



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

“SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN EN ALEACIÓN  
DE ALUMINIO 7075 Y ANÁLISIS METALOGRAFICO”

TESIS

QUE COMO PARTE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

PRESENTA

WILLIAMS HERNÁNDEZ TREJO

DIRIGIDA POR

ING. JOAQUÍN ROLDÁN JIMÉNEZ

San Juan del Río, Querétaro. marzo de 2015

# DEDICATORIA

A mi familia, en especial a mis padres que me dieron vida y siempre estuvieron a mi lado brindándome educación, apoyo y consejos para hacer de mí una mejor persona. A mis compañeros y amigos quienes sin su ayuda nunca hubiera podido hacer esta tesis.

# AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de estudiar la licenciatura en sus instalaciones.

A mi asesor Ing. Joaquín Roldan Jiménez por todo su apoyo y consejos compartidos a lo largo de este trabajo, a mis sinodales Dr. Luis A. Morales Hernández, M. en C. Manuel García Quijada y Dr. Juan primo Benítez Rangel que fueron constantes y estuvieron pendientes del trabajo.

A mis amigos y compañeros por su amistad, ayuda, conocimiento y compañía durante la licenciatura.

Y muy en especial a mi familia, por todo su apoyo, comprensión y por creer en mí.

Gracias a todos ustedes se culmina un logro en mi vida.

# INDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
INDICE GENERAL .....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
INDICE DE TABLAS.....	x
CAPÍTULO 1 .....	1
1 INTRODUCCIÓN .....	2
1.1 ANTECEDENTES.....	4
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	7
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	8
1.4 HIPÓTESIS.....	9
1.5 OBJETIVOS.....	10
1.5.1 Objetivo General.....	10
1.5.2 Objetivos Específicos .....	10
CAPITULO 2.....	11
2 ESTADO DEL ARTE.....	12
2.1 ALUMINIO.....	12
2.1.1 Principales propiedades del aluminio. ....	12
2.2 ALEACIONES .....	13
2.2.1 Designaciones .....	13
2.2.2 Aleaciones de aluminio fundidas.....	14
2.2.3 Aleaciones de aluminio endurecidas por trabajo en frio .....	15
2.3 ALEACIÓN DE ALUMINIO AA-7075.....	16
2.3.1 Composición química .....	16
2.3.2 Propiedades mecánicas .....	17
2.4 SOLDADURA.....	18
2.4.1 Soldadura por forja .....	18
2.4.2 Soldadura por electrodo revestido (SMAW) .....	19
2.4.3 Soldadura por electrodo sumergido (SAW) .....	20

2.4.4	Soldadura con núcleo de fundente (SNF/FCAW).....	21
2.4.5	Soldadura por arco bajo gas protector (TIG/GTAW) .....	22
2.4.6	Soldadura por arco bajo gas protector (MIG/GMAW) .....	24
2.4.7	Soldadura por gas .....	24
2.4.8	Soldadura por hidrogeno atómico .....	25
2.4.9	Soldadura laser.....	26
2.4.10	Soldadura por fricción agitación (SFA/FSW) .....	28
2.5	DUREZA .....	31
2.6	TAMAÑO DE GRANO Y LIMITES DE GRANO .....	33
CAPÍTULO 3.....		34
3	METODOLOGÍA.....	35
3.1	MANUFACTURA DE INDENTADORES. ....	35
3.2	MANUFACTURA DE MORDAZAS. ....	38
3.3	REALIZACIÓN DE LA SOLDADURA EN CNC.....	41
3.3.1	Preparación del material .....	41
3.3.2	Sujeción .....	42
3.3.3	Torque.....	43
3.3.4	Soldadura .....	44
3.4	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS. ....	47
3.5	CORTE DE LA MUESTRA. ....	47
3.6	MONTAJE O ENCAPSULADO DE LAS MUESTRAS .....	49
3.7	DESBASTE O ESMERILADO FINO. ....	52
3.8	PULIDO.....	54
3.9	PRUEBAS DE MICRO-DUREZA .....	57
3.10	REVELAR DE TAMAÑO DE GRANO. ....	61
CAPÍTULO 4.....		64
4	EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS .....	65
4.1	INDENTADOR 3 mm X 3 mm. ....	66
4.1.1	2.0 cm/min Velocidad de avance. ....	66
4.1.2	2.5 cm/min Velocidad de avance. ....	68

4.1.3	3.0 cm/min Velocidad de avance.....	70
4.2	INDENTADOR 4 mm X 4 mm .....	72
4.2.1	2.0 cm/min Velocidad de avance.....	72
4.2.2	2.5 cm/min Velocidad de avance.....	74
4.2.3	3.0 cm/min Velocidad de avance.....	76
4.3	INDENTADOR 5 mm X 5 mm. ....	78
4.3.1	2.0 cm/min Velocidad de avance.....	78
4.3.2	2.5 cm/min Velocidad de avance.....	80
4.3.3	3.0 cm/min Velocidad de avance.....	82
4.4	INDENTADOR 6 mm X 6 mm. ....	84
4.4.1	2.0 cm/min Velocidad de avance.....	84
4.4.2	2.5 cm/min Velocidad de avance.....	86
4.4.3	3.0 cm/min Velocidad de avance.....	88
4.5	RESULTADOS TAMAÑO DE GRANO .....	90
4.6	COMPARATIVA.....	97
CAPÍTULO 5.....		98
5 CONCLUSIONES.....		99
BIBLIOGRAFÍA.....		101

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura (2.1) Soldadura SMAW. ....	20
Figura (2.2) Soldadura SAW. ....	21
Figura (2.3) Soldadura SNF con gas protector. ....	22
Figura (2.4) Soldadura FCAW auto protegida. ....	22
Figura (2.5) Soldadura GTAW. ....	23
Figura (2.6) Soldadura GMAW. ....	24
Figura (2.7) Soldadura por hidrogeno atómico. ....	25
Figura (2.8) Mecanismo soldadura Laser. ....	27
Figura (2.9) Herramienta (indentador) para método SFA. ....	28
Figura (2.10) Esquema del proceso de Soldadura por Fricción Agitación (SFA). .	29
Figura (2.11) Durómetro vickers marca <i>buehler</i> . ....	32
Figura (2.12) Esquema del ensayo brinell contra ensayo vickers. ....	32
Figura (3.1) Manufactura de indentadores. ....	36
Figura (3.2) Manufactura de indentadores. ....	37
Figura (3.3) Indentador 5 mm x 5 mm. ....	37
Figura (3.4) Indentador 3 mm x 3 mm. ....	37
Figura (3.5) Diseño de mordazas de sujeción. ....	38
Figura (3.6) Proceso de manufactura de mordazas ....	39
Figura (3.7) Proceso de manufactura de mordazas. ....	39
Figura (3.8) Vista superior de las mordazas. ....	40
Figura (3.9) Vista lateral de las mordazas. ....	40
Figura (3.10) Placas para soldar. ....	41
Figura (3.11) Bloque de aluminio para soporte. ....	42
Figura (3.12) Sujeción de las placas a soldar. ....	43
Figura (3.13) Soldaduras con torque bajo. ....	44
Figura (3.14) Hombro del indentador a roce con las placas a soldar. ....	45
Figura (3.15) Programa en Fresadora CNC. ....	46
Figura (3.16) Cortadora de disco abrasivo <i>abrasimet 2</i> marca <i>buehler</i> . ....	48
Figura (3.17) Probeta seccionada. ....	48
Figura (3.18) Espécimen vista superior de la soldadura. ....	49
Figura (3.19) Espécimen vista lateral de la soldadura. ....	49
Figura (3.20) Polvo fenólico marca <i>buehler</i> . ....	50
Figura (3.21) Muestra junto con resina. ....	51
Figura (3.22) Maquina para encapsular <i>simplimet 2</i> y su manómetro de presión. ....	51
Figura (3.23) Muestra encapsulada. ....	52
Figura (3.24) Esmeriladora manual <i>handimet 2</i> marca <i>buehler</i> . ....	53
Figura (3.25) Dirección de desbaste en lijas. ....	54
Figura (3.26) Máquina de pulido fino <i>ecomet 6</i> marca <i>buehler</i> . ....	55

Figura (3.27) Proceso de pulido fino. ....	56
Figura (3.28) Probetas con acabado espejo.....	57
Figura (3.29) Durómetro <i>MMT-3</i> marca <i>buehler</i> . ....	58
Figura (3.30) Distancias en mm para indentador 3 mm x 3 mm. ....	59
Figura (3.31) Distancias en mm para indentador 5 mm x 5 mm. ....	59
Figura (3.32) Distancias en mm para indentador 4 mm x 4 mm. ....	60
Figura (3.33) Distancias en mm para indentador 6 mm x 6 mm. ....	60
Figura (3.34) Reactivos para ataque de aleaciones de aluminio. ....	61
Figura (3.35) Procedimiento para revelar tamaño de grano. ....	62
Figura (3.36) PC y microscopio Nikon epiphot 200. ....	63
Figura (4.1) Grafica micro-dureza. Indentador 3 mm y 2.0 cm/min de avance. ....	67
Figura (4.2) Grafica micro-dureza. Indentador 3 mm y 2.5 cm/min de avance. ....	69
Figura (4.3) Grafica micro-dureza. Indentador 3 mm y 3.0 cm/min de avance. ....	71
Figura (4.4) Grafica micro-dureza. Indentador 4 mm y 2.0 cm/min de avance. ....	73
Figura (4.5) Grafica micro-dureza. Indentador 4 mm y 2.5 cm/min de avance. ....	75
Figura (4.6) Grafica micro-dureza. Indentador 4 mm y 3.0 cm/min de avance. ....	77
Figura (4.7) Grafica micro-dureza. Indentador 5 mm y 2.0 cm/min de avance. ....	79
Figura (4.8) Grafica micro-dureza. Indentador 5 mm y 2.5 cm/min de avance. ....	81
Figura (4.9) Grafica micro-dureza. Indentador 5 mm y 3.0 cm/min de avance. ....	83
Figura (4.10) Grafica micro-dureza. Indentador 6 mm y 2.0 cm/min de avance....	85
Figura (4.11) Grafica micro-dureza. Indentador 6 mm y 2.5 cm/min de avance....	87
Figura (4.12) Grafica micro-dureza. Indentador 6 mm y 3.0 cm/min de avance....	89
Figura (4.13) Probetas con mejores resultados en indentador 3mm. ....	90
Figura (4.14) Tamaño de grano en zona de cordón probeta 2.0-1500 (izquierda) y 2.0-2000 (derecha). ....	91
Figura (4.15) Tamaño de grano en zona de cordón probeta 2.5-1000 (izquierda) y 3.0-2000 (derecha). ....	91
Figura (4.16) Probetas con mejores resultados en indentador 4 mm. ....	92
Figura (4.17) Tamaño de grano metal base (izquierda) y zona de cordón (derecha). ....	92
Figura (4.18) Tamaño de grano metal base (izquierda) y zona de cordón (derecha). ....	93
Figura (4.19) Probetas con mejores resultados en indentador 5 mm. ....	93
Figura (4.20) Tamaño de grano zona de cordón pruebas 2.0-1000 (izquierda) y 2.0-1500 (derecha). ....	94
Figura (4.21) Tamaño de grano zona de cordón pruebas 2.5-1000 (izquierda) y 2.5-1500 (derecha). ....	94
Figura (4.22) Tamaño de grano probeta 3.0-1000.....	95
Figura (4.23) Probetas con mejores resultados en indentador 6 mm. ....	95



Figura (4.24) Tamaño de grano en metal base (izquierda) y zona de cordón prueba  
2.5-1000 (derecha). ..... 96

Figura (4.25) Tamaño de grano en zona de cordón 2.5 1500 (izquierda) y 3.0 1000  
(derecha). ..... 96

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Número de grupos de aleaciones de aluminio.....	13
Tabla 2.2 Composición química aluminio 7075. ....	17
Tabla 2.3 Propiedades mecánicas aluminio 7075. ....	17
Tabla 2.4 Beneficios clave de la Soldadura por Fricción-Agitación (SFA). ....	30
Tabla 3.1 Matriz parcial de experimentos.....	47
Tabla 3.2 Hoja de datos, máquina de pulido fino.....	56
Tabla 4.1 Prueba micro-dureza. Indentador 3 mm y 2.0 cm/min de avance. ....	66
Tabla 4.2 Pruebas micro-dureza. Indentador 3 mm y 2.5 cm/min de avance. ....	68
Tabla 4.3 Pruebas micro-dureza. Indentador 3 mm y 2.5 cm/min de avance. ....	70
Tabla 4.4 Pruebas micro-dureza. Indentador 4 mm y 2.0 cm/min de avance. ....	72
Tabla 4.5 Pruebas micro-dureza. Indentador 4 mm y 2.5 cm/min de avance. ....	74
Tabla 4.6 Pruebas micro-dureza. Indentador 4 mm y 3,0 cm/min de avance. ....	76
Tabla 4.7 Pruebas de micro-dureza. Indentador 5 mm y 2.0 cm/min de avance. .	78
Tabla 4.8 Pruebas de micro-dureza. Indentador 5 mm y 2.5 cm/min de avance. .	80
Tabla 4.9 Pruebas de micro-dureza. Indentador 5 mm y 3.0 cm/min de avance. .	82
Tabla 4.10 Pruebas de micro-dureza. Indentador 6 mm y 2.0 cm/min de avance.	84
Tabla 4.11 Pruebas de micro-dureza. Indentador 6 mm y 2.5 cm/min de avance.	86
Tabla 4.12 Pruebas de micro-dureza. Indentador 6 mm y 3.0 cm/min de avance.	88

# CAPÍTULO 1

# 1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día uno de los intereses en la industria ha sido buscar la mejora de sus procesos, teniendo como objetivo hacerlos más eficientes; esto lo pretende lograr implementando nuevas alternativas en sus procesos e incluso haciendo uso de nuevas tecnologías buscando no generar pérdidas económicas. La eficiencia de un producto radica en que tenga las mejores propiedades para el trabajo que realizará y que a su vez presente la menor pérdida de energía para realizar su trabajo. Existen una gran cantidad de procesos para los cuales es indispensable contar con una buena eficiencia, esto para mejorar tiempos en sus líneas de producción. Tan importante ha sido mejorar las líneas productivas que en algunos procesos como en los de la industria metal mecánica se ha optado por la utilización de nuevos materiales como lo es el aluminio y algunas de sus variantes.

Debido a que el material con el que se pretende trabajar es una pieza clave para buscar nuevas ventajas y soluciones, se ha optado por usar materiales como el aluminio, este ha sido desde hace muchos años la opción y ha brindado excelentes respuestas a un sector industrial específico. Sin embargo el aluminio por sí solo no presenta características lo suficientemente favorables para aplicaciones industriales, por lo cual desde hace ya varios años se ha ido implementando aleaciones de aluminio con otros metales para que así cumplan con las características químicas y mecánicas que la industria requiere. Estas aleaciones han respondido de manera favorable la necesidad de procesos industriales que buscan esta eficiencia debido a sus excelentes propiedades físicas y químicas.

A pesar de esto algunas de las aleaciones de aluminio presentan inconvenientes al ser soldados por métodos de soldadura convencionales, es por esto que en este trabajo se exponen el análisis metalográfico de los efectos del método relativamente nuevo de unión (soldadura por fricción agitación) sobre la aleación de aluminio AA-7075; con el fin de comprobar si es posible, con las características que se proponen, encontrar una soldadura con propiedades

favorables y sin defectos. A su vez los resultados son respaldados con ensayos de micro dureza y tamaño de grano a muestras de la soldadura.

El contenido de este trabajo se encuentra dividido en cinco capítulos, en los cuales queda descrito el desarrollo del proyecto, el capítulo 1 contiene una introducción, en la que se presentan algunas de las necesidades para la realización del presente trabajo, también se exponen los antecedentes, la justificación del desarrollo de este trabajo, además se plantean los objetivos a alcanzar y se también a grandes rasgos la forma de enfrentar el problema. En el capítulo 2 se realiza una revisión de la literatura donde se describe el aluminio y sus aleaciones; así como también la clasificación y los tipos de soldadura; y una descripción de los análisis que se realizaran a la soldadura. La metodología sugerida se muestra en el capítulo 3 nos muestra la información para la realización de dos indentadores y la metodología que consisten en realizar pruebas de soldadura a diferentes velocidades tanto de avance como de giro, en una máquina de control numérico, hecho esto se realiza una probeta por prueba; se aplicaron las pruebas de micro-dureza así como pruebas metalográficas para poder determinar el tamaño de grano y la dureza de la soldadura. Los resultados obtenidos se muestran en el capítulo 4 donde se comparan los resultados de las pruebas contra el aluminio 7075 en su estado normal y a su vez con los obtenidos en la tesis de Leal (2012). En el quinto y último capítulo se incluyen conclusiones de las pruebas realizadas, dando algunas perspectivas del trabajo realizado. Finalmente se exponen las referencias bibliográficas consultadas que le dan fundamento científico.

## 1.1 ANTECEDENTES

El aluminio es un material estructuralmente liviano, con una elevada resistencia específica, por lo cual provee una oportunidad valiosa para reducir el peso en elementos estructurales y así mejorar la economía del combustible y disminuir las emisiones peligrosas producidas en la industria tanto automotriz como naval y aérea al momento de sustituir diseños más pesados hechos con aceros tradicionales. (MAG TECH 1, 2004)

Al ser el aluminio un material con estas características tan favorables; por ejemplo ser liviano, tener alta conductividad eléctrica y térmica, buena resistencia mecánica, entre otros; lo introduce a la industria como un elemento básico para muchas piezas. Pero el problema radica al momento de hacer una unión o soldadura entre dos o más de estos elementos, dado que los procesos de soldadura por arco eléctrico presentaban dificultades para obtener soldaduras con bajos niveles de defectos, ante esto nace la necesidad de un nuevo método de soldadura que ofreciera uniones con excelentes propiedades mecánicas. Y es en 1991 cuando el proceso de Soldadura por Fricción-Agitación (SFA) o "Friction Stir Welding" (FSW) es desarrollado por el TWI "Technological Welding Institute" en Cambridge, Inglaterra. (Thomas *et al*, 1995). Este nuevo concepto de soldadura ofrecía la unión en fase sólida por fricción del aluminio y sus aleaciones obteniendo excelentes propiedades mecánicas aunque también ha evidenciado tener buenos resultados en la unión de aceros de medio carbón y aceros inoxidable.

El material sujeto a SFA no se funde y refunde, por consiguiente la soldadura resultante ofrece ventajas sobre soldaduras de arco convencionales, como son mejor retención de propiedades mecánicas básicas, menor distorsión, menores esfuerzos residuales y menores defectos en la soldadura.

Existen varias publicaciones internacionales y trabajos que se han realizado, todos con la finalidad de encontrar las mejores características que sirvan para obtener una soldadura con las mejores propiedades. Aunque como de

la investigación se trata, muchas veces no se obtienen los resultados esperados, estos trabajos aun así sirven como antecedente para futuras investigaciones.

En la literatura científica se encuentran estudios como el de Bahemmat *et al* (2010) que realizó un estudio de características mecánicas, micro y macro estructurales de la unión de aluminio de diferentes aleaciones, siendo estos: aluminio 6061 y aluminio 7075. Los resultados reportados en este estudio fueron: no tener buena adherencia entre estos aluminios principalmente por su diferencia de dureza, presentaron defectos mayores en uniones con velocidades de soldadura 160 mm/min; las fracturas y la dureza se ven más afectadas las zonas del aluminio AA-6061 que el AA-7075.

Por otro lado se observa en un artículo de Rajakumar *et al* (2009) de la Universidad de India, en el que se muestra su investigación sobre la optimización y proceso de la unión por fricción agitación y los parámetros de la herramienta para obtener un mejor esfuerzo a la tensión. Los mejores parámetros obtenidos en esta investigación resultaron ser un indentador de 5.13 mm a un avance de 6.73 cm/min y una velocidad de giro de 1438 rpm.

También Cabot *et al* (2003) evaluaron la eficiencia mecánica de SFA, usando una fresadora, y el aluminio AA 6061T6 de 6.25 mm, para un rango de relación de velocidades de 5 a 15 rev/mm. En este trabajo se concluyó que al aumentar la velocidad de soldadura, para una velocidad de rotación constante de 1500 rpm, la resistencia mecánica aumento levemente y la eficiencia de la junta soldada alcanzo el 80%.

Ahora bien cabe destacar que la soldadura por fricción abarca también la unión de metales disimilares como el aluminio, cobre, magnesio y acero, incluyendo muchas aleaciones consideradas de difícil soldabilidad por procesos convencionales por fusión. Sobre esto, es posible encontrar trabajos donde se analiza la unión de estos metales con resultados satisfactorios que sirven de antecedente y como fuente de información para aplicaciones que impliquen la unión y estudio de estos metales.

Muchos trabajos de investigación se han enfocado en los cambios de microestructura y de propiedades mecánicas que se causan al cambiar las variables del proceso SFA. Rajiv y Mishra (2005), presentaron una revisión de los principales aspectos micro-estructurales y mecánicos especialmente enfocados hacia las aleaciones de aluminio.

Finalmente dentro de la Universidad Autónoma de Querétaro se han desarrollado trabajos de investigación tales como el de Vera (2009) en el que compara y establece las ventajas que se tiene el utilizar la Soldadura por Fricción-Agitación en vez de Soldadura por Fusión en la aleación AA-7075. Otro trabajo es el de Sosa (2010) desarrollo la investigación del efecto del tratamiento térmico de envejecimiento en aluminio AA-7075 soldado por fricción-agitación, esta investigación mostró que los tratamientos térmicos de envejecimiento utilizados por Sosa permitieron aumentar significativamente la dureza del material base desde 120 o 130 HV (Hardness Vickers) hasta 180. También se encontró la investigación de González (2012) que realizó el diseño y manufactura de un dispositivo para torno convencional, para implementación de soldadura por fricción en aluminio AA-6061 teniendo como resultado una dureza bastante disminuida con respecto a la del metal base y en las pruebas de tracción se obtuvo una resistencia desde el 40% hasta el 70% respecto al material base. Por último se tiene la de Leal (2012) quien realizó un análisis metalográfico para identificar los mejores resultados con las diferentes características de soldadura, con aluminio AA-6061, como velocidades de avance y giro con diferentes indentadores; obteniendo buenos resultados con el indentador de 4 mm y velocidades de giro y avance bajas; además de obtener buenos resultados al comparar la dureza con una muestra de unión por soldadura (GTAW) reflejando que el método de unión SFA es mejor que (GTAW) para este material.

A pesar de que existen estas publicaciones aún no se cuenta con resultados que garanticen el uso de la soldadura por fricción agitación sin que la unión muestre inconvenientes. Por lo que sería importante contar con un proceso que comparado con la investigación de Leal (2012), tenga una sujeción que



garantice que las piezas a soldar no tengan flexiones o movimientos y que esta nueva sujeción agilice el proceso de soldadura.

Por otro lado complementar con nuevos diámetros de indentadores para tener un rango más amplio de investigación. Sumado a esto realizar el análisis metalográfico correspondiente a cada muestra para identificar los resultados más favorables. Un aspecto importante sería a su vez revelar el tamaño de grano que se tiene en cada muestra

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

En base a los antecedentes se puede inferir que hay un campo de experimentación bastante amplio, que no se ha hecho mucha investigación al respecto pero que se trata de un método bastante interesante y que involucra a varias aplicaciones industriales importantes; aplicaciones que se verían beneficiadas con este método ya que el material tiene las propiedades idóneas para su uso pero que al no tener una manera eficaz de unirlos es necesario recurrir a otros métodos con propiedades poco benéficas.

Cabe destacar que el aluminio AA-7075 presenta problemas al ser unido por métodos de arco convencionales, por ejemplo con los procesos convencionales de soldadura por Gas Inerte de Tungsteno (Tungsten Inert Gas, TIG) y soldadura laser, la estructura dendrítica que se forma en la zona de fusión trae consigo un drástico decremento en la fuerza que es una de las mayores propiedades mecánicas (Su *et al*, 2003.). Y aunque con la SFA ha presentado buenos resultados aún no se cuenta con los parámetros que cumplan con las propiedades para ser usado en la industria.

Contar con estos parámetros permitirá a varias industrias, aeronáuticas principalmente, implementar con confianza este material puesto que se tendría un método de unión confiable.

Es por eso que en esta investigación se proponen nuevas herramientas de unión junto con otras variantes para encontrar esos parámetros. Por otro lado, también se pretende desarrollar un sistema de sujeción implementado al método de SFA para que se eviten los problemas causados por una mala sujeción.

Por otra parte, el método de soldadura por fricción agitación es una técnica relativamente nueva y aunque ya existen muchas publicaciones y estudios se habla de un procedimiento con muchos aspectos e incógnitas que resolver como saber con certeza qué tipo de herramienta, características de soldado, ya sea velocidad de giro y/o de avance, y las propiedades mecánicas que se quieren en nuestra soldadura o pieza dependiendo de la aplicación para la cual vaya a ser usada y además todos estos factores proporcionen una alta confiabilidad en nuestra pieza soldada.

Al no existir datos contundentes o relevantes, a pesar varias publicaciones nacionales e internacionales, convierte a este trabajo en una investigación interesante que busca encontrar los parámetros de herramienta y proceso que optimicen los resultados en la unión. Contar con esta investigación será una gran ventaja dependiendo de los resultados, ya que si por un lado se tienen resultados desfavorables aun así será esto un punto de partida para nuevas investigaciones y para que estos investigadores no abunden en un tema ya experimentado y tomen de referencia estos datos; por otro lado si son favorables los resultados demostraran que este es un método de unión viable para las aplicaciones que la industria necesite dependiendo de su uso.

### **1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Como ya se vio el aluminio presenta dificultades a ser unido por procesos de arco eléctrico pues presenta inconvenientes operativos como porosidad,

susceptibilidad a la fisuración en caliente. Además el aluminio se consideraba como insoldable en aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales debido a las pobres propiedades en la zona de fusión.

La aplicación de la SFA en varias ramas de la industria ya es necesaria, por ejemplo, para evitar pesos adicionales; el problema de la Soldadura por fricción radica en la falta de información que nos muestre la configuración de variables (velocidad de giro y avance) para obtener el método más viable de la aplicación de la soldadura y el tipo de herramienta.

Por otro lado tomando como antecedente la investigación de Leal (2012) podemos observar que en algunos de sus cordones resultantes presentaban poro, se piensa que esto se debía a los defectos en la sujeción de las placas de aluminio, que solía tener una deficiencia en las uniones debido a que no llegaban a estar (en algunos casos) sujetas con firmeza o que al momento del apriete en los clamps se llegaban a mover las placas, dando como consecuencia defectos en los cordones de soldadura SFA. Por tal motivo en la presente investigación se pretende eliminar este problema usando una prensa de precisión pero además aplicando un torque que evite que se aflojen y separen las placas debido a la vibración y fuerzas que se producen durante el proceso de soldadura.

#### **1.4 HIPÓTESIS**

La combinación propuesta entre herramienta o indentador, velocidades de giro y avance puede cumplir con tener una soldadura con propiedades mecánicas lo más similares al aluminio AA-7075 en su estado normal.

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 Objetivo General**

Realizar un análisis metalográfico a placas soldadas a diferentes velocidades de giro y avance obtenidas por el método de soldadura por fricción-agitación de la aleación de aluminio 7075, aplicando presión por medio de sujeción mecánica; identificando los parámetros más favorables de giro, avance e indentador.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Diseño y manufactura de base mecánica para sujeción en el proceso de soldado.
- Implementar soldadura a placas de aluminio tipo 7075, a 4 velocidades de giro diferentes y 3 velocidades de avance diferentes.
- Realizar el análisis metalográfico a las pruebas de soldadura y revelar el tamaño de grano para determinar los efectos de las velocidades de giro y de avance.
- Realizar el análisis de micro-dureza en probetas a dos diferentes líneas de profundidad.

# CAPITULO 2

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 ALUMINIO

El aluminio (Al) es un metal de los más abundantes en el mundo y de los más usados también, cuenta con excelentes propiedades físicas y químicas como resistencia mecánica, es ligero, alta conductividad térmica y eléctrica, resistencia a la corrosión además de ser altamente reciclable lo hacen un material muy versátil. El aluminio lo encontramos desde la cocina de nuestras casas, en conductores eléctricos, motores de automóviles, hasta estructuras de aeronaves.

Sin embargo el aluminio por si solo es aun así poco atractivo para aplicaciones industriales, debido a que sus propiedades físicas y químicas son muy endebles y no cumplen con los requerimientos necesarios. Para esto el aluminio requiere de aleaciones con otros metales para aumentar su resistencia y otras cualidades. Dependiendo de las necesidades algunos de los metales con los que normalmente encontramos aleaciones son: Cobre (Cu), Silicio (Si), Magnesio (Mg), Zinc (Zn) y Manganeseo (Mn); otros en menor medida son: Hierro (Fe), Cromo (Cr) y Titanio (Ti); y en cantidades aún más pequeñas podemos llegar a encontrar: Níquel (Ni), Cobalto (Co), Plata (Ag), Litio (Li), Vanadio (V), Zirconio (Zr), Estaño (Sn), Plomo (Pb), Cadmio (Cd) y Bismuto (Bi).

