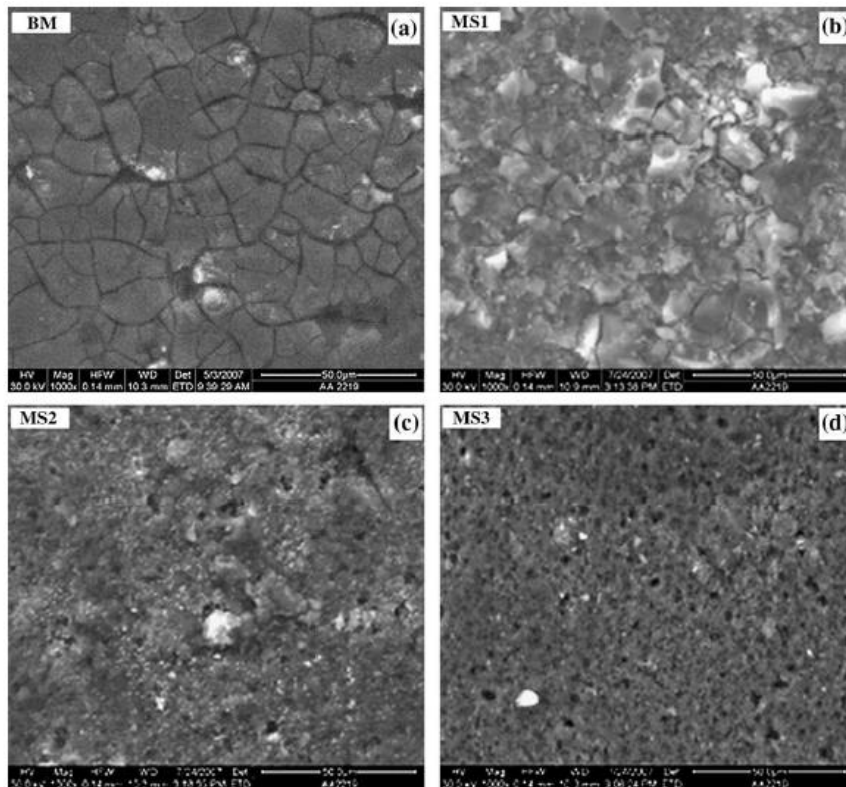


Figura 1. 13 Imágenes de la microestructura FSP con el microscopio SEM después de ser sometidos a ensayos de inmersión

Además de los ensayos de inmersión se plotearon curvas de Tafel (figura 1.14) para cada probeta, donde se corroboraron los resultados obtenidos en los ensayos de inmersión, los cuales dicen que a mayor número de pasadas aumenta la resistencia a la corrosión.

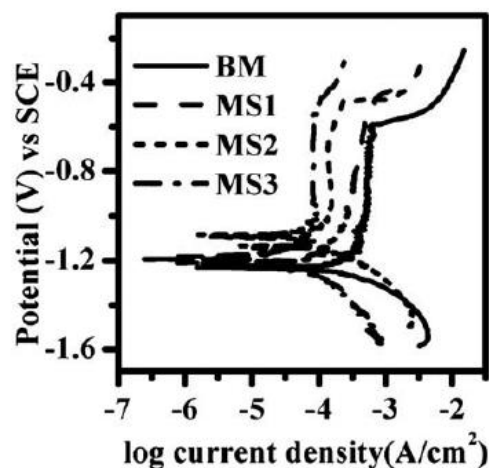


Figura 1. 14 Curvas de Polarización en diferentes números de pasadas

Tabla 1. 8 Velocidad de pérdida de peso, potencial de corrosión y corriente de corrosión

Alloy condition	Corrosion rate in mpy	E_{pit} (mV)	I_{corr} (μ A)
BM	15.7	-587	869.6
MS1	4.5	-498	77.8
MS2	4.0	-484	31.5
MS3	3.8	-466	6.3

Con esto quedó demostrado que la resistencia a la corrosión de la AA 2219 procesada por fricción batido es mejor que en el material base y que a mayor número de pases, manteniendo los parámetros de velocidad constantes, la resistencia a la corrosión también aumenta.

Por otro lado, V. Fahimpour, S.K. Sadrnezhad y F. Karimzadeh hicieron ensayos para comparar la resistencia a la corrosión de las aleaciones de aluminio sometidas a los métodos de soldadura por fricción batido y GTAW (TIG). Para esto utilizaron placas de aluminio 6061-T6. En la soldadura por GTAW se usó un voltaje de 35V y una corriente de 200 A. Para la soldadura por fricción batido se empleó una

velocidad de avance de 200mm/min y una velocidad de rotación de 800 rpm. Para comparar la resistencia a la corrosión en los dos tipos de uniones se empleó diagramas de polarización Tafel (figura 1.15). Las probetas se sumergieron en una solución de 3.5 wt. % NaCl. Después de que se estabilizaran se les inyectó corriente al circuito. Se obtuvo los resultados de la tabla 1.9.

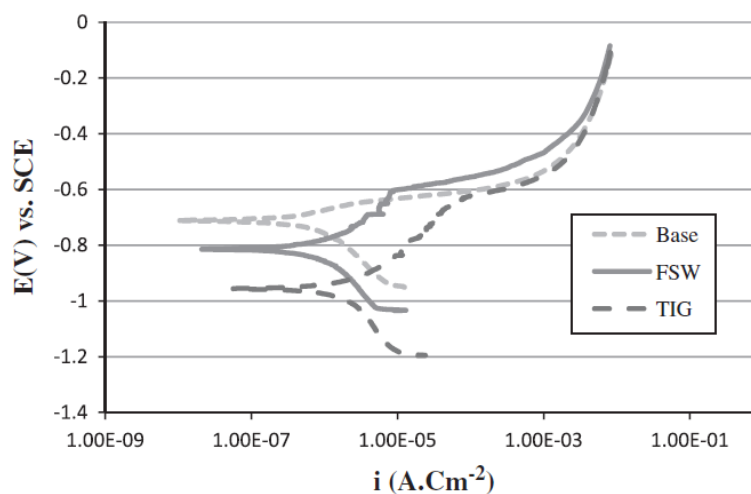


Figura 1. 15 Diagrama de curvas de polarización tafel

Tabla 1. 9 Voltaje de corrosión y densidad de corriente eléctrica

Material/process	E (mV) vs. SCE	$I_{\text{Corrosion}}$ ($\mu\text{A cm}^{-2}$)
Base metal	-700	0.6
FSW	-825	0.8
TIG	-975	1.5
FSW-T6	-675	0.55
TIG-T6	-725	0.5

De las tablas se puede concluir que la resistencia a la corrosión de la muestra procesada por TIG welded es menor que la procesada por FSW y este a la vez menor que a la del material base, debido a que el voltaje de corrosión y la densidad de corriente va en aumento desde el material base hasta GTAW TIG.

P. Bala Srinivasana, K.S. Arorab, W. Dietzela, S. Pandeyb, M.K. Schaperc analizaron la resistencia a la corrosión en la aleación AA2219 que previamente habían sido procesados por FSW. Se realizaron ensayos potenciodinámicos y ensayos de inmersión.

Para los ensayos potenciodinámicos se realizaron curvas de polarización y de circuito de potencial abierto en una solución de 3.5% NaCl, estos ensayos se realizaron en tres zonas del FSW (Nugget, TMAZ/HAZ, BM). Para los ensayos de inmersión las muestras fueron sumergidas durante 6 horas en una solución que contiene 57g de NaCl y 10ml de peróxido de hidrogeno en un litro de agua destilada.

La figura 1.16 y 1.17 muestran los ensayos de circuito de potencial abierto y curvas Tafel, respectivamente. En estos ensayo se puede apreciar que la resistencia a la corrosión en la zona del nugget es mayor que en el material base y en la TMAZ. Es decir que la resistencia a la corrosión aumenta cuando procesamos por FSW a esta aleación de aluminio

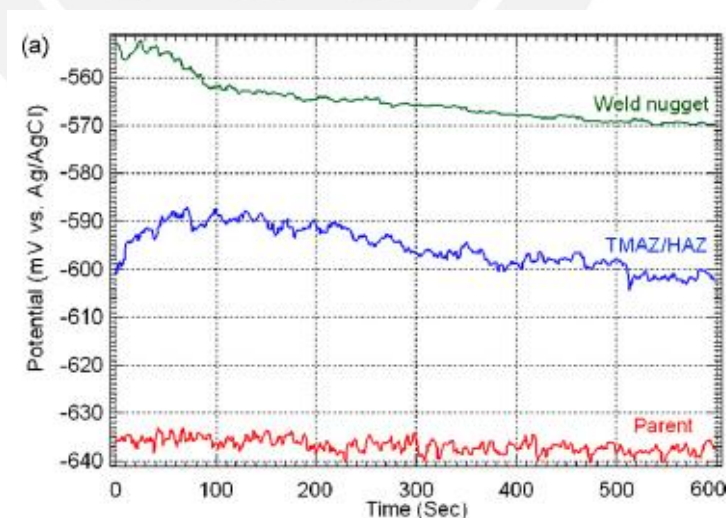


Figura 1. 16 Curvas de Circuito de potencial abierto (OCP)

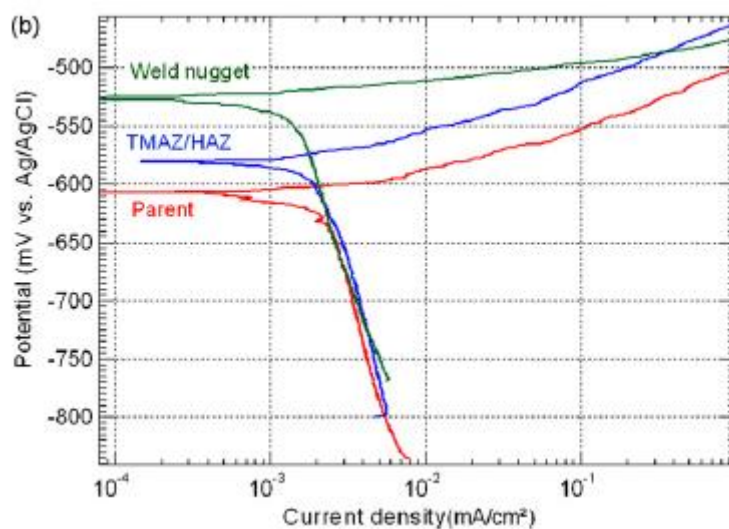


Figura 1. 17 Curvas de polarización Tafel en las 3 regiones de la zona procesada

Los mismos resultados son apreciados en los ensayos de inmersión donde se ve el mismo comportamiento con respecto a la corrosión. La zona del nugget actúa como cátodo y se protege de la corrosión; la TMAZ es atacada por la corrosión medianamente y el material base fue atacado por corrosión intergranular.

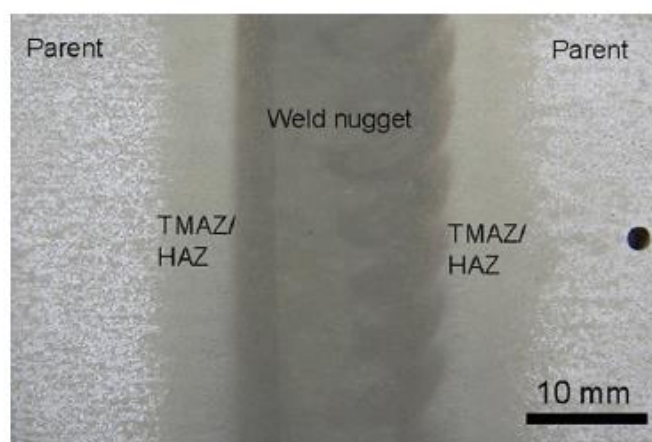


Figura 1. 18 Análisis macro de la zona procesada por fricción batido

Mohiedin Bagheri Hariri, Sajad Gholami Shiri , Yadollah Yaghoubinezhad , Masoud Mohammadi Rahvard realizaron ensayos de corrosión en la aleación AA5052 ,que previamente había sido procesada por FSW, para obtener parámetros óptimos de velocidad de rotación y velocidad de avance. Esto lo hicieron de 2 formas, primero mantuvieron la velocidad de avance constante combinándolas con 5 velocidades de rotación. Después, mantuvieron la velocidad de rotación constante y variaron la velocidad de avance.

Para cada caso hicieron curvas de polarización Tafel y ensayos de inmersión en las 3 zonas de la probeta. (SZ, TMAZ, BM) .

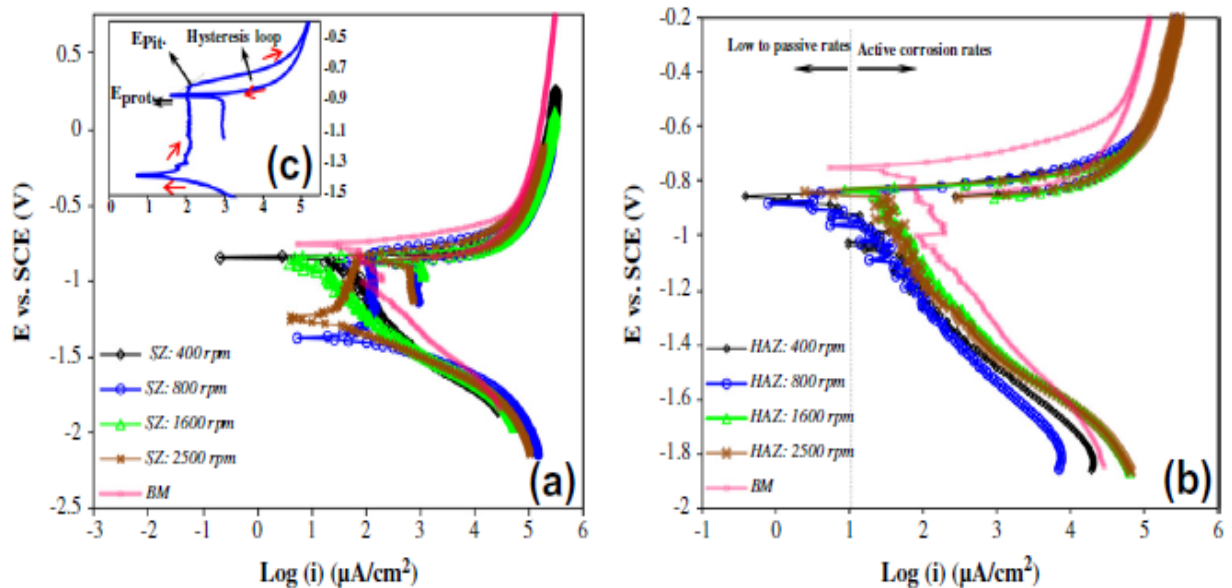


Figura 1. 19 Curvas de polarización Tafel en probetas procesadas a velocidad de avance constante a) Zona batida b) Zona afectada por el calor

Tabla 1. 10 Potencial de corrosión y corriente de corrosión (velocidad de rotación constante)

Rotation speed (rpm)	$E_{corr.}$ (V vs. SCE)			$i_{corr.}$ ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)		
	SZ	HAZ	BM	SZ	HAZ	BM
400	-0.844	-0.858	-0.751	0.96	1.41	63.45
800	-1.374	-0.884	-0.749	70.8	6.31	64.56
1600	-0.888	-0.842	-0.755	9.54	26.3	70.56
2500	-1.26	-0.842	-0.754	14.13	25.11	63.87

Primero mantuvieron la velocidad de avance a 50 mm/min y variaron la velocidad de rotación entre 400 a 2500 RPM. Se aprecia que la mayor tasa de corrosión se da a 800 y 2500 RPM (Tabla1.10).

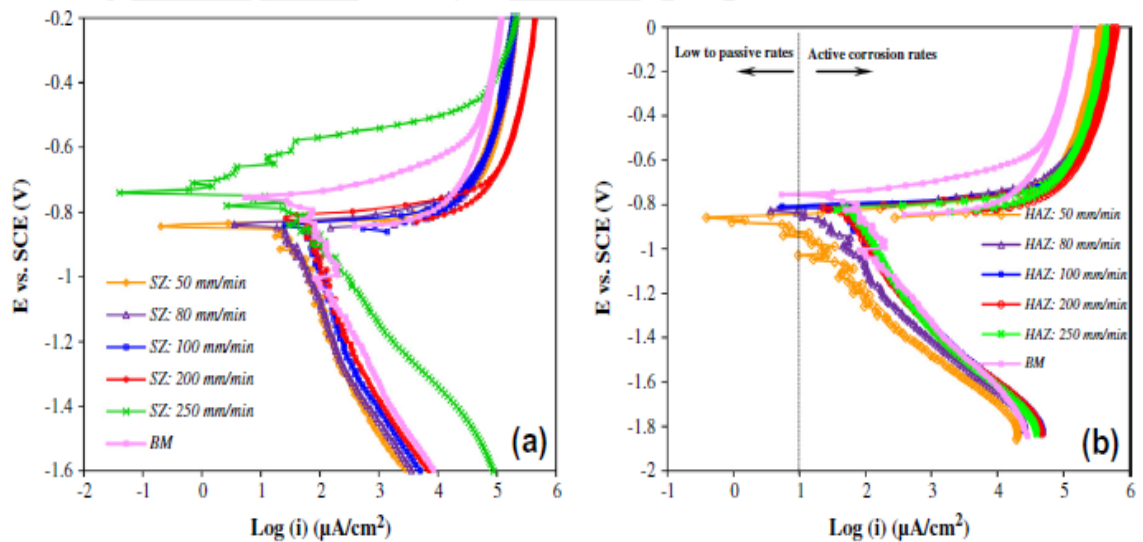


Figura 1. 20 Curvas de polarización Tafel en probetas procesadas a velocidad de rotación constante a) Zona batida b) Zona afectada por el calor

Tabla 1. 11 Potencial de corrosión y corriente de corrosión

Traveling speed (mm/min)	$E_{corr.}$ (V vs. SCE)			$i_{corr.}$ ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)		
	SZ	HAZ	BM	SZ	HAZ	BM
50	-0.844	-0.858	-0.751	2.51	2.69	62.97
80	-0.837	-0.825	-0.756	16.59	14.12	63.71
100	-0.84	-0.812	-0.749	67.61	40.73	66.58
200	-0.831	-0.813	-0.75	63.09	64.56	70.92
250	-0.74	-0.813	-0.73	0.63	77.43	65.18

Luego se mantuvo la velocidad de rotación constante a 400 RPM variando la velocidad de avance entre 50 a 250 mm/min. Se puede apreciar que no hay mucha variación con respecto a la resistencia a la corrosión, debido a que el tamaño de grano no varía mucho al variar la velocidad de avance.

Para verificar estos datos obtenidos se realizó ensayos de inmersión donde se analizó la pérdida de peso por unidad de área (Figura 1.21).

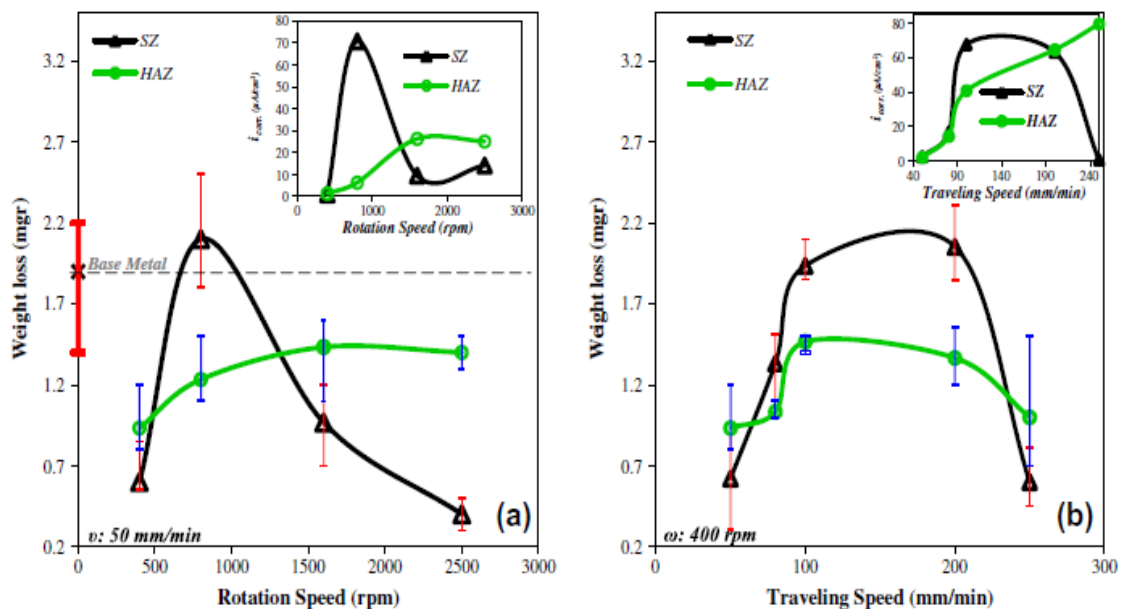


Figura 1. 21 Gráfico de pérdida de peso a) velocidad de avance constante b) Velocidad de rotación constante

Donde se llegó se pudo verificar los resultados obtenidos en los ensayos electroquímicos.

Finalmente, T SMahmoud analizó la resistencia a la corrosión de la aleación AA6063 una vez que esta había sido procesada por FSP. Para esto uso ensayo de inmersión estáticos con el fin de luego analizar la pérdida de peso en una balanza de precisión de 0.1 mg. Mantuvo la velocidad de avance constante y varió la velocidad de rotación en un rango de 250 a 800 RPM. En los ensayos de inmersión analizó la pérdida de peso desde que fue sumergida hasta las 120 horas sumergidas.

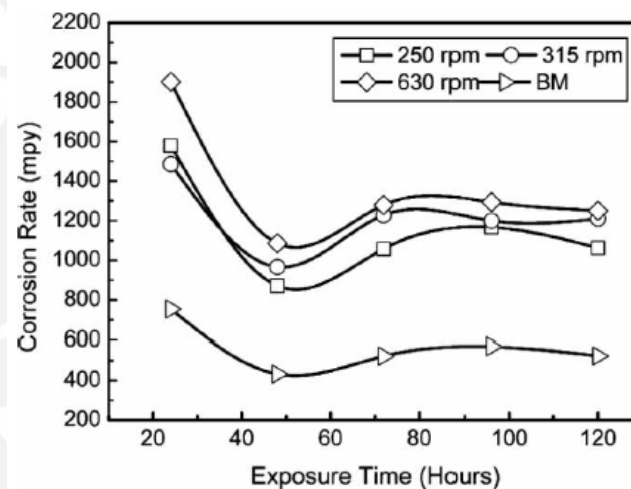


Figura 1. 22 Velocidad de corrosión vs tiempo de exposición a la solución

Se llegó a la conclusión que a mayor sea la velocidad de rotación, para una misma velocidad de avance, la resistencia a la corrosión será menor

2. Procedimiento experimental

2.1. Metodología de trabajo

Para el desarrollo del trabajo se seleccionó el proceso de fricción batido (FSP), puesto que es un proceso relativamente nuevo y se está usando en diversas aplicaciones debido a que permite mejorar las propiedades mecánicas de los materiales, principalmente del aluminio.

