



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA

FACTIBILIDAD TÉCNICA DE REALIZAR SOLDADURA POR FRICCIÓN-  
AGITACIÓN (FSW) EN COBRE PURO, PARA CENTRO DE MECANIZADO CNC,  
CCHEN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

CLAUDIO ANDRÉS HUARACÁN PICHÚN

PROFESOR GUÍA:  
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ALEJANDRO VARGAS USCATEGUI  
LUIS OLIVARES SALINAS

ESTE TRABAJO HA SIDO FINANCIADO POR LA COMISIÓN CHILENA DE  
ENERGÍA NUCLEAR  
(CCHEN)

SANTIAGO DE CHILE  
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: CLAUDIO ANDRÉS HUARACÁN PICHÚN  
FECHA: DICIEMBRE 2018  
PROF. GUÍA: RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA**

**FACTIBILIDAD TÉCNICA DE REALIZA SOLDADURA POR FRICCIÓN - AGITACIÓN  
(FSW) EN COBRE PURO, PARA CENTRO DE MECANIZADO CNC, CCHEN.**

El cobre es uno de los materiales más versátiles disponibles en la industria, dadas sus propiedades físicas y mecánicas, con aplicaciones en la electrónica, piping, la industria metalmeccánica y la construcción. Sin embargo, su utilización se ve limitada a los procesos de manufactura disponibles, donde los sistemas de unión de materiales suponen un problema. En los procesos de soldadura tradicionales, arco eléctrico protegido por fundente o gases inertes, es necesario una gran densidad de energía para poder alcanzar el punto de fusión del material (1083 °C), además estos generan defectos de soldadura que reduce considerablemente sus propiedades, como la resistencia a la tracción y la dureza.

La soldadura por fricción-agitación (FSW), es un sistema de soldadura creado para la unión de materiales que presentan problemas en su soldado, en un principio fue creado para soldadura de aluminios de la serie 2XXX y 7XXX, para luego ser aplicados en cobre, aleaciones de titanio y algunos aceros. El proceso consiste en generar una unión de superficies aprovechando el aumento de temperatura y la deformación plástica generadas por la fricción de una herramienta cilíndrica rotativa en su paso por la línea de soldadura.

El objetivo general de este trabajo fue determinar la posibilidad de realizar un proceso de FSW en un centro de mecanizado (CM) modelo HATFORD HCMC 2082, disponible en la Comisión Chilena de Energía nuclear (CCHEN). Para esto fueron realizadas las siguientes etapas, el desarrollo de un modelo teórico para calcular la potencia necesaria para realizar FSW y comparar con las características del CM; determinar la evolución de las propiedades mecánicas de la unión (resistencia a la tracción, dureza y ductilidad) y la microestructura respecto de la velocidad de rotación de la herramienta; y determinar los parámetros con los cuales se obtienen los mejores resultados de propiedades mecánicas.

Las experiencias fueron realizadas en placas de cobre comercial de 8 mm de espesor, utilizando una herramienta carburo tungsteno, a una velocidad constante de avance de herramienta de 5 mm/min. Se utilizó como variable del estudio la velocidad de rotación de la herramienta en el rango de los 800 RPM a 1600 RPM.

A partir del estudio, concluyó que el centro de mecanizado reúne las condiciones para FSW. De la experimentación se obtuvieron soldaduras de superficie regular, sin defectos visibles. Los ensayos realizados a estas, radiografía, metalografía, tracción, dureza, mostraron que la calidad de soldadura disminuye al aumentar las RPM de la prueba, obteniendo los mejores resultados en condiciones de operación 5 mm/min de velocidad de avance y 800 RPM de velocidad de rotación de herramienta.

## Tabla de contenido

1.- Introducción.....	1
2.- Objetivos .....	2
2.1 Objetivo General.....	2
2.2 Objetivos específicos.....	2
2.3 Alcances .....	2
3.- Antecedentes .....	3
3.1 Cobre.....	3
3.1.1 Propiedades y aplicaciones.....	3
3.1.2 Soldabilidad del cobre.....	3
3.1.3 Métodos de soldadura por fusión.....	4
3.2 Soldadura por fricción.....	5
3.2.1 Soldadura por Fricción Rotacional [3, 31, 19] .....	6
3.2.1 Soldadura por Fricción Lineal.....	6
3.2.1 Soldadura por Fricción- Inercia .....	6
3.3 Soldadura por fricción- agitación .....	7
3.4 Fundamentos del proceso de FSW .....	8
3.4.1 Principio de Funcionamiento.....	8
3.4.2 Flujo de Material.....	9
3.4.3 Parámetros de operación .....	10
3.4.4 Tipos de Juntas Soldadas .....	12
3.4.5 Estructura interna Soldadura.....	13
3.4.6 Defectos de Soldadura.....	14
3.5 Generación de calor.....	15
3.5.1 Variable de estado de contacto.....	16
3.5.2 Estimación analítica de Generación de Calor .....	17
3.5.3 Efecto de la condición de contacto .....	19
3.5.4 Modelos de Distribución de Temperatura.....	19
3.6 Centro de mecanizado.....	21
4.- Metodología. ....	23
4.1 Cálculo Potencia Teórico.....	23
4.2 Montaje Experimental .....	25
4.2.1 Placa de sujeción.....	25
4.2.2 Placa de refrigeración .....	26