El aluminio puro es débil, con una resistencia a la tensión que varía entre los 90 a los 140 MPa dependiendo de su condición. Es empleado para conductores eléctricos y para productos domésticos, aunque para usos estructurales debe ser reforzado aleándolo. Las aleaciones más fuertes tienen una resistencia a la tensión de más de 500 MPa. (Dwight, 2002)

#### 2.1.1 Principales propiedades del aluminio.

Densidad: 2.70 g/cm a 20 °C

Punto de fusión: 660 °C

## 2.2 ALEACIONES

Existen dos tipos de aleaciones de aluminio forjados:

1. Aleaciones que pueden ser endurecidas por tratamiento térmico.
2. Aleaciones que puedan ser endurecidas por trabajo en frío y que no es posible tratarlas térmicamente.

Estas aleaciones están sub-divididas en grupos de aleaciones dependiendo del material con el que se alean, a estas subdivisiones se les conoce como designaciones.

### 2.2.1 Designaciones

Para poder entender las aleaciones primero se clasifican por número de 4 dígitos (YXXX), el primer número 'Y' es el dominante el cual nos indica el metal con que esta principalmente aleado; en la tabla (2.1) podemos observar la clasificación.

Tabla 2.1 Número de grupos de aleaciones de aluminio.

Componente principal	Grupo de Aleación
Aluminio sin alear 99%	1
Cu	2
Mn	3
Si	4
Mg	5
Mg, Si	6
Zn	7
otros	8

### 2.2.1.1 Designaciones de temple

Después de los 4 dígitos, es posible encontrar letras y números que representan una especificación más completa, a esta designación se le conoce como designación de temple. En la siguiente lista podemos apreciar las designaciones para cualquier de los dos tipos de aleaciones.

- **F:** en el estado en el que se fabrica (mediante trabajo en frío o en caliente o mediante el colado);
- **O:** recocido (del estado de trabajo en frío o colado);
- **H:** endurecido por deformación por trabajo en frío (para productos forjados únicamente);
- **T:** tratado térmicamente;
- **W:** tratado por solución únicamente (temple inestable).

### 2.2.2 Aleaciones de aluminio fundidas

- **1XX.X** – Aluminio (99.00% mínimo);
- **2XX.X** – Aluminio-cobre;
- **3XX.X** – Aluminio-silicio, con cobre y/o magnesio;
- **4XX.X** – Aluminio-silicio;
- **5XX.X** – Aluminio-magnesio;
- **6XX.X** – Serie no utilizada;
- **7XX.X** – Aluminio-zinc;
- **8XX.X** – Aluminio-estaño.

En la serie 1xx.x, los segundo y tercer dígitos indican el contenido mínimo de aluminio, igual que ocurre en los tercer y cuartos dígitos del aluminio forjados. Para otras series, los dígitos segundos y terceros no tienen un significado numérico. El cuarto dígito (a la derecha del punto decimal) indica la forma del producto. (Kalpakjian & Schmid, 2002)



### 2.2.3 Aleaciones de aluminio endurecidas por trabajo en frío

- **1XXX** – Aluminio comercialmente puro – excelente resistencia a la corrosión; elevada conductividad eléctrica y térmica; buena capacidad de trabajo; baja resistencia; no es tratable térmicamente.
- **2XXX** – Cobre – elevada relación resistencia al peso; baja resistencia a la corrosión; tratable térmicamente.
- **3XXX** – Manganeso – buena resistencia a la corrosión y buena soldabilidad; resistencia mecánica de moderada a alta; no es tratable térmicamente.
- **4XXX** – Silicio – menor punto de fusión; forma una película de óxido de color de gris oscuro a negro carbón; generalmente no es tratable térmicamente.
- **5XXX** – Magnesio – buena resistencia a la corrosión y buena soldabilidad; resistencia mecánica de moderada a alta; no es tratable térmicamente.
- **6XXX** – Magnesio y Silicio – resistencia media; buena formabilidad, maquinabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión; tratable térmicamente.
- **7XXX** – Zinc – resistencia de moderar a muy alta; tratable térmicamente.
- **8XXX** – Otro elemento.

En estas designaciones el segundo dígito indica modificaciones de la aleación. Para la serie 1xxx el tercer y cuarto dígito representan la cantidad mínima de aluminio en la aleación- por ejemplo, “1050” indica un mínimo de 99.50% de aluminio, “1090” indica un mínimo de 99.90% de aluminio. En otras series el tercer y cuarto dígitos identifican las diferentes aleaciones en el grupo sin un significado numérico. (Kalpakjian & Schmid, 2002)

## 2.3 ALEACIÓN DE ALUMINIO AA-7075

La aleación aluminio 7075 es comercialmente conocida como *zicral* puesto que su principal elemento de aleación es el Zinc (Zn). Esta aleación se compone principalmente de zinc, magnesio, cobre y pequeñas cantidades de silicio, hierro magnesio, cromo, titanio y otros metales; lo que le da alta resistencia a la fatiga frente a otros metales, es fuerte, es fácil de mecanizar y tiene menos resistencia a la corrosión que muchas otras aleaciones sin embargo no es soldable. Aunque otras aleaciones 7XXX han sido desarrolladas con mejoras en propiedades específicas, la aleación 7075 sigue siendo la línea base con un buen balance de propiedades requeridos para las aplicaciones aeroespaciales. (Alcoa Mill Products)

Aunque esta aleación es usada ampliamente en la industria aeronáutica y aeroespacial primordialmente en estructuras, esta clase de aleación de aluminio es difícil de unir mediante técnicas convencionales de soldadura por fusión porque la estructura dendrítica formada en la zona de fusión puede deteriorar seriamente las propiedades mecánicas de la unión (Rajakumar *et al*, 2009). Por lo tanto usamos la técnica de soldadura por fricción agitación que al no ser una técnica de fundición y refundición ofrece ventajas sobre las soldaduras de arco convencional, tales como menor distorsión, menores esfuerzos residuales, mejor retención de propiedades mecánicas de base y menores defectos de soldadura (Su *et al*, 2003). Para obtener el esfuerzo deseado es esencial tener el control completo sobre los parámetros relevantes del proceso.

### 2.3.1 Composición química

Los diferentes elementos que constituyen al aluminio AA-7075 los podemos ver en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Composición química aluminio 7075. (Rajakumar *et al*, 2009)

Elemento	Mg	Mn	Zn	Fe	Cu	Si	Cu	Al
<b>Metal Base (7075-T6)</b>	2.1	0.12	5.1	0.35	1.2	0.58	1.2	Bal.

La aleación entre Al-Zn-Mg- Cu proporcionan alta resistencia, mientras que adicionalmente el cromo desarrolla una buena resistencia al agrietamiento por tensión-corrosión en productos laminados (Alcoa Mill Products).

### 2.3.2 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas nos serán de gran ayuda para poder comparar si nuestros resultados son favorables, la Tabla 2.3 nos muestra la resistencia a la cedencia, resistencia máxima a la tensión, la elongación y por último la dureza en vickers.

Tabla 2.3 Propiedades mecánicas aluminio 7075. (Rajakumar *et al*, 2009)

Material	Limite elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Elongación (%)	Dureza Vickers (HV 0.05)
<b>Metal Base (7075-T6)</b>	410	485	12	160

## **2.4 SOLDADURA**

La unión de piezas data de años muy remotos donde el hombre primitivo unía piezas con cuerdas, piedras con lodos una contra otra, entre otras. Pero con el paso del tiempo en la edad de bronce y hierro se desarrollaron los que pudieran ser los primeros métodos de soldadura, uno consistía en formar un molde de arena con la forma de la pieza que se quería soldar encima de una pieza metálica y fundir en el molde directamente sobre la pieza metálica; otro método consiste en poner ambas piezas metálicas a soldar con una ligera separación y poner en los bordes arena para que al verter la fundición esta actuara como muro de contención mientras que la fundición soldaba ambas piezas.

En la revolución industrial fue cuando se implementa el método de unir piezas de hierro conocido como forja. Sin embargo ya era evidente la necesidad de un método menos rudimentario y con más versatilidad para las necesidades que iban surgiendo.

Y siglos después la soldadura pasa de ser considerada como un proceso tosco y primitivo a toda una ciencia, pues los nuevos métodos de soldadura involucran la ingeniería eléctrica, electrónica, mecánica; metalurgia, electromagnetismo, entre muchas otras ciencias.

Hoy en día existen muchos métodos y aplicaciones de soldadura, entre los cuales vemos los siguientes.

### **2.4.1 Soldadura por forja**

Este proceso consiste en calentar las piezas a unir hasta su estado plástico, después con el uso de una herramienta se golpean las piezas hasta lograr unir las y darles la forma deseada. En este proceso no se utiliza material de aporte y la limitación del proceso es que solo se puede aplicar en piezas pequeñas y en forma de lámina. Este tipo de unión está muy propensa a la oxidación y para evitar esto se usaban aceites gruesos son un fundente, por lo regular se utilizaba bórax con sal de amonio. (Jeffus, 2009)

### **2.4.2 Soldadura por electrodo revestido (SMAW)**

La soldadura por arco metálico protegido (SMAW, por sus siglas en ingles), es el proceso de soldadura usado con más frecuencia debido a su bajo coste, flexibilidad, portabilidad y versatilidad. La máquina y los electrodos consumibles son más baratos. El proceso SMAW es muy flexible en cuanto a espesor de metal se refiere pues puede soldar desde metales de 2 mm de espesor o calibre 16 hasta otros de varios centímetros de espesor utilizando la misma maquina pero con una configuración diferente.

Este proceso es muy manejable debido a que el equipo es fácil de mover y a que existen soldadoras cuya fuente de alimentación es un generador motriz. Además la limitada cantidad de equipo necesaria para el proceso facilita el movimiento. (Jeffus, 2009)

El recubrimiento del electrodo crea una atmosfera protectora y escoria para la operación de soldadura. También ayuda a estabilizar el arco eléctrico y regula la velocidad a la que se funde el electrodo.

Durante la operación, el extremo del metal descubierto de la varilla de soldadura (que está en la otra punta de la soldadura) se sujeta en un soporte de electrodos conectado a la fuente de energía. El soporte tiene una manija aislada para que lo tome y manipule el soldador. Las corrientes que se usa regularmente en la SMAW varían entre los 30 y 300 A y 15 a 45 V. la sección de los paramentos de energía adecuados depende de los metales que se van a soldar, del tipo y longitud del electrodo, así como de la profundidad de penetración de la soldadura requerida.

Los metales base de los electrodos incluyen los aceros, aceros inoxidables, los hierros fundidos y ciertas aleaciones no ferrosas.

La ventaja de este proceso de soldadura es que el equipo es portátil y de bajo costo, lo que hace más versátil el método. Las desventajas radican en el uso de varillas con electrodos consumibles, porque estos deben cambiarse en forma

periódica a causa del desgaste, esto reduce el tiempo de arco eléctrico en este proceso de soldadura

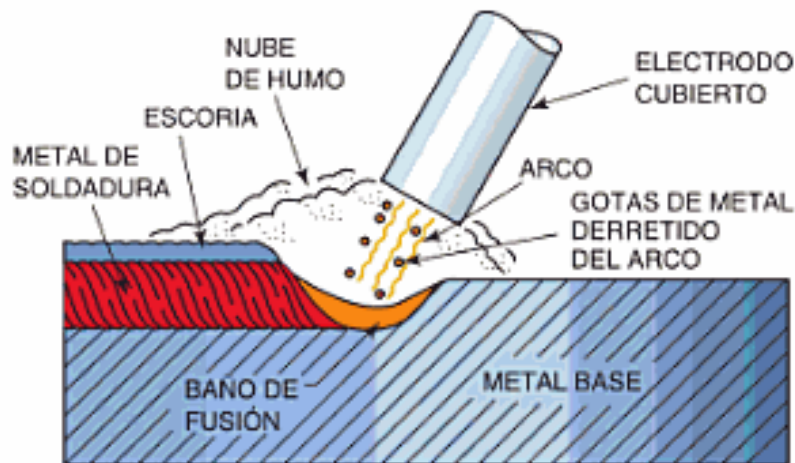


Figura (2.1) Soldadura SMAW. (Jeffus, 2009)

### 2.4.3 Soldadura por electrodo sumergido (SAW)

La soldadura por electrodo sumergido SAS (en inglés Submerged Arc Welding, SAW) es un proceso que usa un electrodo de alambre desnudo consumible continuo, el arco eléctrico se protege por una capa de fundente granular

El fundente se introduce a la unión mediante la gravedad, se vierte por un tanque alimentador y evita las chispas y salpicaduras además de proteger la soldadura del medio ambiente por lo tanto esto produce una unión de alta calidad. El electrodo se alimenta continuamente desde un carrete hasta el arco eléctrico.

Este proceso de soldadura consiste en que el fundente más cercano al arco se derrite y se mezcla con el metal de soldadura fundido para remover impurezas, que después se solidifican en la parte superior de la unión soldada y forman una escoria con aspecto de vidrio.

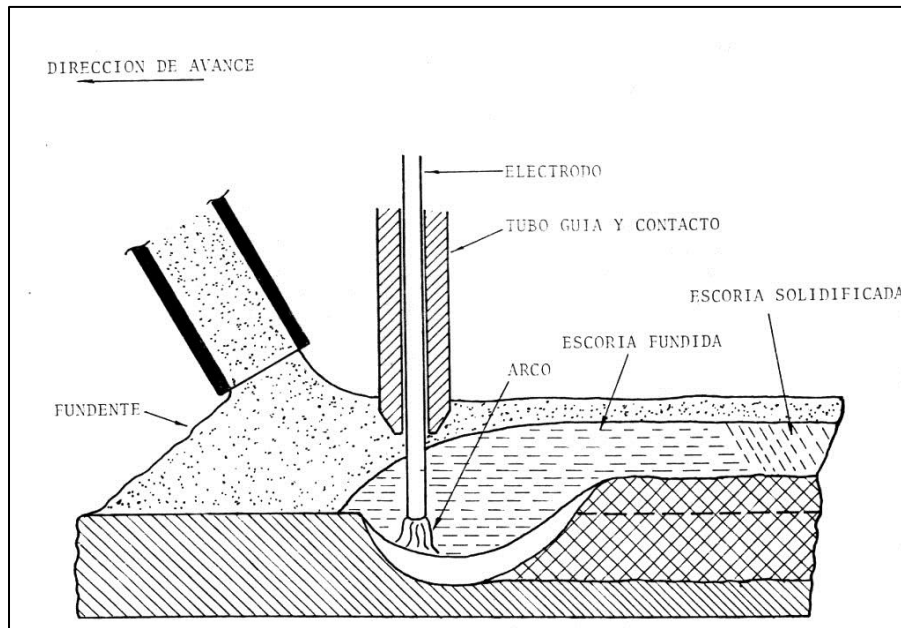


Figura (2.2) Soldadura SAW. (Bisconti, 2009)

La soldadura por arco sumergido se usa ampliamente en la fabricación de acero para formas estructurales, componentes soldados para máquinas pesadas, placas de acero de una pulgada o más, aceros de bajo carbón, aceros inoxidable entre otras. (Groover, 1997)

#### 2.4.4 Soldadura con núcleo de fundente (SNF/FCAW)

La soldadura con núcleo de fundente, SNF (en inglés Flux Core Arc Welding, FCAW), es un proceso en el cual el electrodo es un tubo consumible continuo que contiene fundente y otros ingredientes en su núcleo, tales como desoxidantes y elementos de aleaciones.

Existen dos versiones de SNF: una versión auto protegida y otra protegida por gas. La soldadura auto protegida proporciona protección por medio de un núcleo que incluye fundentes e ingredientes que generan gases protecciones para el arco eléctrico. La segunda versión obtiene la protección de arco eléctrico mediante gases que se incorporan de forma externa.

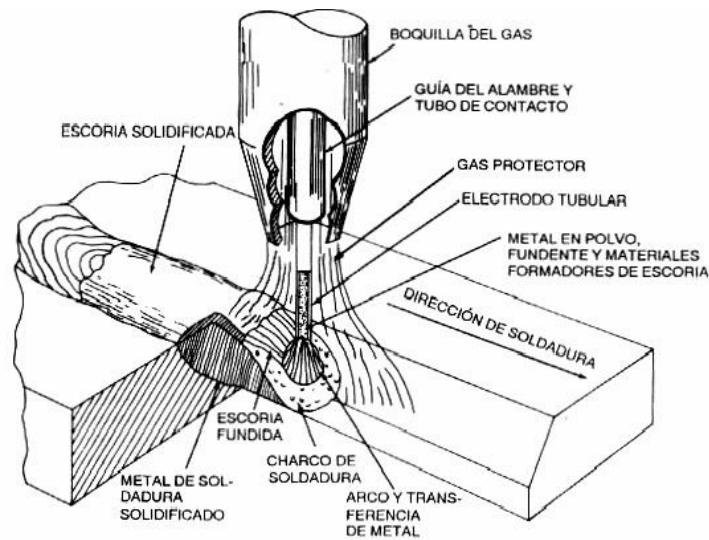


Figura (2.3) Soldadura SNF con gas protector. (Jeffus, 2009)

La soldadura con núcleo fundente se usa principalmente para soldar aceros y aceros inoxidable en un amplio rango de espesores de materias primas. Es notable su capacidad para producir uniones soldadas de muy alta calidad que son lisas y uniformes. (Groover, 1997)

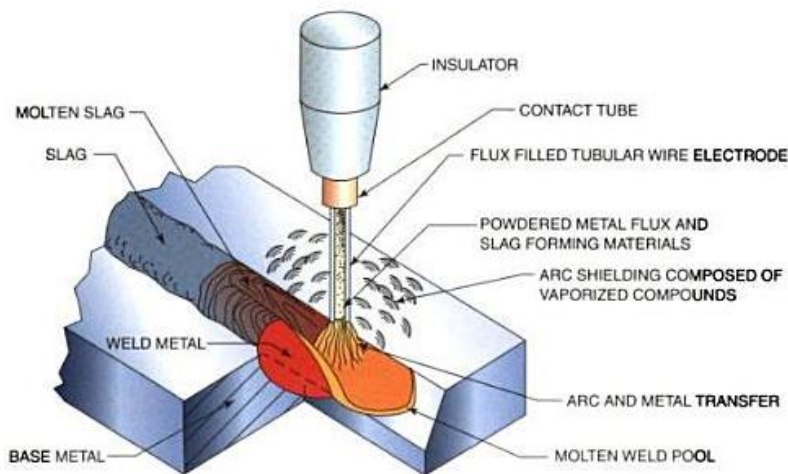


Figura (2.4) Soldadura FCAW auto protegida. (Jeffus, 2009)

### 2.4.5 Soldadura por arco bajo gas protector (TIG/GTAW)

El proceso de soldadura por arco bajo gas protector con electrodo de tungsteno (GTAW, Gas Tungsten Arc Welding), durante los años ha tenido varios



nombres y variantes en el proceso. En 1930 el proceso utilizaba helio como gas protector. A finales de 1940 y principios de 1950 se introdujo como alternativa al argón como gas protector. Y fue hasta 1960 que el argón fue el gas protector primario y surgió el término TIG (Tungsten Inert Gas). Después en 1970 la American Welding Society le dio un nombre oficial a este proceso llamándolo soldadura por arco bajo gas protector con electrodo de tungsteno (GTAW). (Jeffus, 2008)

Este proceso de soldadura GTAW se puede definir como un proceso de soldadura de arco que utiliza el arco eléctrico que salta ente un electrodo de tungsteno (no consumible) y la pieza a soldar, mientras que un gas inerte protege el baño de fusión sin la aplicación de presión. El arco produce el calor necesario para fundir el material. El gas protector mantiene el oxígeno del aire fuera del baño de fusión y el tungsteno caliente; además durante este proceso se puede o no agregar material de aportación al baño de fusión.

El tungsteno se utiliza para el electrodo debido a su alta temperatura de fusión y a sus buenas características eléctricas. El gas argón es el más apropiado pues es más barato que el helio y produce muy buena cobertura en la zona de la soldadura. La adición de metal de aportación es por medio de varillas o alambres que proporcionan refuerzo a la soldadura.

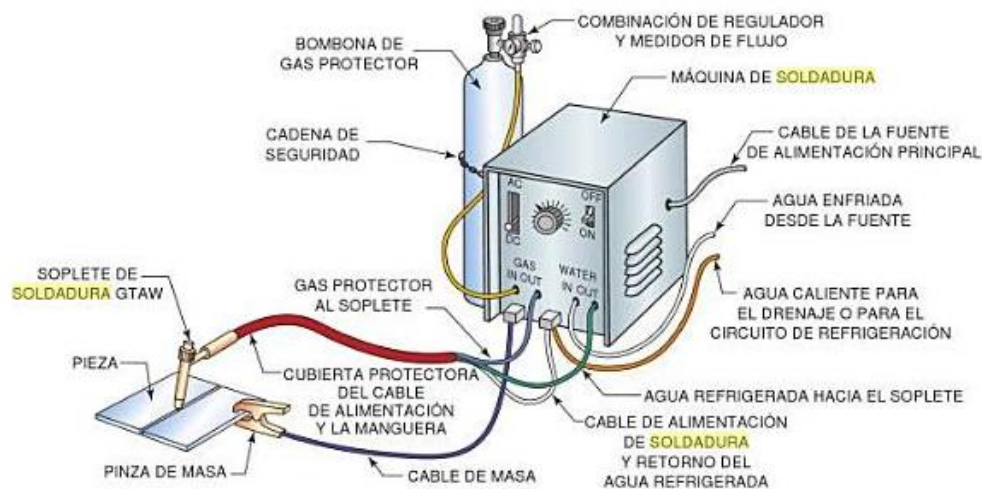


Figura (2.5) Soldadura GTAW. (Jeffus, 2009)

#### 2.4.6 Soldadura por arco bajo gas protector (MIG/GMAW)

Conocido como soldadura de gas de arco metálico (GMAW, Gas Metal Arc Welding) o gas de metal inerte (MIG).

Este método utiliza un hilo o alambre para soldar que se alimenta automáticamente a una velocidad constante, como un electrodo. El arco se genera entre el hilo y el metal base, el calor resultante funde el hilo propiciando la unión de las placas. Durante este proceso un gas protector protege la soldadura de la atmosfera y evita la oxidación del metal base. (Richard Rowe, 2008)

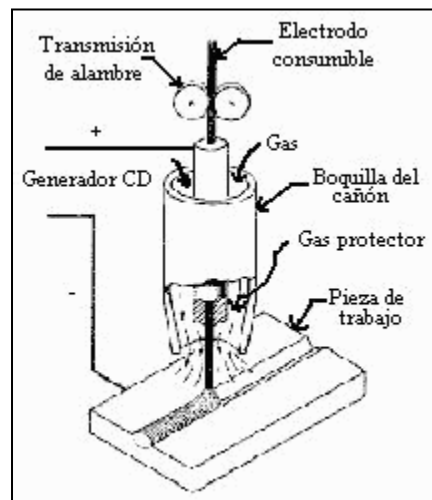


Figura (2.6) Soldadura GMAW. (Casioepa, 2010)

#### 2.4.7 Soldadura por gas

La soldadura con gas combustible (OFW del inglés Oxyfuel Gas Welding), también comúnmente llamada soldadura por gas o autógena, es uno de los métodos más populares y usados actualmente, además de ser un método de bajo costo. (Rodríguez, 2001)

Este método consiste en tener dos gases, por lo regular son oxígeno y acetileno, los cuales al combustionar generan el calor suficiente como para fundir cualquier metal. Así que para rellenar las uniones de las piezas a soldar se utilizan varillas de relleno, hechas de diversas aleaciones de metales, llamadas varillas de aporte o varillas de soldar. Por ende cuando calentamos las piezas junto con las

varillas de aporte estas se funden juntas y esto resulta en la unión de ambas partes.

#### 2.4.8 Soldadura por hidrogeno atómico

El arco salta entre dos electrodos de tungsteno que someten al gas a una temperatura de hasta 4000 °C a pocos milímetros del arco. Por la boquilla llega un chorro de oxígeno, que, al chocar con el arco, produce una llama al disociarse por elevada temperatura.

La corriente gaseosa, al tocar la pieza, pierde temperatura que luego recobra al mezclarse el hidrogeno con el metal base. El empleo de electrodos desnudos facilita la fusión. (Sola, 1992)

Se emplea corriente alterna usando maquinas muy parecidas a las que se usan para soldadura por arco eléctrico tradicional, pero en estas el voltaje es bastante más elevado pues puede llegar a los 300 V.

El hidrogeno que se encuentra en tanques presurizados pasa a una cámara de distribución que se encuentra en el generador de corriente y a través de unos tubos flexibles junto con la corriente de soldadura sale por el soplete o boquilla.

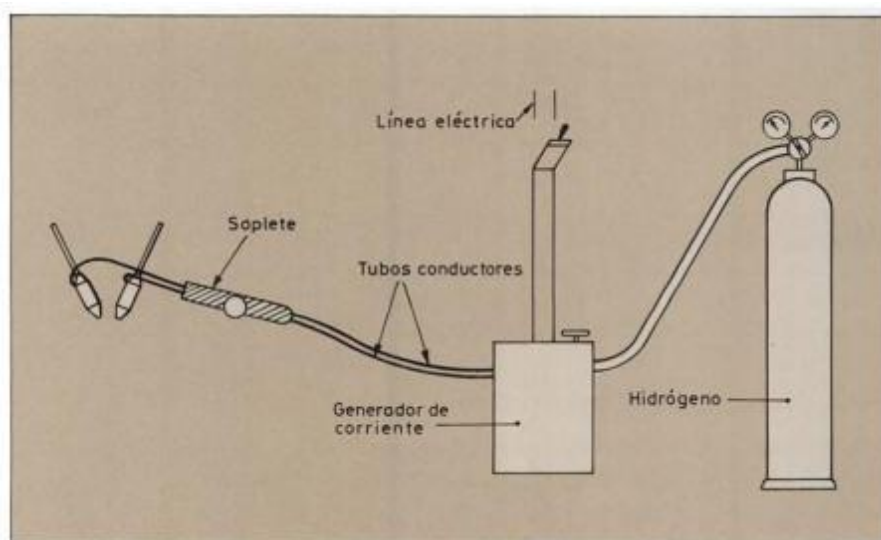


Figura (2.7) Soldadura por hidrogeno atómico. (Sola, 1992)

### 2.4.9 Soldadura laser

El láser se utiliza como la fuente de calor capaz de fundir los metales a unir, logra uniones de alta precisión, es un proceso muy costoso pero fácil de automatizar y muy rápida, lo que la hace ideal para producción en masa.

En la actualidad las industrias aeroespacial, naval y automovilística han implementado el láser en sus cadenas de montaje para soldar una gran variedad de materiales. Entre esos se encuentra el plomo, metal y sus aleaciones, cobre y sus aleaciones, aluminio y sus aleaciones, titanio y sus aleaciones, entre otros. También los materiales no metálicos como los plásticos se pueden soldar por láser.

Algunos de los parámetros que debemos tener en cuenta al momento de hacer una soldadura por láser son las propiedades térmicas del material como conductividad, sus temperaturas de fusión y ebullición, la facilidad de soldarla geometría de la unión que comprende el diseño, las tolerancias y la accesibilidad; a su vez es importante tomar en cuenta características del láser como son la potencia promedio y pico, el modo continuo o pulsante y la longitud de onda; el proceso también afectan parámetros como la velocidad de soldadura, la longitud focal utilizada, el tipo de gas de aporte y la posición relativa del punto focal y de la pieza.

Existen cuatro tipos de láseres útiles para la soldadura; el láser Nd: vidrio, el láser de rubí, el láser de Nd: YAG, y el láser de  $CO_2$ .

Los dos primeros solo pueden operar en modo pulsado ofreciendo además un rendimiento muy bajo, lo que hace que solo se utilicen en casos en los que sea importante la localización de la soldadura. Los más utilizados en la industria son el láser Nd: YAG y el láser de  $CO_2$ . El primero emite una radiación de  $10.6 \mu m$  de longitud de onda y el otro de  $10.6 \mu m$

Para proporcionar la densidad de potencia necesaria para fundir el metal el láser puede operar en modo continuo o en modo pulsado, ambos métodos de laser Nd: YAG y  $CO_2$  pueden utilizar cualquiera de los dos modos de operación.

Trabajando en forma de pulsación intensificada el láser es muy estable y muy útil para la técnica de soldadura en profundidad.

Otra de las ventajas de trabajar en el modo pulsante es la menor formación de plasma mejorando con ello el rendimiento del proceso ya que el plasma que se forma se sitúa justo en la zona de trabajo donde incide el haz de luz y el plasma absorbe la mayoría de la energía antes de que llegue a la pieza.