Se hizo el diseño y la fabricación de la herramienta con la que se realizó el proceso de fricción batido. Se tuvo que tomar medidas exactas de esta, debido a que la medida de la herramienta depende mucho de las dimensiones de las probetas a procesar.

Las probetas fueron procesadas por el método de fricción batido manteniendo la velocidad de rotación y altura de penetración constante, pero se utilizó diferente velocidad de avance para cada probeta con el fin de analizar como varía la corrosión cuando se procesa con diferentes velocidades de avance a una fija velocidad de rotación.

Una vez las probetas fueron procesadas por el método de fricción batido, se procedió al análisis metalográfico, análisis de dureza y análisis de corrosión en la zona afectada. Estos análisis se realizaron en las 3 zonas que deja el proceso de fricción batido (SZ, TMAZ/HAZ, BM).

2.2. Características del material a emplear

En este trabajo se analizó la aleación de aluminio AA6063-T6 que tiene buenas propiedades mecánicas, además es tratable térmicamente y posee buena soldabilidad. Esta aleación se usa principalmente en perfiles arquitectónicos como por ejemplo marco para ventanas, marco puertas y techos. El tratamiento T6 consiste en calentar el material hasta una cierta temperatura para luego ser enfriado en una solución y

posteriormente hacerle un envejecimiento artificial. Su composición química es mostrada en la tabla 2.1 y sus propiedades en la tabla 2.2.

Tabla 2. 1 Composición química del aluminio AA6063

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	otros	Al
Máx.	0.6	0.35	0.1	0.1	0.9	0.1	-	0.1	0.1	0.15	El resto
Mín.	0.2	-	-	-	0.45	-	-	-	-	-	El resto

Tabla 2. 2 Propiedades mecánicas del aluminio AA6063

Propiedades	Valor
Ultimo esfuerzo a la tracción (MPa)	241
Esfuerzo a la fluencia(MPa)	214
Dureza(HV)	83
Conductividad Térmica (W/mK)	200

Para este trabajo se utilizó 2 planchas del aluminio de 1490 x 100 x 3 mm de dimensión, donde se fabricaron 10 probetas. Cada probeta fue del tamaño de 150 x 100 x 3 mm tal como se muestra en la figura 2.1.

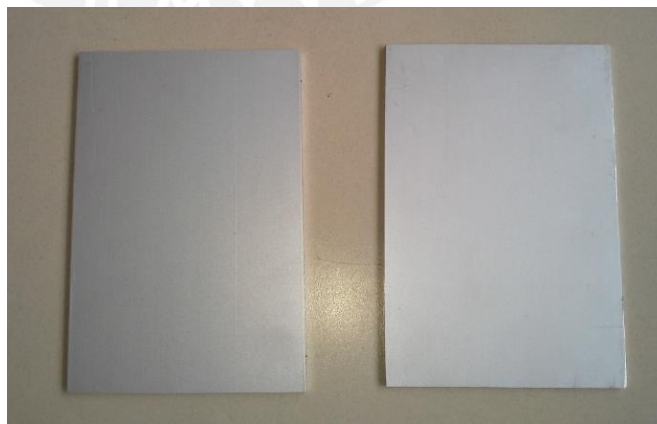


Figura 2. 1 Planchas de aluminio AA 6063- T6

2.3. Ejecución del proceso de fricción batido

2.3.1. Parámetros usados en el proceso de fricción batido

Para el proceso de fricción batido se diseñó la herramienta con la que se iba a realizar dicho proceso, para esto se tuvo en cuenta algunas recomendaciones dadas por los previos investigadores. Se tomó en cuenta lo siguiente: la relación de diámetros entre el pin y el hombro debe ser de aproximadamente de 3 y la altura del pin debe ser menor que el espesor de la plancha. (Figura 2.2)

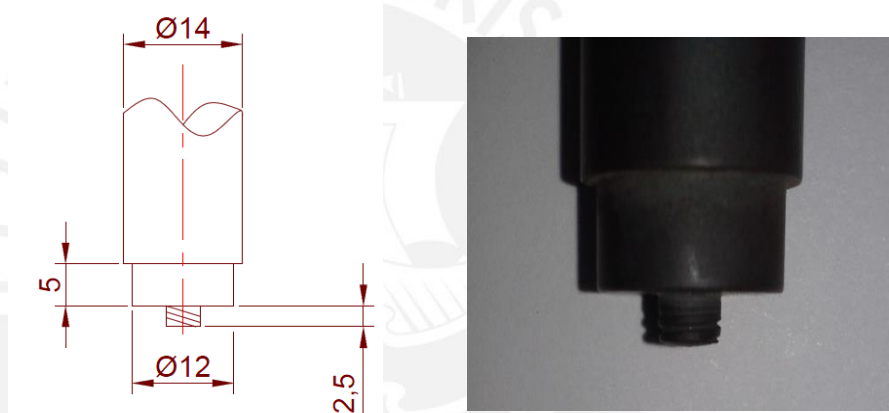


Figura 2. 2 Herramienta del proceso de fricción batido

Esta herramienta es del material k340 BOHLER y se fabricó en el torno CNC del taller de manufactura de la PUCP. Una vez que la herramienta estuvo fabricada se procedió al tratamiento térmico de esta que fue de temple y revenido, esto se realizó para obtener alta resistencia al desgaste y una óptima dureza. Para el temple primero se realizó un precalentamiento de la herramienta a 550 °C durante media hora, posteriormente se colocó la herramienta en un horno a 1050 °C durante 45 minutos para posteriormente ser enfriada en aceite como se puede apreciar en la figura 2.3. Finalmente, se hizo 2 revenidos de la herramienta a 550 °C cada uno y fue enfriado por aire. Con esto se obtuvo una dureza de 55 HRC.

El precalentamiento, temple y revenido fueron realizados en el horno de calcinación CARBOLITE1100 del laboratorio de materiales de la PUCP (figura 2.3).



Figura 2. 3 Tratamiento térmico a la herramienta del proceso de fricción batido

Por otro lado, para el proceso de fricción batido encontraron las siguientes variables:

- Velocidad rotacional
- Velocidad de avance
- Fuerza de penetración
- Altura de penetración
- Angulo de inclinación de la herramienta
- Geometría del PIN

Se seleccionó un pin cilíndrico roscado de 2.5 milímetros. Para cada probeta se mantuvo constante la fuerza de penetración, altura de penetración, ángulo de inclinación de la herramienta, que fue de 0 grados, y la velocidad de rotación; el

único parámetro que varió fue el de la velocidad de avance. Se trabajó con 5 velocidades de avance como se puede ver en la tabla 2.3.

Tabla 2. 3 Parámetros de procesamiento de cada probeta

NUMERO DE PROBETA	VELOCIDAD DE AVANCE (mm/min)	VELOCIDA DE ROTACIÓN (RPM)	ALTURA DE PENETRACION(mm)	FUERZA DE PENETRACIÓN (KN)
1	60	600	2.5	15
2	100	600	2.5	15
3	120	600	2.5	15
4	160	600	2.5	15
5	200	600	2.5	15

Para la selección de las velocidades se tomó como referencia la velocidad de la probeta número 3 (600 RPM, 120 mm/min), puesto que en un ensayo previo realizado por T S Mahmoud fue ahí donde ocurrió la corrosión máxima del aluminio AA6063-T6 cuando fue procesado por fricción batido. Se seleccionaron 2 velocidades de avance menores y 2 velocidades de avance mayores manteniendo la velocidad rotacional constante. Para dicha selección de velocidad de avance se tuvo en cuenta la relación velocidad de avance (mm/min) entre velocidad de rotacional (rev/min) que debe estar entre el rango desde 0.1 hasta 0.3 mm/rev aproximadamente, para que ocurra un adecuado batido del material.

Se trabajó con 5 combinaciones de velocidades, para cada combinación de velocidad se procesó 2 probetas para así comprobar la homogeneidad de los resultados que íbamos obteniendo. En total se procesó 10 probetas. Todas las probetas fueron procesadas de extremo a extremo en dirección longitudinal tal como se indica en la figura 2.4.

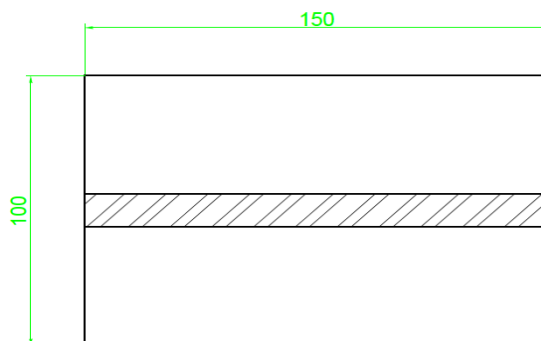


Figura 2. 4 Esquema del canal de soldadura

La fabricación de estas probetas se realizó en el centro de mecanizado CNC del taller de manufactura de la PUCP (figura 2.5), marca MAZAK modelo VTC-16B que puede llegar a una potencia de hasta 15HP con lo cual el proceso de fricción batido se puede realizar sin ninguna dificultad.



Figura 2. 5 Centro de mecanizado CNC marca MAZAK modelo VTC-16B

Es importante que durante este proceso la probeta este fija a la mesa del centro de mecanizado. Debido a esto se usó un sistema de sujeción constituido por una placa como soporte en la parte inferior de la probeta, 2 placas en la parte superior de la probeta dejando libre el canal donde se iba a procesar y 4 garras de sujeción (figura 2.6)

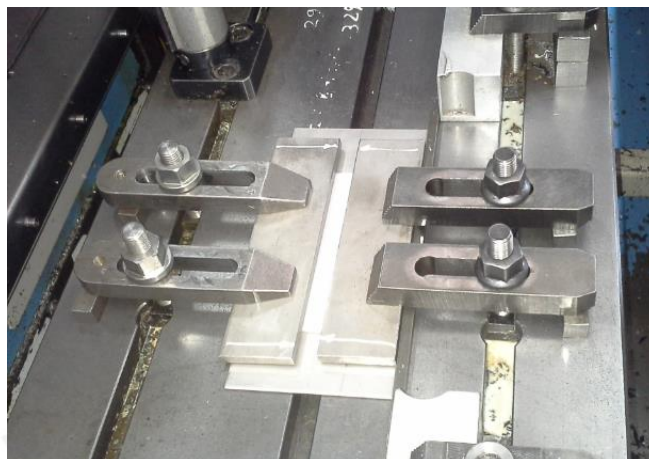


Figura 2. 6 Sujeción de probeta para el procesado de fricción batido

En la figura 2.7 se puede observar como fue ejecutado el proceso de fricción batido, este se realizó sin adicionar refrigerante. Se debe verificar que en cada pasada el hombro de la herramienta choque completamente con la probeta, puesto que de lo contrario no se realizará un buen proceso de fricción batido.



Figura 2. 7 Proceso de fricción batido

Asimismo, en la figura 2.8 se observa el cordón generado luego del proceso a una velocidad de 600 RPM y 200 mm/min. La toma de muestras se realizó de la parte central de la probeta procesada, ya que como podemos ver en la figura 2.8, en los

extremos de la probeta la mezcla del material no es óptima, como si lo es en el medio de esta. Se dejaron 20 mm de desecho a cada extremo de la probeta.

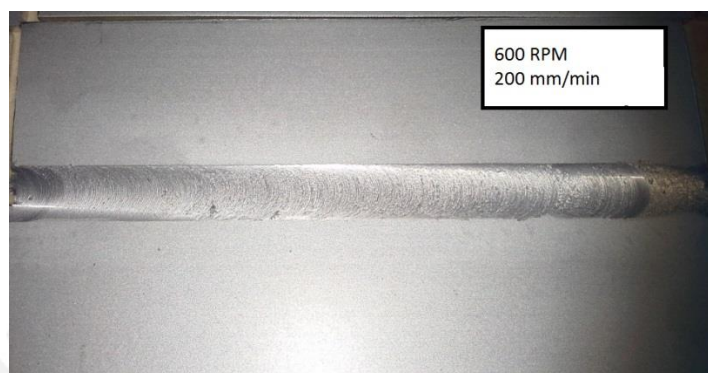


Figura 2.8 Canal de soldadura a 600RPM y 200 mm/min

2.4. Estudio de la corrosión la aleación de aluminio procesada por FSP

2.4.1. Ensayo de corrosión por inmersión

a) Preparación de materiales

Para este ensayo se usó dos tipos de muestras, las primeras fueron de 30 x 8 x 3 mm. Estas muestras fueron obtenidas una de la zona batida (SZ) y otra de la zona termo mecánicamente afectada (TMAZ). En la figura 2.9 podemos apreciar dichas muestras.

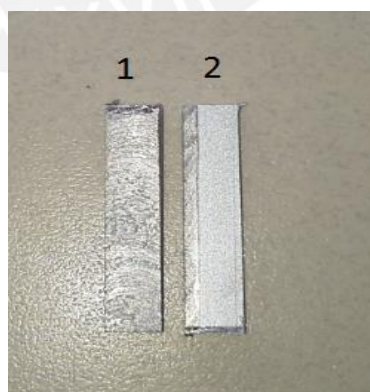


Figura 2. 9 Probetas para inmersión 1) SZ 2) TMAZ

Las otras muestras fueron de 42 x 10 x 3 mm. Estas muestras fueron obtenidas a lo largo de todas las zonas que involucran el proceso de la fricción batido (figura 2.10)



Figura 2. 10 Probeta para inmersión de todas las regiones

Todas las superficies de estas muestras se desgastaron con papel de SiC de granulometría 360 para posteriormente ser limpiada con acetona y agua destilada. Luego fueron secadas con aire caliente para ser pesadas y medidas.

b) Ensayo de corrosión por inmersión

Las muestras fueron sumergidas en una solución de 100ml de 1M HCL (figura 2.11) y la extensión del ataque de corrosión se pudo observar mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) y posteriormente se procedió a la medición de la pérdida de peso para así determinar la velocidad con la que se corroe el material, las muestras las pesamos una vez que hayan estado sumergidas 72, 96 y 144 horas (análisis gravimétrico).

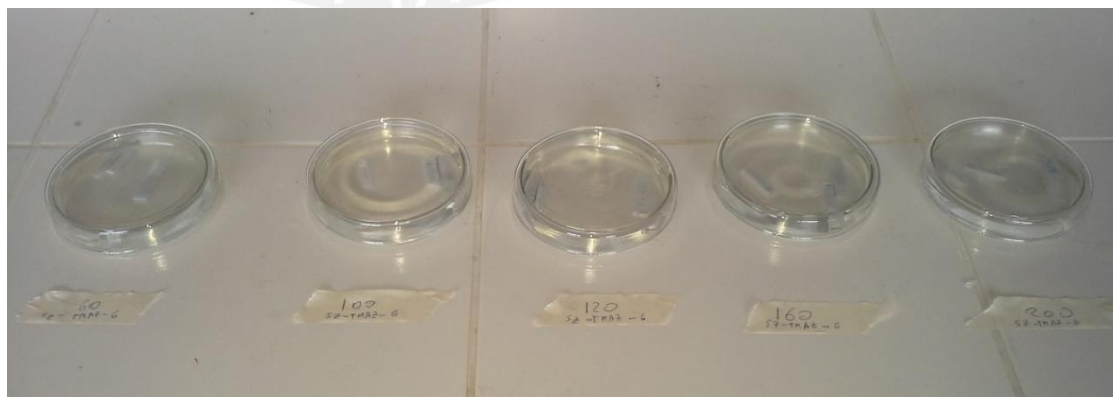


Figura 2. 11 Probetas sumergidas en 1M HCL

2.4.2. Caracterización electroquímica del material procesado

a) Preparación de muestras

Una vez la probeta fue procesada mediante fricción batido, se cortó 1 muestra circular por probeta, esta muestra abarcaron todas las zonas del proceso (SZ, TMAZ y BM). Las muestras circulares fueron de 15 mm de diámetro y de 2.9mm de espesor. Estas fueron cortadas de la superficie de la probeta tal como se muestra en la figura 2.12.

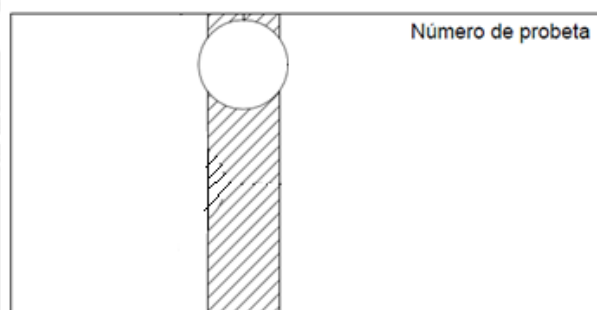


Figura 2. 12 Esquema del corte de las probetas para ensayos potenciodinámicos

Es muy importante la preparación superficial de estas muestras, debido que se quiere ensayar la susceptibilidad a la corrosión por picadura, corrosión intergranular y corrosión bajo tensión. Además, no debe tener defecto alguno o resquicios, ya que esto no favorece a las mediciones de voltaje de circuito de potencial abierto ni de las curvas de polarización Tafel. Por este requerimiento se preparó estas superficies lijándolas con papel abrasivo de SiC de granulometría de 150, 220, 360, 400, 600 y 1000 sucesivamente. Finalmente, fueron limpiadas con etanol para eliminar la impurezas que pudieran haber quedado y luego fueron secadas con aire seco caliente.

Finalmente, las muestras fueron introducidas en el porta muestras de modelo k105 flat specimen holder (figura2.13), para posteriormente comenzar con los ensayos potenciodinámicos.

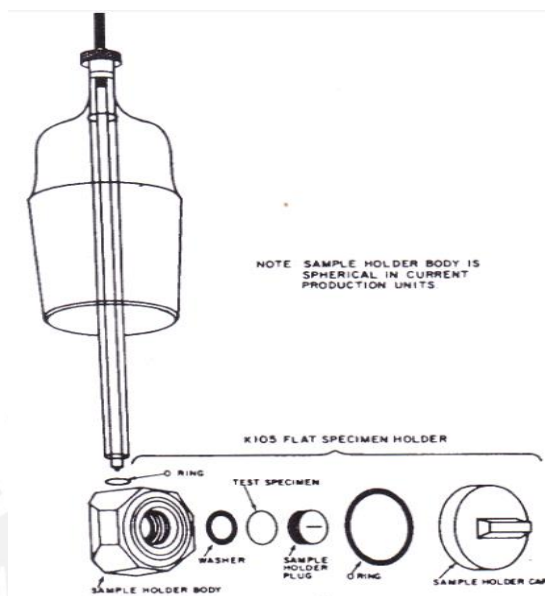


Figura 2. 13 Porta muestras K105

a) Equipos empleados

Para la realización de los ensayos potenciodinámicos se usó el potencióstato convencional GAMRY Reference 600 (figura 2.14), éste a su vez estuvo conectado a una laptop con la cual interactuaba mediante el software GAMRY framework.



Figura 2. 14 Potencióstato Reference 600

Otro equipo importante que se usó fue un sistema de célula de corrosión de modelo K47 (Figura 2.15)



Figura 2. 15 Celda de corrosión modelo K47

Los componentes principales de esta celda son los siguientes:

- Frasco de corrosión (Corrosion FLASK)
- Electrodo de referencia (Reference electrode)
- Contra electrodos (Counter electrodes)
- Electrodo de trabajo (Working electrode)
- Tubo de purga y ventilación (purge and vent tube)

Este sistema de célula de corrosión está conectado al potencióstato mediante los cables y los contactos eléctricos. En el electrodo de trabajo está expuesta la pequeña superficie de la muestra que se obtuvo del proceso de fricción batido.

Una parte muy importante para que la toma de mediciones sea correcta es el equipo DE calibración del potencióstato. Esta calibración se realizó con la ayuda de una placa de circuito impreso llamada "Dummy Cell" (figura 2.16). Esta celda consta de una serie de componentes, su función es reproducir valores ideales de una probeta bajo un proceso de corrosión electroquímica y luego compararlos con los resultados que se obtienen en el potencióstato.



Figura 2. 16 Universal Dummy Cell

b) Ensayos potenciodinámicos

Como se mencionó previamente se usó un potencióstato con una celda de corrosión con 3 electrodos para realizar los ensayos potenciodinámicos, se presenta el esquema de este arreglo en la figura 2.17.

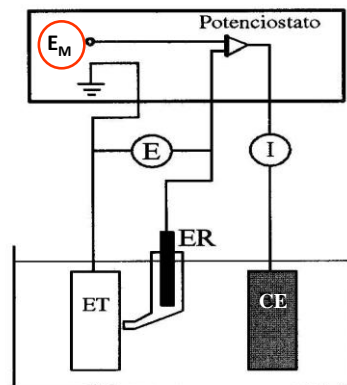


Figura 2. 17 Esquema de celda electroquímica

Donde ET, ER y CE son el electrodo de trabajo, electrodo de referencia y el contra electrodo, respectivamente.

El electrodo de referencia y el electrodo de trabajo están conectados mediante un puente salino. Además, se sabe que lo que mide el potencióstato es el EM que es

el potencial del electrodo de trabajo con respecto al electrodo de referencia. El contra electrodo es un material inerte que cumple la función de cerrar el circuito y hacer pasar una corriente (I) al sistema. Todos estos electrodos están sumergidos en un electrolito.

El fin de usar el potencióstato es registrar las curvas de polarización Tafel del material a ensayar y así poder determinar sus propiedades de pasivación.

Los datos importantes que se pueden medir en estos ensayos son la corriente de corrosión (i_{corr}), potencial de corrosión (E_{corr}) y pendientes tafel (β_a y/o β_c). Asimismo, se puede graficar la curva de polarización (E vs $\log i$).

- Ensayo de potencial de circuito abierto

Para este ensayo no se aplica un potencial exterior al sistema, solo se deja que actúe de forma natural y se mide cada cierto tiempo el valor del potencial que registra el equipo durante un periodo de tiempo.

Para esta prueba, nuestra muestra fue el electrodo de trabajo, se usó grafito como electrodo auxiliar y un electrodo saturado de Calomel (SCE) para que sirva como el electrodo de referencia. El electrolito que se usó fue 800 ml de 3.5% NaCl. Este ensayo se realizó hasta que el voltaje se estabilice, una vez el voltaje fue estable se pudo realizar otros ensayos como las curvas de polarización Tafel.

- Curvas de polarización

Para este ensayo se impuso una variación continua del potencial para poder apreciar el comportamiento del material cuando está protegido por la capa de pasivación y también analizar su comportamiento una vez que esta capa se rompe en el potencial de corrosión.