4.2.3 Diseño de herramienta .....	27
4.2.4 Parámetros de operación .....	29
4.3 Realización de experiencias .....	30
4.4 Procedimiento Ensayos .....	30
4.4.1 Radiografías .....	30
4.4.2 Metalografías .....	31
4.4.3 Micro dureza .....	32
4.4.4 Ensayos de tracción .....	33
5.- Resultados y discusión.....	35
5.1 Potencia calculada y reportada.....	35
5.2 Presentación del cordón de soldadura .....	37
5.3 Radiografías .....	39
5.4 Ensayos de tracción.....	40
5.5 Metalografías .....	43
5.6 Ensayos de dureza .....	47
6.- Conclusiones.....	50
6.1 Trabajo Futuro .....	52
7.-Bibliografía .....	53
8.- Anexos .....	56

## Índice de figuras

Figura 1: Esquema General FSW .....	8
Figura 2: Esquema Herramienta FSW .....	9
Figura 3: Flujo de Material alrededor PIN.....	10
Figura 4: Configuración de Juntas Soldadas, a) tope, b,c,) en T, d,e)Sobrepuesta, f,g) en L.....	13
Figura 5: Zonas características en FSW, sección transversal, para aleación 2024 Aluminio .....	13
Figura 6: Esquema defectos de Soldadura .....	15
Figura 7:Diseño herramienta simplificada. ....	18
Figura 8: Esquema discretización cordón de soldadura.....	24
Figura 9: Modelo 3D mesa de sujeción .....	26
Figura 10: Placa de refrigeración construida.....	27
Figura 11: Modelo hombro y pin.....	28
Figura 12: Configuración inicial de experiencias .....	29
Figura 13: Ubicación de toma de micrografías .....	32
Figura 14: Patrón de medición ensayo de micro dureza .....	32
Figura 15: Durómetro STRURS, Duramin-02 .....	33
Figura 16: Diseño final probeta tracción .....	33
Figura 17: Máquina universal de ensayos mecánicos, Zwick/Roell, Z100 .....	34
Figura 18: Interfaz CNC, reporte de potencias.....	35
Figura 19:Cordón de soldadura P1, 5 mm/min 800 RPM.....	37
Figura 20: Cordón de soldadura P2, 5 mm/min 1200 RPM.....	38
Figura 21: Cordón de soldadura P3, 5 mm/min 1600RPM.....	38
Figura 22: Radiografía P1 .....	39
Figura 23: Radiografía P2 .....	39
Figura 24: Radiografía P3 .....	40
Figura 25: Comparación gráficos esfuerzo deformación .....	41
Figura 26: Evolución resistencia a la tracción con RPM.....	42
Figura 27: Evolución elongación máxima con RPM .....	42
Figura 28: Perfil transversal cordones de soldadura .....	43
Figura 29: Evolución tamaño de zona nugget con RPM .....	46
Figura 30:Evolución tamaño de zona TMAZ con RPM.....	46
Figura 31: Perfil de dureza material base.....	47
Figura 32:Perfil de dureza experiencia P1 .....	48
Figura 33: Perfil de dureza experiencia P2 .....	48
Figura 34: Perfil de dureza experiencia P3 .....	49

## Índice de tablas

Tabla 1: Condiciones de operación utilizados en otros estudios.....	12
Tabla 2: Resumen Variables Estado de Contacto.....	17
Tabla 3: Ficha Técnica CNC Hatford HCMC-2082 [27].....	22
Tabla 4: Propiedades cobre utilizado .....	23
Tabla 5: Dimensiones de herramientas de otros estudios.....	28
Tabla 6: Etiqueta y condiciones de operación .....	30
Tabla 7: Parámetros toma de Radiografías.....	31
Tabla 8: Ataques químicos recomendados para cobre .....	31
Tabla 9: Potencias reportadas y calculadas.....	36
Tabla 10: Resultados ensayo de tracción .....	41
Tabla 11: Tamaño de grano material base.....	44
Tabla 12: Tamaño de grano P1 (800 RPM, 5 mm/min).....	44
Tabla 13: Tamaño de grano P2 (1200 RPM, 5 mm/min).....	44
Tabla 14:Tamaño de grano P3 (1600 RPM, 5 mm/min).....	44

## 1.- Introducción

La soldadura por fricción-agitación (FSW, Friction Stir Welding) nace en 1991, desarrollado por The Welding Institute (TWI), como una alternativa a los procesos de soldadura tradicionales, como son el arco eléctrico con electrodo protegido (SMAW), o arco protegido por gases inertes (GMAW, GTAW), los cuales presentan diversos problemas en la unión de materiales como el aluminio, el cobre, titanio, entre otros, relacionado al cambios por el proceso fusión-solidificación, y/o la cantidad de energía necesaria para lograrlo. Actualmente tiene aplicaciones en la industria de la aeronáutica, naval, y espacial.