En cuanto al material, los láseres de Nd: YAG no pueden cortar ni fundir materiales transparentes tales como los vidrios y plásticos, mientras que los láseres de  $CO_2$  si lo permiten. Los láseres de  $CO_2$  existentes en el mercado son de potencias promedio mucho más altas y energéticamente más eficientes que los láseres tipo Nd: YAG.

El principal problema al soldar con láser es el alto índice de reflexión que los metales presentan a la radiación de  $10.6 \mu m$  y  $10.06 \mu m$  de los láseres. Por lo tanto existen algunos materiales que nos son suficiente para tratar con láser como son el cobre, oro, plata, aluminio, latón y por el contrario otros perfectamente capaces de ser tratados con láser como el hierro, níquel, estaño, plomo, tungsteno, molibdeno, cromo, titanio, zirconio, entre otros. (Bachs & Cuesta, 1988)

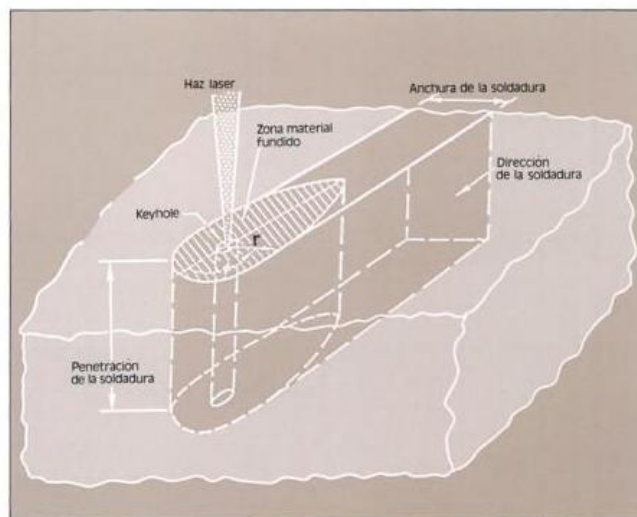


Figura (2.8) Mecanismo soldadura Laser. (Bachs & Cuesta, 1988)

#### 2.4.10 Soldadura por fricción agitación (SFA/FSW)

La técnica de Soldadura por Fricción-Agitación (SFA) desarrollada para la unión de aleaciones de aluminio por The Welding Institute (TWI) (Thomas *et al*, 1995). La unión consiste en unir dos placas o laminas por medios mecánicos. La SFA utilizar una herramienta (indentador) no consumible especialmente diseñado que tiene dos características principales (Figura (2.9): el pin (perno) y el hombro; siendo el pin el responsable de la soldadura.

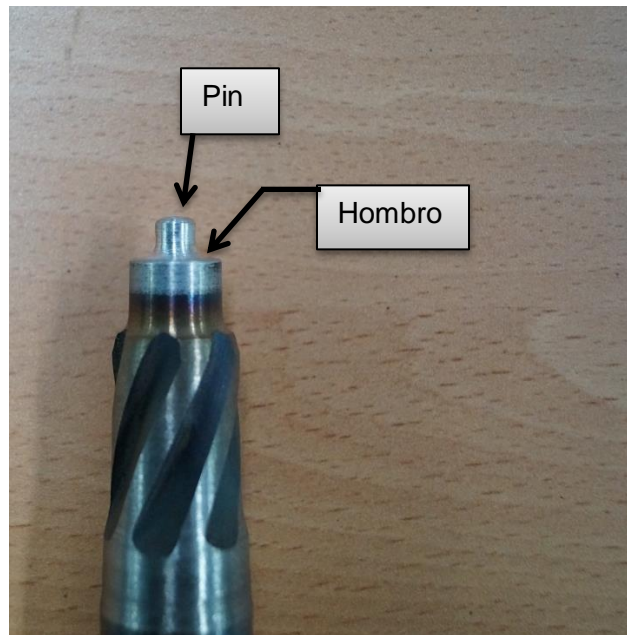


Figura (2.9) Herramienta (indentador) para método SFA.

La herramienta que gira se introduce en la zona donde convergen ambas piezas de aluminio y una vez ahí se hace pasar esta herramienta a lo largo de la junta para que así vaya uniando los materiales mientras se encuentran en estado sólido. La fricción, agitación y presión generada por dicha herramienta plastifica y forja el material circundante consolidando la unión.

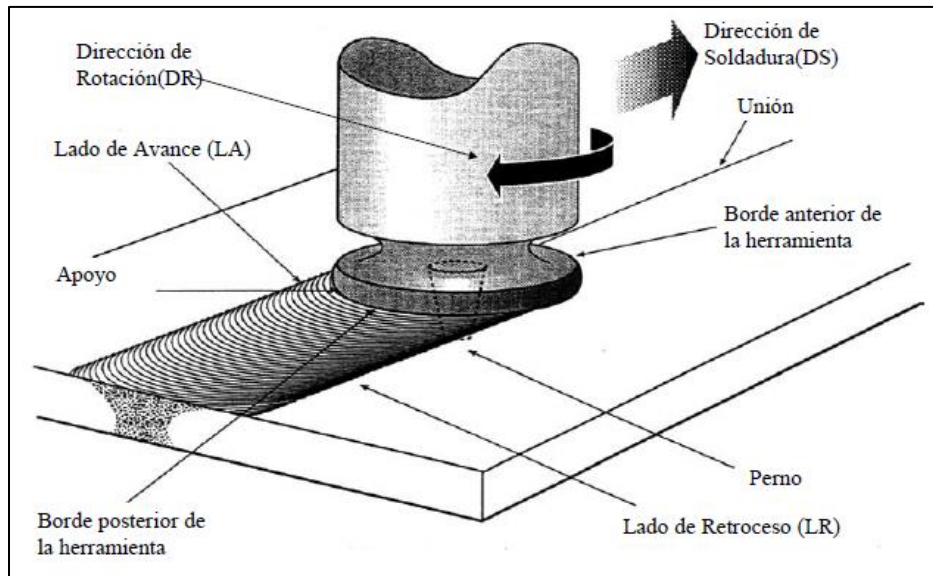


Figura (2.10) Esquema del proceso de Soldadura por Fricción Agitación (SFA). (Santiago *et al*, 2005)

Algunas aleaciones de aluminio pueden ser soldadas por el método de soldadura por resistencia, pero la preparación de las superficies son muy extensas, siendo la oxidación en las superficies el mayor problema. La SFA, por otro lado, puede ser usada en la mayoría de las aleaciones de aluminio, y la oxidación en la superficie no es impedimento para el proceso. No son requeridas las técnicas especiales de limpieza para soldar (Rhodes *et al*, 1997).

Aunque las piezas se calientan durante la SFA, la temperatura no alcanza el punto de fusión. La unión de SFA, entonces, no tiene la estructura dendrítica típica de una unida por soldadura por fusión junto con su seria degradación de propiedades mecánicas (Rhodes *et al*, 1997), de esta manera la SFA genera ventajas con respecto a los métodos convencionales de soldadura.

Conjuntamente se pueden enlistar algunas de las ventajas que presenta la soldadura por fricción agitación como se pueden ver en la siguiente tabla.

Tabla 2.4 Beneficios clave de la Soldadura por Fricción-Agitación (SFA). (Rajiv y Murray, 2007)

<b>Beneficios Metalúrgicos</b>	<b>Beneficios Ambientales</b>	<b>Beneficios Energéticos</b>
Proceso en fase-sólida	No requiere gases de protección	Se optimiza el uso de los materiales permitiendo la reducción de peso
Baja distorsión	Limpieza superficial mínima requerida	Usa solamente el 2.5% de la energía necesitada por una soldadora laser
Buena estabilidad dimensional y repetitividad	Ahorro en materiales consumibles como cable y otros gases	Reduce el consumo de combustibles por su bajo peso en industrias aeronáutica, automotriz y naval
Excelentes propiedades mecánicas en el área de la unión	No emisiones dañinas	
Estructura recristalizada fina		
Ausencia de fisuración		
Reemplaza múltiples partes unidas por cierres		
Soldadura de todo tipo de materiales y disimilares		

Por el contrario las desventajas de este procedimiento son la necesidad de firme sujeción de las piezas, producción de un hueco residual al final de la soldadura en el lugar de extracción de la herramienta, reducida versatilidad propia de un proceso automático, aplicación limitada a piezas planas o de gran radio de curvatura.

Actualmente se experimenta con la unión de otros materiales tales como el acero, titanio, cobre, magnesio, plomo, zinc, etc.



## 2.5 DUREZA

Se define la dureza de un material como su resistencia a la indentación permanente. Una buena dureza significa generalmente que el material es resistente al rayado y al desgaste. La resistencia a estos parámetros es una característica importante para muchas aplicaciones de ingeniería. (Groover, 1997)

La manera de determinar la dureza de un material es realizando ensayos de dureza y, aunque existen varios ensayos, en la presente investigación nos centraremos en aplicar el ensayo de dureza Vickers al ser uno de los más versátiles pues se puede utilizar para la mayoría de los metales porque cuenta con una de las escalas más amplias entre los ensayos.

El ensayo de dureza de Vickers, desarrollado en 1922 y antes conocido como ensayo de dureza de la pirámide de diamante, utiliza un indentador de diamante en forma de pirámide y una carga que va desde 1 kilo hasta 20 kilos. El número de dureza se indica mediante HV. Las imprecisiones obtenidas son típicamente inferiores a 0.5 mm (0.020 pulgadas) en diagonal. En el ensayo vickers da esencialmente el mismo número de dureza, independientemente de la carga, y es adecuado para el ensayo de materiales con una amplia gama de dureza, incluyendo los aceros tratados térmicamente. (Kalpakjian & Schmid, 2002)

La dureza Vickers se determina con la siguiente formula:

$$HV = \frac{1.854 F}{D^2}$$

Donde F= fuerza aplicada, (kg) y D= diagonal de la impresión hecha por el indentador (mm).

Una ventaja que presenta el micro durómetro Vickers (Figura (2.11)), es que la diagonal de un cuadrado se determina con mayor precisión que el de otras pruebas como lo es el ensayo brinell en cual utiliza el diámetro de un círculo como su indentación (Figura (2.12)).

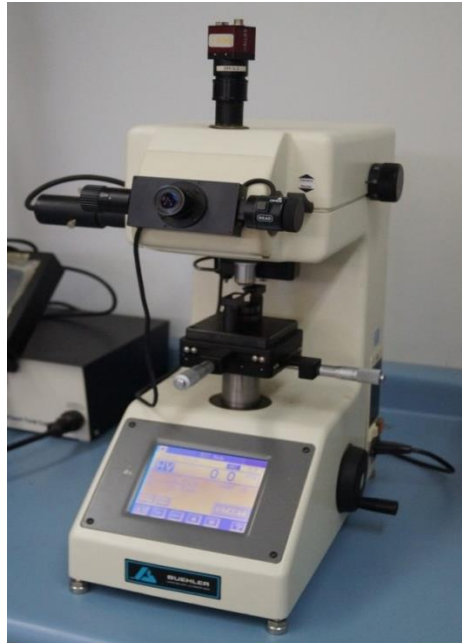


Figura (2.11) Durómetro vickers marca *buehler*. UAQ.

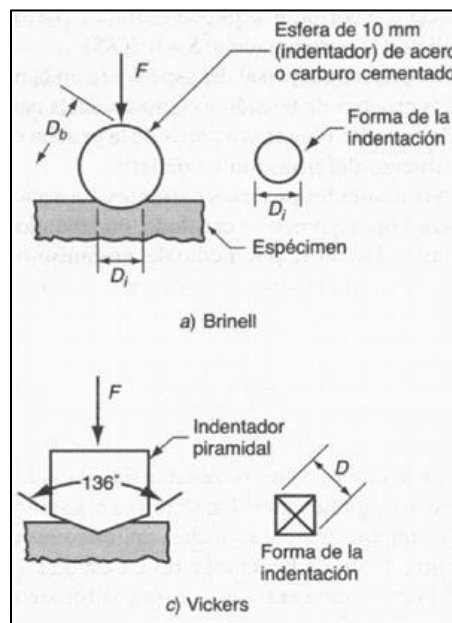


Figura (2.12) Esquema del ensayo brinell contra ensayo vickers. (Groover, 1997)

## 2.6 TAMAÑO DE GRANO Y LIMITES DE GRANO

Un trozo de metal puede contener millones de cristales individuales llamados *granos*, estos granos tienen una orientación reticular única. El tamaño de los granos está determinado, entre otros factores por el número de sitios de nucleación en el material fundido y por la rapidez del enfriamiento de la masa fundida. El tamaño de los granos es importante para los metales porque afecta sus propiedades mecánicas. Un metal con granos pequeños es preferible, desde el punto de vista del diseño, porque representa una mayor resistencia y dureza. Es también deseable en ciertas operaciones de manufactura porque significa mayor ductilidad durante su deformación y una mejor superficie del producto terminado. Entonces, cuando un trozo de metal es fundido y se enfría, en el momento de solidificación se inicia la nucleación de cristales individuales; conforme los cristales van creciendo llegan a interferir unos con otros y forman en su interface un defecto superficial llamado *límite de grano*. (Groover, 1997)

Los límites de grano constituyen zonas en las cuales los átomos están colocados de modo menos ordenado que en el interior del cristal y representan áreas anódicas. Este fenómeno explica el ataque selectivo de las superficies pulidas por los reactivos químicos con la finalidad de revelar su microestructura metalográfica. A mayor tamaño de grano corresponde menor número de límites de grano en la superficie. (Molera, 1989)

# CAPÍTULO 3

### **3 METODOLOGÍA.**

En el capítulo se presentan el proceso del desarrollo experimental de la presente investigación. Para este trabajo se necesita de la manufactura de dos mordazas para una prensa de banco, estas prensas nos servirán para tener un mejor soporte en las placas a soldar y hacer más rápido el proceso de soldadura. Como siguiente paso se verá el proceso que lleva la soldadura por fricción agitación en una fresadora CNC soldando dos placas de 2.54 X 5 X 0.635 cm. Para poder realizar las pruebas a la soldadura previamente se hizo un proceso de preparación de una pequeña pieza extraída de las pruebas de soldadura por fricción agitación, estas piezas son llamadas muestras o especímenes, la extracción se realiza con una cortadora, esta muestra se encapsula pues favorece para la manipulación del espécimen en procesos posteriores, después se desbaste y pulió para que por último se pudieran realizar las pruebas metalográficas y de micro-dureza a la soldadura.

#### **3.1 MANUFACTURA DE INDENTADORES.**

Para la manufactura de los indentadores se modificó un cortador de 1.905 cm de diámetro ( $\frac{3}{4}$  de pulgada), modificándolo en un torno paralelo para obtener el indentador de la medida que se quería. El procedimiento que se siguió para hacer cada uno de los indentadores fue sujetar el cortador de en el chuck de mordazas independientes del torno paralelo, se centró el cortador en el chuck usando un indicador de caratula y una vez centrado el cortador se usó un moto-tool con piedras de desbaste, posicionando el moto-tool en la torreta porta herramientas. Con las piedras se desbastaron los cortadores hasta obtener la forma y dimensiones que se requerían.

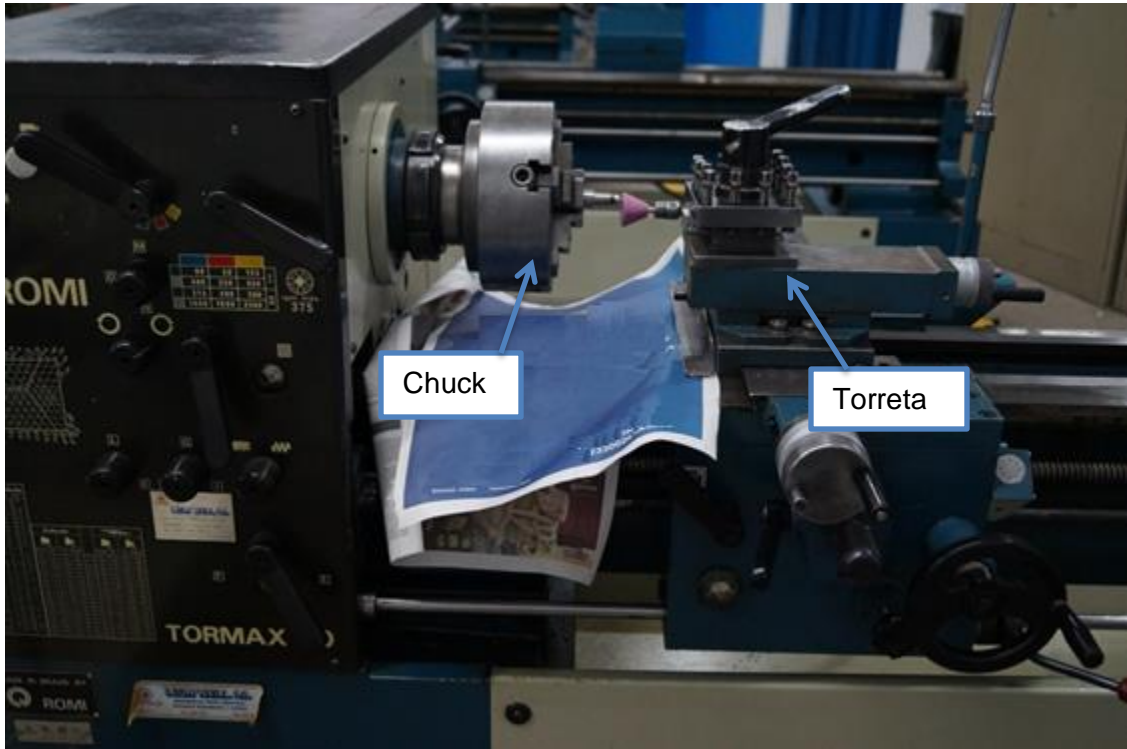


Figura (3.1) Manufactura de indentadores.

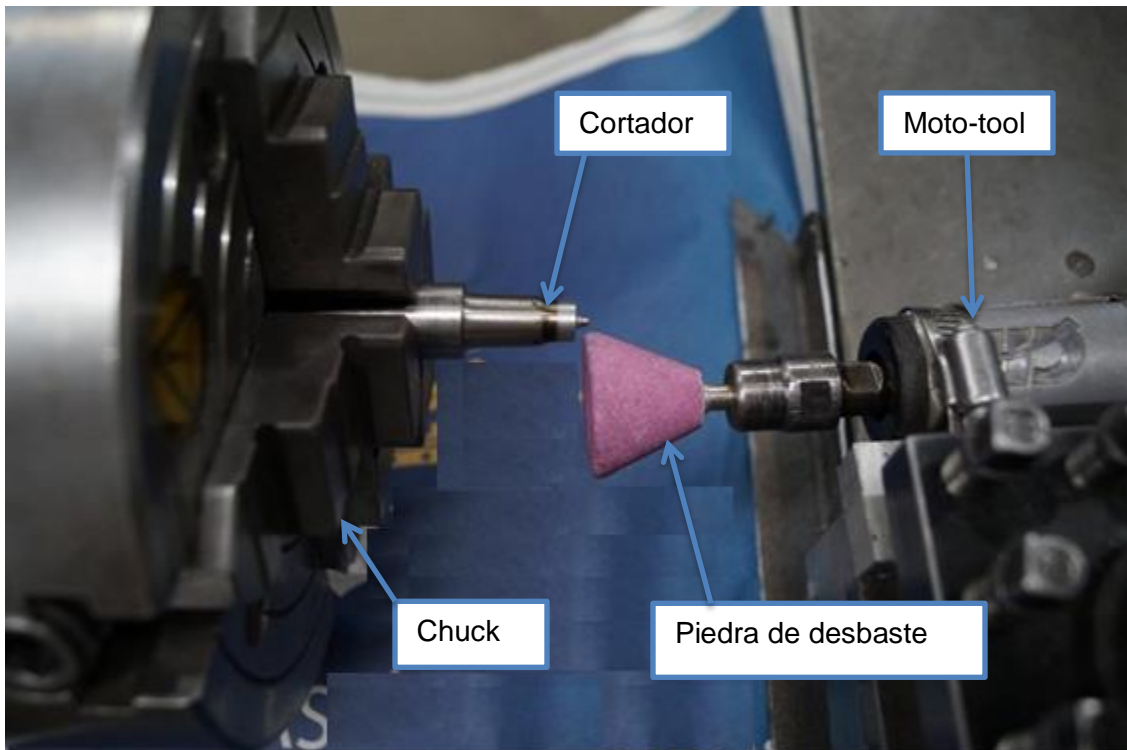


Figura (3.2) Manufactura de indentadores.

En las figuras siguientes se observa a ambos indentadores en su etapa final.



Figura (3.3) Indentador 5 mm x 5 mm.



Figura (3.4) Indentador 3 mm x 3 mm.

### 3.2 MANUFACTURA DE MORDAZAS.

La sujeción de las placas al soldar aluminio es, a veces, un obstáculo en cuanto al avance de este tema de investigación por diferentes razones. Una de ellas es que al contar con una mala sujeción se tendrán resultados deficientes, además también se tendría que repetir el proceso de sujeción y soldadura hasta obtener una adecuada unión, consecuentemente esto trae consigo pérdidas económicas, de tiempo, entre otras. Por lo cual uno de los objetivos de este trabajo es fabricar mordazas que permitieran una sujeción de piezas más práctica y que al mismo tiempo asegurara que las piezas tuvieran una mejor sujeción contrario a como se venía haciendo anteriormente usando clamps.

Se diseñaron las mordazas como en la figura (3.5) con la finalidad que ofreciera la sujeción de manera horizontal con la prensa y verticalmente con los opresores que tienen en cada mordaza.

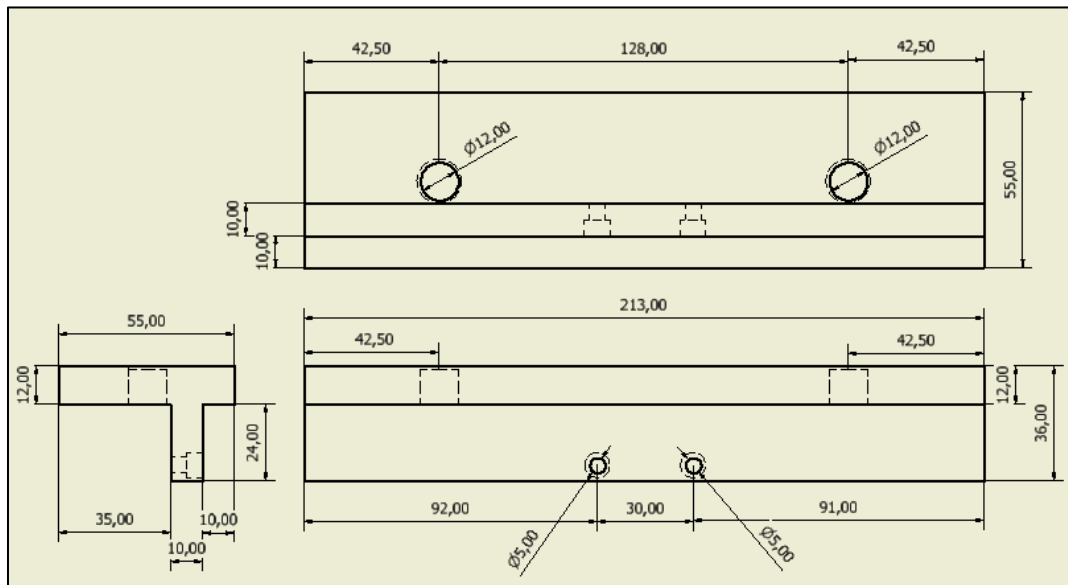


Figura (3.5) Diseño de mordazas de sujeción.

En este paso se desbasto una pieza de metal usando una fresadora universal marca Bridgeport, la pieza de metal debe quedar con la forma y medidas que se muestran en la figura anterior. En las figuras siguientes podemos apreciar algunos de los pasos del proceso de la manufactura de las mordazas.





Figura (3.6) Proceso de manufactura de mordazas



Figura (3.7) Proceso de manufactura de mordazas.

Por ultimo las mordazas terminadas se montan en la prensa.

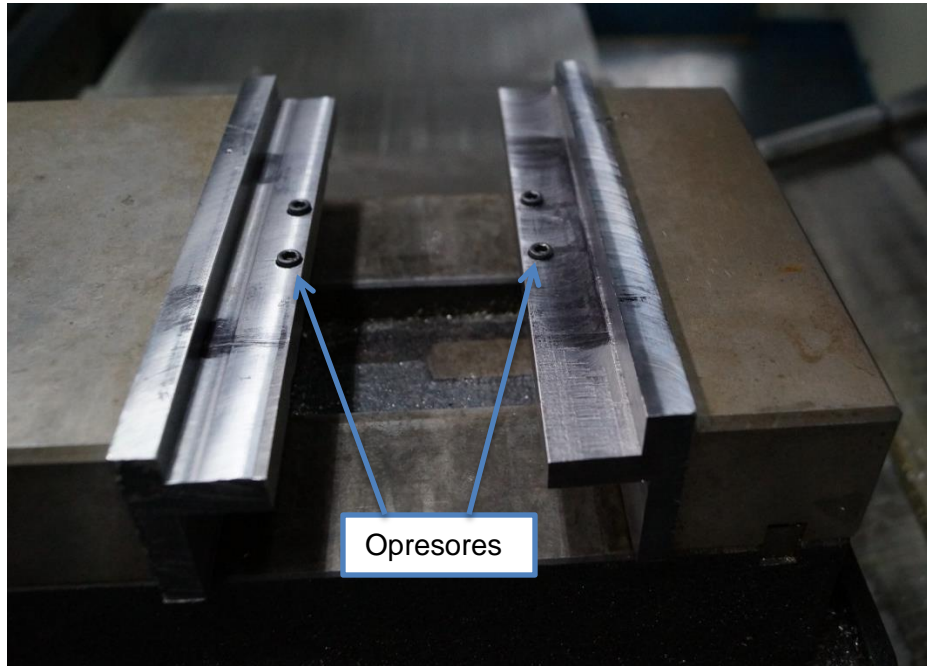


Figura (3.8) Vista superior de las mordazas.

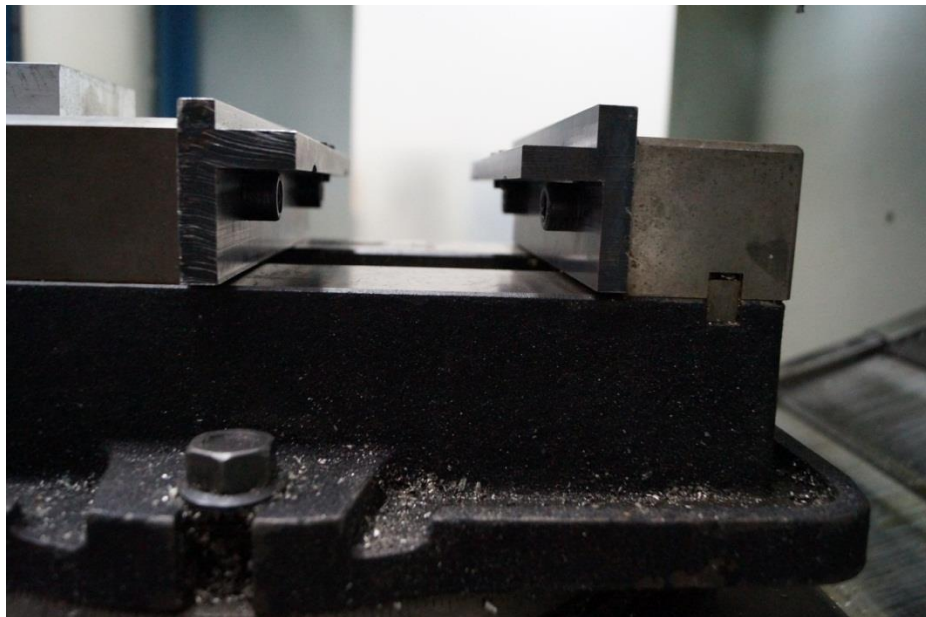


Figura (3.9) Vista lateral de las mordazas.

### 3.3 REALIZACIÓN DE LA SOLDADURA EN CNC

#### 3.3.1 Preparación del material

Para llevar a cabo el método de soldadura por fricción-agitación primero se preparó el material a ser soldado, para esto se cortó una solera de aluminio AA-7075 con las siguientes dimensiones: 5.80 cm de ancho, por 5 cm de largo y por 0.635 cm de espesor; como se muestra más adelante.