En esta prueba se usó grafito como electrodo auxiliar y un electrodo saturado de Calomel (SCE) para que sirva como el electrodo de referencia. El electrolito

que se usó fue 800 ml de 3.5% NaCl. El potencial inicial y final con respecto a OCP fue de 250 mV menor y 700 mV mayor, respectivamente.

2.5. Caracterización mecánica del material ensayado

2.5.1. Ensayo de Dureza

a) Preparación de la muestra

Para la realización de este ensayo se cortó la sección transversal de la probeta, aproximadamente a la mitad de esta, debido a que es ahí donde la mezcla del material y por ende la microestructura es más homogénea (Figura 2.18).



Figura 2. 18 Probetas para ensayo de dureza

El paso previo fue lijar la superficie transversal con lijas de diferentes grados de rugosidad y posteriormente pulir la probeta en disco de pulido con alúmina $1\mu\text{m}$ para que posteriormente pase al lavado con acetona y agua; y finalmente el secado con aire caliente seco. Esto se realizó con el fin de que las huellas que dejó el indentador puedan observarse en el equipo de dureza Vickers sin ninguna dificultad. Además, las caras deben ser paralelas para la adecuada toma de dureza.

b) Equipos empleados

Este ensayo se realizó en el laboratorio de Materiales de la PUCP y se utilizó un microdurómetro Vickers de marca ZWICK ROEL(figura 2.19).

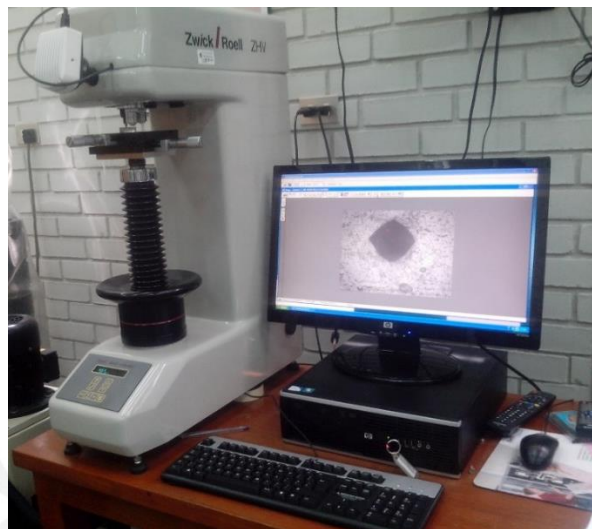


Figura 2. 19 Micro durómetro Vickers

c) Ensayo de microdureza Vickers

Para este ensayo se aplicó una carga de 500 gramos por 10 segundos, la carga es aplicada por medio de un indentador con el objetivo de dejar huellas en forma de rombo con el valor de diagonales d_1 y d_2 . Este valor de la medida está en micrómetros y puede ser medido por el equipo de Microdureza Vickers. Con el promedio de estas 2 diagonales se procede a buscar el valor de dureza Vicker en la norma ASTM E 384.

Se llevó acabo barrido de dureza a lo largo de la sección transversal de la zona procesada por fricción batido. Esto se realizó con el fin de analizar como variaba la dureza en la zona de batido, zona termo mecánicamente afectada, zona afectada por calor y en el metal base.

Los ensayos se realizaron en la sección transversal a 1 mm de distancia con respecto de la superficie.

2.5.2. Análisis micro estructurales

a) Equipos empleados

Microscopio electrónico de barrido (SEM)

b) Análisis metalográfico y macro gráfico

Para los análisis metalográficos se tuvo que tener una cuidadosa preparación superficial de las muestras que incluye el desbaste, pulido y ataque químico. Esta preparación superficial influyó en el revelado de la microestructura.

El primer paso para estos análisis es el corte de la muestra a analizar, este corte se realizó con un disco de corte de precisión, la muestra cortada se montó en una pastilla para ser maniobrada con mayor facilidad. (Figura 2.20)



Figura 2. 20 Probetas embriquetadas para ensayos metalográficos y macrográficos

Posteriormente, se procedió al desbaste por vía húmeda de las muestras tratando de obtener una superficie sin rayas, en el trabajo se usó papel abrasivo de carburo de silicio (SiC) de granulometrías de 150, 220, 360, 400, 600 y 1000 sucesivamente. Para el pulido se utilizó una superficie gírotoria con una solución acuosa cubierta de un paño de partículas abrasivas, se utilizó alúmina de 1 μm . Debido a que el aluminio es un metal blando se tuvo que tener especial cuidado en el pulido para que los rayones no se hicieran visibles en el microscopio de barrido.

Por último, las muestras pulidas fueron limpiadas con agua detergente y alcohol; y luego secadas con aire caliente para proceder a atacar al material con un reactivo

con el fin de apreciar los límites de grano y los precipitados que se formaron. Usamos Flick reagent (1.5 partes de HCl, una parte de HF y 9 partes de H₂O) por 1 minuto.

Se compararon las diferentes microestructuras obtenidas en el material base y las obtenidas al variar el la velocidad de avance en la SZ.



3. Obtención y análisis de resultados

3.1. Análisis microestructural

A continuación se presentará los resultados tanto de la macrografía y de la metalografía obtenidos de las probetas, donde cada una de estas se procesó a la misma velocidad de rotación; sin embargo, la velocidad de avance fue diferente para cada probeta. En la figura 3.1 se muestra un esquema de la zona transversal que ha sido procesada. En cada probeta se obtuvo diferentes dimensiones en las medidas de la zona procesada, lo cual se indica en la tabla 3.1.

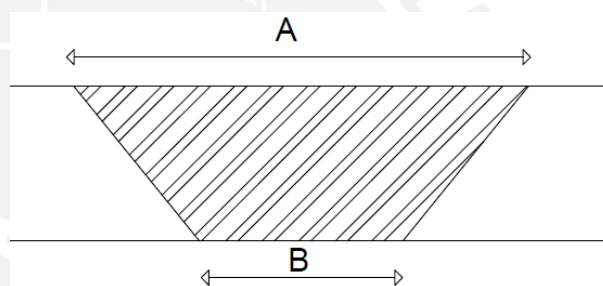


Figura 3. 1 Esquema de la zona procesada

Tabla 3. 1 Medidas de la zona procesada con relación de velocidades

# DE PROBETA	A (mm)	B (mm)	Relación (Va/RPM)
PROBETA 1	8.35	3.73	0.1
PROBETA 2	11.17	3.29	0.17
PROBETA 3	12.18	3.49	0.2
PROBETA 4	8.82	3.95	0.27
PROBETA 5	8.37	3.99	0.33

Mediante los análisis macrográficos se pueden observar claramente las zonas que quedan como resultado después del proceso de fricción batido que es la zona batida (SZ) y la zona termo mecánicamente afectada (TMAZ); sin embargo, la zona afectada por el calor (HAZ) no se puede diferenciar del todo bien. La SZ tiene la forma de un tazón que va aumentando a razón que se acerca a la superficie, esto es debido los efectos del hombro que ejerce sobre el flujo de material durante el FSP que es mayor en la parte superior y menor en la parte inferior. La TMAZ es una zona angosta que se distingue de otra tonalidad de color donde es la transición del BM y la SZ.

Asimismo, se pueden apreciar las dimensiones de toda la zona procesada y como varía esta cuando es procesada a diferente velocidad de avance con una misma velocidad de rotación. Estas dimensiones se pueden apreciar en la tabla 3.1. La zona procesada más grande se obtiene cuando la relación velocidad de avance entre velocidad de rotación (revolutionary pitch) es de 0.17 y 0.2 mm/rev, esto ocurre en la probeta número 2 y 3, respectivamente.

Además, en las imágenes macros se observa que de las 5 probetas procesadas, solo 2 de ellas no presentan defectos. Estas probetas son las probetas número 2 y 3 donde su revolutionary pitch es de 0.17 y 0.2 mm/rev respectivamente. Estas probetas también son las en las cuales se obtuvo mayores dimensiones de la zona procesada. Estos resultados obtenidos son congruentes con los estudios realizados por Liu H.J, en donde se indica que para que se obtenga resultados óptimos en el proceso de fricción batido de aleaciones de aluminio, el revolutionary pitch debe estar cercano a 0.2 mm/rev, ya que esto significa un adecuado aporte de calor al material procesado durante el proceso de fricción batido. La generación de calor en el proceso es inversamente proporcional al valor del revolutionary pitch.

Por otro lado, en todas las macrografías se observa que entre la Zona termo mecánicamente afectada y la zona de batido existe unos anillos de otra tonalidad de color, en la zona de avance, conocidos como “onion rings”. En estudios realizados previamente por R. Nandan, concluyó al realizar ensayos EDS que en esas bandas existía una diferente densidad de las partículas de segunda fase y no una significativa

diferencia en la estructura del grano o la textura. Asimismo, en los ensayos de rotura las grietas se formaban alrededor de estos “aros de cebolla” (onion rings).

Otro análisis que se realizó fue el análisis metalográfico donde se observó que en la SZ de cada probeta procesada por fricción batido existe un refinamiento de grano con respecto al metal base donde se obtiene aproximadamente granos 40 veces más finos (figura 3.2). Los tamaños de grano obtenidos fueron obtenidos $2\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$ en la SZ y BM, respectivamente.

En las fotografías con el microscopio SEM (figura 3.2) de la SZ y el BM donde se aprecian en el metal base y SZ que existe 3 clases de precipitados. Estos precipitados en el metal base y la SZ se encuentran en los límites de grano y también en la matriz α del aluminio.

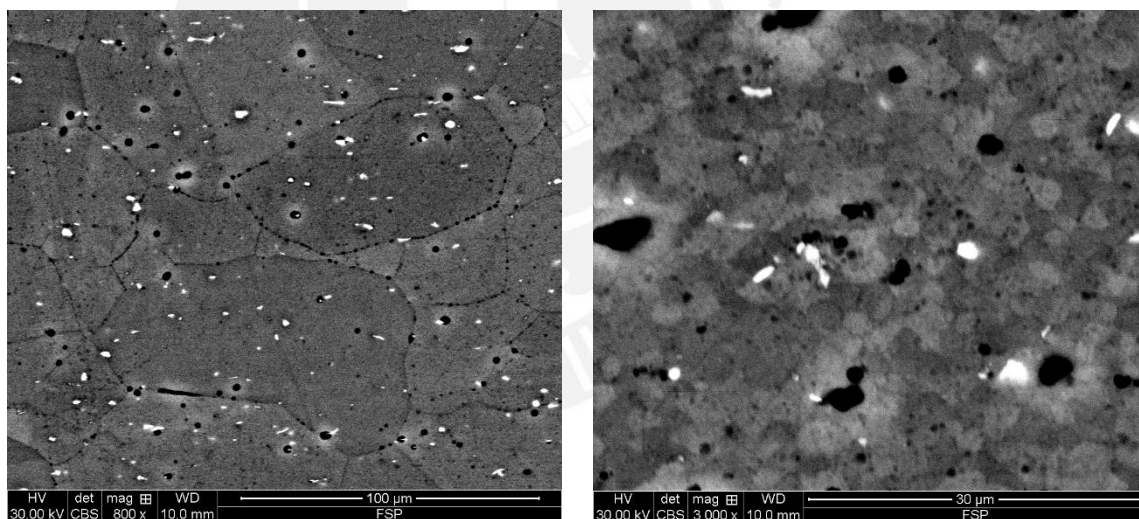


Figura 3. 2 Metal base 800X SEM (figura izquierda) Zona batida probeta 3 3000X SEM (figura derecha)

Se pudo determinar la composición química de los precipitados tanto en el metal base como en la zona batida mediante análisis de espectroscopia de rayos X dispersiva en energía (EDS). Los resultados se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 3. 2 Composición química de precipitado 1 Metal base

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %
O K	2.82	4.89	5.68	15.44
MgK	0.62	0.71	9.59	14.24
AlK	83.58	86	1564.53	3.56
SiK	3.97	3.92	21	12.93
FeK	9.01	4.48	85.82	2.96

Tabla 3. 3 Composición química de precipitado 2 Metal base

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %
MgK	1.07	1.18	24	5.58
AlK	98.93	98.82	2267.66	1.22

Tabla 3. 4 Composición química de precipitado 3 Metal base

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %
MgK	0.99	1.1	20.89	5.75
AlK	98.56	98.68	2147.6	1.33
FeK	0.45	0.22	3.84	31.17

En cambio, en la Zona batida (SZ) se obtiene la siguiente composición en los precipitados donde no se aprecia porcentaje de Si en estos precipitados, pero sí de algunos óxidos.

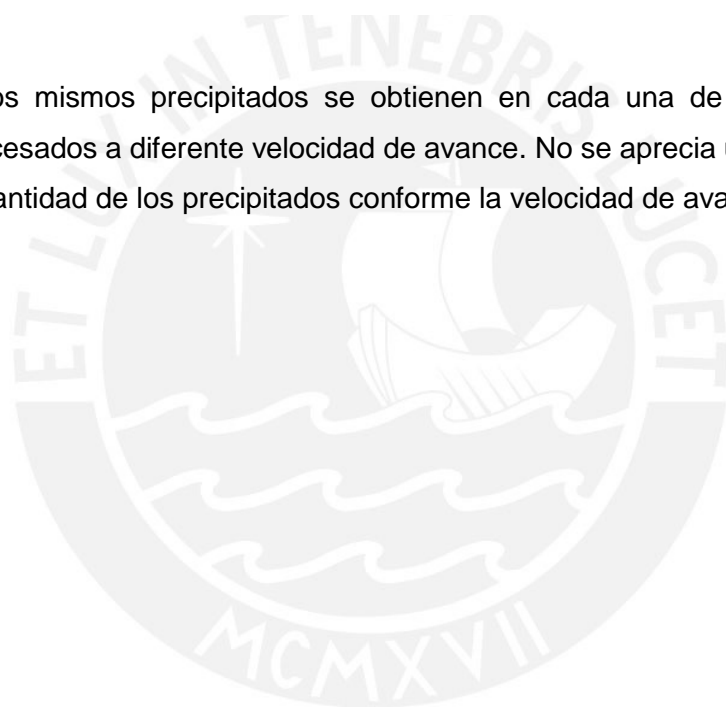
Tabla 3. 5 Composición química de precipitado 1 Zona batida

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %
MgK	1.04	1.15	16.11	6.04
AlK	98.96	98.85	1563.16	1.26

Tabla 3. 6 Composición química de precipitado 2 Zona batida

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %
OK	0.9	1.53	1.67	25.72
MgK	1.19	1.33	23.54	6.68
AlK	94.96	95.71	2033.59	2.16
FeK	2.95	1.44	27.09	7.31

Estos mismos precipitados se obtienen en cada una de las probetas que fueron procesados a diferente velocidad de avance. No se aprecia un cambio significativo en la cantidad de los precipitados conforme la velocidad de avance varía.



3.1.1. Probeta 1 (600 RPM, 60 mm/min)

En la Figura 3.3 (macrografía de la probeta 1) se puede notar que existe un gran defecto en la zona de batido y zona termo mecánicamente afectada, aproximadamente a 2 mm de la cara superficial. Esto se debe a que el revolutionary pitch es de 0.1 mm/rev, lo cual significa un excesivo aporte de calor en el proceso. Asimismo, debido a que no se procesa con una adecuada relación de velocidades se aprecia que las dimensiones obtenidas de la zona procesada no son las óptimas, ya que la dimensión máxima de la zona procesada debería ser aproximadamente el diámetro del hombro de la herramienta (12mm), pero en este caso solo alcanza 8.35 mm. El círculo A muestra la zona de batido y el círculo B muestra el cambio de la microestructura desde el material base hasta la zona de batido.





Figura 3. 3 Macrografía de la zona procesada probeta 1 (600RPM, 60mm/min)

En las figuras 3.4 y 3.5 se comparan la microestructura del metal base y la SZ (Circulo A). Se puede apreciar, como ya es mencionado en varias investigaciones previas a esta, que existe un refinamiento de grano cuando el metal base es procesado por fricción batido.

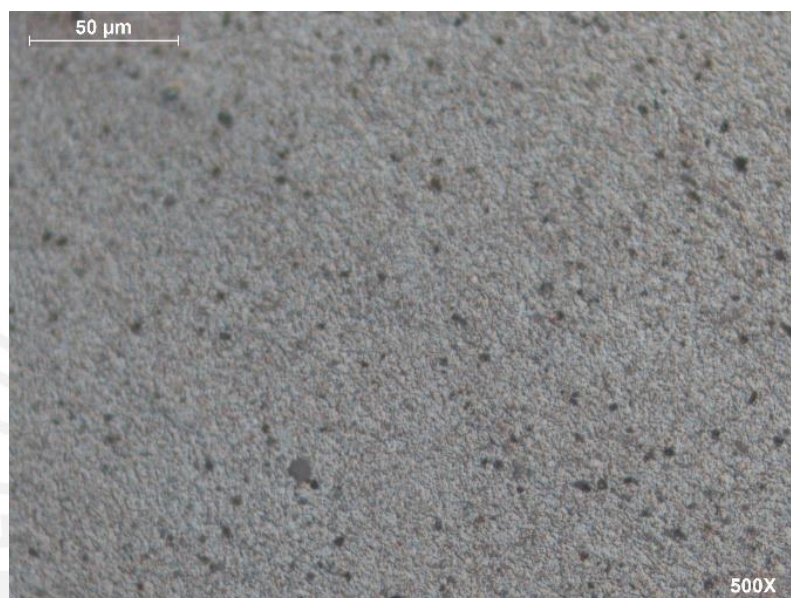


Figura 3. 4 Zona batida (Probeta 1 500 X)



Figura 3. 5 Metal base (100X)

La figura 3.6 muestra con una mayor ampliación las 4 zonas (circulo B) del proceso de fricción batido. La zona afectada térmicamente (HAZ) no se puede diferenciar claramente del material base con el reactivo usado, pero sabemos que esta se encuentra entre la TMAZ y BM.

En la TMAZ del lado de zona de avance se forma una zona rojiza en forma de líneas arqueadas que como mencionamos anteriormente es una parte de los “aros de cebolla” (onion rings) que se forma durante el proceso de fricción batido.

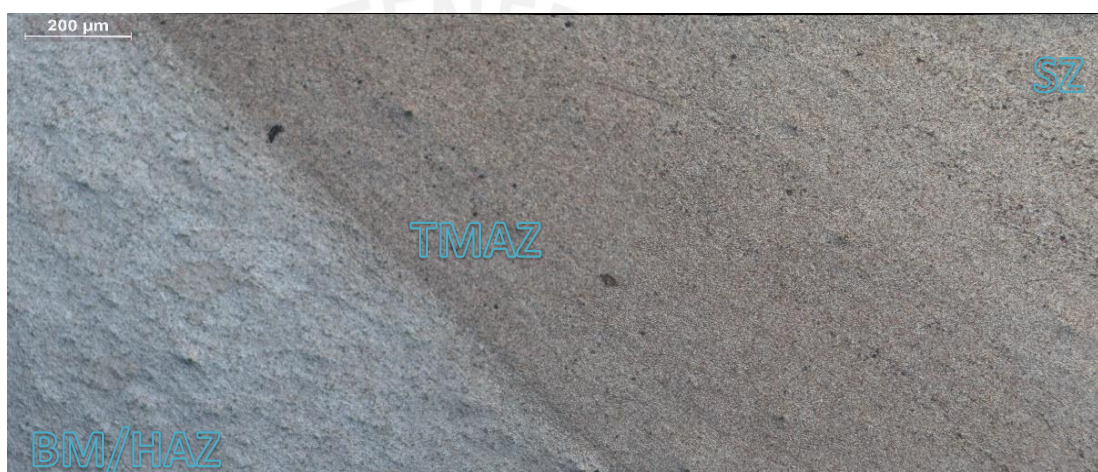
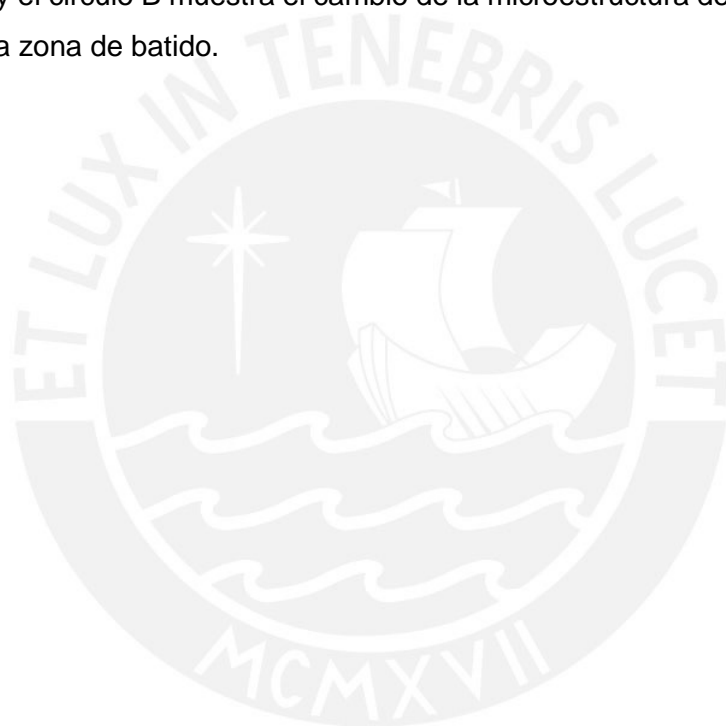


Figura 3. 6 Partes de la zona procesada de probeta 1

3.1.2. Probeta 2 (600 RPM, 100 mm/min)

En la figura 3.7 (macrografía de la probeta 2) a comparación de la presentada previamente se aprecia que existe un mejor flujo de material y por ende se presenta una zona procesada si mayores defectos. Esto se debe a que el revolutionary pitch es de 0.17 mm/rev, la cual es más cercana a la relación óptima. Además, las medidas de la zona procesada son más grandes, siendo la medida más grande 11.17 mm, la cual es muy cercana al diámetro del hombro (12 mm); es decir, que prácticamente es relación de velocidad óptima. El círculo A muestra la zona de batido y el círculo B muestra el cambio de la microestructura desde el material base hasta la zona de batido.