La FSW es un proceso de soldadura en estado sólido, dado que la temperatura del material es elevada a un punto menor al de fusión, junto a la aplicación deformación mecánica se genera la unión de las superficies de trabajo. Este consiste en generar roce entre el material de la zona de unión con una herramienta rotatoria cilíndrica en toda la línea de soldadura. Este método reduce la energía necesaria, además de reducir los defectos como vacíos, la presencia de óxidos dentro del cordón y el cambio de propiedades mecánicas como la dureza y la resistencia a la tracción.

Al ser un proceso relativamente nuevo, se han realizado estudios principalmente experimentales para determinar los efectos de las distintas variables del diseño del proceso, material de herramienta, y variación de parámetros de operación, velocidad de avance, velocidad de rotación de herramienta, e inclinación de esta, en la calidad de la soldadura final.

El buen comportamiento que ha registrado el proceso de FSW aplicado al cobre motivan el desarrollo de la tecnología, lo cual permitirá ampliar los procesos disponibles para la industria de elementos de cobre en el país.

Este trabajo de título enmarca dentro del proyecto “Desarrollo de tecnología de FSW en equipos convencionales para materiales de uso ingenieril” desarrollado por la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN). El estudio buscó determinar la capacidad de un centro de mecanizado CNC para realizar FSW en cobre electrolítico comercial, evaluando la calidad de las soldaduras realizadas, aspecto y propiedades mecánicas, determinando la relación de éstas con la variación de la velocidad de rotación de herramienta, para finalmente encontrar el conjunto de parámetros de operación donde se obtuvieron los mejores resultados.

## **2.- Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

- Determinar la factibilidad de realizar soldadura por fricción-agitación a tope para placas de cobre de 8 mm en centro de mecanizado Hatford HCMC-2082

### **2.2 Objetivos específicos**

- Comparar los requerimientos energéticos para realizar FSW con las características del centro de mecanizado disponible.
- Realizar pruebas de FSW en placas de cobre B-152 DHP de 8 mm a tope, modificando la velocidad de rotación del husillo.
- Realizar caracterización de propiedades mecánicas y microestructuras de las muestras realizadas.
- Analizar los resultados obtenidos y determinar las condiciones donde se obtiene los mejores resultados.

### **2.3 Alcances**

Los alcances de este estudio se definieron como:

- Realización de un cálculo predictivo de la capacidad necesaria de la maquinaria para la realización de FSW.
- Las experiencias se realizan a velocidad de avance constante 5 mm/min.
- Las experiencias se realizan a 3 velocidades de rotación de herramienta: 800 RPM, 1200 RPM, 1600 RPM.
- Caracterización metalográfica y propiedades mecánicas de las muestras obtenidas, mediante ensayos de tracción, dureza, radiografías y metalografías.



### **3.- Antecedentes**

#### **3.1 Cobre**

El cobre es uno de los primeros metales usados por la humanidad, su extracción y utilización se registra desde el 9000 A.C, con esto se deja de depender de las herramientas en base a piedra. Así mismo, el bronce, aleación de cobre-estaño marcar el inicio de una nueva etapa en la civilización. [9]

Actualmente el cobre tiene una gran importancia económica para Chile, dado que su extracción y exportación significa 10% promedio al PIB durante los últimos 10 años [34]. A pesar de la gran producción del mineral en el país, el mayor porcentaje de este se exporta de manera natural, dado que la manufactura se ve limitada a los procesos convencionales disponibles.

##### **3.1.1 Propiedades y aplicaciones**

Este metal y gran parte de sus aleaciones tienen una estructura cristalográfica cúbica centrada en las caras, lo que le da una gran maleabilidad. El material destaca principalmente por su conductividad térmica y eléctrica, su resistencia a la corrosión contra el agua dulce, salada y varios químicos orgánicos, su resistencia al desgaste metal-metal, y su buen aspecto estético [28]

Estas características, además de su valor económico, son los que le dan una gran variedad de usos: conductores eléctricos, y para la fabricación de equipamiento eléctrico, su resistencia a la corrosión lo hace importante para la fabricación de tuberías, válvulas, intercambiadores de calor, en circuitos de agua o vapor, y equipamiento para el manejo de químicos, su color y maleabilidad favorece su aplicación en elementos de arquitectura [5]. Por otra parte, en la última década se han desarrollado sus aplicaciones como un potente bactericida, en diferentes usos y equipamiento de la medicina. Se ha demostrado que una superficie de cobre es capaz de eliminar el 99,99% de bacterias como la Escherichia coli, salmonella entérica, entre muchas otras [35].