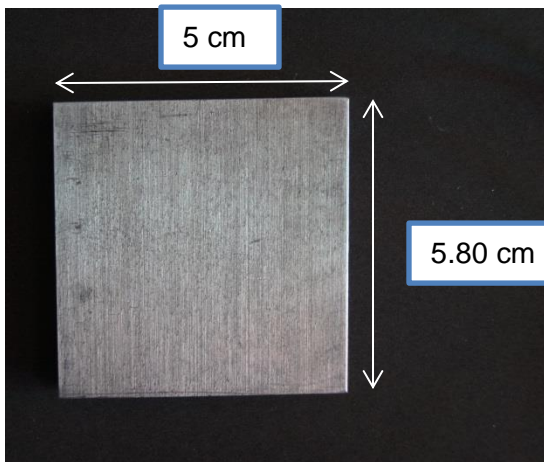
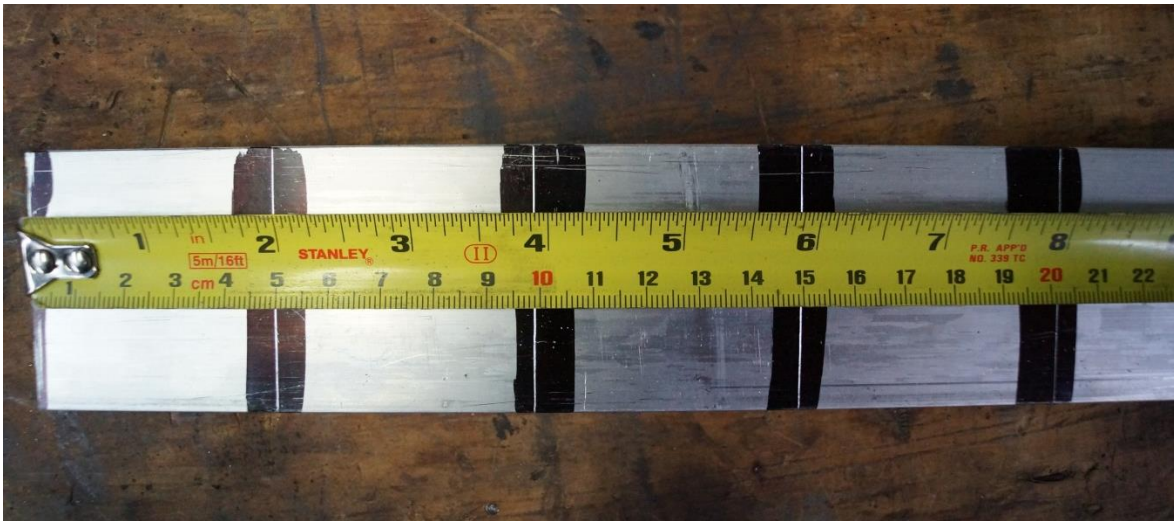


Figura (3.10) Placas para soldar.

### 3.3.2 Sujeción

Como siguiente paso se colocaron las piezas en la prensa usando las mordazas que se fabricaron previamente, para este propósito se usó adicionalmente un bloque de aluminio (Figura (3.11) con dimensiones de 2.54 cm (1 pulgada) de espesor y 9.525 cm ( $3 \frac{3}{4}$  pulgadas) de largo y 10.16 cm (4 Pulgadas) de ancho, como base para evitar un posible impacto de la maquina CNC o del indentador contra la prensa. Las piezas queda sujetas horizontalmente contra las mordazas y verticalmente contra los opresores con que cuentan las mordazas, tal y como se muestra en la Figura (3.12).

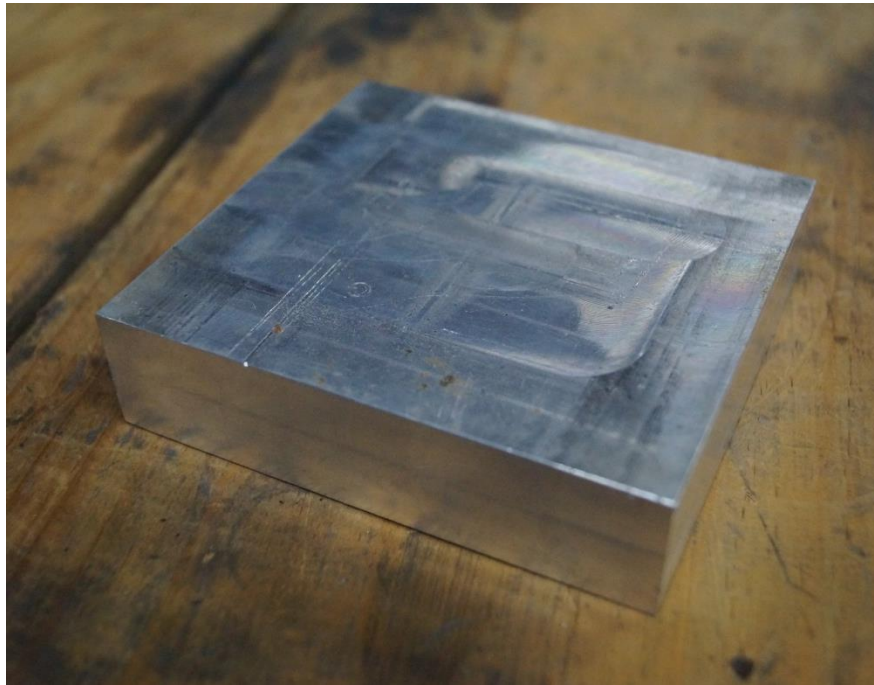


Figura (3.11) Bloque de aluminio para soporte.

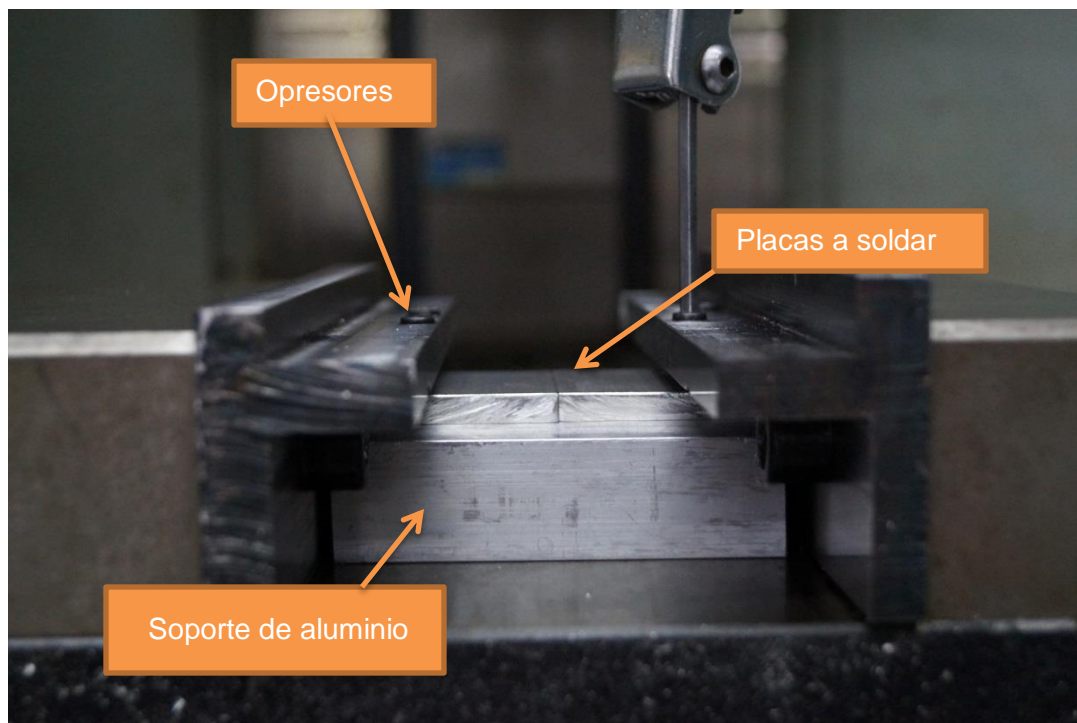


Figura (3.12) Sujeción de las placas a soldar.

### 3.3.3 Torque

El tornillo de la prensa se torqueo para asegurar la sujeción de las piezas, ya que se tomó como antecedente la investigación de Leal (2012) en la cual se observó que en varias de sus pruebas se presentaba poro a lo largo o en alguna parte del cordón, se piensa que esto se debe a deficiencias en la sujeción; por lo tanto en la presente investigación se implementa una prensa con mordazas diseñadas y manufacturadas específicamente para asegurar una sujeción rápida y eficaz aplicando a esta prensa un torque que garantice un mejor prensado.

Los torques aplicados a la prensa se obtuvieron de por el método de prueba y error, y mediante la observación y revisión de la investigación de Burgos, *et al* (2010).

Como primer paso se aplicaron torques pequeños, observando que el torque máximo que se proporciona con la manivela de la prensa es aproximadamente de 50 lb/pie, de esta manera, se comenzó por aplicar torques

de 60 lb/pie. Pero al terminar de soldar parecían aflojarse las mordazas pues presentaban poro excesivamente grande

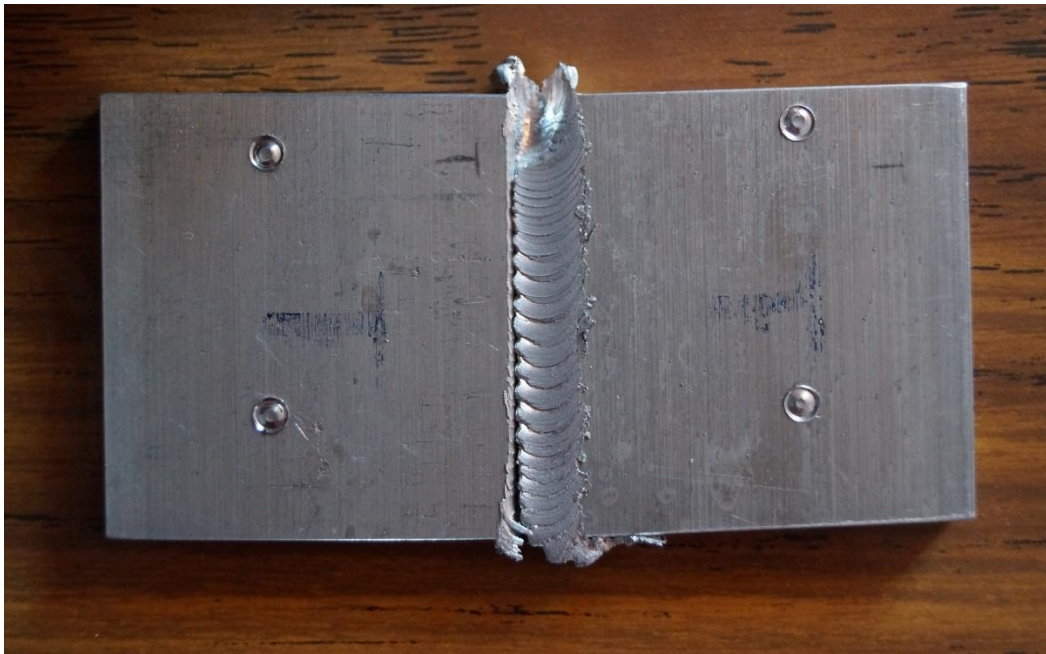


Figura (3.13) Soldaduras con torque bajo.

Por lo tanto se decidió aumentar el torque, se aplicaron torques de hasta 110 lb/pie pero el torquímetro parecía estar en su límite y se veía propenso a dañarse, así que se optó por conservar un rango de torques de entre 70 a 90 lb/pie, como los podemos observar en la Tabla 3.1, con los cuales se ofrecían los mejores resultados y además el torquímetro trabajaba sin dañarse.

### 3.3.4 Soldadura

Una vez que se tenían sujetas las piezas en la prensa se procedió a montar el indentador/herramienta en el usillo de la fresadora CNC, acto seguido se ubica el usillo de la fresadora en el centro donde convergen ambas piezas de aluminio. Ahora el usillo se enciende a una velocidad cualquiera con el propósito de colocar el hombro del indentador justo a roce contra las placas de aluminio, además que al tener el usillo encendido se evita un daño mayor a la herramienta o bancada al tener un impacto accidental. El indentador se coloca de esta forma

pues el hombro evita que el material batido salga de la zona del cordón o que exista una mayor probabilidad de poro o separación de material al momento de ser soldado.

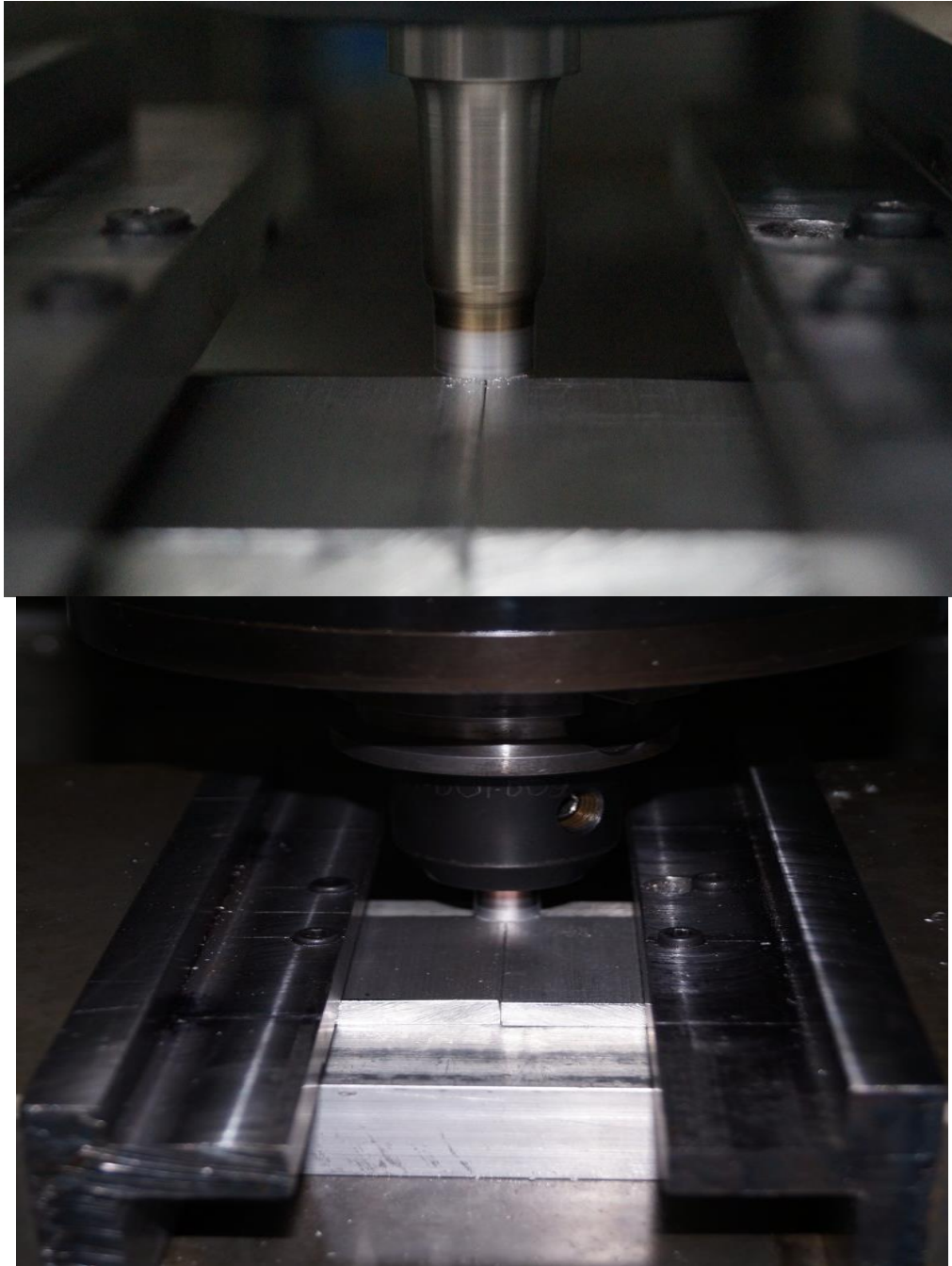


Figura (3.14) Hombro del indentador a roce con las placas a soldar.

Cuando ya se tiene a roce todo está listo para soldar, solo falta programar las condiciones en las que se soldaran como son la velocidad de avance y la velocidad de giro; así que se programa en la maquina CNC dos líneas de comandos (Figura (3.15)).

La primera es la velocidad de giro del usillo, donde:

- **S** es la velocidad de giro (Spindle Speed).
- **1500** es la variable que tendrá S
- **M3** es el sentido de giro que tomara el usillo.

La segunda es la velocidad de avance, donde:

- **G01** representa un movimiento rápido.
- “**Y**” es el eje en el que se moverá la bancada y **-70** la distancia en mm que se moverá en ese eje.
- **F** (Feed) representa la velocidad de avance y **30** es la variable de la velocidad en la que avanzara la bancada según matriz de experimentos (Tabla 3.1).

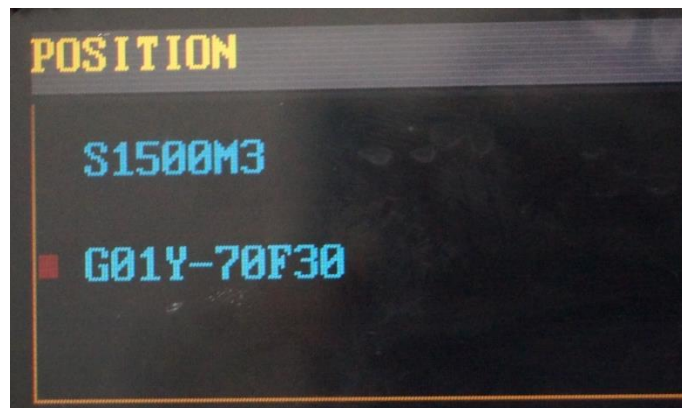


Figura (3.15) Programa en Fresadora CNC.

Se realizaron un total de 48 pruebas, 12 con cada indentador repitiendo las mismas velocidades de giro y avance para cada indentador.



Tabla 3.1 Matriz parcial de experimentos.

Prueba	Velocidad de Avance	Velocidad de Giro	Torque
1	2 cm/min	1000 rpm	70 - 90 lb*ft
2	2 cm/min	1500 rpm	70 - 90 lb*ft
3	2 cm/min	2000 rpm	70 - 90 lb*ft
4	2 cm/min	2500 rpm	70 - 90 lb*ft
1	2.5 cm/min	1000 rpm	70 - 90 lb*ft
2	2.5 cm/min	1500 rpm	70 - 90 lb*ft
3	2.5 cm/min	2000 rpm	70 - 90 lb*ft
4	2.5 cm/min	2500 rpm	70 - 90 lb*ft
1	3 cm/min	1000 rpm	70 - 90 lb*ft
2	3 cm/min	1500 rpm	70 - 90 lb*ft
3	3 cm/min	2000 rpm	70 - 90 lb*ft
4	3 cm/min	2500 rpm	70 - 90 lb*ft

### 3.4 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.

Para revelar los detalles micro-estructurales y llevar acabo las pruebas de micro dureza es necesario hacer previamente la preparación de muestras o también conocidas como especímenes metalográficos de las probetas de soldadura. Estos especímenes siguen una secuencia de pasos que se verán a continuación.

### 3.5 CORTE DE LA MUESTRA.

Como primer paso se extrae una muestra de la probeta de soldadura que se realizó, para ello se secciona la probeta (Figura (3.17) utilizando una cortadora de disco abrasivo para que de esta manera se obtenga el espécimen de un tamaño adecuado. La cortadora que es usada es una *abrasimet 2* marca buehler la cual utiliza refrigerante especial.



Figura (3.16) Cortadora de disco abrasivo *abrasimet 2* marca *buehler*. UAQ.



Figura (3.17) Probeta seccionada.

En la figura siguiente se aprecia cómo quedó un espécimen después de ser cortado.

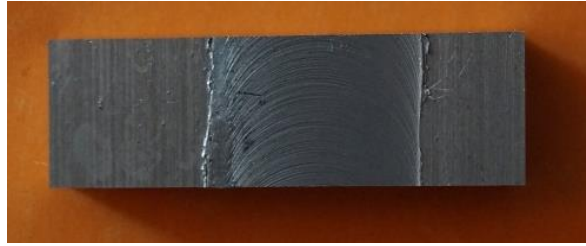


Figura (3.18) Espécimen vista superior de la soldadura.



Figura (3.19) Espécimen vista lateral de la soldadura.

Pero el espécimen o muestra obtenida después del corte es muy pequeña para manipularla con facilidad para lo cual está el siguiente paso.

### **3.6 MONTAJE O ENCAPSULADO DE LAS MUESTRAS**

En esta etapa se usan las muestras cortadas del paso anterior y se hace uso de la máquina para encapsular *simplimet 2* marca buehler. Para poder encapsular el material la maquina utiliza una resina o polvo fenólico, mejor conocida como baquelita, sensible a la presión y a la temperatura para máxima rapidez de montaje y economía (Figura (3.20)).

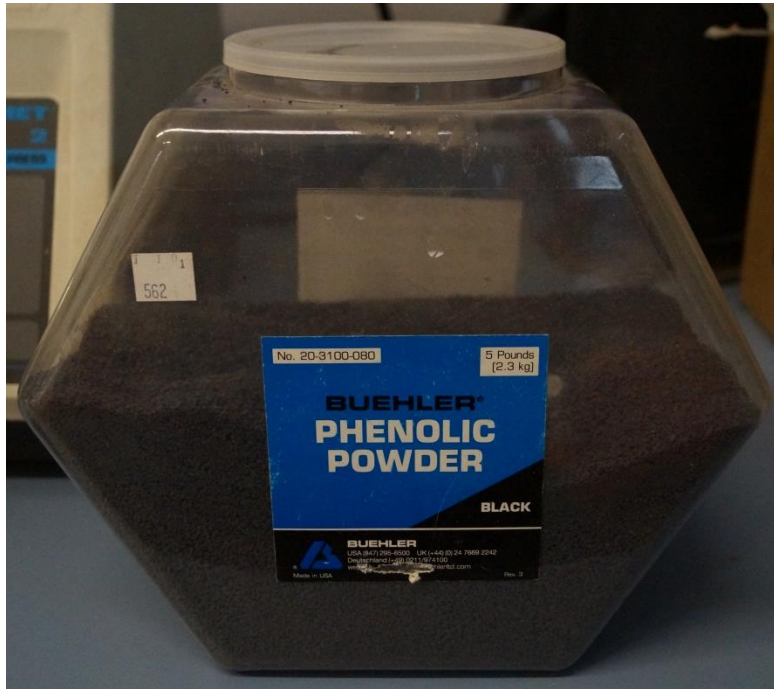


Figura (3.20) Polvo fenólico marca *buehler*. UAQ

El proceso de montaje consiste básicamente en colocar la muestra en el tubo superior de la maquina junto con el polvo fenólico/resina (Figura (3.21)). Al tubo se le aplica calor mediante un termostato, además se aplica una presión a la muestra con el fin de derretir y comprimir la resina, la presión debe mantenerse constante durante todo el proceso de calentamiento.

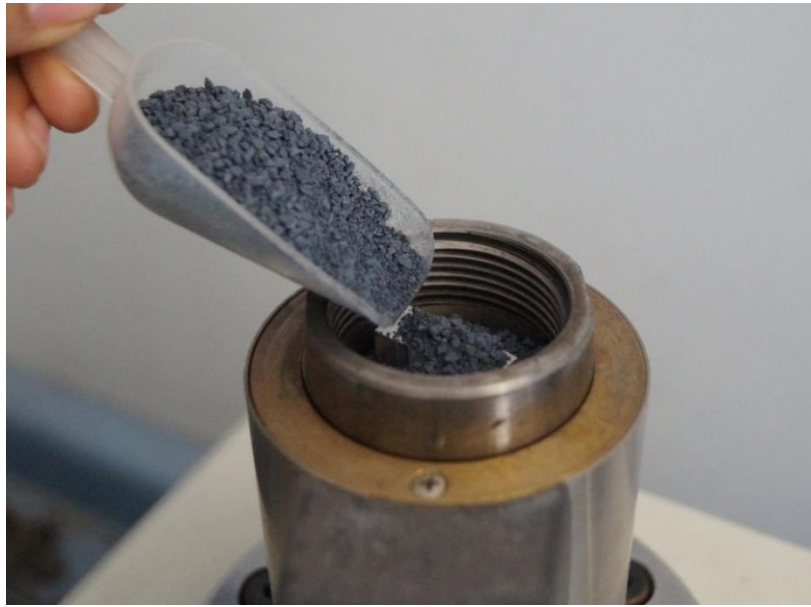


Figura (3.21) Muestra junto con resina.

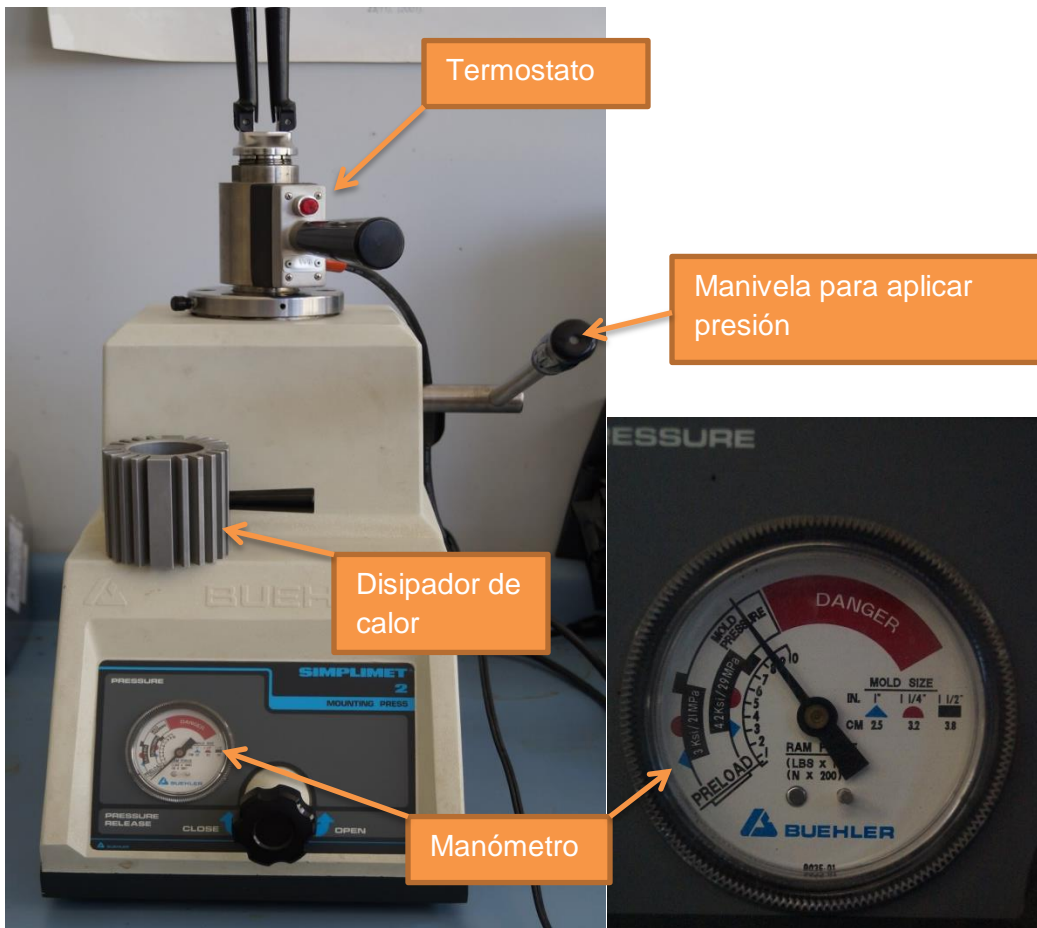


Figura (3.22) Maquina para encapsular *simplimet 2* y su manómetro de presión.

El termostato cuenta con una luz indicadora, la luz permanece encendida desde que la encendemos, pero una vez que se apaga la luz indicadora se deja cinco minutos más el termostato para posteriormente apagarlo. El proceso anterior dura alrededor de 15 minutos y una vez transcurrido este tiempo se retira el termostato y se coloca un disipador de calor para enfriar la pieza y poder retirarla. Este paso proporciona soporte al espécimen y protección a sus bordes. La muestra encapsulada luce de la siguiente manera.



Figura (3.23) Muestra encapsulada.

### **3.7 DESBASTE O ESMERILADO FINO.**

Para remover material y eliminar defectos superficiales que quedan sobre el corte, así como polvo fenólico que haya quedado en la superficie, se desbasta la muestra con el fin de dejar una superficie totalmente plana. En este esmerilado se utiliza un aparato que consiste en una serie de lijas de diferentes tamaños de grano. Este aparato no es más que una esmeriladora manual, usa papeles abrasivos en secuencia descendente de tamaño de partícula, en rangos de malla de 240, 320, 400 y 600.



Figura (3.24) Esmeriladora manual *handimet 2* marca *buehler*. UAQ

Para hacer el desbaste se empieza de la lija más gruesa (240) a la más delgada (600). Se usan solo con movimientos rectos de enfrente hacia atrás y una vez que se ve que la muestra tiene líneas en un solo sentido a causa del lijado significa que se puede pasar a la siguiente lija pero ahora la muestra debe ser rotada 90 grados y repetimos la misma operación hasta terminar con las cuatro lijas. En cada paso, el esmerilado debe extenderse más allá del punto en que las rayas del paso anterior ya no sean visibles, para eliminar cualquier deformación remanente.



Figura (3.25) Dirección de desbaste en lijas.