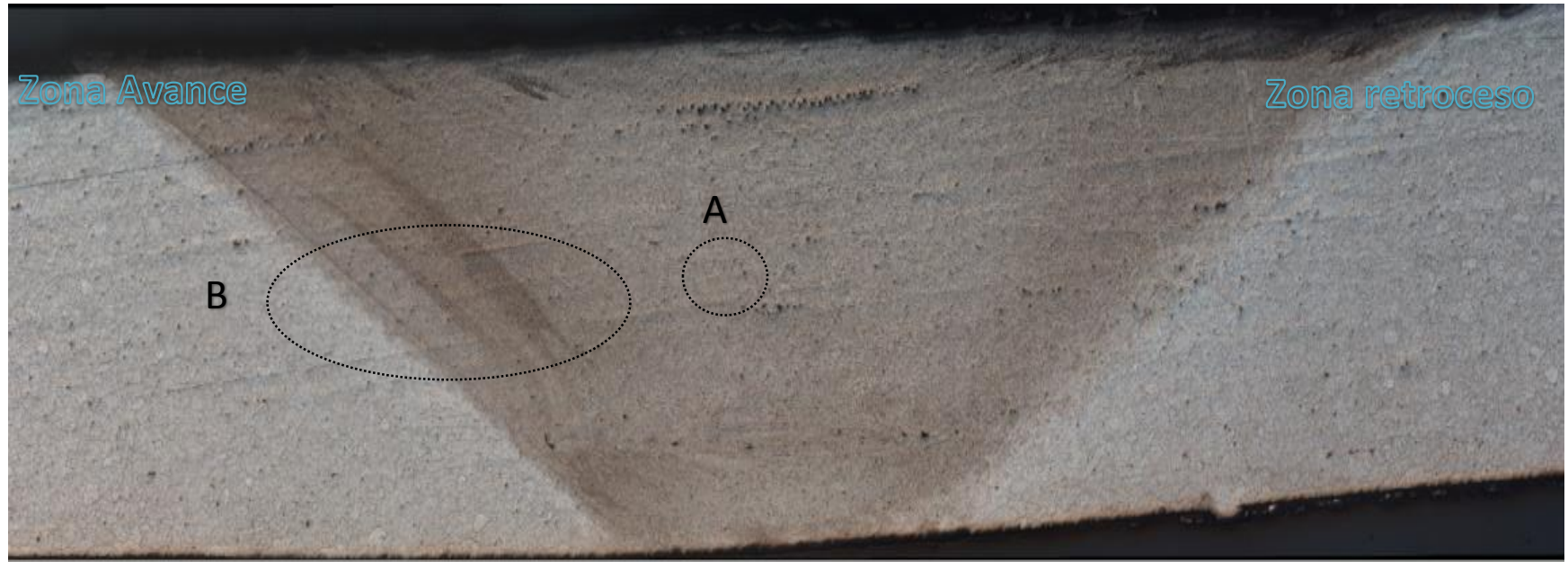
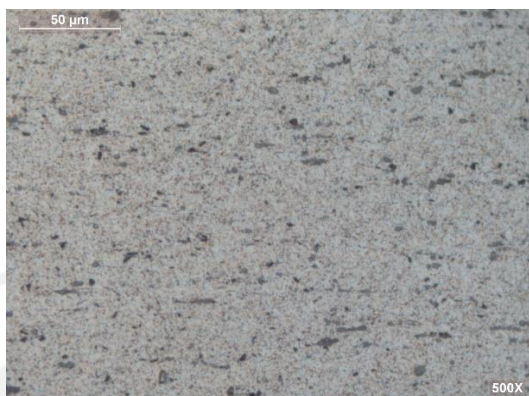


Figura 3. 7 Macrografía de la zona procesada probeta 2 (600RPM, 100 mm/min)

Se puede apreciar también que existe un refinamiento de grano cuando el metal base es procesado mediante fricción batido (figura 3.8)



,Figura 3. 8 SZ Probeta 2 50X

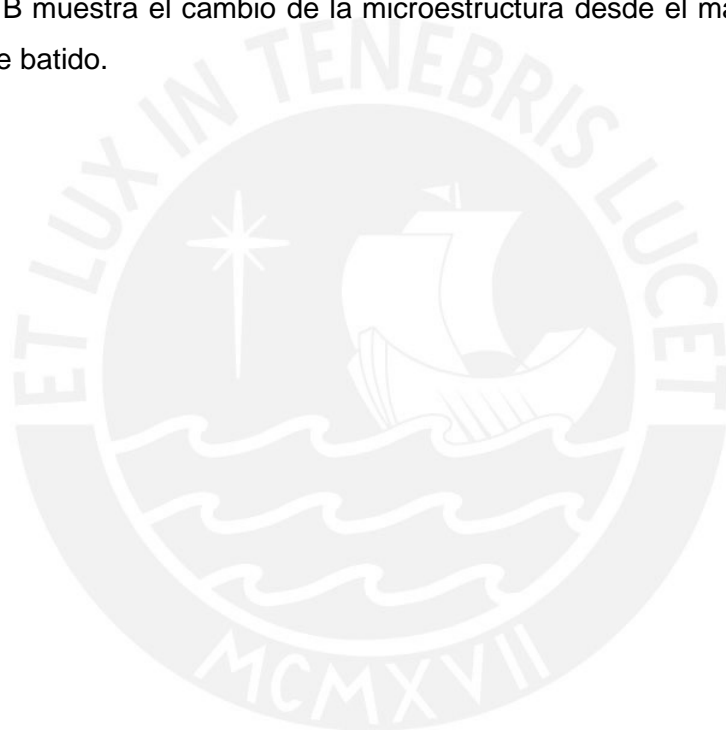
La figura 3.9 muestra las 4 zonas (circulo B) de la zona procesada por fricción batido y como varía la microestructura. También aparecen unas líneas arqueadas de un color rojizo en la TMAZ de la zona de avance



Figura 3. 9 Partes de zona procesada probeta 2 (600 RPM y 100 mm/min)

3.1.3. Probeta 3 (600 RPM, 120 mm/min)

En la figura 3.10 se aprecia la macrografía de la probeta 3, la cual fue procesada a la óptima relación de velocidades (0.2mm/rev). Debido a esto es que se obtiene una zona procesada sin fallas, puesto que existe una adecuada distribución de calor durante el proceso y un buen flujo del material. La dimensión de la zona procesada en la zona superficial es de 12.38 mm que es un poco más grande que el diámetro del hombro, esto nos quiere decir que el hombro está actuando completamente en la generación del calor en el proceso. El círculo A muestra la zona de batido y el círculo B muestra el cambio de la microestructura desde el material base hasta la zona de batido.



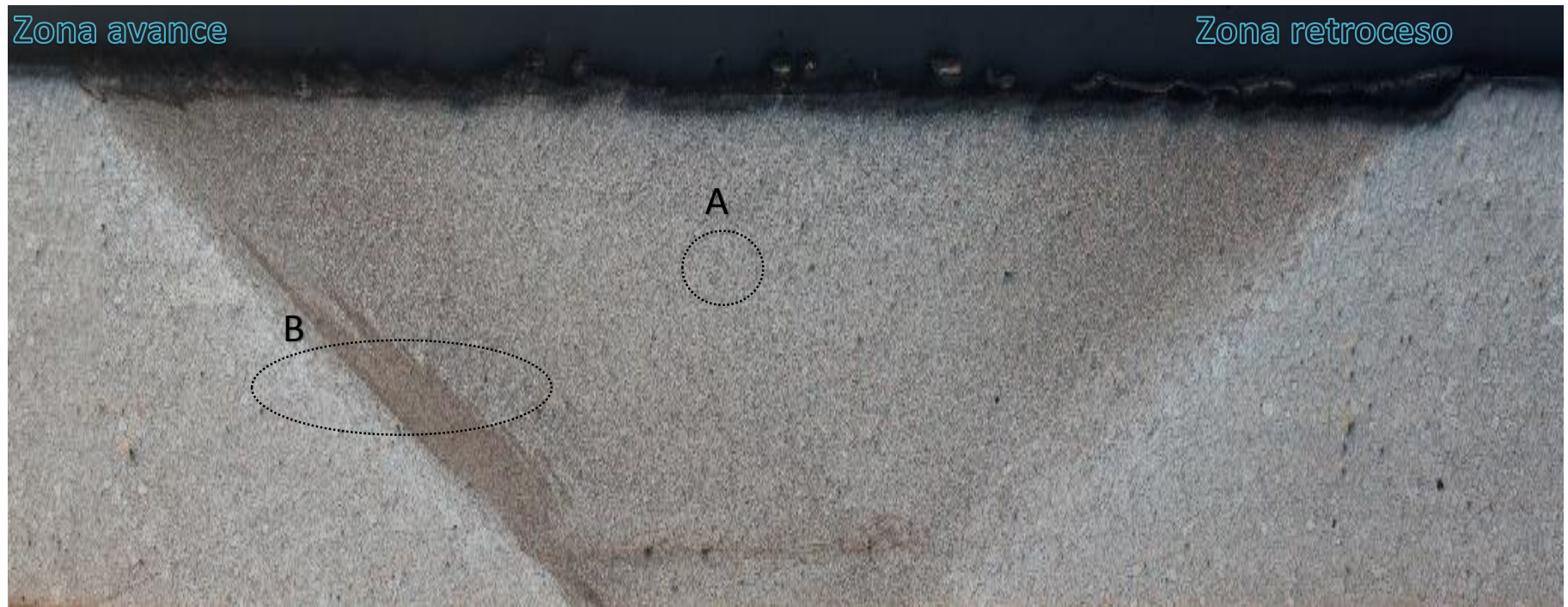


Figura 3. 10 Macrografía de la zona procesada probeta 3 (600RPM, 120mm/min)

Se puede apreciar que existe un refinamiento de grano cuando el metal base es procesado mediante fricción batido (figura 3.11)

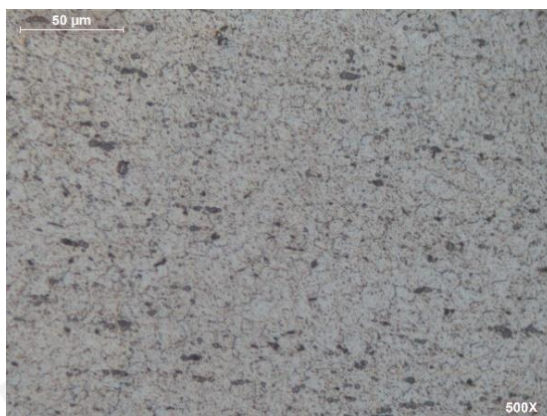


Figura 3. 11 Zona batida (Probeta 350X)

La figura 3.12 muestra las 4 zonas de la zona procesada por fricción batido y como varía la microestructura. También aparecen unas líneas arqueadas de un color rojizo en la TMAZ de la zona de avance.



Figura 3. 12 Partes de la zona procesada probeta 3

3.1.4. Probeta 4 (600 RPM, 160 mm/min)

En esta probeta debido a que la hemos pasado la relación de velocidad recomendada, se generan algunos defectos en la zona procesada. La relación de velocidad es 0.27mm/rev, esta relación de velocidad nos indica que existe una falta de calor aportado, puesto que la velocidad de avance es muy grande (160mm/min). Las dimensiones de la zona procesada tampoco son las óptimas, ya que se tiene una dimensión en la cara superficial de 8.82 mm, la cual es mucho menor a la del diámetro del hombro, lo cual confirma que no existe un buen flujo del material. El círculo A muestra la zona de batido y el círculo B muestra el cambio de la microestructura desde el material base hasta la zona de batido.



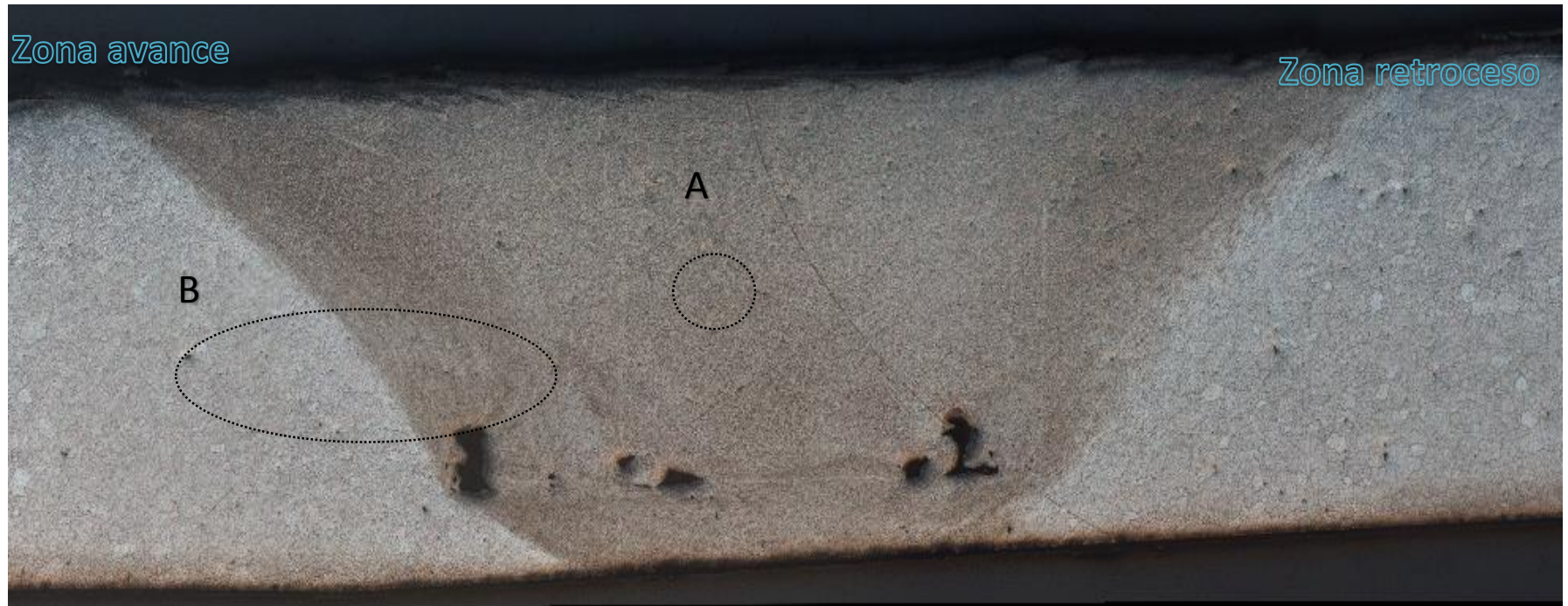


Figura 3. 13 Macrografía de la zona procesada probeta 4 (600RPM, 160mm/min)

En la figura 3.14 se ve la ampliación de la zona batida (circulo A)



Figura 3. 14 Zona batida Probeta 4 50X

La figura muestra las 4 zonas de la zona procesada (circulo B) por fricción batido y como varía la microestructura. También aparecen unas líneas arqueadas de un color rojizo en la TMAZ de la zona de avance.



Figura 3. 15 Partes de la zona procesada probeta 4 (600 RPM y 160 mm/min)

3.1.5. Probeta 5 (600 RPM, 200 mm/min)

En la figura 3.16 se muestra la macrografía de la probeta 5, esta probeta ha sido procesada con una excesiva velocidad de avance, lo que conlleva a una deficiencia de calor aportado en el proceso y por ende un inadecuado flujo de material. Debido a esto se forman defectos en la zona procesada como se observa en la figura 3.16. Las dimensiones como era de esperarse tampoco son las óptimas. La dimensión mayor es de 8.37 mm, la cual es menor a la dimensión del hombro. El círculo A muestra la zona de batido y el círculo B muestra el cambio de la microestructura desde el material base hasta la zona de batido.



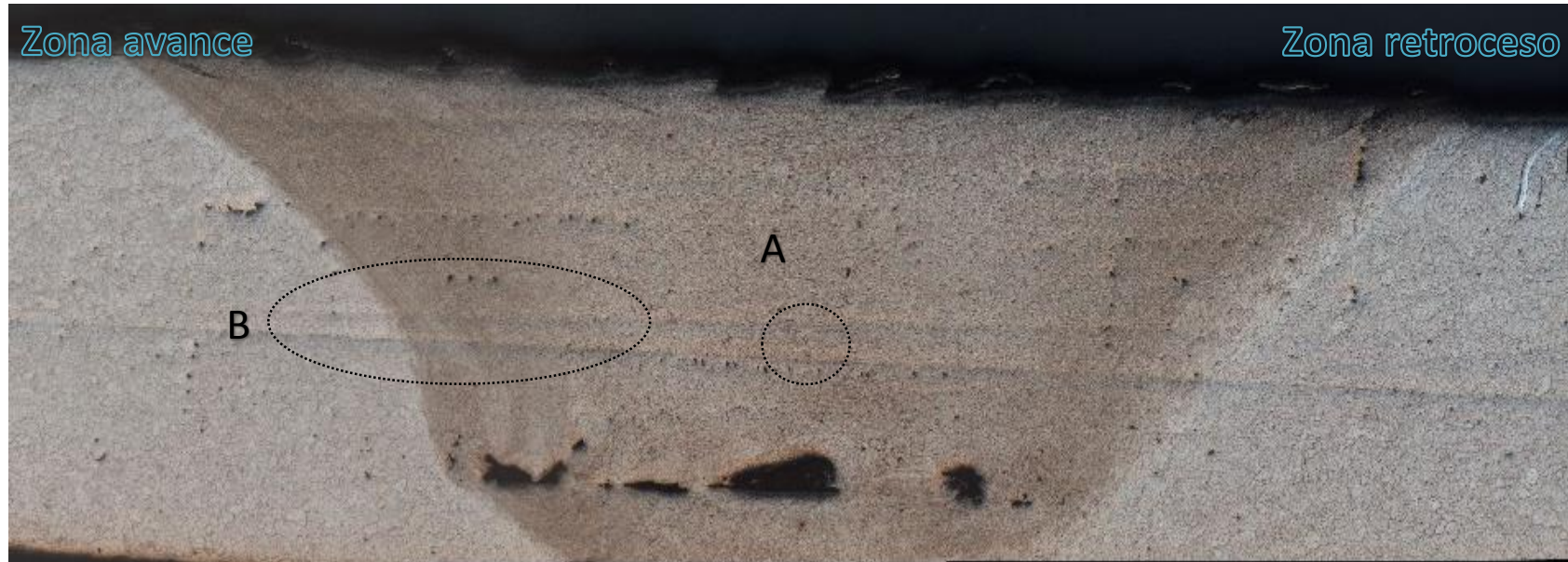


Figura 3. 16 Macrografía de la zona procesada probeta 5 (600RPM, 200 mm/min)

En la figura 3.17 se ve la ampliación de la zona batida (Circulo A)



Figura 3. 17 Zona batida (Probeta 50X)

La figura 3.18 muestra las 4 zonas de la zona procesada por fricción batido y como varía la microestructura. También aparecen unas líneas arqueadas de un color rojizo en la TMAZ de la zona de avance.



Figura 3. 18 Partes de la zona procesada probeta 5

3.2. Ensayos de microdureza Vickers

En los siguientes gráficos y tablas se muestran los resultados del barrido de microdureza Vickers que se realizaron en las probetas que previamente habían sido procesadas por fricción batido con 5 velocidades de avance diferente. Las indentaciones se realizaron en la sección transversal a 1 mm de la cara superficial. Las distancias entre indentaciones fueron de 0.5 milímetros y el barrido se realizó a lo largo de toda la zona procesada desde el lado de retroceso hasta el lado de avance pasando por la zona de batido (SZ), zona termo mecánicamente afectada (TMAZ) y la zona afectada por el calor (HAZ).

Debido a que en este proceso de fricción batido existe una diferencia en el calor aportado y en la velocidad de enfriamiento de cada una de las diferentes zonas durante todo el ciclo térmico del proceso, la dureza obtenida es diferente en el material base y en cada una de las zonas.

Sato reportó en sus investigaciones hechas en FSW de la aleación AA6063 que la temperatura alcanzada en el material procesado fue máxima en el centro de la zona batida y disminuía conforme se acercaba hacia la TMAZ, HAZ y BM, debido a que la temperatura obtenida en el proceso no es homogénea, tampoco lo es la velocidad de disolución y reprecipitación, especialmente, el precipitado en forma de aguja β que es el precipitado que da principalmente el fortalecimiento para las aleaciones de Al-Mg-Si. Por el tiempo corto de enfriamiento en el FSW/ FSP estos se forman en cantidades limitadas lo cual con lleva un ablandamiento del material en la zona batida.

En las cinco probetas donde se realizó el barrido de dureza se observó el mismo comportamiento, donde la dureza es menor en la zona batida y conforme se acerca al material base ésta aumenta hasta llegar a la dureza nominal del aluminio.

La dureza en las cinco probetas procesadas con la misma velocidad de rotación y diferente velocidad de avance no varía mucho, siendo ligeramente superior la dureza promedio de la zona batida en las probetas procesadas a mayor velocidad como se indica en la tabla 3.7. Esto se debe a que a mayor velocidad de avance el calor aportado es menor, por lo cual el ablandamiento del material es menor.

Tabla 3. 7 Dureza promedio de probetas

# DE PROBETA	Dureza promedio en la SZ (HV)
Probeta 1: (600 RPM, 60mm/min)	44.4
Probeta 2: (600 RPM, 100mm/min)	44.6
Probeta 3: (600 RPM, 120mm/min)	45.3
Probeta 4: (600 RPM, 160mm/min)	46.2
Probeta 5: (600 RPM, 200mm/min)	50.5

3.2.1. Probeta 1 (600 RPM, 60 mm/min)

En la tabla 3.8 se muestran los resultados obtenidos del barrido de microdureza Vickers que se realizaron en la probeta 1 procesada a 600 RPM y 60 mm/min. Se realizaron 30 indentaciones partiendo desde el centro de la probeta hasta 7 mm a la derecha y a la izquierda hasta llegar al metal base.

Tabla 3. 8 Datos obtenidos barrido de dureza probeta 1

PROBETA 1: 600 RPM y 60 mm/min				
Distancia al centro de la probeta (mm)	D1 (μm)	D2 (μm)	Dprom (μm)	DUREZA (HV)
-7.2	106.7	110.9	108.8	78
-6.8	103.9	107.2	105.6	83
-6.3	108.1	108.1	108.1	79
-5.9	106.7	108.1	107.4	80
-5.4	114.6	110.9	112.8	73
-5.0	112.3	110.4	111.4	75
-4.5	111.3	116	113.7	72
-4.1	113.2	119.2	116.2	69
-3.6	121.5	120.3	120.9	63
-3.2	126.6	124.3	125.5	59
-2.7	129.9	125.7	127.8	57
-2.3	135	135.4	135.2	51
-1.8	141	139.6	140.3	47
-1.4	141.4	141.4	141.4	46
-0.9	142.4	142.4	142.4	46
-0.5	141.4	141.4	141.4	46
0.0	140	144.2	142.1	46
0.5	141.4	143.7	142.6	46
0.9	141.4	144.2	142.8	45
1.4	147	145.1	146.1	43
1.8	146.5	143.7	145.1	44
2.3	141.9	146.1	144.0	45
2.7	141.4	143.7	142.6	46
3.2	142.4	140	141.2	47
3.6	125.2	134	129.6	55
4.1	118.3	122.5	120.4	64
4.5	117.4	115.5	116.5	68
5.0	112.7	109	110.9	75
5.4	103.5	110	106.8	81
5.9	109	108.1	108.6	79
6.3	103.9	106.2	105.1	83
6.8	104	106.9	105.5	83

En la figura 3.19 se muestra la curva de dureza obtenida, donde se aprecia la zona más blanda es la zona batida (SZ), puesto es que en esta zona es donde se alcanza la máxima temperatura. La dureza es prácticamente constante a lo largo de la SZ, aproximadamente (44.4HV). A medida que las indentaciones se van acercando al material base, pasando por la TMAZ y HAZ, la dureza va subiendo hasta alcanzar el valor de dureza del material base.