### 3.8 PULIDO.

Es un paso en el cual a las probetas que ya se desbastaron se les da un acabado superficial más fino. Esta operación ha ido cambiando con el paso del tiempo, actualmente existe maquinaria que hace esta operación de manera automática, pero el principio es el mismo, la pieza a examinar debe tener un acabado superficial excelente o también conocido como acabado espejo. Para lograr este acabado se procede a hacer el pulido fino o también conocido como



acabado espejo el cual consiste en utilizar un abrasivo fino llamado alúmina ( $Al_2O_3$ ), la cual se coloca sobre un disco giratorio cubierto de un paño y ejerciendo presión entre la pieza y el paño se logra el acabado. En este caso se hace uso de una maquina llamada *Ecomet 6* marca *buehler*. Esta máquina consta de dos platos giratorios y un cabezal con husillo; los platos giratorios están cubiertos de paños de medio pelo y al cabezal se le pueden adaptar accesorios para realizar el proceso de pulido de manera automática.



Figura (3.26) Máquina de pulido fino *ecomet 6* marca *buehler*. UAQ

El procedimiento a seguir para hacer el pulido consiste en colocar las muestras encapsuladas al porta especímenes, con el lado de la muestra hacia abajo, el cual va sujeto al husillo, consultando la hoja de datos de la maquina (Tabla 3.2) determinamos y programamos la carga y la velocidad recomendada para el pulido de las probetas.



Figura (3.27) Proceso de pulido fino.

Tabla 3.2 Hoja de datos, máquina de pulido fino.

Tamaño alúmina.	Carga en libras.	Velocidad rpm.	Tiempo en minutos.
6 $\mu$ m	6	140	6
1 $\mu$ m	6	150	5

Terminado este paso las probetas resultaban de la siguiente manera.



Figura (3.28) Probetas con acabado espejo.

### 3.9 PRUEBAS DE MICRO-DUREZA

Completados los pasos anteriores se tienen las probetas listas para hacer las pruebas correspondientes, así que se procede a hacer las pruebas de micro-dureza.

Estas pruebas se llevaron a cabo en un durómetro modelo MMT-3 marca buehler, en este equipo se midió la dureza del material en unidades Vickers.



Figura (3.29) Durómetro *MMT-3* marca *buehler*.

Las pruebas de micro dureza se realizaron a tres líneas de profundidad; la primera a 1 mm, la segunda a 2 mm y la tercera a 3 mm de profundidad de la superficie de la soldadura, con los intervalos y distancias siguientes entre cada una y para cada uno de los indentadores se observan en la Figura (3.30), Figura (3.31), Figura (3.32) y Figura (3.33); las distancias para los primeros dos indentadores se obtuvieron de forma que fueran lo más similares al patrón que se siguió en la investigación de Leal (2012).

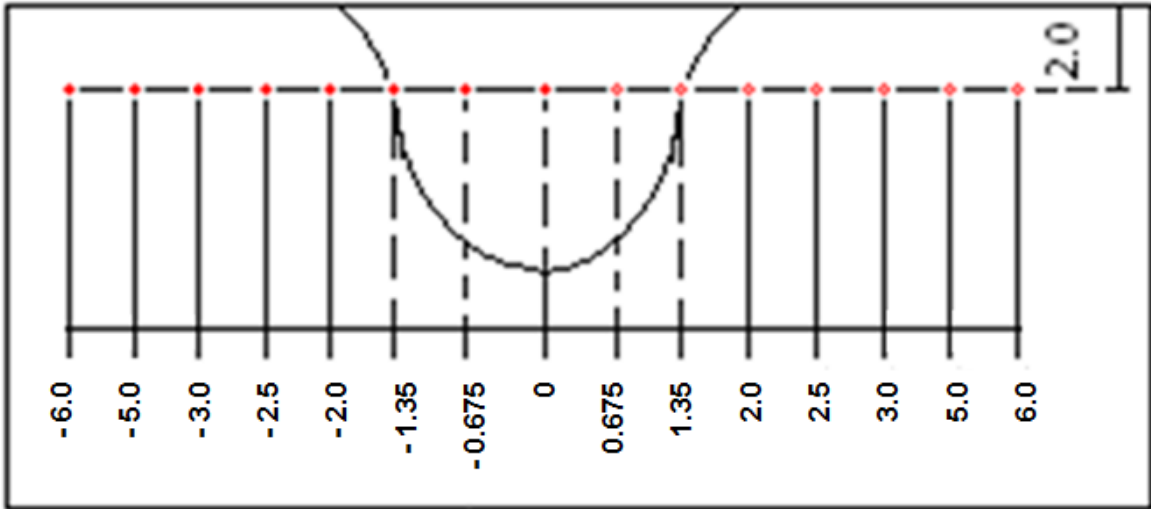


Figura (3.30) Distancias en mm para indentador 3 mm x 3 mm.

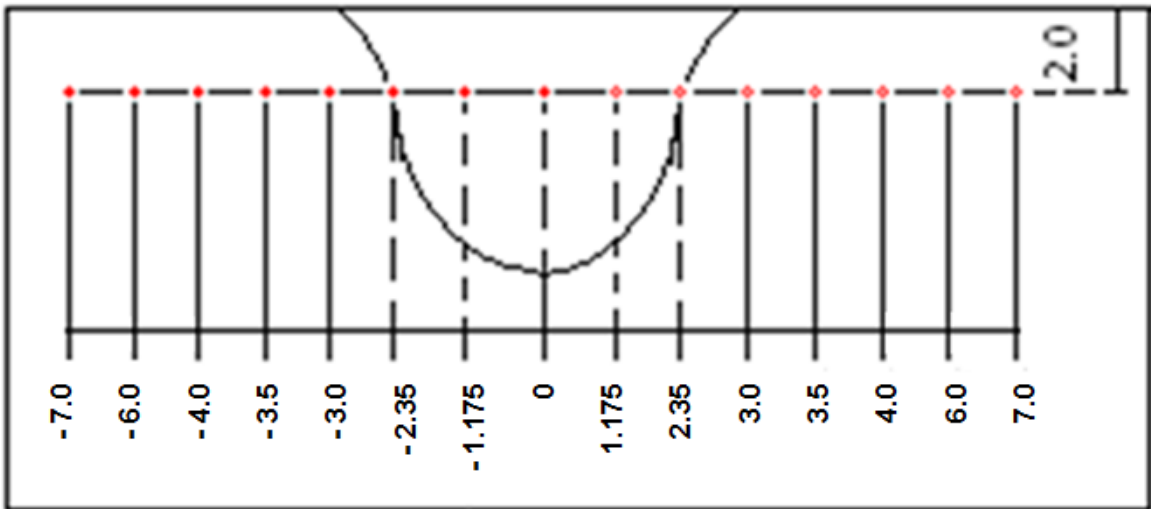


Figura (3.31) Distancias en mm para indentador 5 mm x 5 mm.

Para las distancias de los indentadores de 4 mm x 4 mm y 6 mm x 6 mm se usaron los mismos parámetros de distancias que se usaron en la investigación de Leal (2012) con el propósito de hacer la comparativa respectiva con los resultados de la investigación pasada.

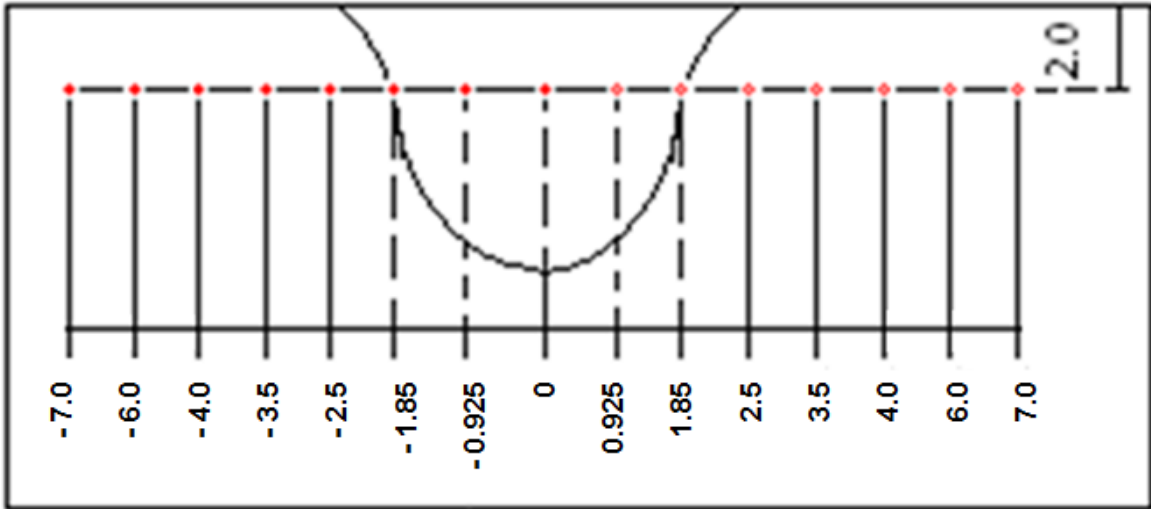


Figura (3.32) Distancias en mm para indentador 4 mm x 4 mm.

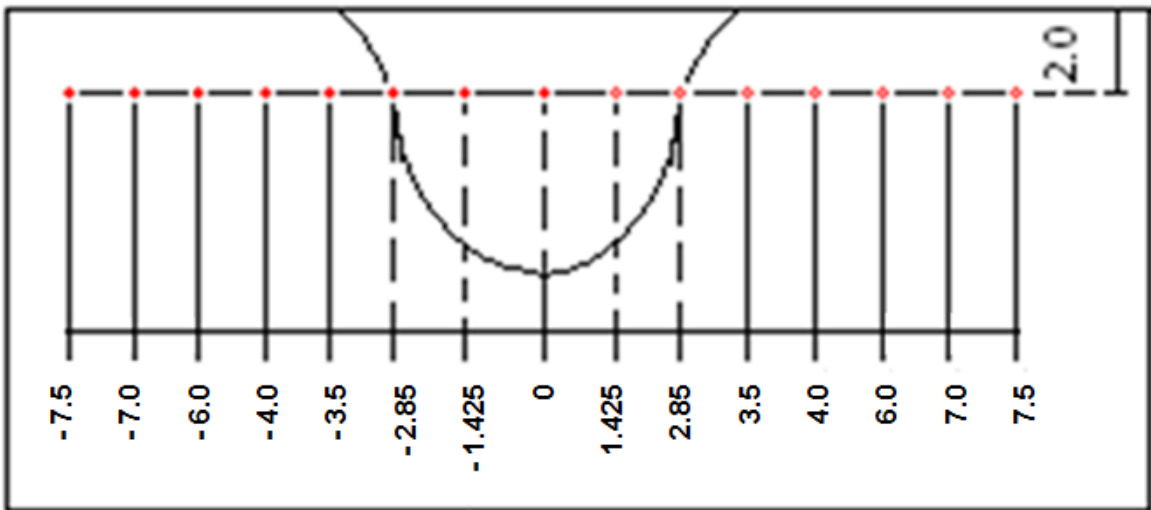


Figura (3.33) Distancias en mm para indentador 6 mm x 6 mm.

### 3.10 REVELAR DE TAMAÑO DE GRANO.

Por último se intentara revelar el tamaño de grano, para lo cual se utilizara el reactivo keller, este reactivo se compone de ácido nítrico ( $HNO_3$ ), ácido clorhídrico ( $HCL$ ), ácido fluorhídrico ( $HF$ ) y agua destilada en las cantidades que se muestran en la figura siguiente.

Reactivos para Ataque de Aleaciones de Aluminio	
0.1-10 mL de HF 90-100 mL de agua destilada	Reactivo de uso general. Ataca el $FeAl_3$ , y define otros constituyentes. El contraste entre granos es usualmente pobre. La concentración 0.5% de HF es muy popular. Úsese por frotamiento.
<b>Reactivo de Keller</b> 2.5 mL de $HNO_3$ 1.5 mL de HCl 1 mL de HF 95 mL de agua destilada	Reactivo de uso general muy popular para <b>Al</b> y aleaciones de <b>Al</b> , excepto las aleaciones con alto contenido de <b>Si</b> . Frote la muestra por 10-20 segundos. Enjuague en agua caliente. Puede seguirse con un baño de $HNO_3$ concentrado. Define todos los constituyentes comunes, revela los límites entre granos en ciertas aleaciones.

Notas: Tabla de Reactivos \*En todos los reactivos cuando se especifica agua, se deberá usar agua destilada. \*\*Para mejores resultados se deberán usar químicos, ácidos, bases, solventes, etc. de grado reactivo. Use campanas extractoras, anteojos de seguridad, guantes y cualquier otro equipo para asegurar la adecuada seguridad en el laboratorio. En particular se debe tener cuidado al trabajar con HF, ya que es un químico muy fuerte. Para quienes no estén familiarizados con los procedimientos seguros en el laboratorio, se recomienda altamente el entrenamiento.

\*\* Reproducido de Vander Voort, George: "Metallography Principles and Practice". ASM International Materials Park, OH. 1996.

Figura (3.34) Reactivos para ataque de aleaciones de aluminio.

El procedimiento para revelar el tamaño de grano es el siguiente (Figura (3.35):

- 1) Se frota la muestra por 20 segundos con el reactivo keller.
- 2) Se enjuaga la muestra con agua caliente.
- 3) Se sumerge la muestra en ácido nítrico durante 15 segundos.
- 4) Se enjuaga la muestra con alcohol.
- 5) Se seca con aire caliente.



Figura (3.35) Procedimiento para revelar tamaño de grano.



Por último se capturan imágenes de las muestras utilizando un microscopio marca Nikon modelo epiphot 200, este usa una interfaz de comunicación con la PC lo cual permite obtener la imagen. El microscopio cuenta con lentes de 5x, 10x, 20x, 50x y 100x con los cuales es posible observar el tamaño de grano de las muestras.

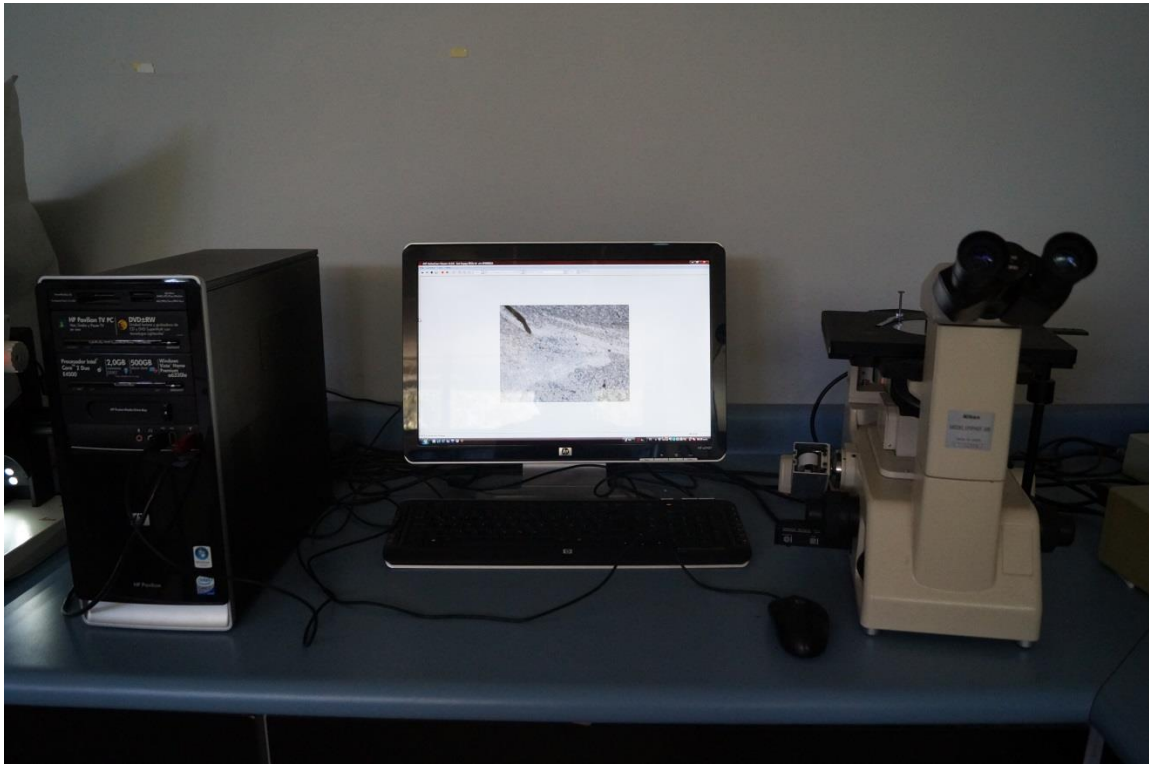


Figura (3.36) PC y microscopio Nikon epiphot 200.

# CAPÍTULO 4

## 4 EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan las pruebas realizadas que sustentan el desarrollo de este trabajo. Con el fin de comprobar la veracidad de las pruebas de micro dureza estas se realizaron a tres líneas de profundidad: 1, 2 y 3 mm desde la superficie del cordón para indentadores de 3, 4 y 5 mm de diámetro. Y para el indentador de 6 mm se realizaron tres líneas de pruebas a 2, 3 y 4 mm las cuales después de promediaron.

Se procedió a hacer las pruebas de micro-dureza montando las probetas en el durómetro y se aproximó a las coordenadas de la muestra. Los resultados se muestran a continuación clasificados por la velocidad de avance y comparados entre si contra los diferentes velocidades de giro. Adicionalmente se intentó revelar el tamaño de grano y, aunque no fue posible revelar el tamaño de grano a todas las muestras, algunos resultados fueron satisfactorios, los cuales se reportan también al final del presente capítulo.

#### 4.1 INDENTADOR 3 mm X 3 mm.

##### 4.1.1 2.0 cm/min Velocidad de avance.

En la Tabla 4.1 se pueden observar los valores del ensayo de micro-durezas obtenidas en el durómetro (MMT-3 Micro-durómetro). Estos valores corresponden a las probetas cuyos parámetros fueron los siguientes: medidas de indentador 3X3 mm, velocidad de avance de bancada 2.0 cm/min y velocidades de giro de 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm y 2500 rpm.

Tabla 4.1 Prueba micro-dureza. Indentador 3 mm y 2.0 cm/min de avance.

Zona de análisis	2.0 cm/min - Indentador 3 mm x 3 mm				
	Velocidades de giro				
	1000 rpm	1500 rpm	2000 rpm	2500 rpm	
<b>-6.0</b>	150.83	156.43	132.57	122.47	Dureza en HV
<b>-5.0</b>	145.73	154.00	117.37	115.30	
<b>-3.0</b>	145.27	154.27	114.03	107.30	
<b>-2.5</b>	145.00	151.73	107.17	112.17	
<b>-2.0</b>	136.93	151.10	109.77	113.87	
<b>-1.35</b>	143.00	149.53	115.30	114.80	
<b>-0.675</b>	155.00	155.85	118.83	126.00	
<b>0.0</b>	132.25	166.00	119.83	130.33	
<b>0.675</b>	131.83	158.40	120.33	116.37	
<b>1.35</b>	148.67	135.67	112.93	109.90	
<b>2.0</b>	148.20	146.23	112.80	108.60	
<b>2.5</b>	144.47	151.90	112.70	108.70	
<b>3.0</b>	149.83	157.93	96.80	110.03	
<b>5.0</b>	150.83	159.23	118.37	118.77	
<b>6.0</b>	155.4	159.5	127.7	133.9	

En la Figura (4.1) se muestran los valores de la Tabla 4.1, graficados:

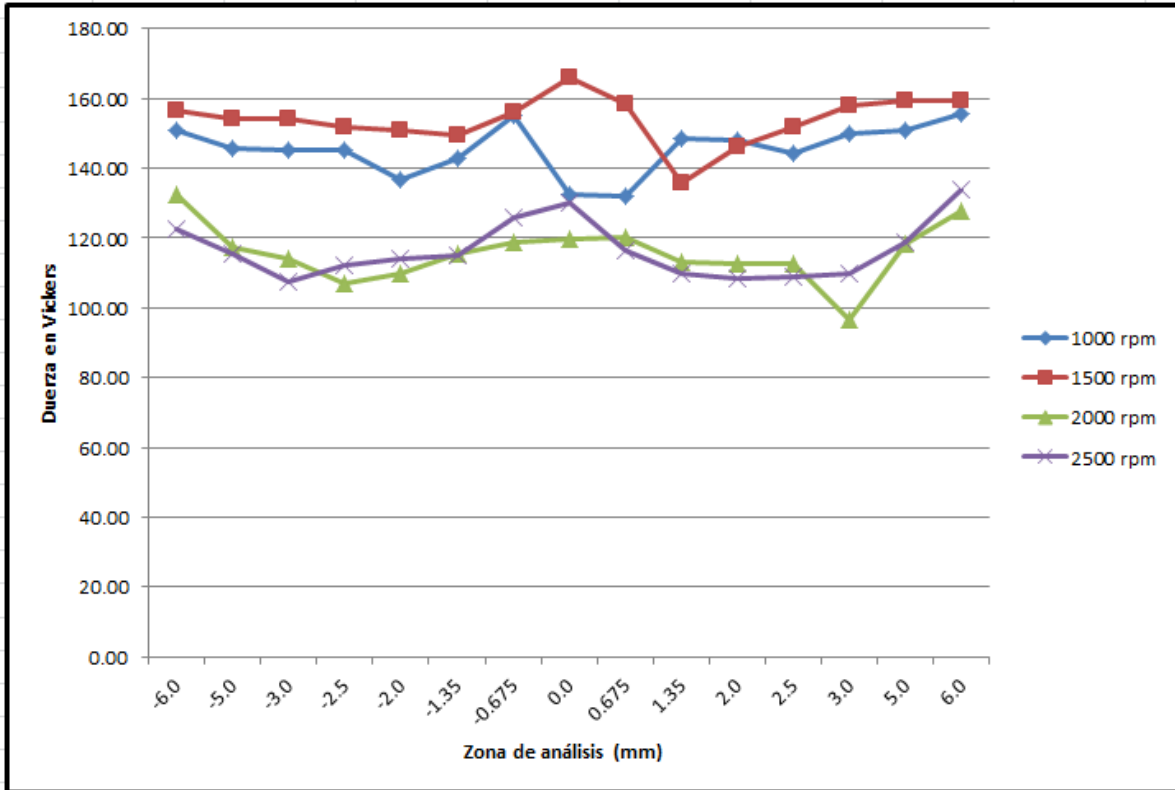


Figura (4.1) Grafica micro-dureza. Indentador 3 mm y 2.0 cm/min de avance.

Se observan buenos resultados en todas las probetas, de manera visual no se veían defectos en la soldadura y en las muestras el poro que se presentaba era mínimo.

Con el este indentador y a esta velocidad de avance, aunque para revoluciones bajas se tiene una dureza mayor, la prueba de 2000 revoluciones muestra los mejores resultados tomando en cuenta un poro casi nulo y una buena dureza.

#### 4.1.2 2.5 cm/min Velocidad de avance.

En la Tabla 4.2 se pueden observar los valores del ensayo de microdurezas obtenidas en el durómetro (MMT-3 Micro-durómetro). Estos valores corresponden a las probetas cuyos parámetros fueron los siguientes: medidas de indentador 3X3 mm, velocidad de avance de bancada 2.5 cm/min y velocidades de giro de 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm y 2500 rpm.

Tabla 4.2 Pruebas micro-dureza. Indentador 3 mm y 2.5 cm/min de avance.

Zona de análisis	2.5 cm/min - Indentador 3 mm x 3 mm				
	Velocidades de giro				
	1000 rpm	1500 rpm	2000 rpm	2500 rpm	
<b>-6.0</b>	143.00	137.07	137.43	134.83	Dureza en HV
<b>-5.0</b>	149.00	124.97	128.93	127.17	
<b>-3.0</b>	146.60	112.50	116.83	113.50	
<b>-2.5</b>	140.33	114.47	99.70	105.17	
<b>-2.0</b>	137.90	113.83	108.80	111.33	
<b>-1.35</b>	151.50	116.57	96.73	111.83	
<b>-0.675</b>	159.00	124.07	120.80	107.23	
<b>0.0</b>	148.33	121.63	112.93	119.00	
<b>0.675</b>	138.50	122.33	117.93	118.33	
<b>1.35</b>	128.33	111.83	114.53	123.97	
<b>2.0</b>	141.00	117.20	111.80	117.50	
<b>2.5</b>	148.00	117.87	105.03	107.83	
<b>3.0</b>	121.33	119.63	113.77	115.33	
<b>5.0</b>	154.33	132.20	120.63	118.87	
<b>6.0</b>	153.5	136.23	123.1	132.67	

En la Figura (4.2) se muestran los valores de la Tabla 4.2 graficados:

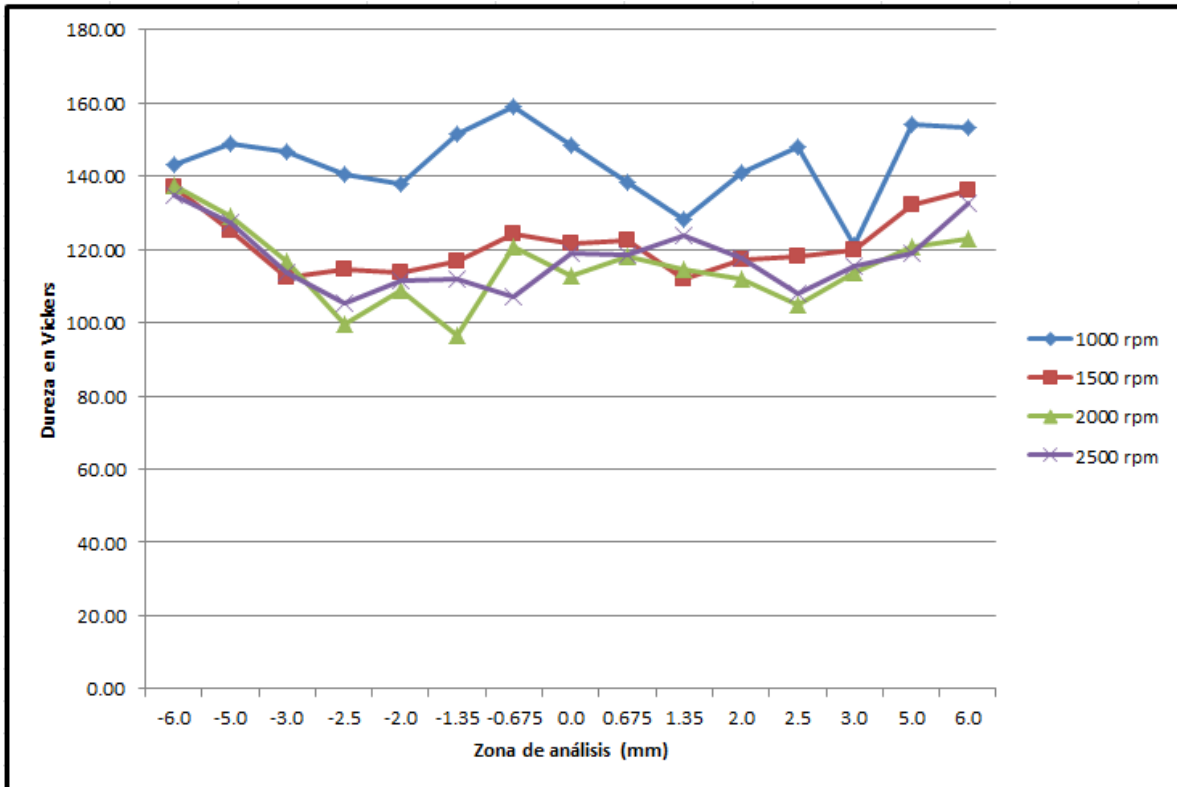


Figura (4.2) Grafica micro-dureza. Indentador 3 mm y 2.5 cm/min de avance.

Para esta velocidad de avance se pueden observar mejores resultados a una velocidad de giro de 1000 rpm y visualmente presenta un poro más pequeño que comparado con las otras tres pruebas. En las demás pruebas se observa como la dureza es menor en la zona de la soldadura y esta aumenta conforme se aleja del cordón, además de tener un poro un poco más grande.

#### 4.1.3 3.0 cm/min Velocidad de avance.

En la Tabla 4.3 se pueden observar los valores del ensayo de microdurezas obtenidas en el durómetro (MMT-3 Micro-durómetro). Estos valores corresponden a las probetas cuyos parámetros fueron los siguientes: medidas de indentador 3X3 mm, velocidad de avance de bancada 3.0 cm/min y velocidades de giro de 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm y 2500 rpm.

Tabla 4.3 Pruebas micro-dureza. Indentador 3 mm y 2.5 cm/min de avance.

Zona de análisis	3.0 cm/min - Indentador 3 mm x 3 mm				
	Velocidades de giro				
	1000 rpm	1500 rpm	2000 rpm	2500 rpm	
<b>-6.0</b>	143.33	148.93	139.73	139.80	Dureza en HV
<b>-5.0</b>	144.33	141.53	131.33	127.30	
<b>-3.0</b>	143.93	129.97	122.83	129.97	
<b>-2.5</b>	138.83	113.07	122.53	126.97	
<b>-2.0</b>	134.60	126.50	117.77	123.80	
<b>-1.35</b>	134.33	121.17	122.37	111.00	
<b>-0.675</b>	153.67	122.13	126.77	130.77	
<b>0.0</b>	161.67	128.27	127.17	129.17	
<b>0.675</b>	148.50	128.63	127.23	127.87	
<b>1.35</b>	146.00	106.83	114.10	123.67	
<b>2.0</b>	147.33	122.80	123.87	125.27	
<b>2.5</b>	150.20	116.17	127.03	126.17	
<b>3.0</b>	150.40	124.87	129.40	124.53	
<b>5.0</b>	157.00	137.87	143.23	138.13	
<b>6.0</b>	152.67	141.7	147.17	144.67	

En la Figura (4.3) se muestran los valores de la Tabla 4.3 graficados:



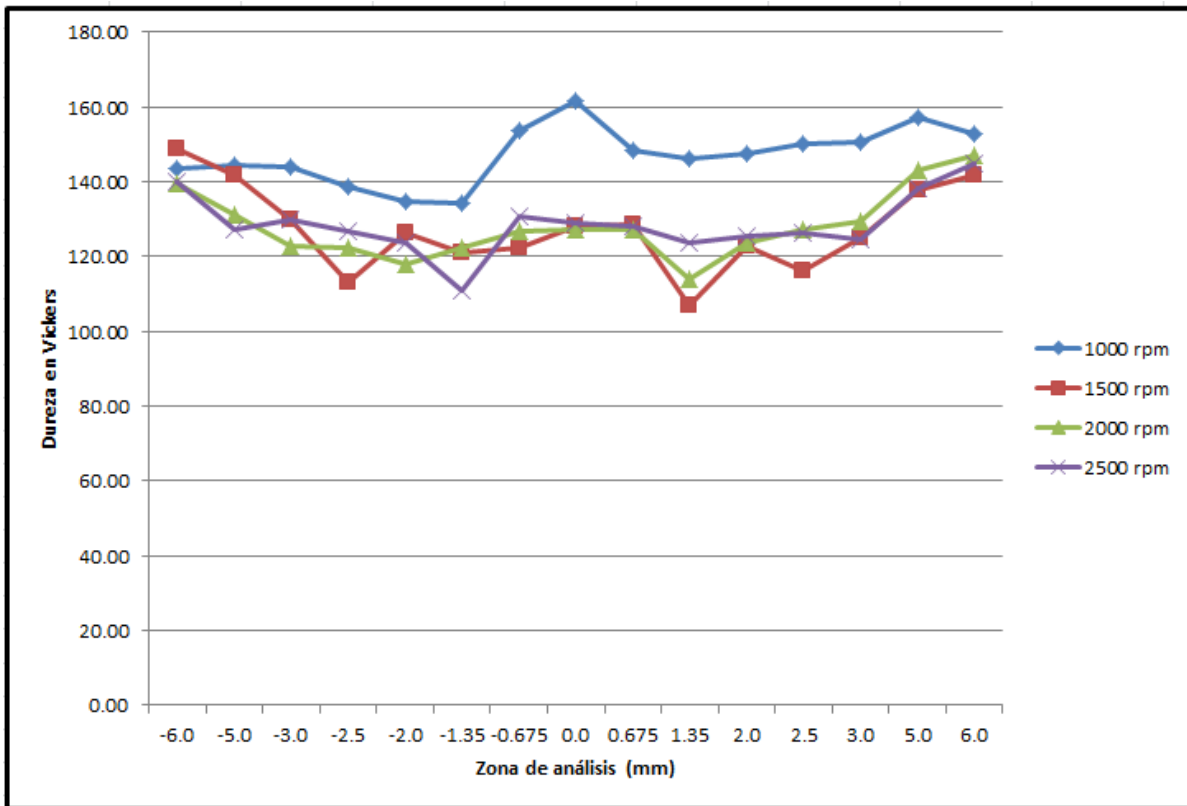


Figura (4.3) Grafica micro-dureza. Indentador 3 mm y 3.0 cm/min de avance.

Todas las pruebas presentaron poro aunque en todas era muy pequeño. Aunque la prueba de 1000 rpm presenta buenos resultados de dureza en la zona del cordón, esta presenta poro, ahora que tomando en cuenta el tamaño del poro la prueba de 2000 rpm es tiene un poro menor, teniendo mejores propiedades tomando en cuenta los defectos visuales y la dureza.

## 4.2 INDENTADOR 4 mm X 4 mm

### 4.2.1 2.0 cm/min Velocidad de avance

En la Tabla 4.4 se pueden observar los valores de las micro-durezas obtenidas en el durómetro, estos valores corresponden a las probetas cuyos parámetros fueron los siguientes: medidas de indentador 4X4 mm, velocidad de avance de bancada 2.0 cm/min y velocidades de giro de 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm y 2500 rpm.

Tabla 4.4 Pruebas micro-dureza. Indentador 4 mm y 2.0 cm/min de avance.

Zona de análisis	2.0 cm/min - Indentador 4 mm x 4 mm				
	Velocidades de giro				
	1000 rpm	1500 rpm	2000 rpm	2500 rpm	
<b>-7.0</b>	110.87	124.97	125.27	106.77	Dureza en HV
<b>-6.0</b>	103.90	119.43	123.70	97.83	
<b>-4.0</b>	108.20	108.57	113.97	96.00	
<b>-3.5</b>	108.47	106.30	114.43	97.50	
<b>-2.5</b>	110.70	106.37	115.77	99.00	
<b>-1.85</b>	114.80	107.37	117.73	107.90	
<b>-0.925</b>	112.00	117.67	124.53	105.50	
<b>0.0</b>	110.67	117.67	122.70	104.70	
<b>0.925</b>	117.07	119.90	120.10	107.63	
<b>1.85</b>	112.57	119.83	102.60	108.17	
<b>2.5</b>	113.07	117.33	111.13	104.87	
<b>3.5</b>	103.73	112.40	106.90	89.67	
<b>4.0</b>	104.60	112.17	105.73	96.50	
<b>6.0</b>	107.87	104.90	114.17	93.90	
<b>7.0</b>	114.73	108.17	123.57	103.83	

En la Figura (4.4) se muestran los valores de la Tabla 4.4 graficados:

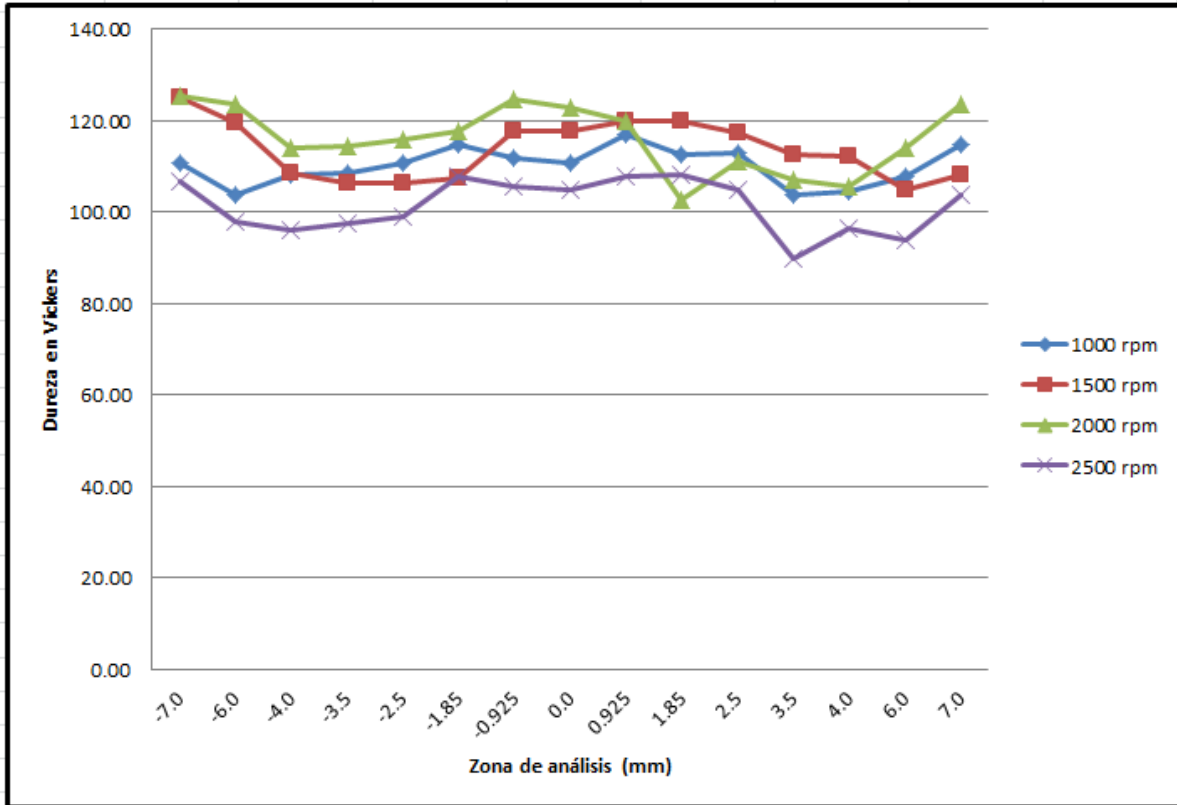


Figura (4.4) Grafica micro-dureza. Indentador 4 mm y 2.0 cm/min de avance.

Se puede observar que para el indentador 4x4 mm a una velocidad de avance de 2.0 cm/min la dureza parece mantenerse a lo largo del cordón y conforme se aleja del mismo la dureza va incrementando poco a poco.

A su vez se puede observar que a 1500 y 2000 revoluciones la dureza aumenta y que en 1000 y 2500 revoluciones la dureza es menor. Aun así para las probetas de mayor dureza también traen consigo un poro más grande mientras que las otras dos probetas el poro es más chico. Por consiguiente el mejor resultado se puede concluir que está a bajas revoluciones.

#### 4.2.2 2.5 cm/min Velocidad de avance.

En la Tabla 4.5 se pueden observar los valores de las micro-durezas obtenidas en el durómetro, estos valores corresponden a las probetas cuyos parámetros fueron los siguientes: medidas de indentador 4X4 mm, velocidad de avance de bancada 2.5 cm/min y velocidades de giro de 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm y 2500 rpm.

Tabla 4.5 Pruebas micro-dureza. Indentador 4 mm y 2.5 cm/min de avance.

Zona de análisis	2.5 cm/min - Indentador 4 mm x 4 mm				
	Velocidades de giro				
	1000 rpm	1500 rpm	2000 rpm	2500 rpm	
<b>-7.0</b>	117.00	122.93	110.50	123.60	Dureza en HV
<b>-6.0</b>	114.33	113.70	108.30	115.20	
<b>-4.0</b>	111.53	111.50	110.57	111.03	
<b>-3.5</b>	112.63	111.60	108.53	112.60	
<b>-2.5</b>	112.80	112.93	102.47	114.23	
<b>-1.85</b>	119.63	107.50	101.27	95.57	
<b>-0.925</b>	121.33	117.60	119.63	118.87	
<b>0.0</b>	120.50	117.73	121.70	120.27	
<b>0.925</b>	120.47	117.27	122.47	123.07	
<b>1.85</b>	104.73	114.93	110.70	119.17	
<b>2.5</b>	114.93	113.90	105.67	112.67	
<b>3.5</b>	111.83	116.70	105.77	109.57	
<b>4.0</b>	105.97	116.50	112.37	113.30	
<b>6.0</b>	112.97	121.60	114.47	116.90	
<b>7.0</b>	124.37	119.53	117.90	122.03	

En la Figura (4.5) se muestran los valores de la Tabla 4.5 graficados:

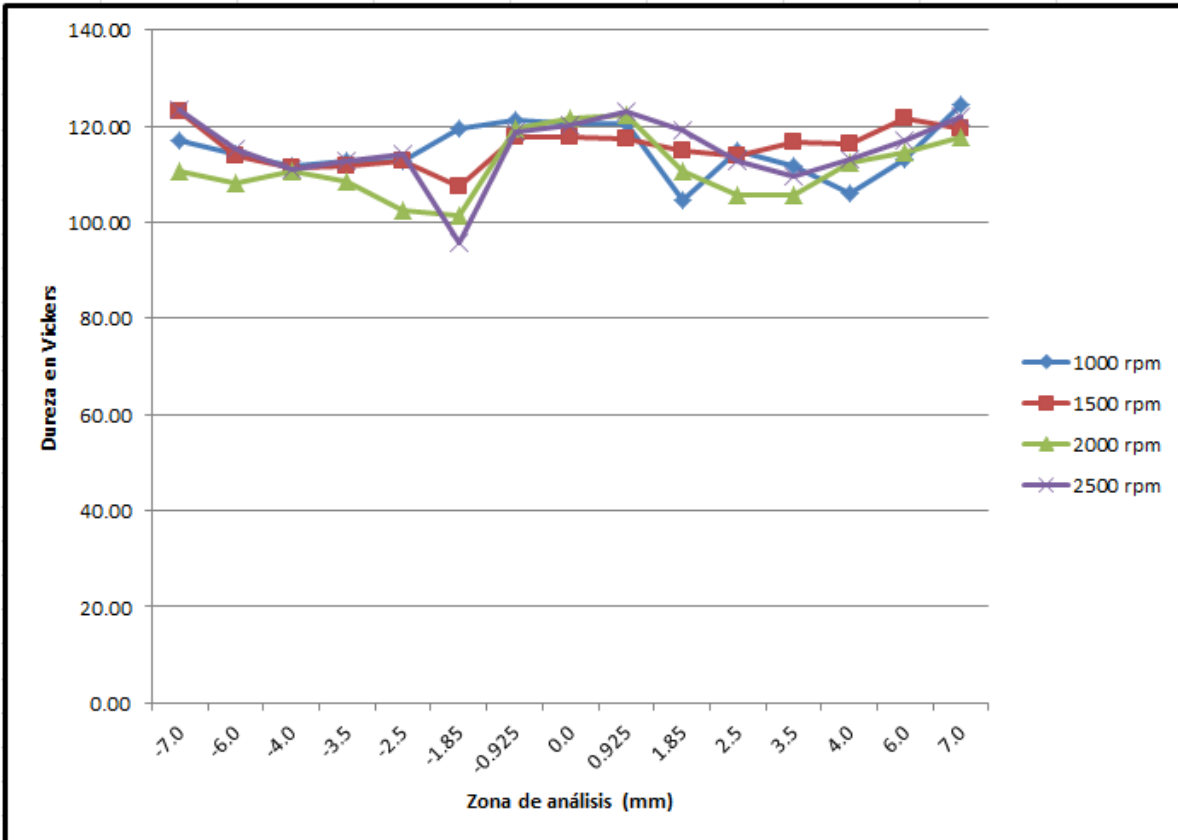


Figura (4.5) Grafica micro-dureza. Indentador 4 mm y 2.5 cm/min de avance.

Para el indentador 4x4 mm a una velocidad de giro de 2.5 cm/min, se puede ver que la micro-dureza de las pruebas tienen un comportamiento parecido, aunque baja la dureza en la orillas del cordón esta sube conforme se aleja del mismo. Aunque todo este conjunto de pruebas presenta poro se puede rescatar que los mejores resultados de dureza están a bajas revoluciones.

#### 4.2.3 3.0 cm/min Velocidad de avance.

En la Tabla 4.6 se pueden observar los valores de las micro-durezas obtenidas en el durómetro, estos valores corresponden a las probetas cuyos parámetros fueron los siguientes: medidas de indentador 4X4 mm, velocidad de avance de bancada 3.0 cm/min y velocidades de giro de 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm y 2500 rpm.

Tabla 4.6 Pruebas micro-dureza. Indentador 4 mm y 3,0 cm/min de avance.

Zona de análisis	3.0 cm/min - Indentador 4 mm x 4 mm				
	Velocidades de giro				
	1000 rpm	1500 rpm	2000 rpm	2500 rpm	
<b>-7.0</b>	130.87	119.13	112.83	109.07	Dureza en HV
<b>-6.0</b>	120.00	109.60	111.67	98.67	
<b>-4.0</b>	115.40	97.00	114.43	95.37	
<b>-3.5</b>	107.03	112.93	120.13	97.90	
<b>-2.5</b>	114.67	114.07	119.73	102.40	
<b>-1.85</b>	120.47	116.90	107.47	105.93	
<b>-0.925</b>	107.83	115.30	96.30	112.17	
<b>0.0</b>	119.03	121.20	121.23	114.07	
<b>0.925</b>	120.63	120.10	124.73	114.63	
<b>1.85</b>	95.93	119.90	124.07	113.50	
<b>2.5</b>	114.37	114.70	124.60	114.07	
<b>3.5</b>	114.97	113.07	120.60	108.70	
<b>4.0</b>	113.03	112.03	117.03	107.57	
<b>6.0</b>	120.00	118.90	116.17	94.70	
<b>7.0</b>	130.37	119.77	113.17	96.17	

En la Figura (4.6) se muestran los valores de la Tabla 4.6 graficados:

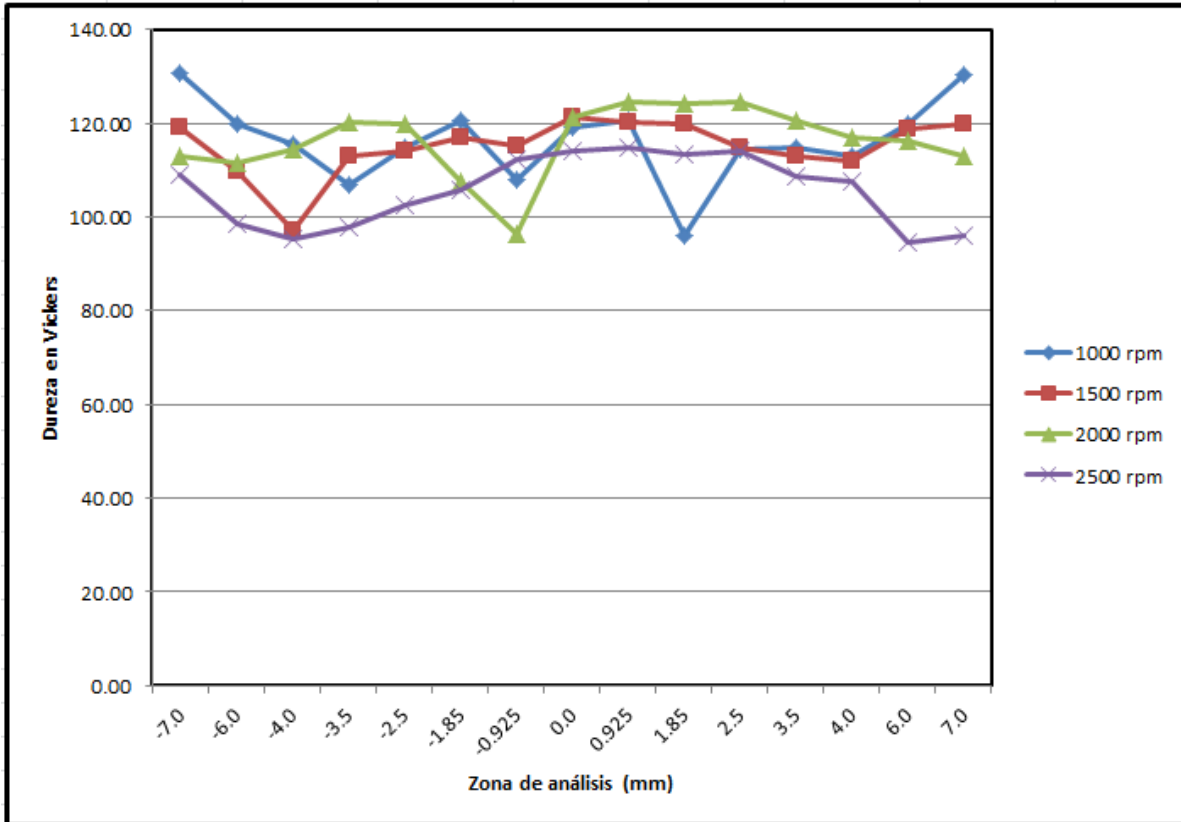


Figura (4.6) Grafica micro-dureza. Indentador 4 mm y 3.0 cm/min de avance.

Se presenta poro en todas las pruebas y el poro aumenta proporcionalmente a las revoluciones, en esta velocidad de avance es donde más grande el poro se presentó en comparación con las velocidades de avance anteriores. Mientras que para la dureza se pueden apreciar resultados ligeramente mejores a las 1500 y 2000 revoluciones.

A esta velocidad de avance se tiene los resultados más carentes, en cuanto a tamaño de poro y dureza se trata, en comparación con las otras velocidades de avance.

### 4.3 INDENTADOR 5 mm X 5 mm.

#### 4.3.1 2.0 cm/min Velocidad de avance.

En la Tabla 4.7 se pueden observar los valores de las micro-durezas obtenidas en el durómetro, estos valores corresponden a las probetas cuyos parámetros fueron los siguientes: medidas de indentador 5X5 mm, velocidad de avance de bancada 2.0 cm/min y velocidades de giro de 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm y 2500 rpm.

Tabla 4.7 Pruebas de micro-dureza. Indentador 5 mm y 2.0 cm/min de avance.

Zona de análisis	2.0 cm/min - Indentador 5 mm x 5 mm				
	Velocidades de giro				
	1000 rpm	1500 rpm	2000 rpm	2500 rpm	
<b>-7.0</b>	146.07	117.87	101.53	107.43	Dureza en HV
<b>-6.0</b>	133.30	109.43	98.93	105.13	
<b>-4.0</b>	117.33	106.73	107.10	106.30	
<b>-3.5</b>	116.33	105.80	109.70	109.17	
<b>-3.0</b>	119.80	91.03	119.30	112.80	
<b>-2.35</b>	122.43	118.17	116.07	120.93	
<b>-1.175</b>	122.73	117.50	117.83	120.43	
<b>0.0</b>	122.00	117.53	113.13	117.77	
<b>1.175</b>	123.57	117.23	117.83	121.37	
<b>2.35</b>	121.53	119.10	115.60	104.47	
<b>3.0</b>	117.67	116.80	113.90	114.37	
<b>3.5</b>	110.67	109.53	105.10	94.47	
<b>4.0</b>	116.77	105.43	106.37	105.87	
<b>6.0</b>	134.17	108.13	98.13	103.67	
<b>7.0</b>	146.33	121.03	100.00	113.10	

En la Figura (4.7) se muestran los valores de la Tabla 4.7 graficados:



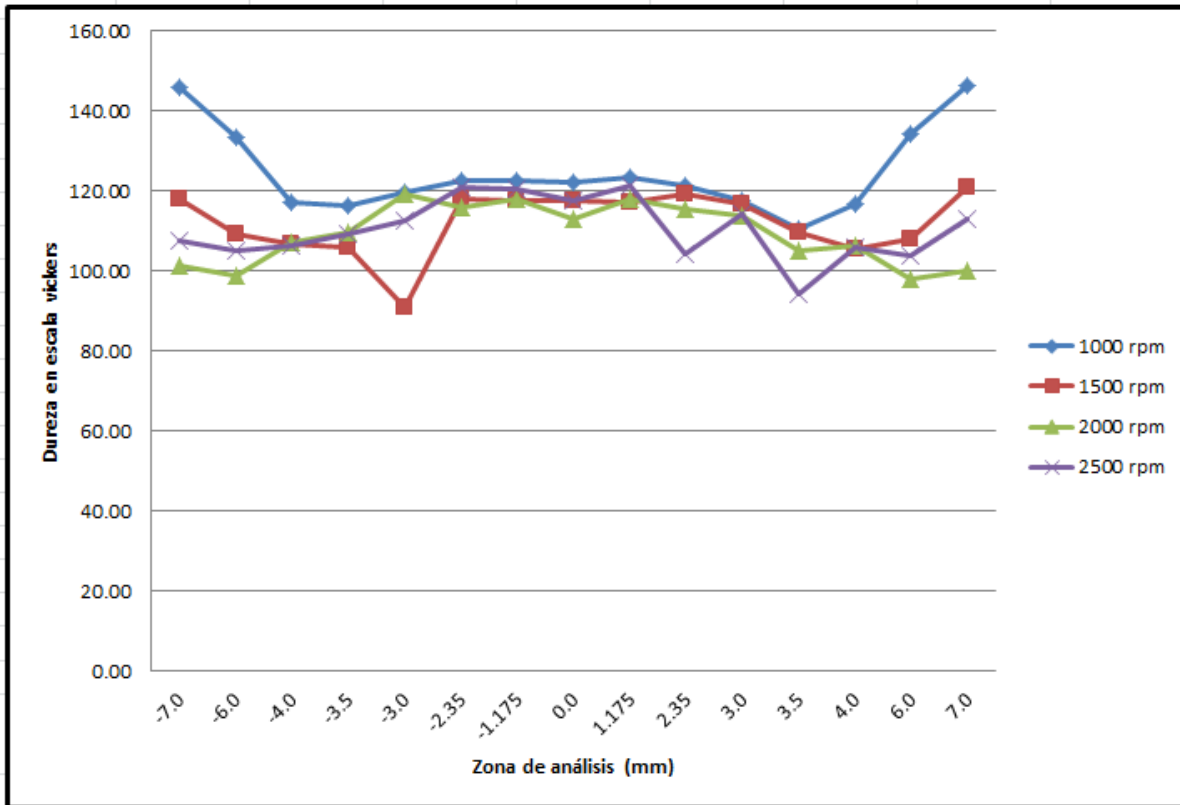


Figura (4.7) Grafica micro-dureza. Indentador 5 mm y 2.0 cm/min de avance.

Para el indentador de 5x5 mm a una velocidad de 2.0 cm/min avance en general se puede observar que a bajas revoluciones se presenta una buena micro-dureza en la parte de la soldadura, a los costados del cordón se puede observar que baja un poco la micro-dureza y conforme nos alejamos del cordón aumenta.

En cuanto a la dureza se trata los mejores resultados están a bajas revoluciones. Y a su vez el poro es casi nulo a bajas revoluciones. Así que podemos concluir que los mejores resultados a la velocidad de avance de 2.0 cm/min se encuentran a 1000 revoluciones

### 4.3.2 2.5 cm/min Velocidad de avance.

En la Tabla 4.8 se pueden observar los valores de las micro-durezas obtenidas en el durómetro, estos valores corresponden a las probetas cuyos parámetros fueron los siguientes: medidas de indentador 5X5 mm, velocidad de avance de bancada 2.5 cm/min y velocidades de giro de 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm y 2500 rpm.

Tabla 4.8 Pruebas de micro-dureza. Indentador 5 mm y 2.5 cm/min de avance.

Zona de análisis	2.5 cm/min - Indentador 5 mm x 5 mm				Dureza en HV
	Velocidades de giro				
	1000 rpm	1500 rpm	2000 rpm	2500 rpm	
<b>-7.0</b>	153.87	113.03	114.60	113.50	
<b>-6.0</b>	142.03	107.27	108.77	106.00	
<b>-4.0</b>	129.23	104.13	105.03	100.00	
<b>-3.5</b>	122.57	103.33	109.27	99.60	
<b>-3.0</b>	125.50	106.70	111.67	93.00	
<b>-2.35</b>	119.90	103.33	119.87	95.00	
<b>-1.175</b>	120.53	118.63	121.53	109.00	
<b>0.0</b>	120.13	119.57	122.67	116.00	
<b>1.175</b>	117.37	121.10	119.47	110.00	
<b>2.35</b>	116.10	118.97	114.50	109.00	
<b>3.0</b>	113.37	112.87	115.77	112.00	
<b>3.5</b>	112.27	108.43	110.13	104.00	
<b>4.0</b>	111.57	106.47	111.67	93.00	
<b>6.0</b>	133.30	106.80	108.40	100.00	
<b>7.0</b>	137.8	113.4	116.77	117	

En la Figura (4.8) se muestran los valores de la Tabla 4.8 graficados:

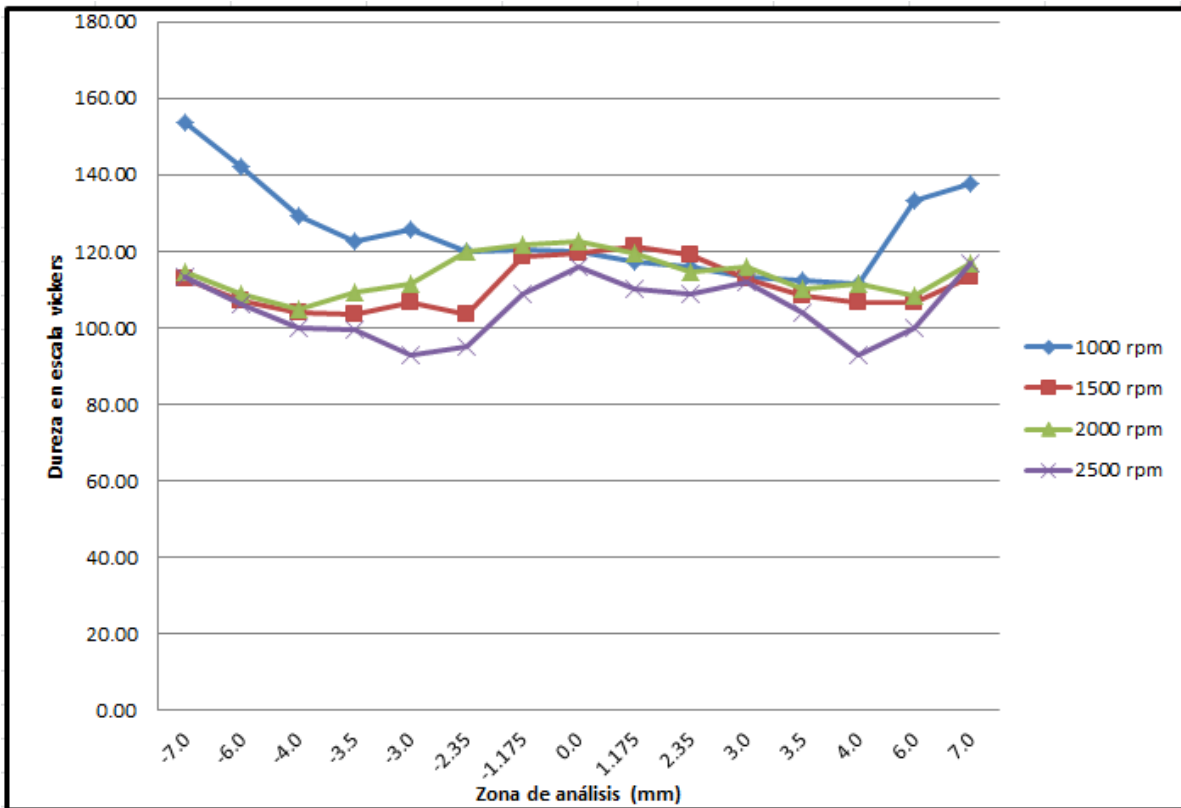


Figura (4.8) Grafica micro-dureza. Indentador 5 mm y 2.5 cm/min de avance.