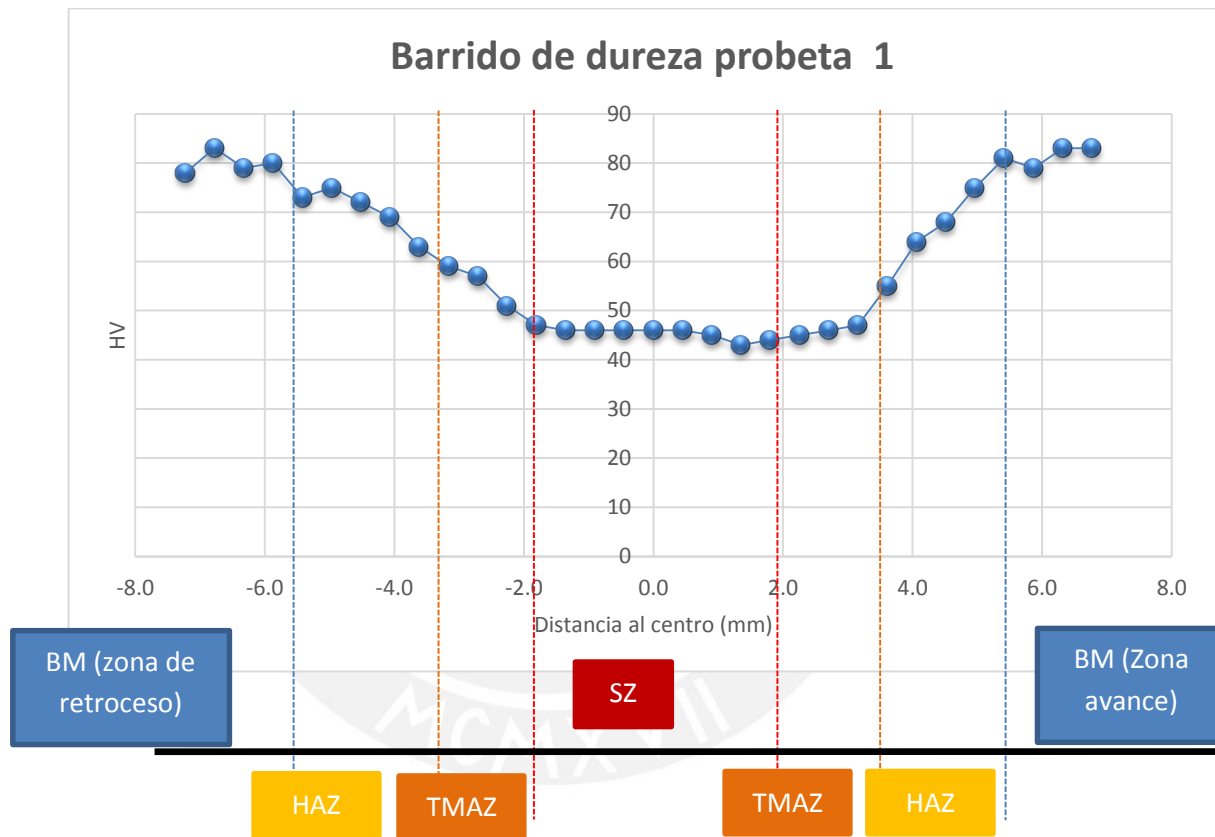


Figura 3. 19 Gráfico de barrido de dureza probeta 1

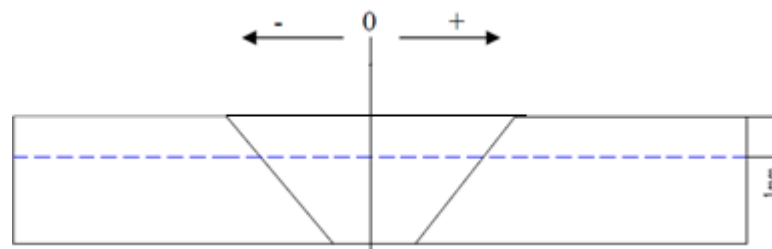


Figura 3. 20 Sentido de distancia con respecto al centro

3.2.2. Probeta 2 (600 RPM, 100 mm/min)

En la tabla 3.9 se muestran los resultados obtenidos del barrido de microdureza Vickers que se realizó en la probeta 2 procesada a 600 RPM y 100 mm/min. Se realizaron 30 indentaciones partiendo desde el centro hasta 7.5 mm ala derecha y a la izquierda hasta llegar al metal base.

Tabla 3. 9 Datos obtenidos barrido de dureza probeta 2

PROBETA 2: 600 RPM y 100 mm/min				
Distancia al centro de la probeta (mm)	D1 (μm)	D2 (μm)	Dprom (μm)	DUREZA (HV)
-7.5	106.7	109	107.9	80
-7	104.9	107.6	106.3	82
-6.5	109.5	108.1	108.8	78
-6	108.6	111.8	110.2	76
-5.5	125.7	126.2	126.0	58
-5	135.4	135.9	135.7	50
-4.5	133.6	141.9	137.8	49
-4	137.7	137.7	137.7	49
-3.5	146.1	146.1	146.1	43
-3	150.7	149.8	150.3	41
-2.5	150.7	147.9	149.3	42
-2	145.6	143.7	144.7	44
-1.5	144.2	143.3	143.8	45
-1	142.8	143.3	143.1	45
-0.5	143.3	146.1	144.7	44
0	139.6	145.1	142.4	46
0.5	138.2	142.4	140.3	47
1	140.5	142.4	141.5	46
1.5	141.4	142.4	141.9	46
2	144.2	142.8	143.5	45
2.5	145.1	143.3	144.2	45
3	142.4	140	141.2	47
3.5	135	133.1	134.1	52
4	135	133.1	134.1	52
4.5	134	133.6	133.8	52
5	124.3	124.3	124.3	60
5.5	117.4	116.4	116.9	68
6	104.5	112.7	108.6	75
6.5	105.8	105.3	105.6	83
7	107.6	107.6	107.6	80
7.5	103.9	106.2	105.1	83

En la figura 3.21 se muestra la curva de dureza obtenida, donde se aprecia que la zona más blanda es la zona batida (SZ), puesto es que en esta zona es donde se alcanza la máxima temperatura. La dureza es prácticamente constante a lo largo de la SZ, aproximadamente (44.6HV) muy similar a la dureza de la probeta número 1. A medida que las indentaciones se van acercando al material base pasando por la TMAZ y HAZ la dureza va subiendo hasta alcanzar el valor de dureza del material base.

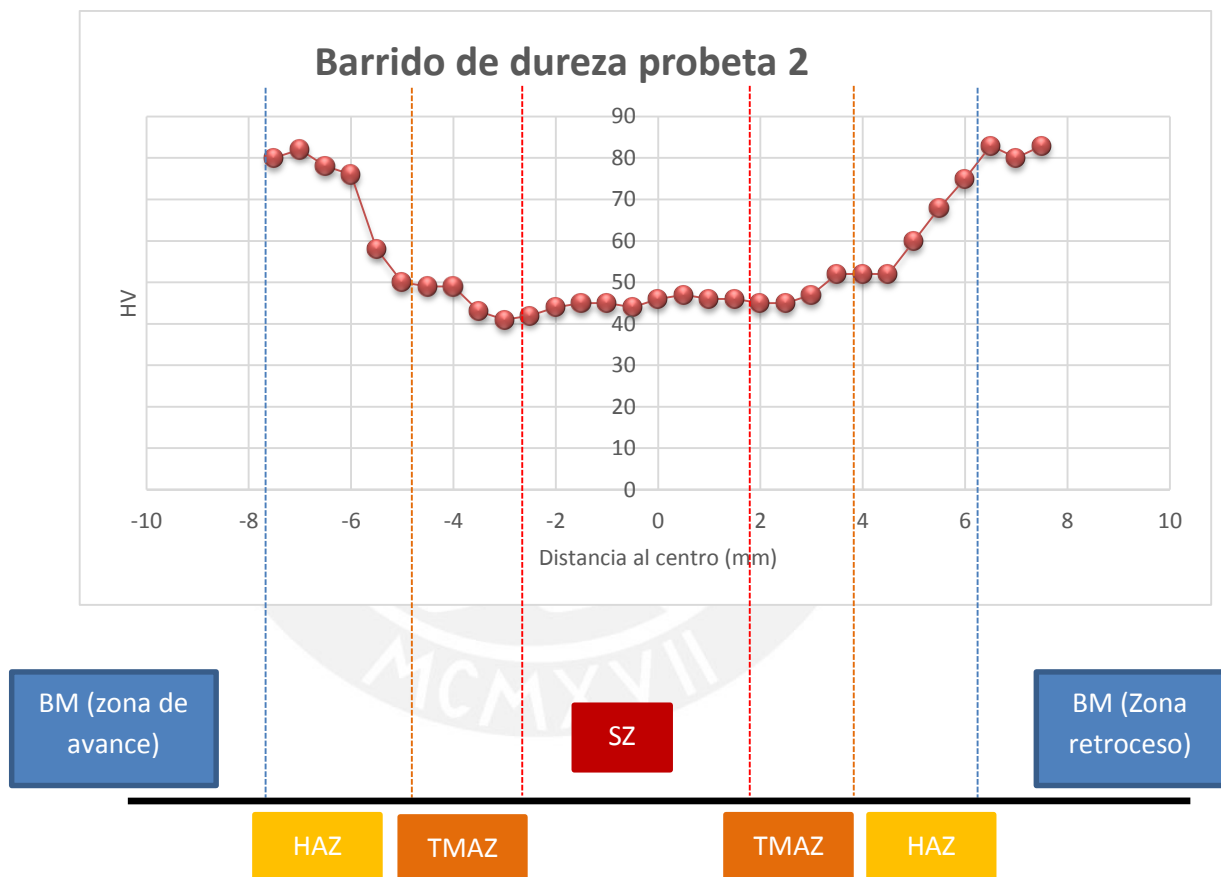


Figura 3. 21 Gráfico de barrido de dureza probeta 2

3.2.3. Probeta 3 (600 RPM, 120 mm/min)

En la tabla 3.10 se muestran los resultados obtenidos del barrido de microdureza Vickers que se realizaron en la probeta 3 procesada a 600 RPM y 120 mm/min. Se realizaron 30 indentaciones partiendo desde el centro hasta 7.5 mm a la derecha y a la izquierda hasta llegar al metal base.

Tabla 3. 10 Datos obtenidos barrido de dureza probeta 3

PROBETA 3: 600 RPM y 120 mm/min				
Distancia al centro de la probeta (mm)	D1 (μm)	D2 (μm)	Dprom (μm)	DUREZA (HV)
-7.5	103.9	107.2	105.6	83
-7	103.8	106.9	105.4	83
-6.5	103.5	110	106.8	81
-6	114.1	116.4	115.3	70
-5.5	123.4	119.2	121.3	63
-5	127.5	129.4	128.5	56
-4.5	136.8	134	135.4	51
-4	140.5	136.8	138.7	48
-3.5	139.1	138.2	138.7	48
-3	148.8	144.2	146.5	43
-2.5	147.9	143.9	145.9	44
-2	167.4	168.7	168.1	33
-1.5	141.4	142.4	141.9	46
-1	140	145.1	142.6	46
-0.5	141.4	145.1	143.3	45
0	141.9	146.1	144.0	45
0.5	139.6	144.7	142.2	46
1	142.8	145.6	144.2	45
1.5	141	141.9	141.5	46
2	142.4	141.4	141.9	46
2.5	143.3	143.7	143.5	45
3	135.4	145.6	140.5	47
3.5	128.9	127.5	128.2	56
4	138.2	135.4	136.8	50
4.5	131.2	125.2	128.2	56
5	121.5	125.7	123.6	61
5.5	118.3	116.9	117.6	67
6	110	110	110.0	77
6.5	108.1	105.3	106.7	81
7	105.3	103.5	104.4	85
7.5	103.5	107.2	105.4	84

En la figura 3.22 se muestra la curva de dureza obtenida, donde se aprecia la zona más blanda es la zona batida (SZ), puesto es que en esta zona es donde se alcanza la máxima temperatura. La dureza es prácticamente constante a lo largo de la SZ, aproximadamente (45.3HV). A medida que las indentaciones se van acercando al material base pasando por la TMAZ y HAZ la dureza va subiendo hasta alcanzar el valor de dureza del material base.

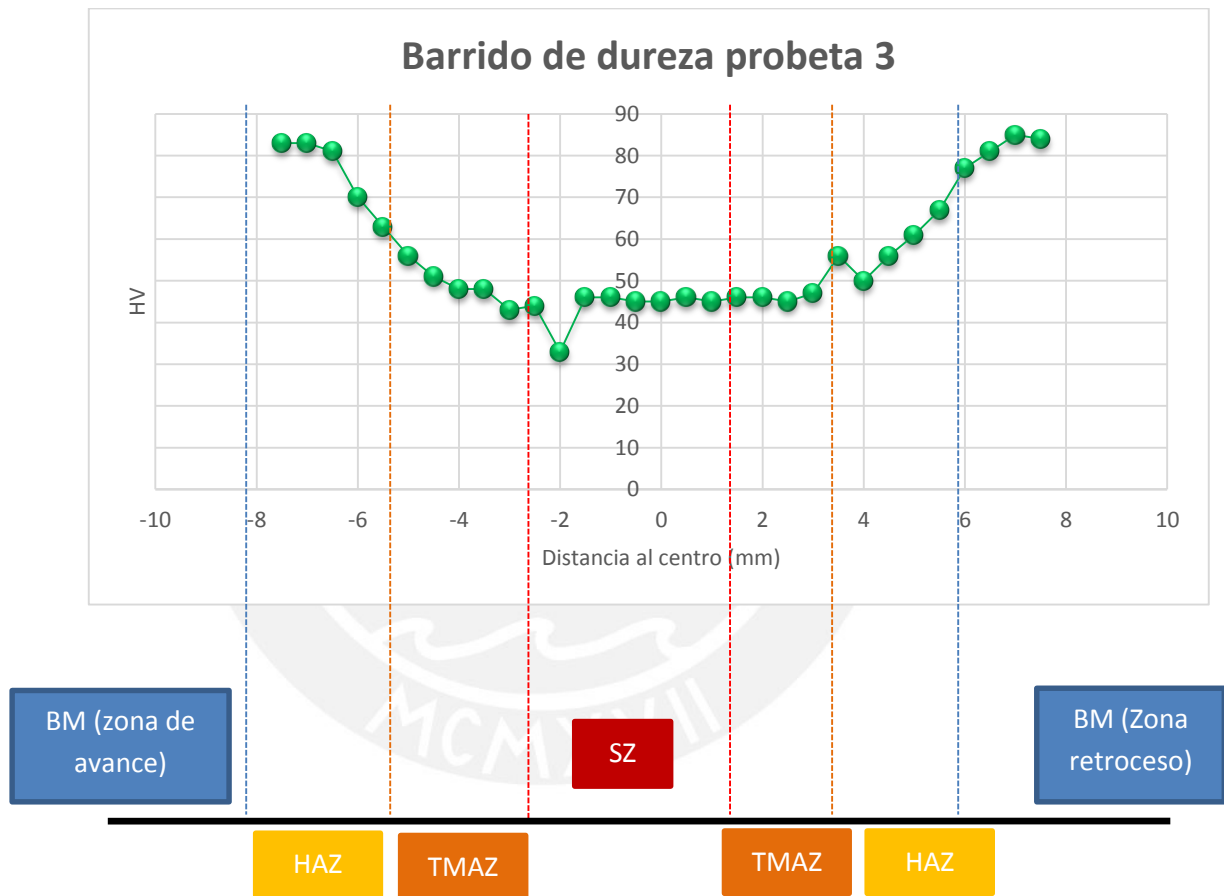


Figura 3. 22 Gráfico de barrido de dureza probeta 3

3.2.4. Probeta 4 (600 RPM, 160 mm/min)

En la tabla 3.11 se muestran los resultados obtenidos del barrido de microdureza Vickers que se realizó en la probeta 4 procesada a 600 RPM y 160 mm/min. Se realizaron 30 indentaciones partiendo desde el centro, hasta 7 mm ala derecha y a la izquierda hasta llegar al metal base.

Tabla 3. 11 Datos obtenidos barrido de dureza probeta 4

PROBETA 4: 600RPM y 160 mm/min				
Distancia al centro de la probeta (mm)	D1 (μm)	D2 (μm)	Dprom (μm)	DUREZA (HV)
-7.2	102.1	104.9	103.5	87
-6.8	108.6	107.2	107.9	80
-6.3	110	112.3	111.2	75
-5.8	120.1	120.6	120.4	64
-5.3	128	124.8	126.4	58
-4.8	130.8	136.8	133.8	52
-4.3	135.4	134.5	135.0	51
-3.9	140	143.3	141.7	46
-3.4	147.5	146.1	146.8	43
-2.9	142.4	141.4	141.9	46
-2.4	141	139.6	140.3	47
-1.9	141	143.7	142.4	46
-1.4	145.1	147	146.1	43
-1.0	141	144.2	142.6	46
-0.5	141.9	145.6	143.8	45
0.0	142.4	148.4	145.4	44
0.5	141	147.9	144.5	44
1.0	141.9	144.2	143.1	45
1.4	143.7	148.8	146.3	43
1.9	141	141.9	141.5	46
2.4	135.4	140	137.7	49
2.9	130.8	133.6	132.2	53
3.4	131.7	141.4	136.6	50
3.9	131.2	133.6	132.4	53
4.3	119.7	123.8	121.8	63
4.8	113.2	115	114.1	71
5.3	108.6	111.8	110.2	76
5.8	105.3	107.6	106.5	82
6.3	104	107.2	105.6	83
6.8	107.6	103.9	105.8	83

En la figura 3.23 se muestra la curva de dureza obtenida, donde se aprecia la zona más blanda es la zona batida (SZ), puesto es que en esta zona es donde se alcanza la máxima temperatura. La dureza es prácticamente constante a lo largo de la SZ, aproximadamente (46.2HV) donde se aprecia que la dureza comienza a aumentar ligeramente con respecto a las probetas procesadas con velocidad avance menor. A medida que las indentaciones se van acercando al material base pasando por la TMAZ y HAZ la dureza va subiendo hasta alcanzar el valor de dureza del material base.

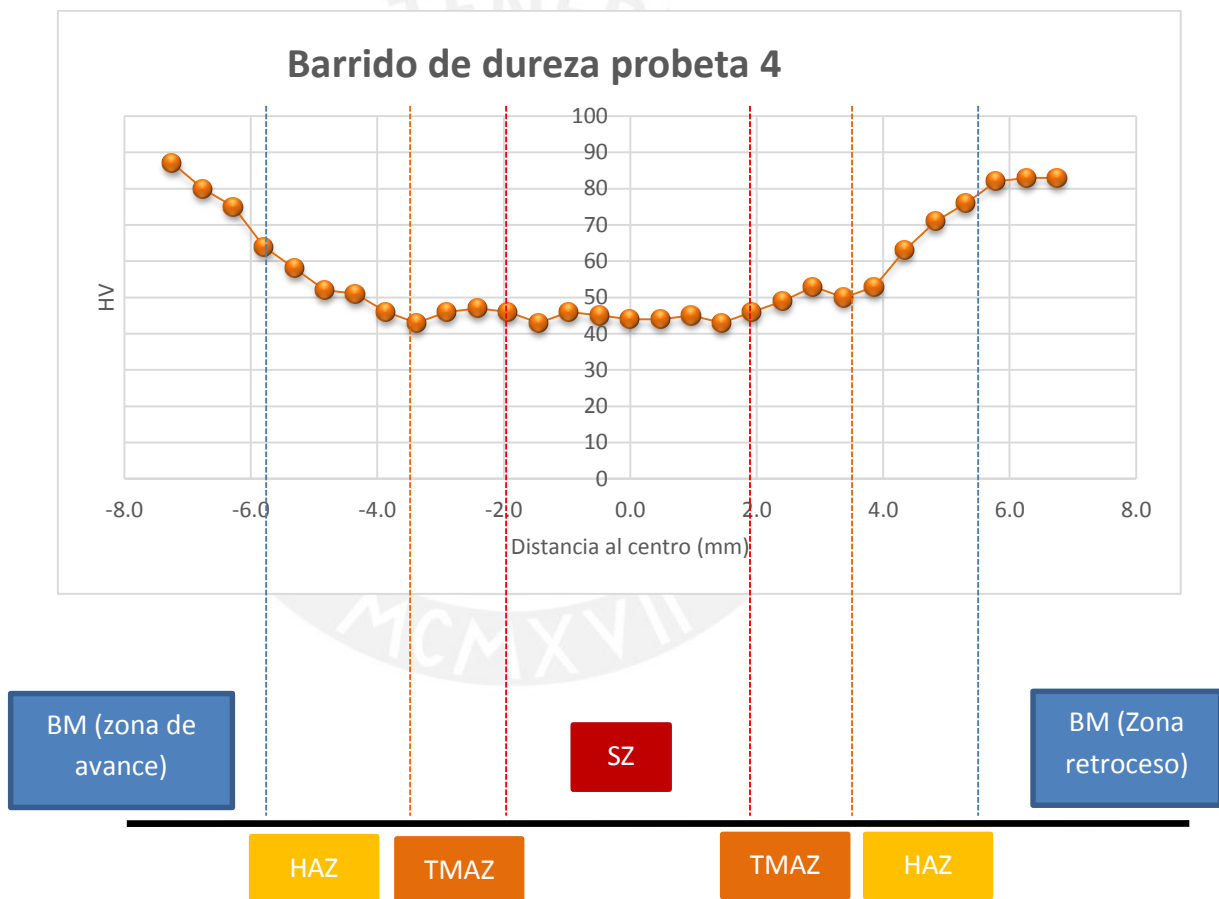


Figura 3. 23 Gráfico de barrido de dureza probeta 4

3.2.5. Probeta 5 (600 RPM, 200 mm/min)

En la tabla 3.12 se muestran los resultados obtenidos del barrido de microdureza Vickers que se realizó en la probeta 5 procesada a 600 RPM y 200 mm/min. Se realizaron 30 indentaciones partiendo desde el centro hasta 7 mm ala derecha y a la izquierda hasta llegar al metal base.

Tabla 3. 12 Datos obtenidos barrido de dureza probeta 5

PROBETA 5: 600 RPM y 200 mm/min				
Distancia al centro de la probeta (mm)	D1 (μm)	D2 (μm)	Dprom (μm)	DUREZA (HV)
-7	105.8	105.3	105.6	83
-6.5	106.2	104.4	105.3	84
-6	106.7	103.5	105.1	84
-5.5	109.5	104.4	107.0	81
-5	110.4	115.5	113.0	73
-4.5	118.7	119.2	119.0	65
-4	124.3	129.4	126.9	58
-3.5	133.6	138.7	136.2	50
-3	139.6	141	140.3	47
-2.5	175.2	179.9	177.6	29
-2	141	141	141.0	47
-1.5	141	137.7	139.4	48
-1	138.2	140.5	139.4	48
-0.5	137.3	141.4	139.4	48
0	137.3	137.3	137.3	49
0.5	139.6	139.6	139.6	48
1	141	137.7	139.4	48
1.5	137.3	137.3	137.3	49
2	141	141.2	141.1	47
2.5	140	138.2	139.1	48
3	138.7	137.3	138.0	49
3.5	127.4	129.4	128.4	56
4	125.2	128	126.6	58
4.5	125.7	126.2	126.0	58
5	119.2	119.7	119.5	65
5.5	116.9	112.3	114.6	71
6	108.1	109.5	108.8	78
6.5	106.2	104.9	105.6	83
7	108.6	109.5	109.1	78

En la figura 3.24, se muestra la curva de dureza obtenida, donde se aprecia la zona más blanda es la zona batida (SZ), puesto es que en esta zona es donde se alcanza la máxima temperatura. La dureza es prácticamente constante a lo largo de la SZ, aproximadamente (50.5HV) esta es la dureza máxima obtenida en las probetas procesadas. A medida que las indentaciones se van acercando al material base pasando por la TMAZ y HAZ la dureza va subiendo hasta alcanzar el valor de dureza del material base.

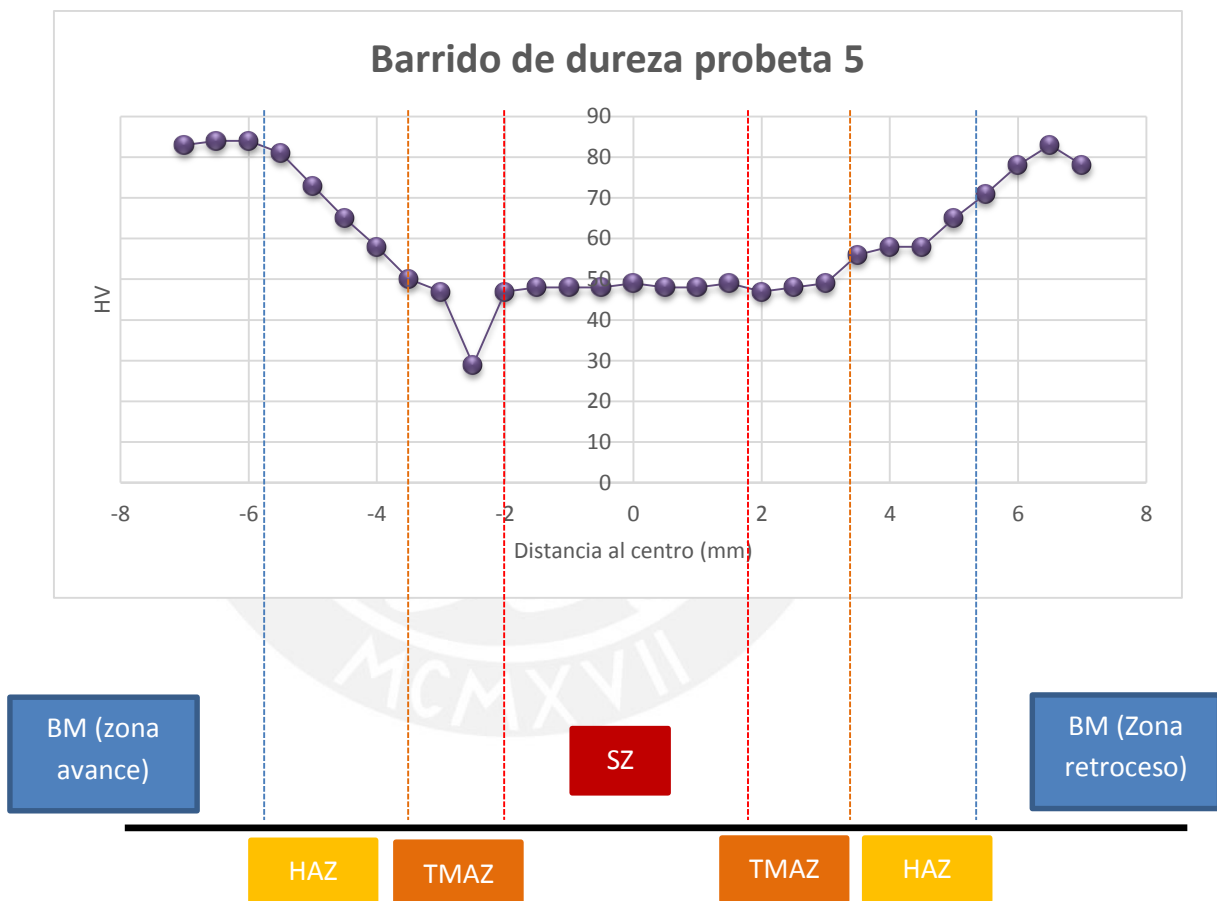
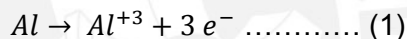


Figura 3. 24 Gráfico de barrido de dureza probeta

3.3. Variación del potencial del circuito abierto (OCP)

Para el estudio del potencial del circuito abierto (OCP) las probetas procesadas fueron sumergidas durante 1 hora a una solución de 3.5% NaCl, se concluyó que el tiempo para que se estabilice el aluminio era de 1 hora, puesto que la variación del potencial desde los minutos iniciales es muy poca, en el peor de los casos de 10 mV, y conforme van transcurriendo estos minutos la variación oscila de entre 2 a 3 mV. Este tiempo de OCP también concuerda con varios ensayos realizados previamente como por ejemplo el realizado por V. Fahimpour donde para el AA6061 soldada por fricción batido, el tiempo que demoró su estabilización fue incluso hasta de media hora en el mismo electrolito que usamos en esta investigación.

En previos estudios se han determinado que el aluminio sus aleaciones reaccionan en soluciones acuosas. Las reacciones anódicas y catódicas de esta reacción son las siguientes.



La ecuación 1 representa la ecuación catódica donde se representa la pérdida de los electrones en el aluminio, estos electrones a su vez reaccionar con el hidrogeno que se encuentra en el electrolitos y se genera la reacción catódica que es la ecuación 2. En la figura 3.25 se representa como ocurre la corrosión del aluminio en una solución acuosa.

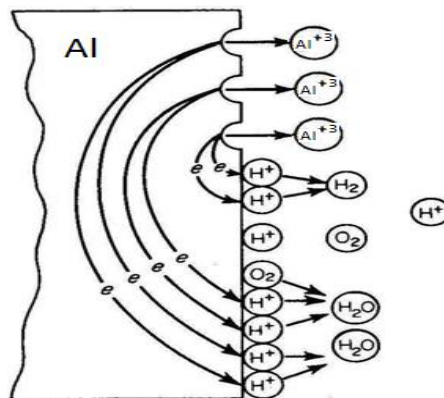


Figura 3. 25 Esquema de corrosión en medios acuosos

En las probetas que fueron ensayadas el OCP de estas fue muy similar, puesto que el potencial de corrosión obtenido fue entre un rango de 20 mV por lo cual se puede decir que la nobleza de todas estas probetas es muy parecidas entre sí.

Los resultados del potencial de corrosión se muestran en la tabla 3.13 y figura 3.26. Los potenciales de corrosión de todas las muestras examinadas, como se mencionó anteriormente, el valor de estos es muy similar entre sí.

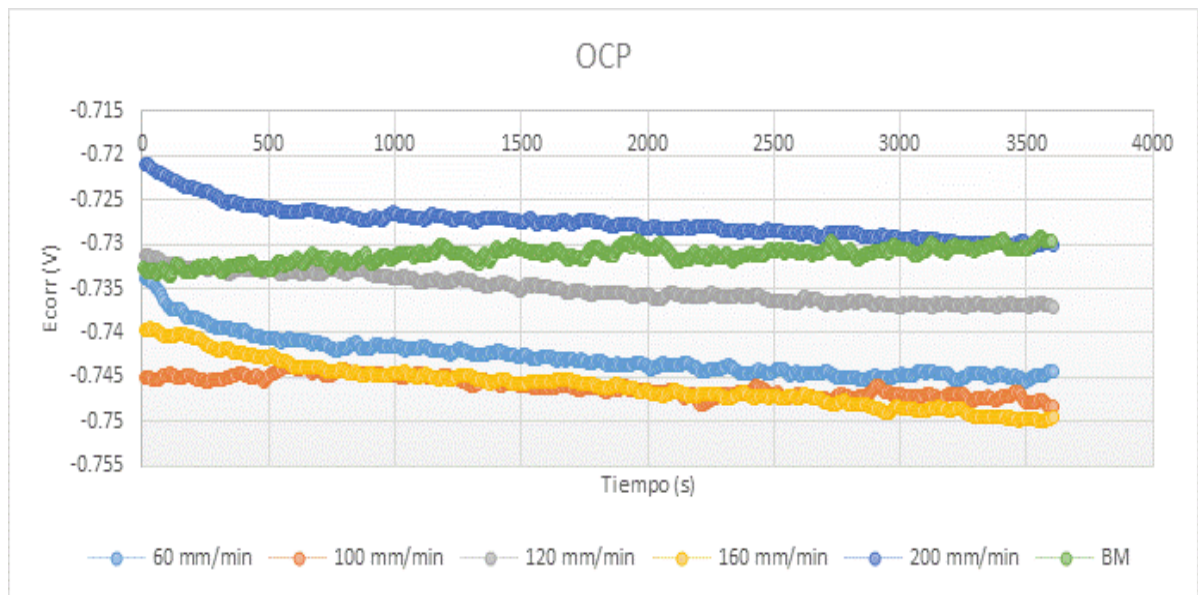


Figura 3. 26 Ensayos del potencial de circuito abierto (OCP)

Tabla 3. 13 Datos del Ecorr y su variación en el tiempo

# PROBETA	E corr (mV)	E maximo (mV)	E min (mV)	Variación (mV)
Probeta 1: 60mm/min	-744.292	-733.9	-745.438	11.5
Probeta 2: 100mm/min	-748.201	-743.681	-748.264	4.6
Probeta 3: 120mm/min	-737.013	-731.275	-737.013	5.7
Probeta 4: 160mm/min	-749.579	-739.53	-749.964	10.4
Probeta 5: 200mm/min	-730.014	-720.976	-730.199	9.2
Probeta 6: BM	-729.945	-728.127	-733.2586	5.1

El material que tiene el potencial de corrosión más alto es el más noble. Para estos ensayos las probetas 3 y 5 obtuvieron los potenciales de corrosión más altos; sin embargo, las probetas 2 y 4 obtuvieron el potencial de corrosión menor. Esto se aprecia en la figura 3.27.

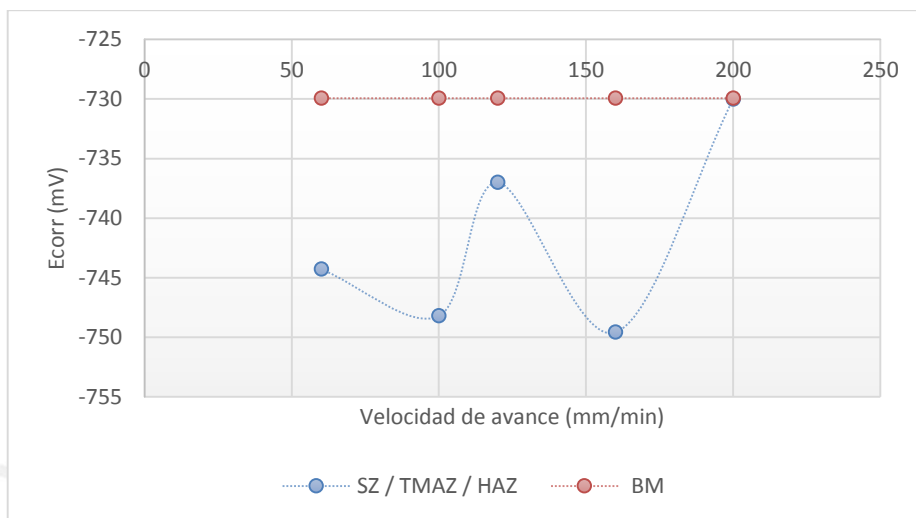


Figura 3. 27 Variación de E_{corr} vs la velocidad de avance

3.4. Curvas de Tafel potenciodinámicas

Las curvas Tafel potenciodinámicas fueron realizadas con una velocidad de barrido de 2.5 mV/s desde 0.25 V antes de E_{corr} hasta 1V después del E_{corr}.

En todas las curvas potenciodinámicas se obtuvo un comportamiento en la rama anódica muy similar. Una vez que el voltaje es superior al E_{corr} zona anódica, la densidad de corriente aumenta rápidamente sin mostrar una clara zona de pasivación.

En la figura 3.28 se muestra todas las gráficas ploteadas en un mismo gráfico donde se ve el comportamiento de las curvas potenciodinámicas del material base y de la zona procesada por fricción batido a diferente velocidad de avance. Se puede apreciar que en la rama anódica a un mismo voltaje el BM tiene menor densidad de corriente, en cambio la probeta procesada a 100 mm/min es la que tiene más densidad de corriente.

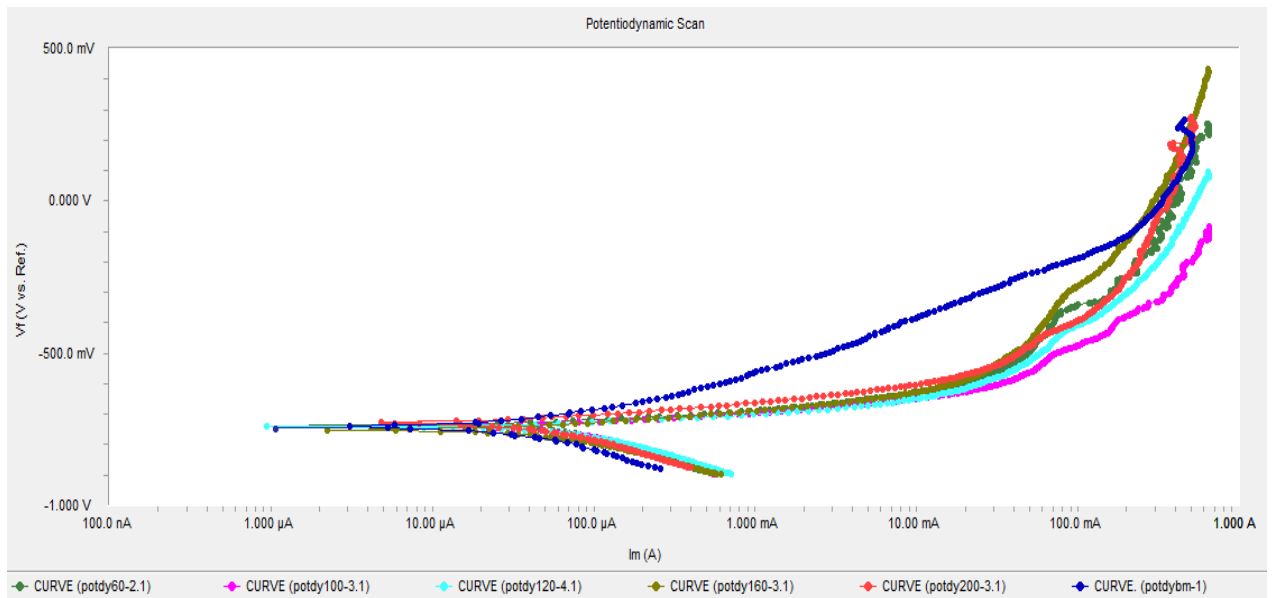


Figura 3. 28 Gráficos potencio dinámicos

Asimismo, de la tabla 3.14 y figura 3.29 se observa como varía la I_{corr} con la velocidad de avance, habiéndose obtenido mayor I_{corr} en las probetas procesadas a velocidad de avance de 100, 160 y 200 mm/min; Por otro lado, las probetas que obtuvieron menor velocidad de avance fueron el BM y la probeta con velocidad de avance de 120mm/min.

Tabla 3. 14 Datos de I_{corr} y E_{corr}

# PROBETA	i_{corr} (μA)	E_{corr} (mV)
Probeta: 60mm/min	3.22	-744.292
Probeta: 100mm/min	6.34	-748.201
Probeta: 120mm/min	0.935	-737.013
Probeta: 160mm/min	5.89	-749.579
Probeta: 200mm/min	7.35	-730.014
Probeta: BM	1.02	-729.945

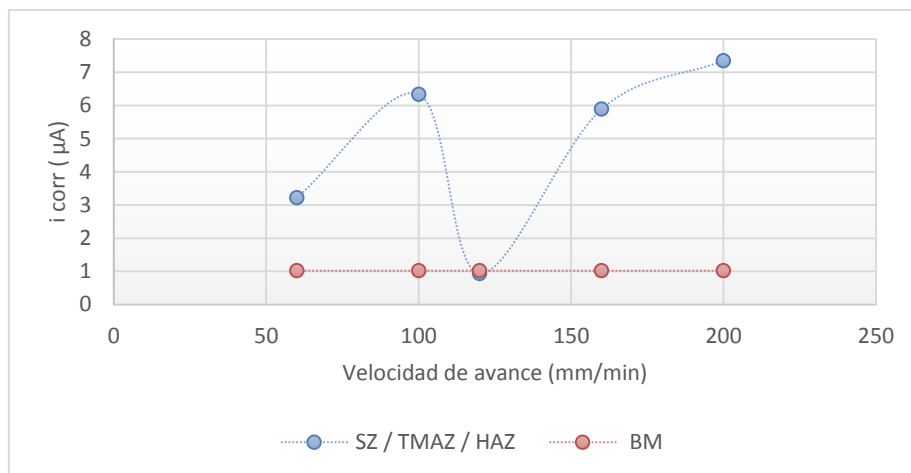


Figura 3. 29 Variación de i_{corr} con respecto a la velocidad de avance

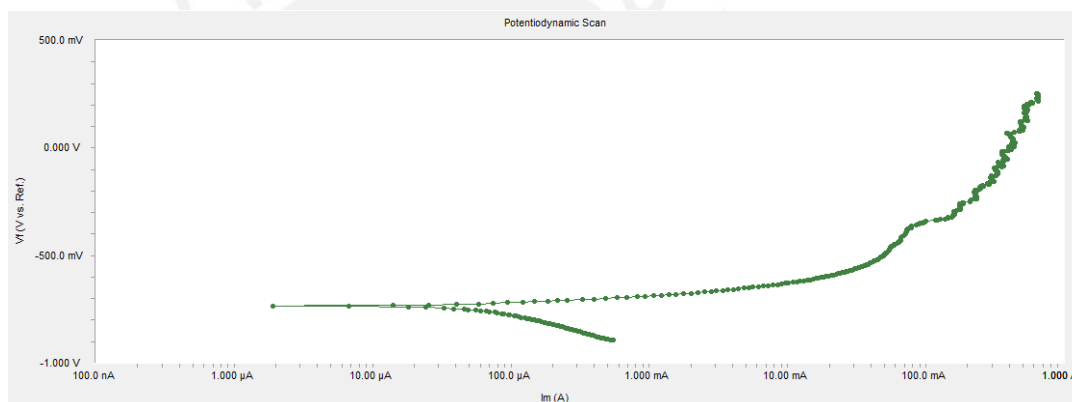


Figura 3. 30 Curva potenciodinámica probeta 1 (600 RPM, 60 mm/min)

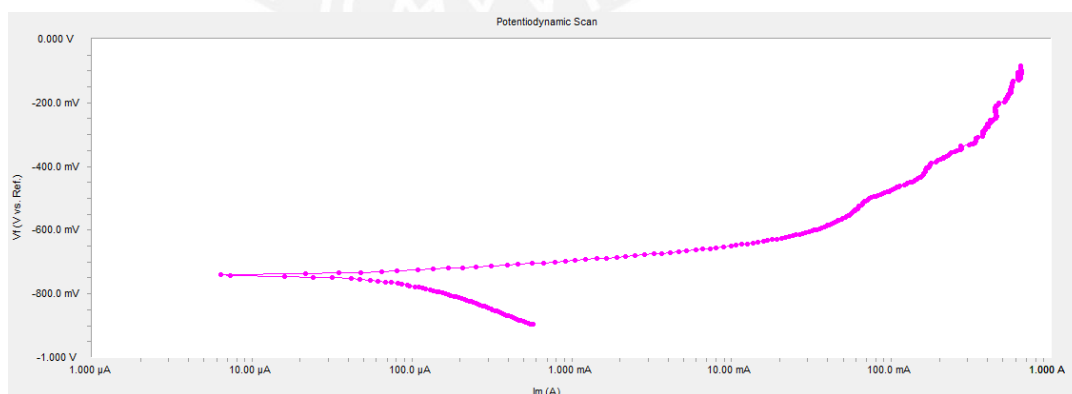


Figura 3. 31 Curva potenciodinámica probeta 2 (600 RPM, 100 mm/min)

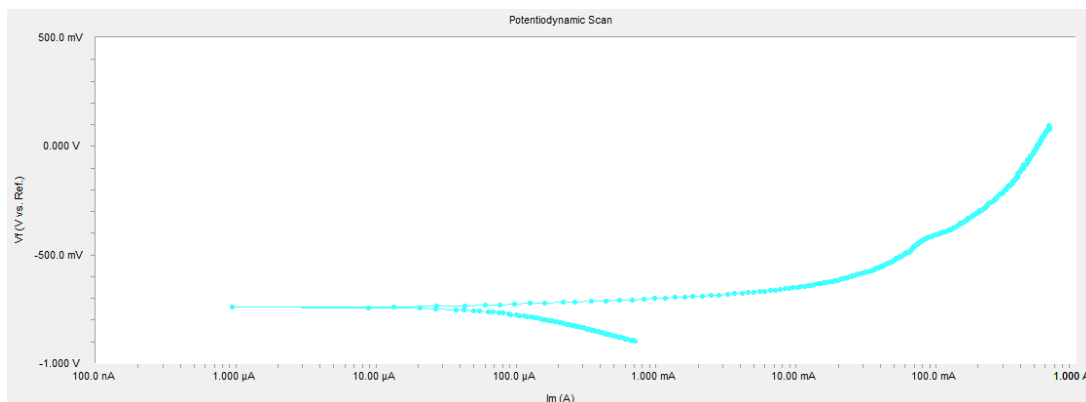


Figura 3. 32 Curva potenciodinámica probeta 3 (600 RPM, 120 mm/min)