En esta velocidad de avance todas las pruebas presentan poro; los mejores resultados están a bajas revoluciones con poros más pequeños. También los mejores resultados de dureza se presentan a bajas revoluciones.

En cuanto a las 2500 revoluciones la unión fue muy deficiente al grado de no alcanzar al unirse completamente en un costado del cordón.

El comportamiento de la dureza es muy parecido en la zona del cordón pero en cuanto nos alejamos del cordón a bajas revoluciones la dureza aumenta considerablemente mientras que para las demás aumenta muy poco.

### 4.3.3 3.0 cm/min Velocidad de avance.

En la Tabla 4.9 se pueden observar los valores de las micro-durezas obtenidas en el durómetro, estos valores corresponden a las probetas cuyos parámetros fueron los siguientes: medidas de indentador 5X5 mm, velocidad de avance de bancada 3.0 cm/min y velocidades de giro de 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm y 2500 rpm.

Tabla 4.9 Pruebas de micro-dureza. Indentador 5 mm y 3.0 cm/min de avance.

Zona de análisis	3.0 cm/min - Indentador 5 mm x 5 mm				Dureza en HV
	Velocidades de giro				
	1000 rpm	1500 rpm	2000 rpm	2500 rpm	
<b>-7.0</b>	149.17	113.23	112.00	123.00	
<b>-6.0</b>	140.87	104.80	104.00	108.57	
<b>-4.0</b>	126.43	109.23	100.00	104.40	
<b>-3.5</b>	124.37	114.10	107.00	106.27	
<b>-3.0</b>	121.27	120.70	114.00	120.10	
<b>-2.35</b>	123.03	123.83	116.00	120.67	
<b>-1.175</b>	121.43	123.67	114.00	122.40	
<b>0.0</b>	127.47	123.17	119.00	118.70	
<b>1.175</b>	127.90	121.57	116.00	122.77	
<b>2.35</b>	125.03	122.63	113.00	123.17	
<b>3.0</b>	125.67	106.73	98.00	119.97	
<b>3.5</b>	114.20	106.40	102.00	115.83	
<b>4.0</b>	131.30	105.50	99.00	112.57	
<b>6.0</b>	143.40	112.60	107.00	101.83	
<b>7.0</b>	147.93	125.27	109.00	106.43	

En la Figura (4.9) se muestran los valores de la Tabla 4.9 graficados:

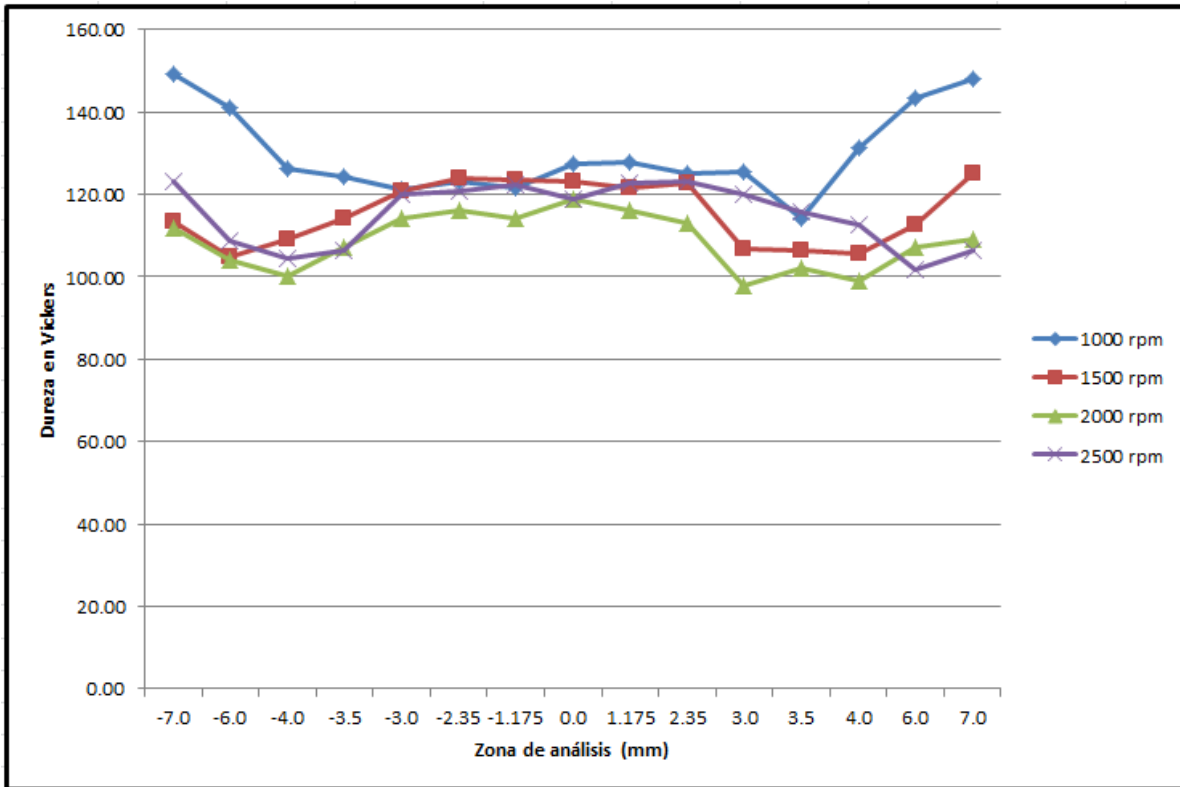


Figura (4.9) Grafica micro-dureza. Indentador 5 mm y 3.0 cm/min de avance.

Para el indentador de 5x5 mm a una velocidad de 3.0 cm/min de avance podemos observar que presenta mayor micro-dureza en la parte de la soldadura con respecto a las dos velocidades de avance anteriores; observamos que en la zona del cordón se tiene una dureza menor y, conforme nos alejamos del cordón aumenta la micro-dureza, esto debido a que en el centro se ve afectada por la soldadura.

Se observa poro en la mayoría de las pruebas y más marcado a altas velocidades de giro. A 1000 revoluciones el poro que presenta es casi nulo, mientras que a 2000 revoluciones la unión es muy deficiente al grado de notarse la falta de unión en un costado del cordón. Por lo tanto a 1000 revoluciones es donde se encuentran los mejores resultados.

#### 4.4 INDENTADOR 6 mm X 6 mm.

##### 4.4.1 2.0 cm/min Velocidad de avance.

En la Tabla 4.10 se pueden observar los valores del ensayo de micro-durezas obtenidas en el durómetro (MMT-3 Micro-durómetro). Estos valores corresponden a las probetas cuyos parámetros fueron los siguientes: medidas de indentador 6X6 mm, velocidad de avance de bancada 2.0 cm/min y velocidades de giro de 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm y 2500 rpm.

Tabla 4.10 Pruebas de micro-dureza. Indentador 6 mm y 2.0 cm/min de avance.

Zona de análisis	2.0 cm/min - Indentador 6 mm x 6 mm				
	Velocidades de giro				
	1000 rpm	1500 rpm	2000 rpm	2500 rpm	
<b>-7.5</b>	138.03	83.07	89.53	89.20	Dureza en HV
<b>-7.0</b>	133.13	92.67	84.97	88.57	
<b>-6.0</b>	119.03	97.17	86.73	90.00	
<b>-4.0</b>	91.20	106.00	98.23	104.33	
<b>-3.5</b>	90.80	109.87	103.33	104.50	
<b>-2.85</b>	97.13	109.67	101.90	107.27	
<b>-1.425</b>	105.07	111.17	105.20	112.97	
<b>0.0</b>	104.77	109.33	106.70	112.00	
<b>1.425</b>	106.20	114.00	111.60	114.05	
<b>2.85</b>	101.00	102.80	91.67	101.13	
<b>3.5</b>	99.43	89.33	88.37	96.33	
<b>4.0</b>	110.00	94.50	87.00	91.17	
<b>6.0</b>	138.53	105.43	95.50	91.57	
<b>7.0</b>	143.83	119.40	104.40	87.83	
<b>7.5</b>	147.87	121.5	108.5	101.8	

En la Figura (4.10) se muestran los valores de la Tabla 4.10 graficados:

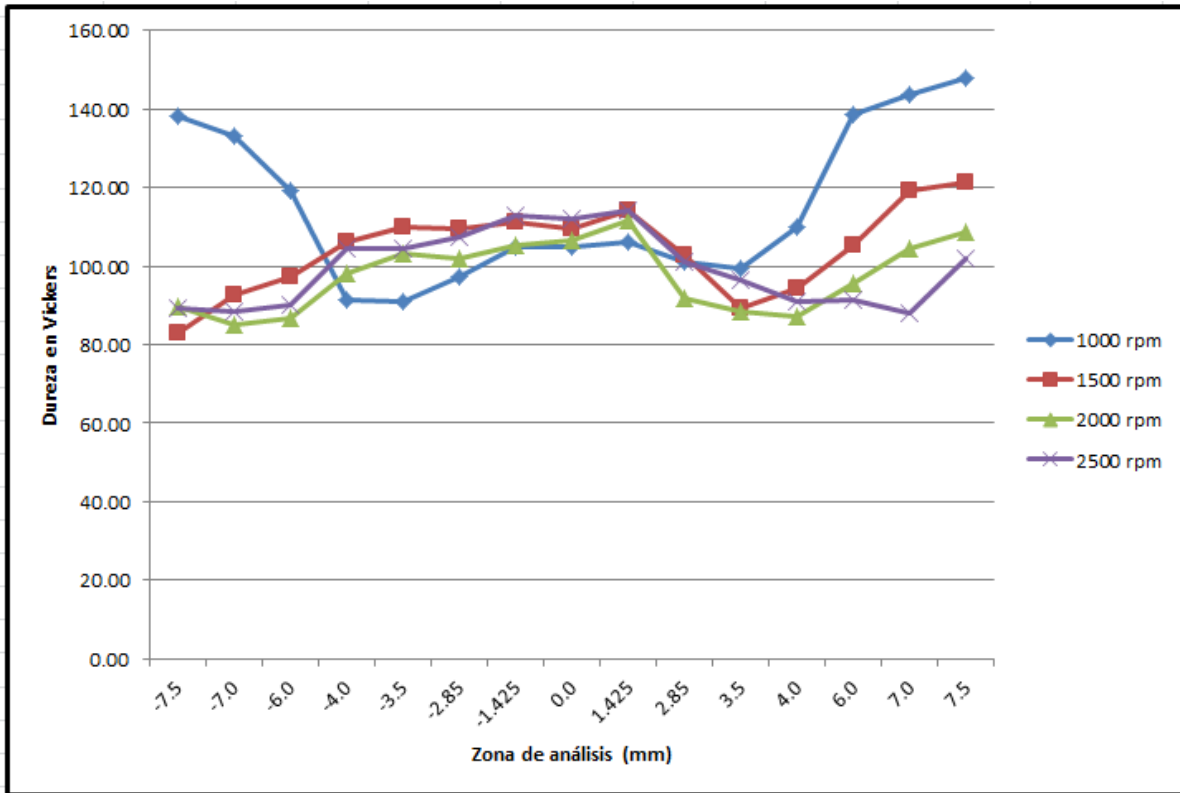


Figura (4.10) Grafica micro-dureza. Indentador 6 mm y 2.0 cm/min de avance.

Para el indentador de 6x6 mm a una velocidad de 2.0 cm/min de avance podemos observar que se presenta una mejor dureza a bajas revoluciones. Se observa en la gráfica anterior que en la zona del cordón la dureza se comporta de manera similar, aunque para bajas revoluciones la dureza aumenta rápidamente en cuanto nos alejamos del cordón. Se observó poro grande a lo largo de la junta en todas las pruebas.

#### 4.4.2 2.5 cm/min Velocidad de avance.

En la Tabla 4.11 se pueden observar los valores del ensayo de micro-durezas obtenidas en el durómetro (MMT-3 Micro-durómetro). Estos valores corresponden a las probetas cuyos parámetros fueron los siguientes: medidas de indentador 6X6 mm, velocidad de avance de bancada 2.5 cm/min y velocidades de giro de 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm y 2500 rpm.

Tabla 4.11 Pruebas de micro-dureza. Indentador 6 mm y 2.5 cm/min de avance.

Zona de análisis	2.5 cm/min - Indentador 6 mm x 6 mm				
	Velocidades de giro				
	1000 rpm	1500 rpm	2000 rpm	2500 rpm	
<b>-7.5</b>	141.17	119.43	112.67	90.33	Dureza en HV
<b>-7.0</b>	136.00	113.37	105.67	89.40	
<b>-6.0</b>	129.53	103.73	98.83	97.17	
<b>-4.0</b>	102.33	86.50	91.83	84.93	
<b>-3.5</b>	98.17	90.10	95.20	109.60	
<b>-2.85</b>	95.60	97.00	100.47	110.17	
<b>-1.425</b>	107.30	111.20	117.35	115.50	
<b>0.0</b>	109.00	107.77	116.17	118.00	
<b>1.425</b>	109.83	108.90	115.00	108.90	
<b>2.85</b>	108.57	105.40	112.33	101.07	
<b>3.5</b>	106.17	106.57	97.67	96.67	
<b>4.0</b>	101.43	103.40	110.67	91.67	
<b>6.0</b>	95.53	91.57	95.83	90.83	
<b>7.0</b>	98.87	92.67	90.00	105.83	
<b>7.5</b>	107.13	94.33	93.00	111.53	

En la Figura (4.11) se muestran los valores de la Tabla 4.11 graficados:



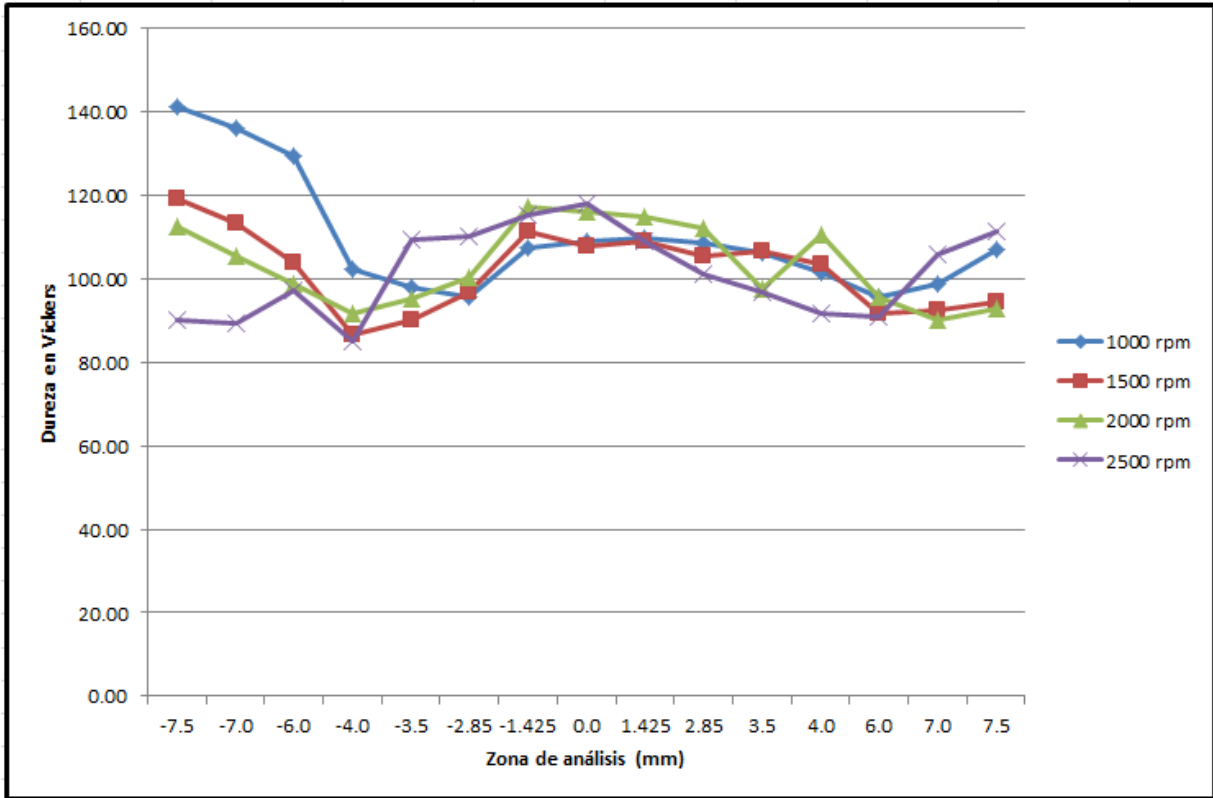


Figura (4.11) Grafica micro-dureza. Indentador 6 mm y 2.5 cm/min de avance.

En este conjunto de pruebas se observan que en el centro de la soldadura la dureza se mantiene y conforme se aleja del cordón la dureza aumenta. Aunque en todas las pruebas se presentó poro a lo largo de la junta, a bajas revoluciones el poro disminuyó un poco, sin embargo a 2500 rpm se observó una mayor deficiencia en la unión al grado de no unirse completamente en un costado del cordón.

#### 4.4.3 3.0 cm/min Velocidad de avance.

En la Tabla 4.12 se pueden observar los valores del ensayo de micro-durezas obtenidas en el durómetro (MMT-3 Micro-durómetro). Estos valores corresponden a las probetas cuyos parámetros fueron los siguientes: medidas de indentador 6X6 mm, velocidad de avance de bancada 3.0 cm/min y velocidades de giro de 1000 rpm, 1500 rpm, 2000 rpm y 2500 rpm.

Tabla 4.12 Pruebas de micro-dureza. Indentador 6 mm y 3.0 cm/min de avance.

Zona de análisis	3.0 cm/min - Indentador 6 mm x 6 mm				
	Velocidades de giro				
	1000 rpm	1500 rpm	2000 rpm	2500 rpm	
-7.5	98.17	95.17	92.00	103.00	Dureza en HV
-7.0	95.83	92.60	92.83	99.00	
-6.0	93.47	92.33	97.33	80.27	
-4.0	107.93	101.83	106.33	94.33	
-3.5	111.27	107.83	109.33	102.73	
-2.85	113.50	107.67	109.50	106.50	
-1.425	112.83	110.57	113.00	122.40	
0.0	102.17	110.83	112.60	120.43	
1.425	109.93	110.50	85.10	121.50	
2.85	99.40	99.00	94.83	115.57	
3.5	95.20	92.50	93.83	112.77	
4.0	95.63	95.83	98.83	105.00	
6.0	109.27	112.33	127.57	78.67	
7.0	120.00	129.67	142.27	95.17	
7.5	127.67	133.67	143.93	97.07	

En la Figura (4.12) se muestran los valores de la Tabla 4.12 graficados:

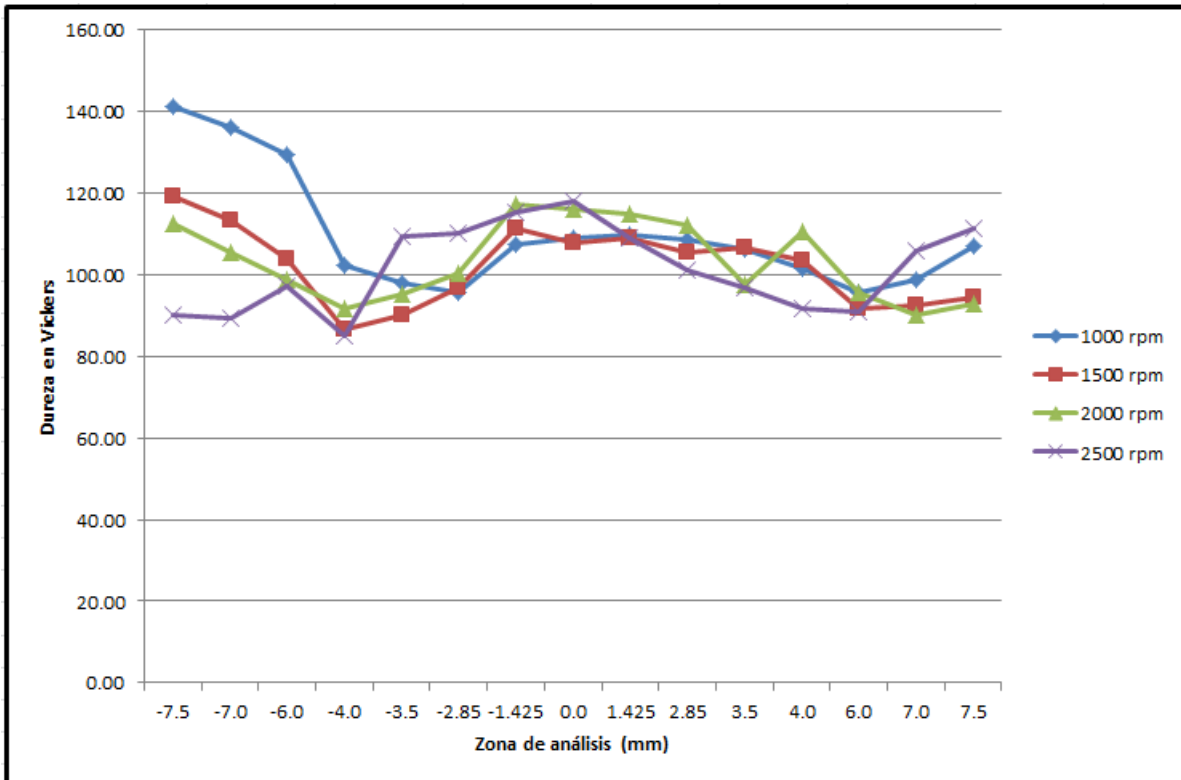


Figura (4.12) Grafica micro-dureza. Indentador 6 mm y 3.0 cm/min de avance.

Para estas tres pruebas se observan resultados deficientes, se presenta poro muy grande a lo largo de la unión, en particular para la probeta de 2000 rpm la prueba presento una ausencia de unión en un costado del cordón. La probeta de 1000 revoluciones es la que mejores resultados visuales presento mientras que a mayores revoluciones las deficiencias también aumentaron. Se observa que en el centro de la soldadura la micro-dureza es más baja y aumenta conforme se aleja del centro aumenta la micro-dureza, debido a que en el centro se ve afectada por la soldadura.

## 4.5 RESULTADOS TAMAÑO DE GRANO

Se escogieron las probetas con los mejores resultados para revelar el tamaño de grano de las mismas.

Para en indentador de 3 mm se escogieron las siguientes probetas (Figura (4.13):

- a) 2.0 cm/min 1500 rpm
- b) 2.0 cm/min 2000 rpm
- c) 2.5 cm/min 1000 rpm
- d) 3.0 cm/min 2000 rpm

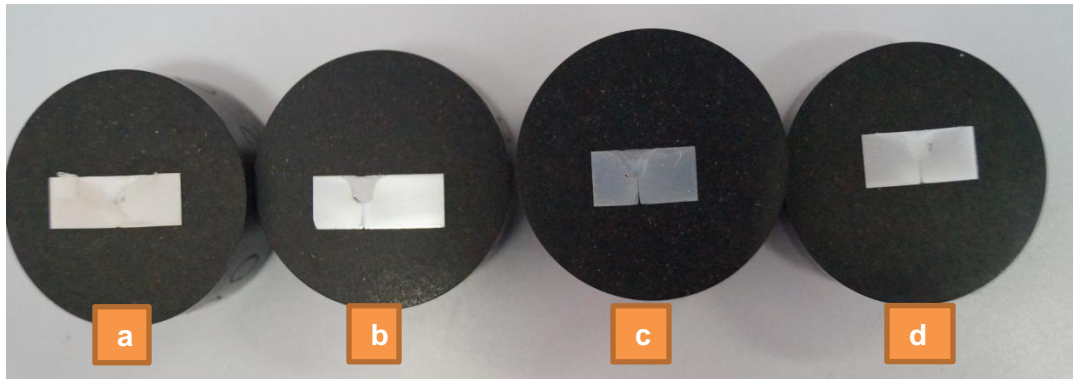


Figura (4.13) Probetas con mejores resultados en indentador 3mm.

El análisis microestructural mostro un grano pequeño que se debe al afecto de la deformación y temperatura alcanzada en la zona del cordón de soldadura, las imágenes siguientes representan la probeta de 2.0 cm/min 1500 rpm y 2.0 cm/min 2000 rpm (Figura (4.14) tomadas con un lente de 50x. y en la (Figura (4.15) se aprecian las probetas de 2.5 cm/min 1000 rpm y 3.0 cm/min 2000 rpm tomadas con una lente de 50x. Se puede observar claramente el cambio en el tamaño de grano entre pruebas.

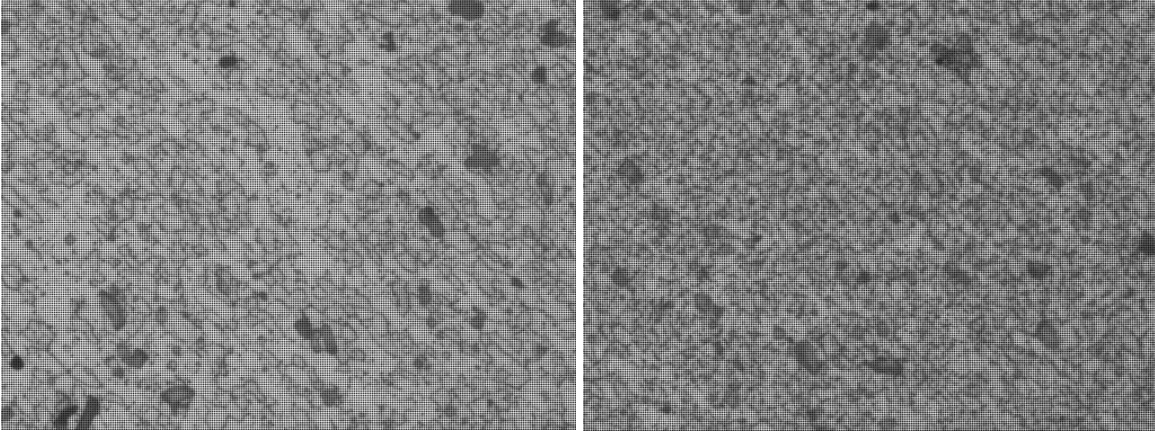


Figura (4.14) Tamaño de grano en zona de cordón probeta 2.0-1500 (izquierda) y 2.0-2000 (derecha).