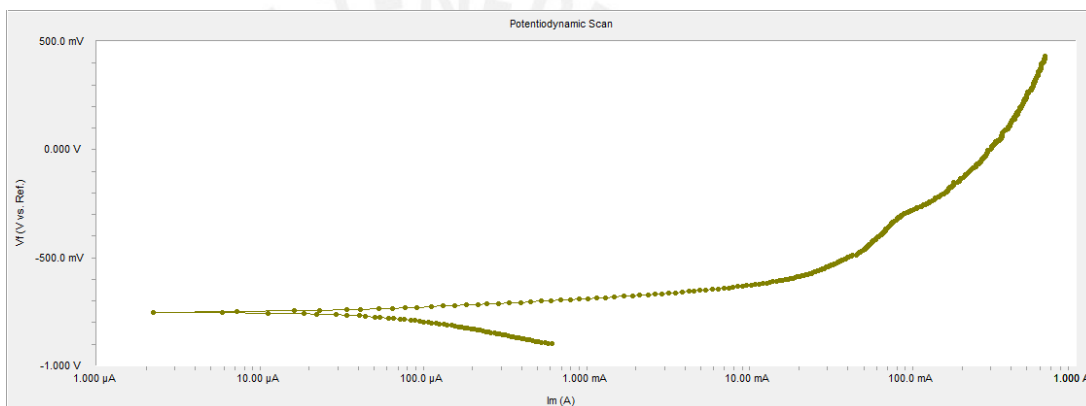


Figura 3. 33 Curva potenciodinámica probeta 4 (600 RPM, 160 mm/min)

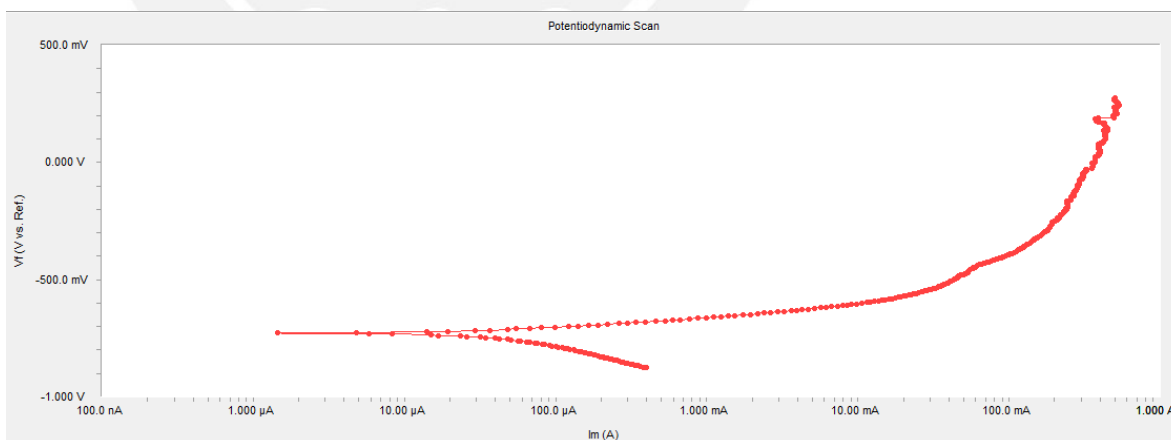


Figura 3. 34 Curva potenciodinámica probeta 5 (600 RPM, 200 mm/min)

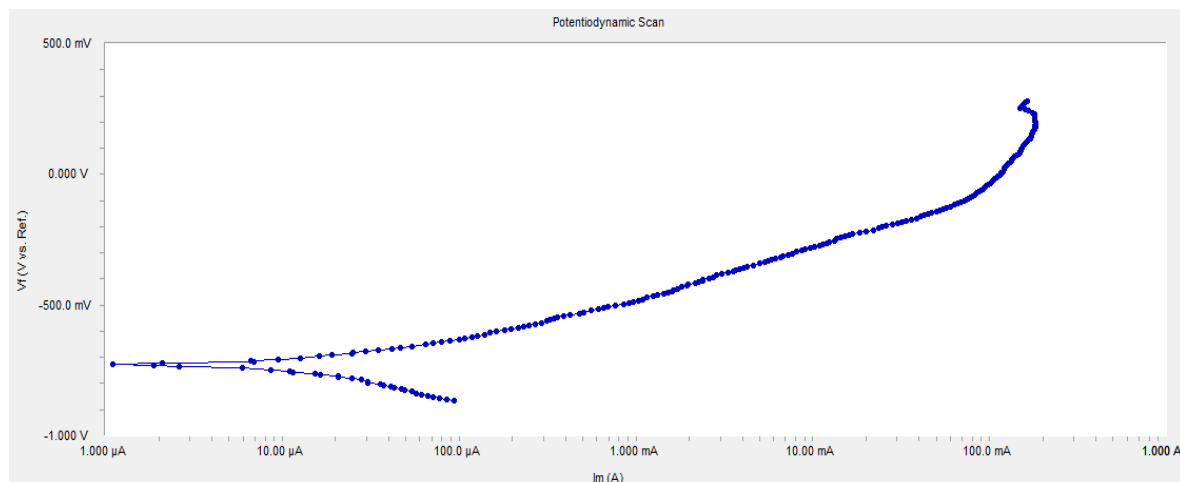


Figura 3. 35 Curva potenciodinámica probeta 6 (BM)

3.5. Ensayos de inmersión

Para estos ensayos de inmersión se fabricaron 3 probetas por cada combinación de velocidad, una probeta fue de la SZ, la otra de TMAZ/HAZ y la última era de una zona mixta que contenía todas las partes de la zona procesada. Todas las probetas fueron sumergidas en una solución de 1M HCl en 100ml de H₂O por un periodo de 144 horas, En la tabla 3.15 se muestra el peso perdido en gramos.

Tabla 3. 15 Pérdida de peso de las probetas en 144 horas

Pérdida de peso(gramos) - 144 horas			
PROBETA	SZ	TMAZ	BM
60	0.2845	0.1878	0.2152
100	0.305	0.2755	
120	0.2746	0.2149	
160	0.3431	0.2688	
200	0.277	0.1959	

En la figura 3.36 se puede apreciar como varía la velocidad de corrosión (mm/año) conforme la velocidad de avance aumenta desde 60 mm/min hasta 200 mm/min (probeta 1 hasta probeta 5) manteniendo la velocidad de rotación constante. De este gráfico se aprecia que en la SZ la velocidad de corrosión es mayor que la del material

base en todos los casos, particularmente cuando la velocidad de avance es de 100mm/min (probeta 2), y la probeta menos afectada por la corrosión cuando la velocidad de avance de 120 mm/min (probeta 3); sin embargo, este mismo comportamiento de menor resistencia a la corrosión no ocurre del mismo modo en la TMAZ, ya que con esta zona se obtiene una menor velocidad de corrosión con respecto al material base esto ocurre en las probetas procesadas a una velocidad de avance de 60, 120 y 200 mm/min (Probeta 1, 3 y 5).

Como es mostrado en la tabla 3.16, existe una estrecha relación entre la velocidad de avance y la resistencia a la corrosión obtenida, más claramente se puede apreciar esto en la figura 3.36. Esto se debe básicamente a que la microestructura (tamaño de grano, tamaño de precipitados, formación de óxidos) que se obtienen depende de la combinación de velocidades usada durante el proceso de fricción batido. En previas investigaciones realizadas por T S Mahmoud, estos precipitados tienen un papel importante en la resistencia a la corrosión de esta serie de aluminio, puesto que en la SZ, la fase Mg_2Si se precipitaba a los límites de grano $\alpha-Al$ donde en estos límites de grano tenían un comportamiento anódico con la matriz y por eso la corrosión a lo largo de los límites de grano llegaba a ocurrir. Además, en los análisis EDS realizados en esa investigación en la SZ se encontró la presencia de óxidos (SiO_2 y MgO) al lado de las partículas de Mg_2Si y como se sabe las partículas de óxido pueden afectar adversamente la resistencia a la corrosión en esta zona.

Tabla 3. 16 Velocidad de corrosión una vez transcurridos 144 horas

mm por año (144 HORAS)				
PROBETA	SZ	TMAZ / HAZ	MIXTO	BM
60	12.737	8.186	10.084	9.188
100	13.979	10.483	12.929	
120	11.220	8.834	10.014	
160	13.333	10.664	12.636	
200	11.455	8.217	10.131	

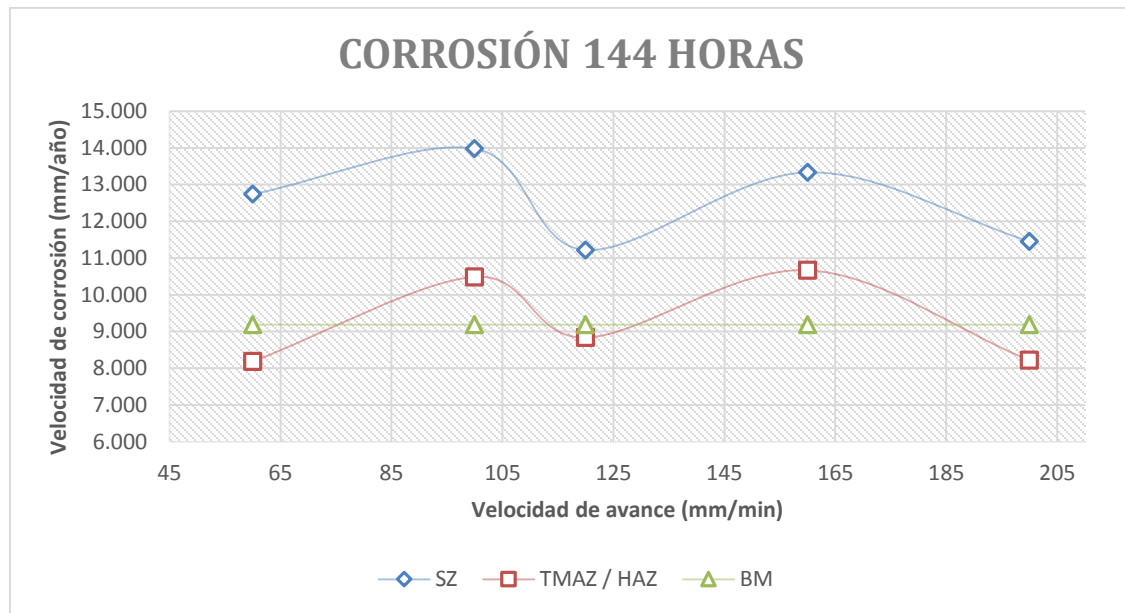


Figura 3. 36 Velocidad de corrosión versus velocidad de avance en las 3 zonas del proceso

Por otro lado, también se analizó como varía la velocidad de corrosión conforme transcurren las horas, esto se realizó como se muestra en las tablas 3.17 y 3.18 pesando todas las probetas a las 0, 72, 96, y 144 horas.

El comportamiento de la velocidad de corrosión a lo largo de las horas transcurridas sumergidas en el BM, TMAZ/HAZ y SZ es muy similar, puesto que en todas estas zonas se aprecia que su velocidad máxima de corrosión es a las 72 horas y conforme las horas transcurren esta velocidad disminuye cada vez con una pendiente menos pronunciada conforme pasan las horas de inmersión. Según la tendencia se puede deducir que a más horas sumergidas, la velocidad de corrosión de la probeta parará de disminuir.

Además, en las figuras 3.37 y 3.38 se observa que mientras transcurren las horas de inmersión la diferencia en las velocidades de corrosión entre las probetas a diferente velocidad de avance son cada vez menores; es decir, que estas velocidades de corrosión tienden a ser similares con el transcurrir de las horas de inmersión.

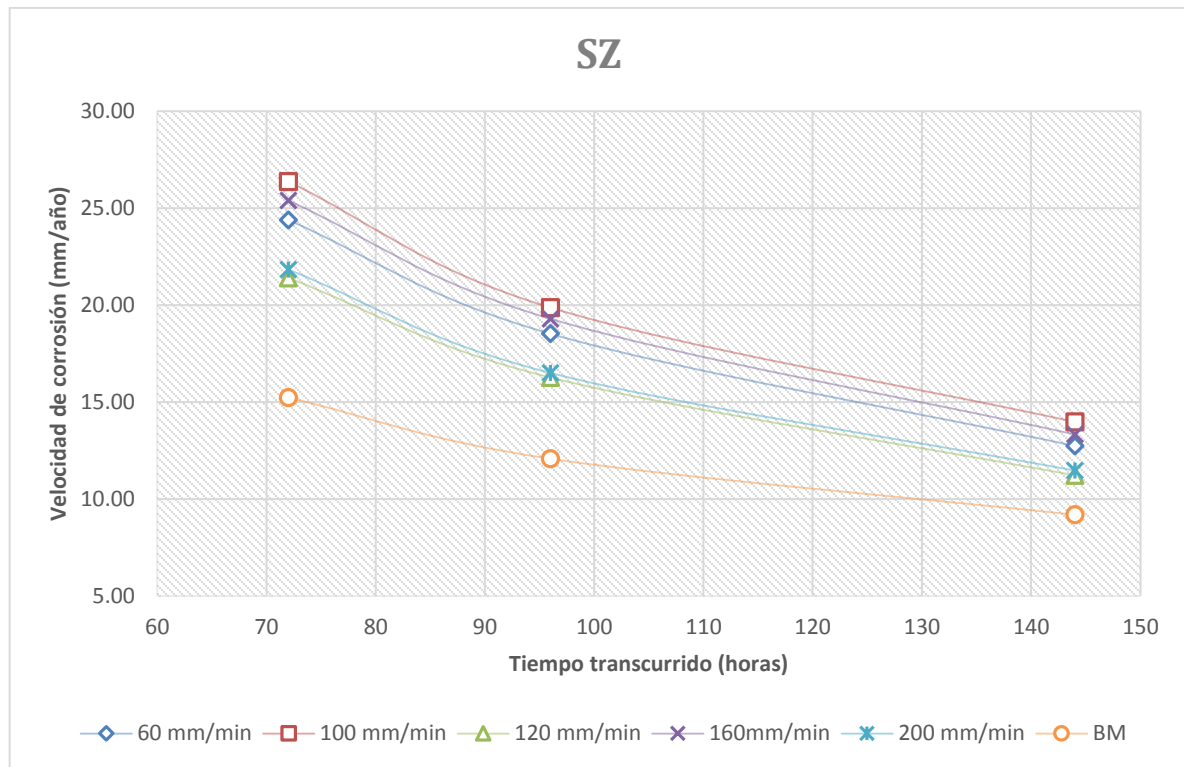


Figura 3. 37 Velocidad de corrosión vs horas de inmersión (SZ)

Tabla 3. 17 Datos velocidad de corrosión vs horas de inmersión (SZ)

SZ - Velocidad de corrosión (mm/año)						
Horas transcurridas	60 mm/min	100 mm/min	120 mm/min	160mm/min	200 mm/min	BM
72	24.39	26.36	21.40	25.38	21.83	15.23
96	18.52	19.87	16.27	19.29	16.49	12.08
144	12.74	13.98	11.22	13.33	11.46	9.19

En la SZ se obtuvo que durante todo el tiempo de inmersión la probeta que más se corroyó fue la probeta procesada a 100 mm/min de velocidad de avance y la que menos se corroyó fue la probeta procesada a una velocidad de avance de 120 mm/min. El material base tuvo mejor resistencia a la corrosión con respecto a todas las probetas de las SZ a lo largo de todas las horas.

Por otro lado, en la TMAZ/HAZ este orden de velocidad de corrosión no se conserva a lo largo de las horas transcurridas sumergida, ya que a las 72 horas la velocidad de corrosión de la probeta procesada con velocidad de avance de 120mm/min es mayor a la del material base; sin embargo, cuando han transcurrido 144 horas la velocidad de corrosión del metal base se hace mayor que la de ésta probeta (figura 3.38).

En la figura 3.38, se observa una mejor resistencia a la corrosión de las probetas procesadas con velocidad de avance de 60, 120 y 200 mm/min (Probetas 1, 3 y 5), con respecto al material base al haber transcurrido 144 horas.

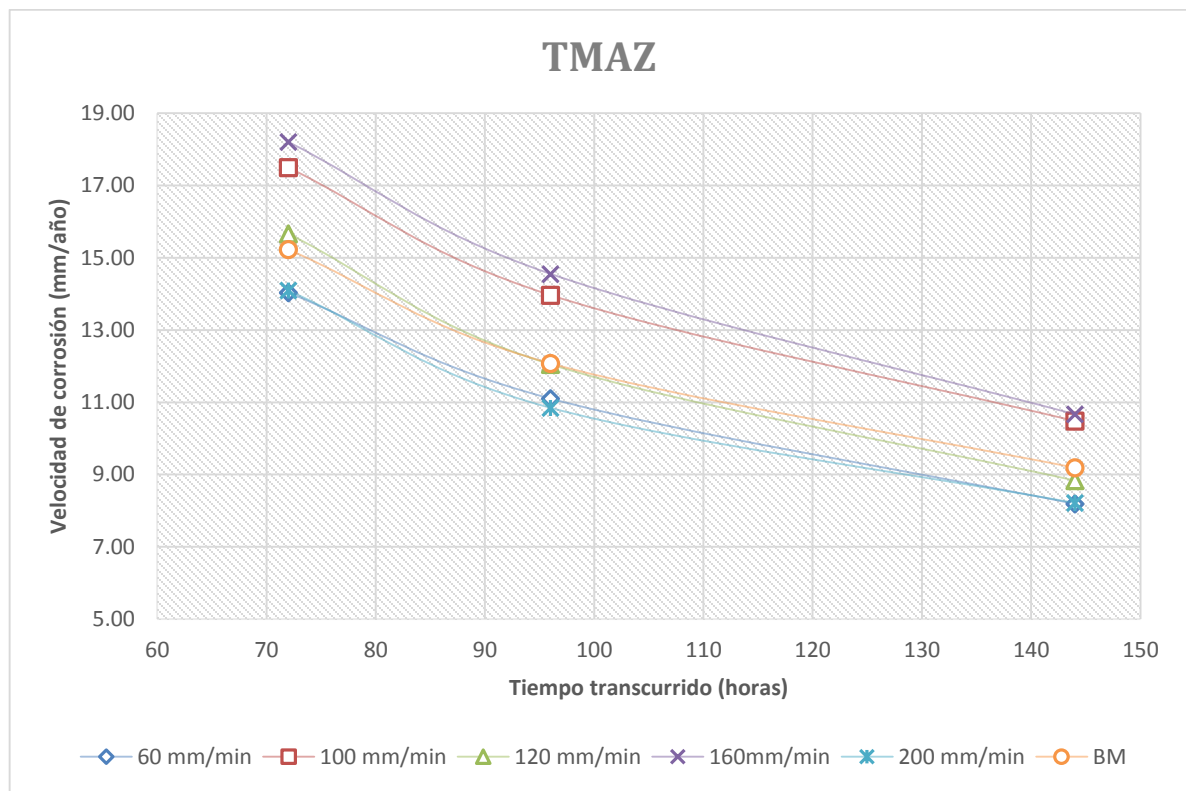


Figura 3. 38 Velocidad de corrosión vs horas de inmersión (TMAZ)

Tabla 3. 18 Datos velocidad de corrosión vs horas de inmersión (TMAZ)

TMAZ - Velocidad de corrosión (mm/año)						
Horas transcurridas	60 mm/min	100 mm/min	120 mm/min	160mm/min	200 mm/min	BM
72	14.04	17.50	15.66	18.20	14.09	15.23
96	11.10	13.97	12.05	14.55	10.85	12.08
144	8.19	10.48	8.83	10.66	8.22	9.19

En las siguientes figuras se observa las probetas luego de haber sido sumergidas en 1M HCL durante 144 horas. En todas las probetas la zona que más se corroe es la SZ. La TMAZ se corroe a una velocidad diferente y con los resultados obtenidos anteriormente podemos saber que en algunas probetas hasta se aumenta la resistencia a la corrosión.

Asimismo, en la probeta 2 se observa que la corrosión ha afectado en mayor manera y la probeta que menos se corroyó fue la probeta 3.

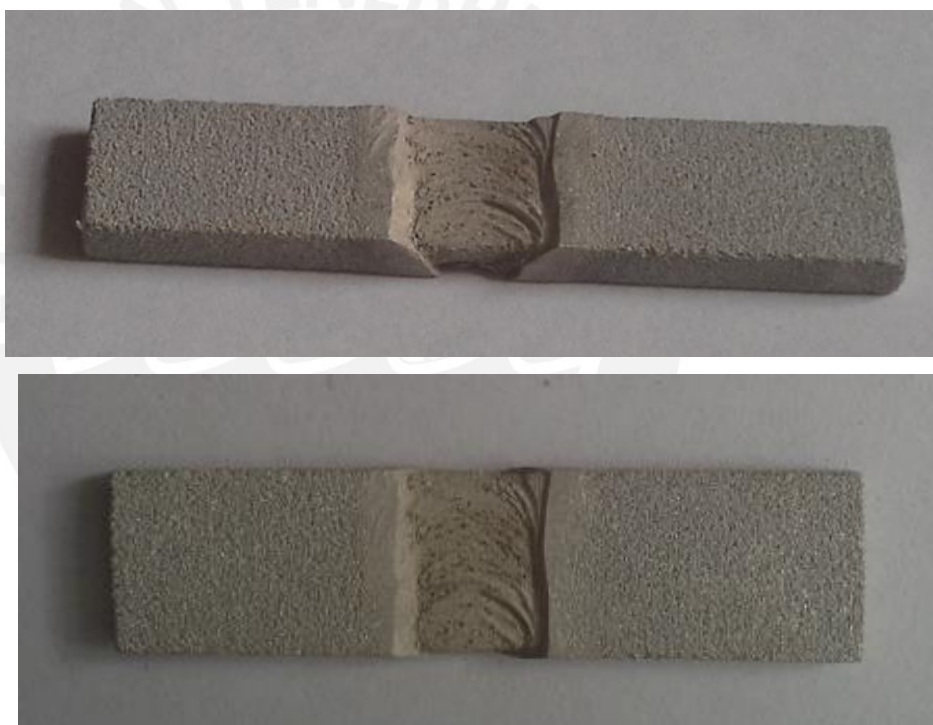


Figura 3. 39 PROBETA 1 (600 RPM, 60 mm/min) después de 144 horas sumergidas en HCl



Figura 3. 41 PROBETA 2 (600 RPM, 100 mm/min) después de 144 horas sumergidas en HCl



Figura 3. 40 PROBETA 3 (600 RPM, 120 mm/min) después de 144 horas sumergidas en HCl

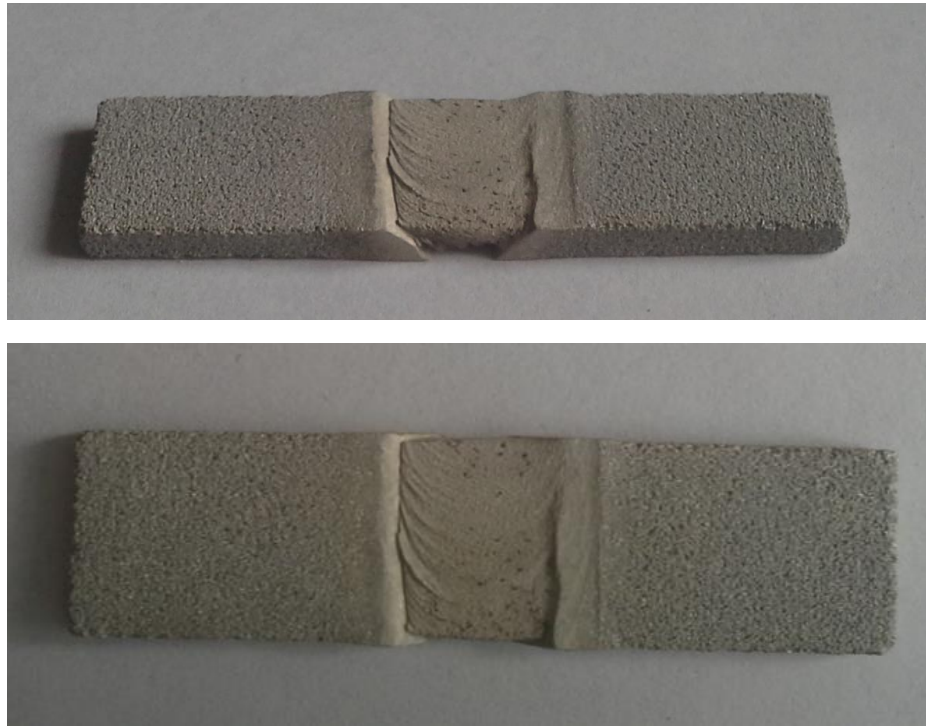


Figura 3. 43 PROBETA 4 (600 RPM, 160 mm/min) después de 144 horas sumergidas en HCl



Figura 3. 42 PROBETA 5 (600 RPM, 200 mm/min) después de 144 horas sumergidas en HCl

En las figuras 3.44 y 3.45 se tienen las vistas del metal base después de haber sido sumergido 144 horas en 1M HCL a 50 y 200 aumentos, respectivamente. Como se puede ver, la corrosión que ocurre en el metal base es intergranular y también se comienza a picar en el grano mismo. Esto es debido a lo visto en la figura 3.2, los precipitados en el metal base se encontraban en los límites de grano y en la matriz α de aluminio, lo cual hacen más sensible a esas zonas y por esto en la figura 3.45 se puede ver que los granos tienen un aspecto de esponja.

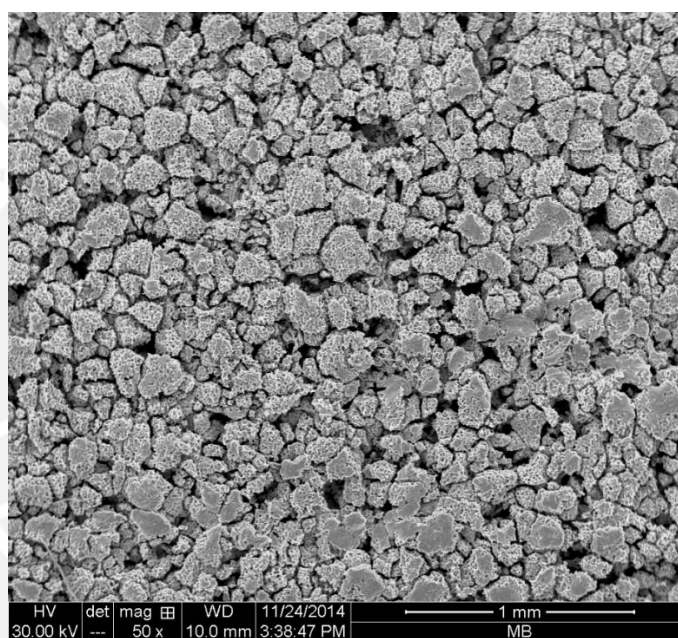


Figura 3. 44 Metal Base (144 horas 1M HCl), microscopio SEM 50X

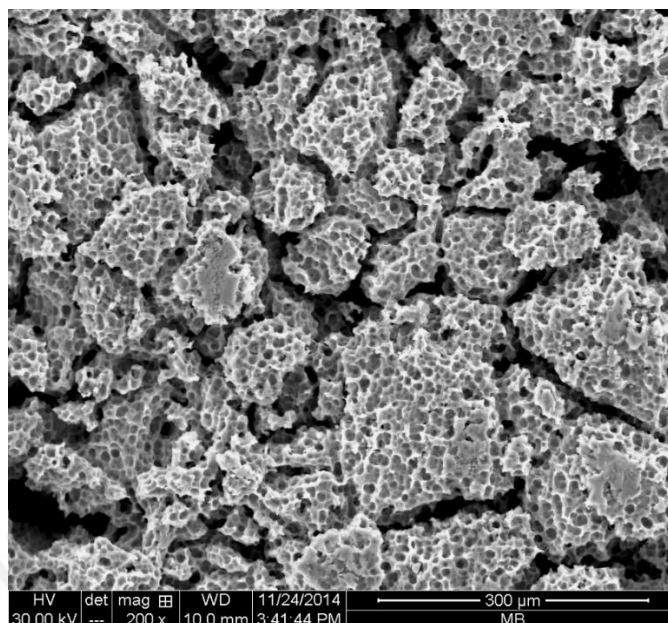


Figura 3. 45 Metal base (144 horas 1M HCl), microscopio SEM 200X

En las figuras 3.46, 3.47, 3.48 se tiene la vista de la probeta 2 una vez que ha sido sumergida 144 horas en 1M de HCl.

En la figura 3.46 se tiene el lado de avance, en este lado se observa claramente las 4 partes de la zona procesada (SZ, TMAZ, HAZ, BM) y la intensidad de corrosión donde claramente se ve que la SZ se corroe más que la TMAZ y HAZ. Debido a que se pueden apreciar mejor las zonas, pudimos determinar que la medida de la TMAZ en este lado fue de $734.7\mu\text{m}$. Por otro lado, la figura 3.47 muestra el lado de retroceso de la zona procesada y claramente que la TMAZ es mucho mayor de 1.609 mm , del mismo modo en la SZ de la zona de retroceso la corrosión ataca con mayor intensidad, e incluso se forman algunas imperfecciones. Esta diferencia en la corrosión de la SZ mejor se aprecia en la figura 3.48.

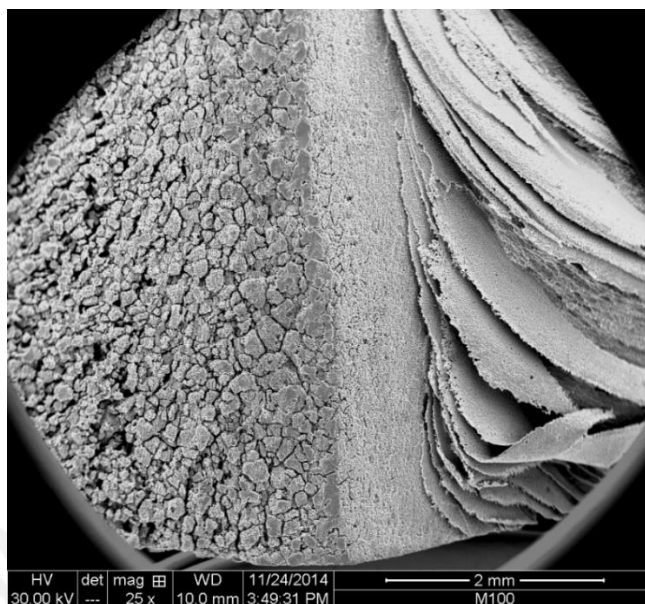


Figura 3. 46 Probeta 2 (600RPM, 100 mm/min) lado de avance (144 horas 1M HCl) microscopio SEM

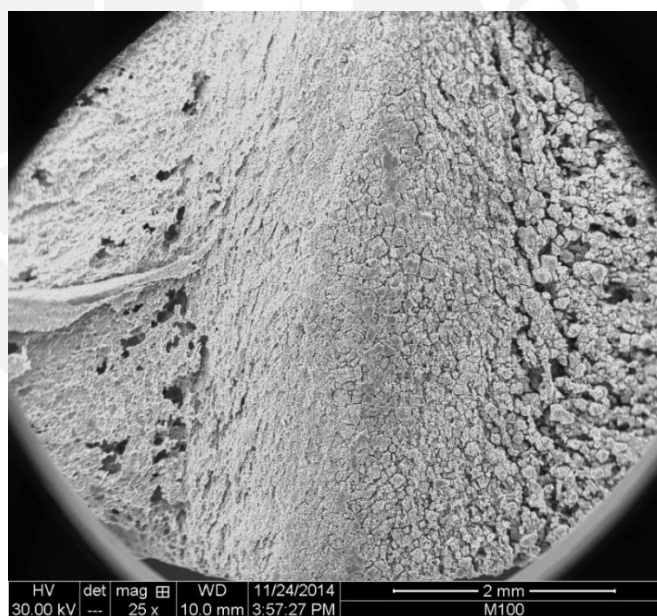


Figura 3. 47 Probeta 2 (600RPM, 100 mm/min) lado de retroceso (144 horas 1M HCl), microscopio SEM

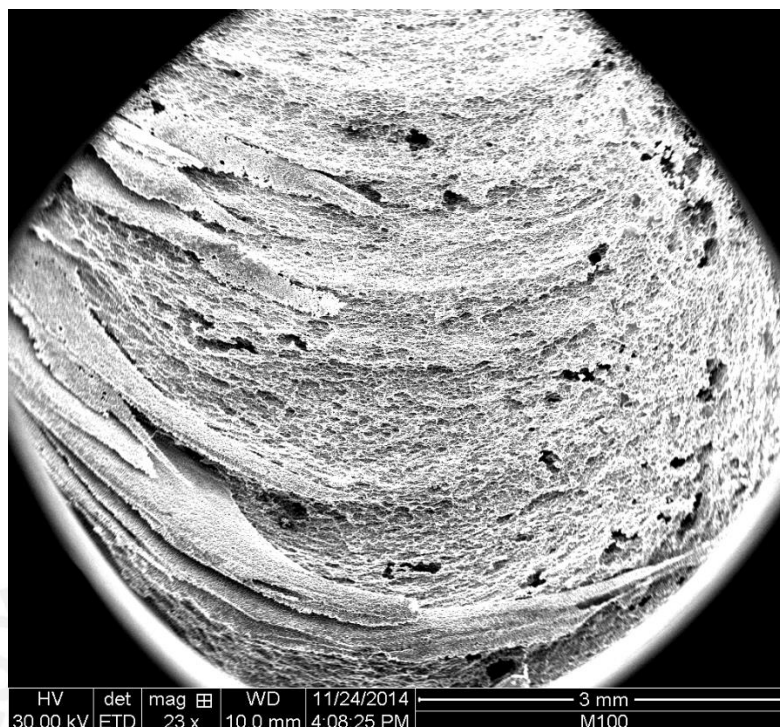


Figura 3. 48 Probeta 2 (600RPM, 100 mm/min) SZ (144 horas 1M HCl), microscopio SEM

Del mismo modo de analizó la probeta numero 3 (figura 3.49 y 3.50). En esta probeta se nota claramente que la corrosión ataca a la SZ más levemente si la comparamos con la SZ de la probeta 2, esto concuerda con los resultados potenciodinámicos y de inmersión obtenidos. También, en esta probeta se tiene que la TMAZ del lado de avance es menor que la TMAZ del lado de retroceso, siendo estas de 633.1 μ m y 1.096 mm, respectivamente. Sin embargo, en esta probeta no se aprecia un cambio de resistencia a la corrosión muy pronunciado en el lado de avance y retroceso de la SZ.

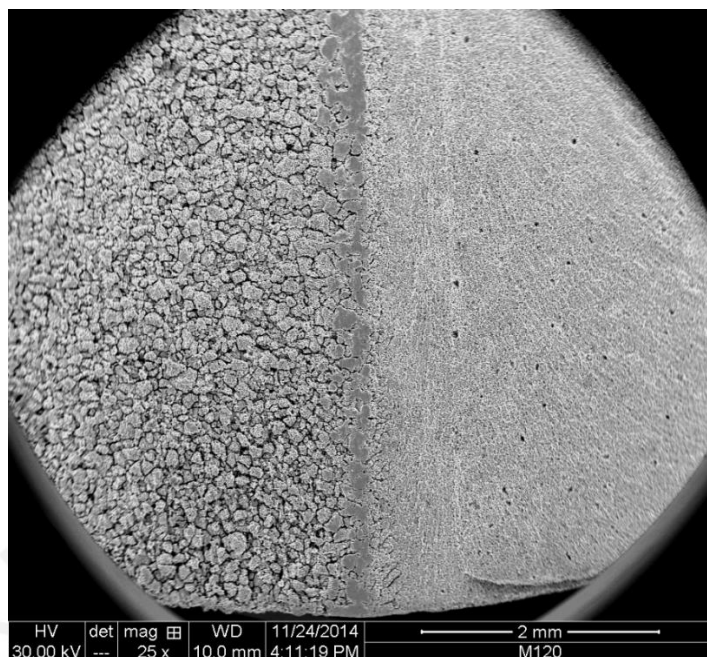


Figura 3. 49 Probeta 3 (600RPM, 120 mm/min) lado de avance (144 horas 1M HCl), microscopio SEM

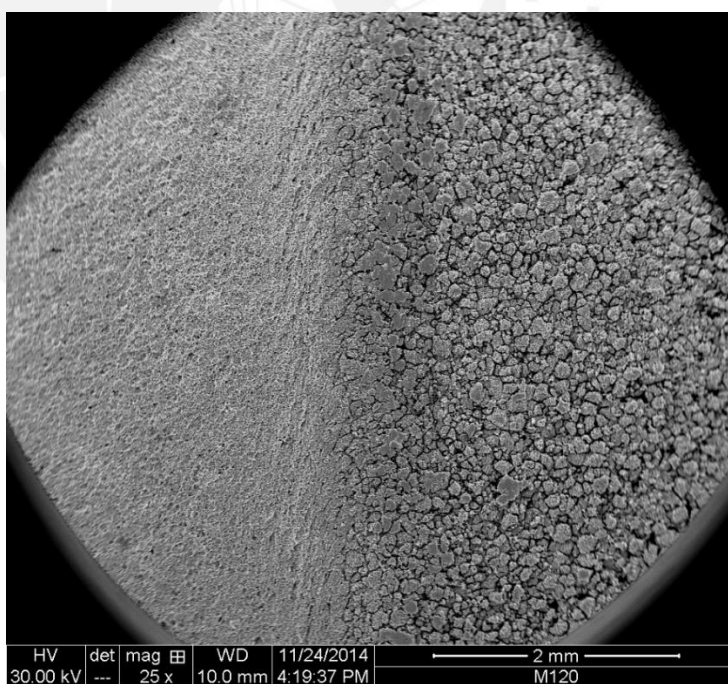


Figura 3. 50 Probeta 3 (600RPM, 120 mm/min) lado de retroceso (144 horas 1M HCl), microscopio SEM

Conclusiones

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS ÓPTIMOS Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

- Los parámetros de procesamiento son muy importantes para que se consiga un adecuado aporte de calor y un adecuado flujo de material. De las probetas procesadas a una misma de velocidad de rotación y a una diferente velocidad de avance solo se obtiene una zona procesada sin defectos en las probeta 2 y 3 que tienen una relación de velocidades 0.17 y 0.2 mm/rev, respectivamente. Esto concuerda con estudios realizados previamente en los cuales se dice que si los valores del revolutionary pitch son lo más cercanos posible a 0.2 mm/rev se consigue una zona procesada óptima y sin defectos. Valores menores de esta relación de velocidad significa un exceso de calor aportado, y valores mayores de ésta significa una deficiencia de calor aportado. Asimismo, se obtuvo mayores medidas de la zona procesada en la probeta 2 y 3, lo cual demuestra que ha existido un mayor flujo de material a causa del adecuado aporte de calor.
- Al momento de la fabricación de las probetas en el centro de mecanizado se pudo concluir que uno de los parámetros más importantes de este procesamiento es el de la profundidad a la cual la herramienta está dentro de la probeta, ya que esta profundidad debe ser la adecuada para que el pin entre completamente y que el hombro este rozando completamente la superficie de la probeta, pues de otro modo no se generará un adecuado calor ni un buen flujo de material y quedará una grieta a lo largo de la zona procesada. Si se exagera con la altura de profundidad tampoco es bueno, puesto que la superficie lateral del hombro estaría actuando directamente con la probeta, lo cual no es dado en el proceso de fricción batido.

ANALISIS MICROESTRUCTURAL

- En el SZ de todas las probetas procesadas se pudo apreciar mediante el microscopio electrónico de barrido que existe una recristalización de grano, puesto que aprecia que en el metal base el tamaño de grano es de en promedio 80 μm y en la SZ llega a medir 2 μm , lo cual demuestra un afinamiento de grano de hasta 40 veces el tamaño.

- Los precipitados en el BM están a lo largo de los límites de grano y también en la matiz α . En la SZ también ocurre lo mismo.
- En la BM existen precipitados que contienen Si, pero en la SZ estos precipitados desaparecen y básicamente los precipitados tienen Al y Mg.

BARRIDO DE DUREZA

- Como era de esperarse en toda la zona procesada, la microdureza Vickers va descendiendo progresivamente conforme se acerca al centro de la zona procesada siendo de aproximadamente el valor de dureza en la SZ la mitad del valor de dureza del metal base. Este comportamiento es igual en el lado de avance y el lado de retroceso por lo que podemos decir que los valores de dureza son casi simétricos con respecto al medio de la zona procesada. En la SZ se obtiene menor dureza que en la TMAZ, esto es debido a que en la SZ se consigue la temperatura más elevada de toda la zona procesada y por ende hay un mayor ablandamiento del material.
- El comportamiento previamente mencionado es igual para las probetas procesadas a diferentes velocidades de avance. Sin embargo, existe una pequeña diferencia en el valor promedio de la dureza Vickers en la SZ de cada una de las 5 probetas. Donde se concluyó que en la SZ el valor de la dureza aumenta ligeramente conforme se aumenta la velocidad de avance siendo la dureza más alta 50.5 HV y la más baja 44.4 HV en la probeta 5 y 1, respectivamente. Esto se debe a que conforme se incrementa la velocidad de avance el calor aportado a la probeta es menor y por lo tanto hay un menor ablandamiento.

RESISTENCIA A LA CORROSIÓN

- En los ensayos de inmersión, donde las probetas fueron sumergidas 144 horas en 1M HCL, se obtuvo que en todas las probetas la SZ presentó una mayor velocidad a la corrosión con respecto al BM siendo las probetas 2 y 4 (100mm/min y 160 mm/min) las que se corroyeron con mayor intensidad y la probeta 3 (120mm/min) la que tuvo mayor resistencia a la corrosión. Por otro lado, en la TMAZ/HAZ ocurre algo parecido, ya que en las probetas 2 y 4 se tiene la mayor velocidad de corrosión que en la BM; sin embargo, en las probetas 1,3 y 5 (60, 120, 200 mm/min) la

velocidad de corrosión obtenida es menor que en la del BM; es decir, la resistencia a la corrosión en estas probetas aumenta con respecto al etal base.

- Asimismo, se analizó como varía la velocidad de corrosión conforme transcurre el tiempo de horas sumergidas en 1M HCl. A las 72 horas es donde se obtiene mayor velocidad de corrosión en todas las probetas y conforme las horas transcurren esta velocidad disminuye. Este comportamiento es visto en la SZ y TMAZ/HA de la misma forma.
- Por otro lado, se realizó ensayos del circuito de potencial abierto (OCP) de las 5 probetas de toda la zona procesada. No se obtuvo una gran diferencia en el valor de potencial de corrosión en las 5 probetas. Se obtiene un resultado parecido a los obtenidos en los ensayos de inmersión, puesto que el BM tiene un comportamiento más noble (mejor resistencia a la corrosión) y las probetas 2 y 4 (100,160 mm/min) son las que tienen comportamiento más activo (menor resistencia a la corrosión)
- En las curvas potenciodinámicas se aprecia el mismo comportamiento catódico en las probetas. La corriente de corrosión en el BM y la probeta 3 (120 mm/min) son menores que en las demás probetas, lo que demuestra que tiene una velocidad de corrosión menor con respecto a las otras probetas. Por otro lado, las probetas 2 y 4 (100 y 160 mm/min) tienen una elevada corriente de corrosión, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en los ensayos de inmersión.
- Los ensayos de inmersión y electroquímicos guardan relación entre sí. También se realizaron algunos análisis macro a las probetas de inmersión luego de ser sumergidas 144 horas en 1M HCl y se observó que el BM y la probeta 3 (120mm/min) son las que se corroen menos y las probetas 2 y 4 son las que se corroen más.
- La corrosión tanto en la SZ como en el BM es intergranular y con picaduras en la matriz de aluminio α . Esto es debido a que los precipitados se concentran en los límites de grano y matriz α del aluminio, lo cual sensibiliza a esas zonas.

Referencia bibliográfica

- [1] ASM Specialty Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, USA, 1998.
- [2] Mishra, Ma Friction stir welding and processing, reports a review journals, 2005
- [3] Mishra Ma, Mahoney, Superplastic deformation behaviour of friction stir processed 7075Al alloy, Acta Materialia, 2002
- [4] Saito, Shigematsu, know M echanical properties of fine-grained aluminum alloy produced by friction stir process, Scripta Materialia, 2003
- [5] ASM Specialty Handbook, corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, USA, 1999.
- [6] ASM Specialty Handbook, Friction stir welding and processing, ASM International, USA, 2008.
- [7] Zhou, Liu Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V friction stir welded joints, Materials and desing, 2010
- [8] Mishra, Ma , charit ,Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite, materials sciences and engineering
- [9] K. Surekha , B.S. Murty , K. Prasad Rao Microstructural characterization and corrosion behavior of multipass friction stir processed AA2219 aluminum alloy, surface an coating technology, 2008
- [10] T SMahmoud, Effect of friction stir processing on electrical conductivity and corrosion resistance of AA6063-T6 Al alloy, Journal of mechanical engineering Science, 2007
- [11] Khaled J. Al-Fadhlah, Abdulla I. Almazrouee, Abdulkareem S. Aloraier Microstructure and mechanical properties of multi-pass friction stir processed aluminum alloy 6063, Science Direct, 2014
- [12] Abbasi Gharacheh M., Kokabi A H., Daneshi G. H., Shalchi B., Sarrafi R., The influence of the ratio of “rotational speed/traverse speed” (w/v) on mechanical properties of AZ31 friction stir welds, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, ScienceDirect, 2006, p 5
- [13] Mohiedin Bagheri Hariri, The optimum combination of tool rotation rate and traveling speed for obtaining the preferable corrosion behavior and mechanical properties of friction stir welded AA5052 aluminum alloy, Science Direct, 2013