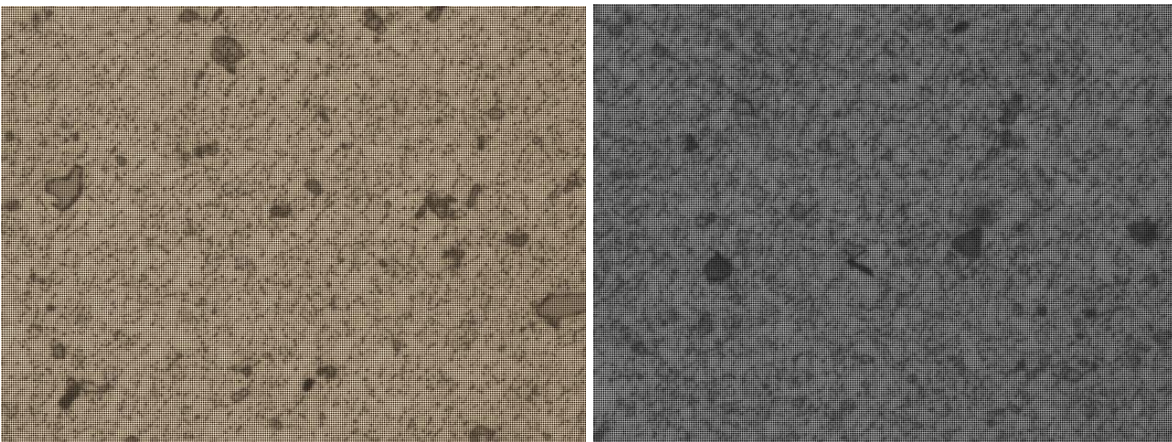


Figura (4.15) Tamaño de grano en zona de cordón probeta 2.5-1000 (izquierda) y 3.0-2000 (derecha).

Para en indentador 4 mm se escogieron las siguientes probetas (Figura (4.16):

- a) 2.0 cm/min 1000 rpm
- b) 2.0 cm/min 2500 rpm

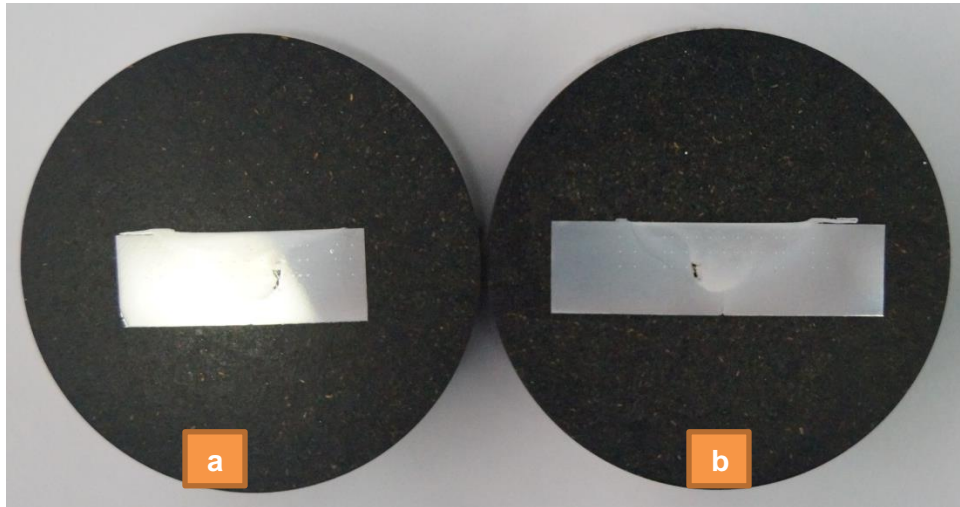


Figura (4.16) Probetas con mejores resultados en indentador 4 mm.

Se puede observar que fue posible revelar el tamaño de grano en las siguientes figuras aunque no muy claramente. El análisis microestructural muestra que una marcada diferencia entre el tamaño de grano del metal base y la zona de cordón para la probeta 2.0 cm/min 1000 rpm Figura (4.17), debido al efecto de la deformación y temperatura alcanzada en el cordón.

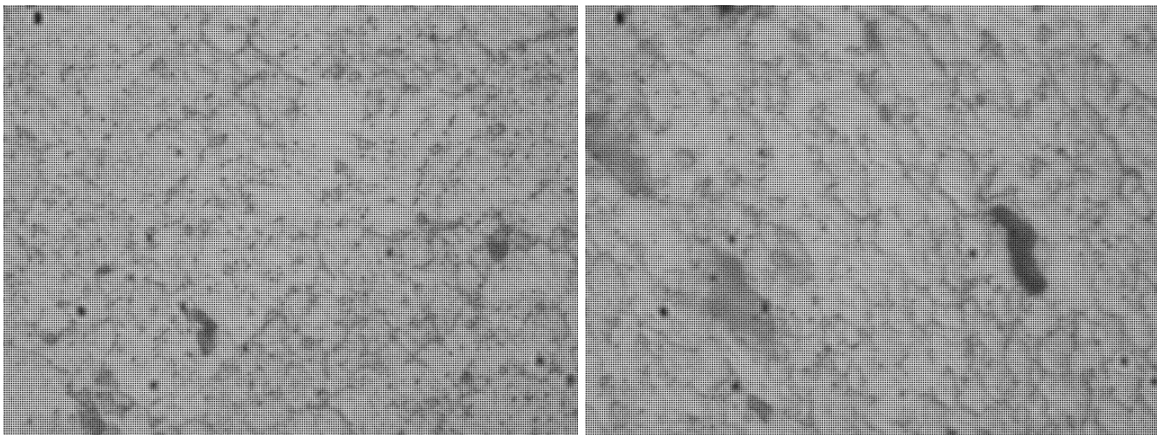


Figura (4.17) Tamaño de grano metal base (izquierda) y zona de cordón (derecha).

En cuanto a la probeta de 2.0 cm/min 2500 rpm (Figura (4.18)), se puede observar de igual manera la visible diferencia entre el tamaño de grano del metal base contra el de la zona del cordón. La zona agitada presenta granos finos mientras que el metal base se aprecian granos más grandes. Las imágenes tomadas fueron con un lente de 50x.

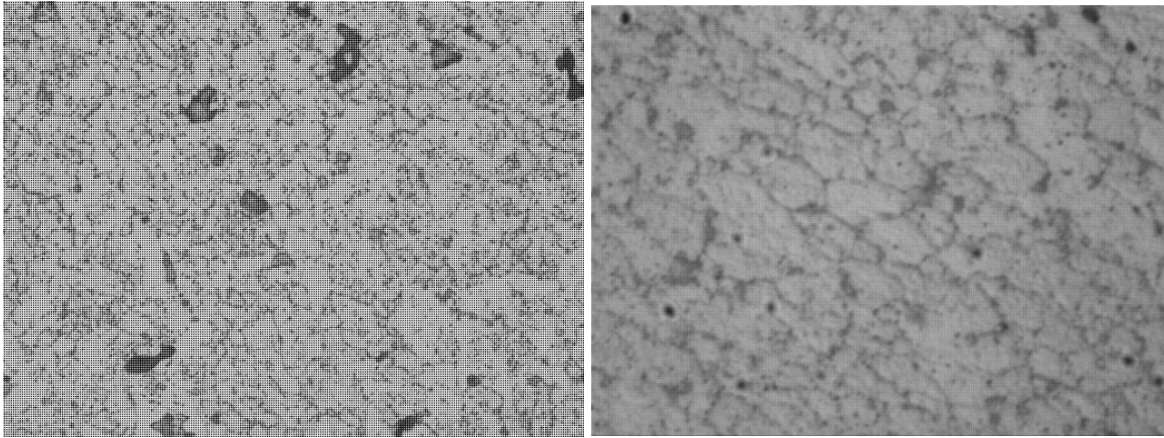


Figura (4.18) Tamaño de grano metal base (izquierda) y zona de cordón (derecha).

Para en indentador de 5 mm se escogieron las siguientes probetas (Figura (4.19):

- a) 2.0 cm/min 1000 rpm
- b) 2.0 cm/min 1500 rpm
- c) 2.5 cm/min 1000 rpm
- d) 2.5 cm/min 2000 rpm
- e) 3.0 cm/min 1000 rpm

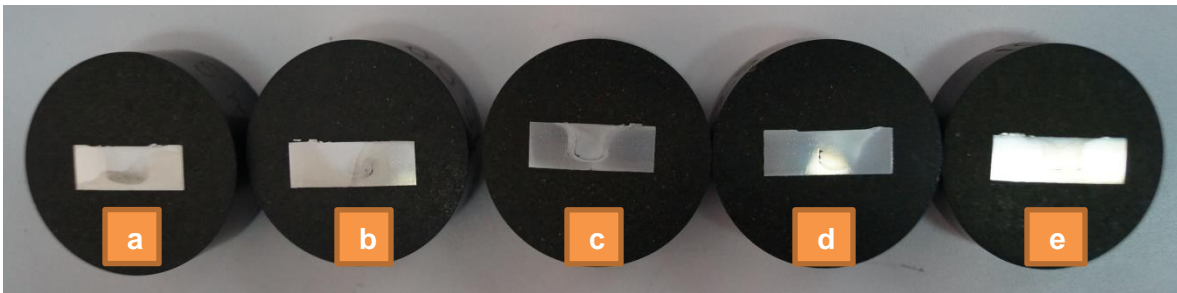


Figura (4.19) Probetas con mejores resultados en indentador 5 mm.

En la Figura (4.20) se observa que no se puede revelar el tamaño de grano para la probeta de 2.0 cm/min y 1000 rpm, esto se debe tal vez a que el grano es muy chico. Mientras que para la probeta 2.0 cm/min y 1500 rpm el grano se obtuvo con un lente de 100x

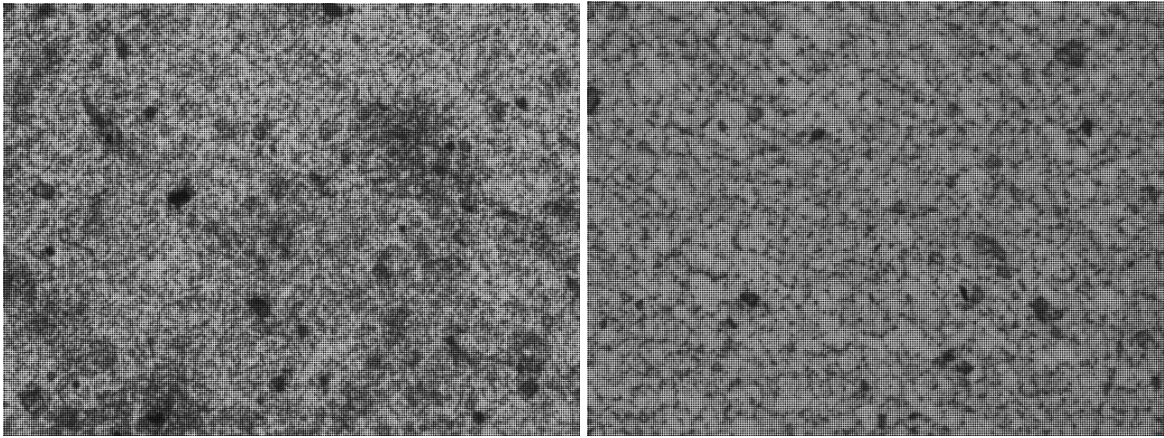


Figura (4.20) Tamaño de grano zona de cordón pruebas 2.0-1000 (izquierda) y 2.0-1500 (derecha).

En las probetas de 2.5 cm/min y 1000 rpm se parecía ligeramente el tamaño del grano comparada con las demás pruebas con este indentador. La prueba de 2.5 cm/min y 1500 rpm se aprecia un grano bien definido pero de tamaño menor; estas imágenes se obtuvieron con un lente de 50x.

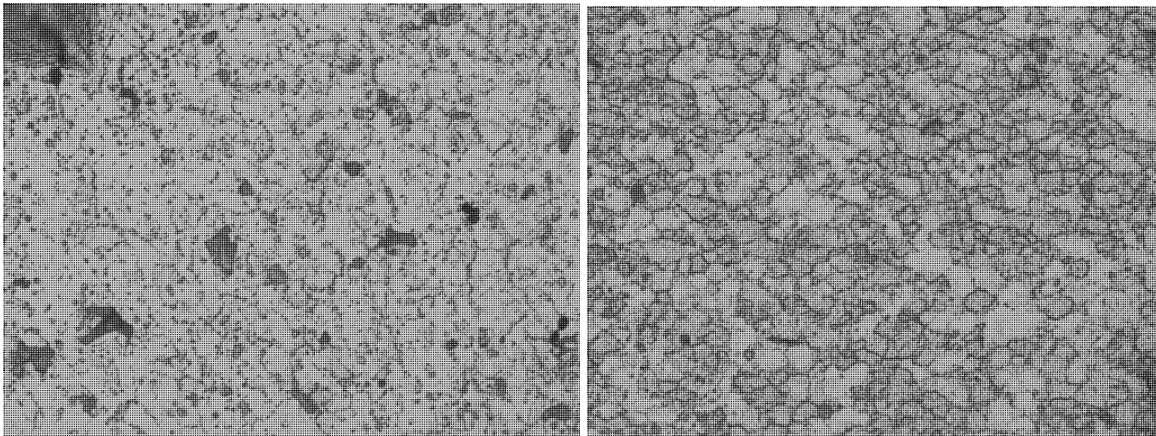


Figura (4.21) Tamaño de grano zona de cordón pruebas 2.5-1000 (izquierda) y 2.5-1500 (derecha).

Para la probeta de 3.0 cm/min y 1000 rpm, no se puede apreciar el tamaño de granos, esto se puede deber a que el grano es muy pequeño por lo cual es imposible observarlo. La siguiente imagen muestra el tamaño de grano en la zona afectada, entre la soldadura y el metal base.



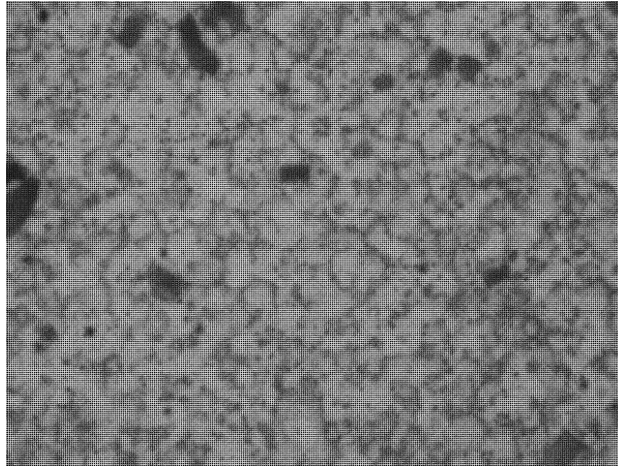


Figura (4.22) Tamaño de grano probeta 3.0-1000.

Por ultimo para el indentador de 6 mm se escogieron las siguientes probetas:

- a) 2.5 cm/min 1000 rpm
- b) 2.5 cm/min 1500 rpm
- c) 3.0 cm/min 1000 rpm

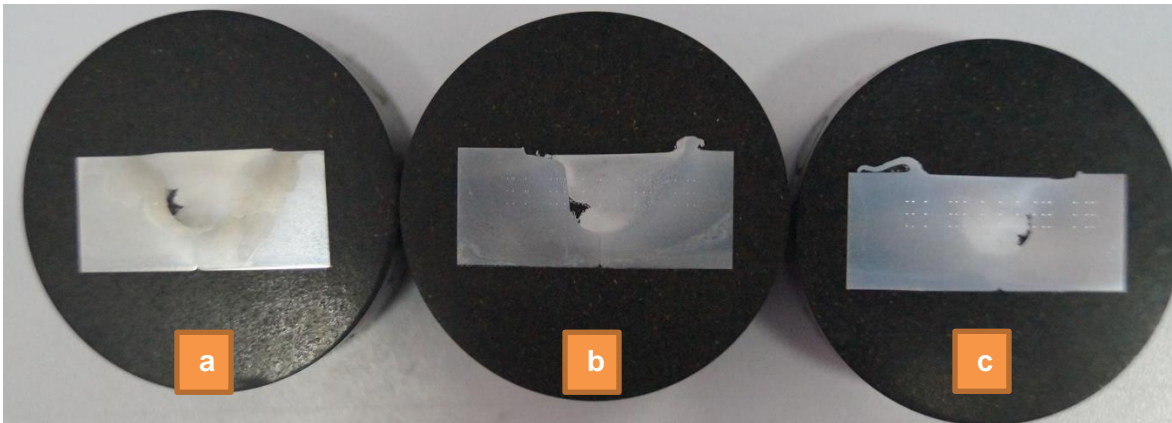


Figura (4.23) Probetas con mejores resultados en indentador 6 mm.

Como se puede ver la prueba de 2.5 cm/min y 1000 rpm (Figura (4.24)) comparada con el metal base se puede apreciar una marcada diferencia en el tamaño de grano. Lo mismo pasa si se compara el tamaño de grano de la pruebas 2.5 cm/min y 1500 rpm, y 3.0 cm/min y 1000 rpm (Figura (4.25)) contra el metal

base. Esto se debe al efecto de deformación y temperatura causado por la soldadura.

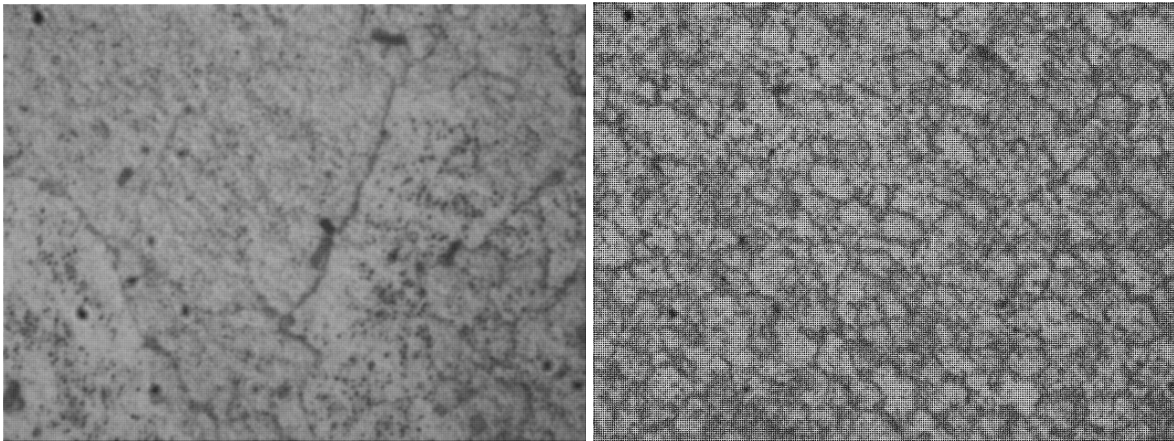


Figura (4.24) Tamaño de grano en metal base (izquierda) y zona de cordón prueba 2.5-1000 (derecha).

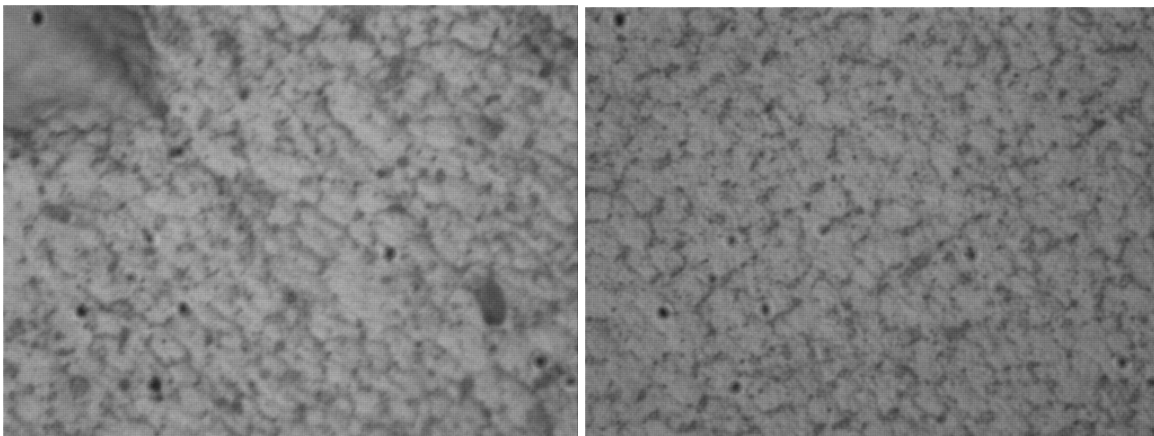


Figura (4.25) Tamaño de grano en zona de cordón 2.5 1500 (izquierda) y 3.0 1000 (derecha).

#### **4.6 COMPARATIVA.**

Comparando resultados del presente trabajo con los obtenidos por Leal (2012) se puede observar que para el indentador de 4 mm los resultados visuales son muy parecidos ya que para ambas investigaciones a bajas revoluciones el poro es demasiado pequeño o no hay poro. Mientras que a altas revoluciones el poro aumenta. En cuanto a la dureza la investigación de Leal (2012) entrega parámetros que van desde 50 a 60 Vickers en la zona del cordón y 90 a 100 fuera del mismo, mientras que la presente investigación oscilan entre los 110 hasta los 120 dentro del cordón y de 110 a 130 fuera del mismo. Esto se debe a que el material que se usa en la presente investigación (AA-7075) tiene mayor dureza en comparación con la aleación usada en la investigación de Leal (2012) (AA-6061).

Por otra parte para el indentador de 6 mm el trabajo de Leal (2012) presenta la mayoría de sus probetas sin poros contrario a esta investigación que todas las probetas presentaron poro. Y en cuanto a la dureza, para Leal (2012) su trabajo presento resultados de 55 a 65 Vickers dentro del cordón y fuera una dureza de 70 a 90 Vickers, en cuanto al presente trabajo la dureza va de los 100 a 120 Vickers dentro del cordón y hasta los 140 Vickers fuera del cordón; debido a la diferencia de materiales.

Se puede concluir que el presente trabajo ofrece mejores resultados para el indentador 4 mm ya que tiene mejor dureza y los defectos visuales como es el poro es muy parecido con la investigación de Leal (2012). Pero para el indentador de 6 mm la investigación de Leal (2012) ofrece mejores resultados tomando en cuenta que la mayoría no presenta poro mientras que todas las de la presente investigación se observa un poro muy grande y a lo largo de la junta.

La dureza es muy importante en los materiales que se someterán a algún trabajo, pero también lo es el poro o los defectos al momento de la soldadura pues a mayor sea el poro mayor serán las probabilidades de una fractura en la pieza soldada.

# CAPÍTULO 5

## 5 CONCLUSIONES

Se cumplen los objetivos de este trabajo donde se presentó el análisis metalográfico aplicado a probetas de aleación de aluminio AA-7075 soldadas por el método de soldadura por fricción agitación (SFA), con el diseño y manufactura de mordazas se logró la implementación de una prensa mecánica que, junto a un torquimetro, anulara los problemas derivados de una mala sujeción y que agilizará el proceso de la soldadura. Además se manufacturaron dos indentadores uno de 3 mm y otro de 5 mm.

Las variables propuestas para la investigación fueron cuatro indentadores: 3, 4, 5 y 6 mm de diámetro; tres velocidades de avance: 2.0, 2.5 y 3.0 cm/min; y 4 velocidades del giro del indentador: 1000, 1500, 2000 y 2500 rpm.

En el indentador de 3 mm es donde encontramos los mejores resultados observando poros casi nulos o poros muy pequeños para todas las pruebas y una dureza bastante aceptable. El indentador de 4 mm mostro mejores resultados a bajas revoluciones y a avances lentos, aunque todas presentaron poros más grandes comparados con el indentador de 3 mm. El indentador de 5 mm ofrece los mejores resultados con poros casi nulos y buena dureza a bajas revoluciones y avances de 2 y 3 cm/min. Para el indentador de 6 mm no se encontraron buenos resultados pues en todas las pruebas se apreció el poro a lo largo de la junta. Se realizó una prueba experimental usando una velocidad de giro de 800 rpm y 2.0 cm/min de avance, no se observaron defectos visuales y se recomienda realizar su análisis metalográfico.

En general los mejores resultados se presentaron para el ensayo con el indentador 3 mm a 2.0 cm/min de avance y 2000 rpm de giro; indentador 5 mm con 2.0 cm/min de avance y 1000 rpm de giro; indentador 5 mm con 3.0 cm/min de avance y 1000 rpm de giro. Tomando en cuenta ausencia de defectos visuales y el mejor comportamiento de dureza. A su vez también se logró revelar el tamaño de grano de la mayoría de las probetas, se recomienda efectuar un análisis más exhaustivo de los resultados.

Durante esta investigación se tuvo la oportunidad de aplicar varios de los conocimientos adquiridos durante la licenciatura, lo cual ayudo ampliamente en el desarrollo del presente trabajo.

Por ultimo como prospectivas del presente trabajo se plantea continuar con la investigación, proponiendo emplear los mismos indentadores usando otras variables para realizar una comparativa de resultados contra la presente investigación. O por otro lado ya sea: mantener los parámetros y proponer otros indentadores o cambiar las variables e indentadores; todo esto con el fin de encontrar los parámetros necesarios para tener una soldadura con condiciones óptimas. También sería interesante complementar con el revelado de tamaño de grano y con ensayos de tensión.

# BIBLIOGRAFÍA

Alcoa Mill Products. (n.d.). Alcoa 7075 data sheet. *ALLOY 7075 PLATE AND SHEET*. Bettendorf, Iowa, USA.

Bachs, L., & Cuesta, J. (1988). Aplicaciones Industriales Del Láser. In J. C. L. Bachs, *Aplicaciones Industriales Del Láser* (pp. 111-114). Barcelona: Productica.

Bahemmat, P., Hangpanahi, M., Besharati, M. K., Ahsanizadeh, S., & Rezaei, H. (2010, Marzo 23). Study on mechanical, micro-, and macrostructural characteristics of dissimilar friction stir welding of AA6061-T6 and AA7075-T6g. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, pp. 1854-1865.

Bisconti, B. (2009, Julio). *Histamar*. Retrieved from <http://www.histamar.com.ar/Astilleros/Diccionario/LetraS.htm>

Burgos, A., Svoboda, H., & Surian, E. (2010). Soldadura por fricción agitación (FSW) de aluminio. *Segundo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica*, 1-11.

Cabot, P., Moglioni, A., & Carella, E. (2003). Soldadura por Fricción Agitación (FSW) de AA 6061 T6. *Materia*, vol.8, 187-195.

Casioepa. (2010, Septiembre). Retrieved from [http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Emsamble\\_Soldaduras](http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Emsamble_Soldaduras)

Gonzalez Leon, J. A. (2012). *Diseño y fabricación de dispositivo para torno paralelo convencional para la implementación de soldadura por fricción*. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.

Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos Y Sistemas*. Estado de México: Prentice Hall.

Jeffus, L. (2008). *Manual de soldadura GTAW (TIG)*. Paraninfo.

Jeffus, L. (2009). Soldadura: principios y aplicaciones. In L. Jeffus, *Soldadura: principios y aplicaciones* (pp. 10-11). Madrid: Paraninfo.

Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación.

Leal Cervantes, L. M. (2012). *Análisis de soldadura por fricción agitación por medio de micro-dureza y tamaño de grano con diferentes parametros de soldadura en una aleación de aluminio 6061*. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.

MAG TECH 1:. (2004). *Report of a the global watch mission*.

- Molera, S. P. (1989). *Electromecanizado: electroerosión y mecanizado electroquímico*. Marcombo.
- Rajakumar, S., Muralidharan, C., & Balasurbramanian, V. (2009, septiembre 3). Optimization of the friction-stir-welding process and tool parameters to attain a maximum tensile strength of AA7075-T6 aluminum alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, pp. 1-18.
- Rajiv S., M., & Murray W., M. (2007). Friction Stir Welding and processing. In M. Rajiv S., & M. Murray W., *Friction Stir Welding and processing* (p. 3). United States of America: ASM International.
- Rajiv S., M., & Z. Y., M. (2005). Materials Science and Engineering. In M. Rajiv S., & M. Z. Y., *Materials Science and Engineering* (p. 1).
- Rhodes, C. G., Mahoney, M. W., Bingel, W. H., Spurling, R. A., & Bampton, C. C. (1997). EFFECTS OF FRICTION STIR WELDING ON MICROSTRUCTURE OF 7075 ALUMINUM. *Scripta Materialia*, 36(1), 69-75.
- Richard Rowe, L. J. (2008). *Manual de soldadura GMAW(MIG-MAG)*. Paraninfo.
- Rodríguez, P. C. (2001). *Manual de Soldadura: Soldadura Oxiacetilénica o por Gas*. Argentina: Alsina.
- Santiago, D., Lombera, G., Cassanelli, A., Urquiza, S., & Vedia, L. A. (2005). Análisis Térmico en Soldadura por Fricción. *Mecánica Computacional Vol. XXIV*, 2781-2793.
- Sola, P. M. (1992). *Soldadura Industrial: Cases y Aplicaciones*. Barcelona, España: Marcombo.
- Sosa Dominguez, A. (2010). *Efecto del tratamiento térmico de envejecimiento en aluminio AA-7075 soldado por fricción agitación*. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Thomas, W., Nicholas, E., Needham, J., Murch, M., Temple-Smith, P., & Dawes, C. (1995). *Patent No. 5460317*. United States of America.
- Vera, R. M. (2009). *Soldadura por fricción agitación una alternativa en la unión de aluminio AA-7075 insoldable por fusión*. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.