##### **3.1.2 Soldabilidad del cobre**

A pesar de su versatilidad, el cobre presenta un problema en su manufactura, en especial los métodos de unión o soldadura, y es que su alta conductividad térmica dificulta alcanzar grandes temperaturas necesarias para la soldadura por

fusión ocupada en los métodos tradicionales [1]. Además, su coeficiente de expansión térmica hace que el control dimensional de las piezas a unir sea menos exacto. Así mismo, el cobre tiene la particularidad de formar óxidos a temperaturas altas, lo que facilita la aparición de defectos de soldadura que debilitan la zona de unión [1].

### 3.1.3 Métodos de soldadura por fusión

Los métodos de soldadura utilizados en la unión del cobre y sus aleaciones presentan una serie de desventajas, las que serán presentadas a continuación.

A) **Soldadura al arco Tungsteno-Gas (GTAW):** Corresponde a un proceso de soldadura que requiere la fusión del material en la zona a unir. El calor es generado por el arco eléctrico formado entre el material y un electrodo no consumible de tungsteno, y la zona es protegida por un flujo de gas inerte que desplaza el aire del entorno, para evitar la formación de óxidos. Este método se puede o no con el material de aporte, en caso de utilizar, corresponde a una varilla externa a la “pistola” que forma el arco e inyecta el gas [25, 6].

En cuanto a la soldadura de cobre, este método presenta las siguientes dificultades, dada la transferencia térmica del cobre, requiere un calentamiento previo de la zona, lo que aumenta la energía requerida. Tiene una baja penetración, por lo que, para placas de mayor espesor, existe una región que no se une. Finalmente, la velocidad de soldadura es bastante baja, para mantener un flujo de calor adecuado para generar la fusión [1, 6].

B) **Soldadura al Arco Metal- Gas (GMAW):** La unión se realiza mediante fusión. El calor es aportado por el arco eléctricos formado por el material y el electrodo, que en este caso es consumible y representa el material de aporte, además la zona es protegida por un gas inerte como el CO<sub>2</sub>, AR, O<sub>2</sub> [25, 30].

La protección de la zona de soldadura en este método es menos efectiva que en GTAW, dado que es común la formación de óxidos. Por otro lado, el material aportado, genera que el material en la unión sea menos conductivo [1, 30].

C) **Soldadura al Arco Protegido (SMAW):** Este método cuenta con un electrodo consumible recubierto por un fundente, que a la hora de producir el calor por arco eléctrico entre metal-electrodo, pasa a estado gaseoso y forma una capa de protección, además estabiliza el arco. Es el proceso más económico para la soldadura de metales [25,26].

Este método produce uniones de muy baja calidad, principalmente por la formación de óxidos y porosidad a causa de la liberación de escoria en la zona de trabajo [4, 6].

D) **Sistema Oxigás:** Una llama producida por la combustión de gases oxígeno-acetileno, a alta presión es dirigida hacia la zona de unión, produciendo la fusión del material base con el material de aporte, a medida que la llama avanza, estos se solidifican formando el cordón [25].

Al momento de soldar cobre, este método requiere de un precalentamiento de la zona a fundir, se produce la formación de óxidos. Finalmente, por la gran cantidad de calor necesaria, la velocidad de soldadura es baja [1].

E) **Soldadura por Fricción:** El calor necesario para la generación de la unión es generado por fricción entre dos o más superficies. Evita la formación de óxidos dado que el proceso se realiza en estado sólido, además de reducir los defectos por porosidad y material incrustado, esto depende principalmente por el diseño de las herramientas. Sin embargo, el método presenta dificultades en las geometrías de los cordones de soldadura, dado que se realiza en una máquina con movimientos definidos. Por otra parte, este método produce deformaciones en el material, luego es necesario maquinar la pieza de forma posterior [4, 21, 25].

### 3.2 Soldadura por fricción

El proceso de soldadura por fricción (FW), es un proceso que permite la unión de dos superficies de material, en contacto directo, la temperatura de estas se eleva por medio de la generación de calor por fricción mecánica (E. Mecánica -> E. Térmica) a la temperatura necesaria. La particularidad de este proceso es que se realiza en estado sólido, pero dada la temperatura que se alcanza, el material tiene se encuentra en estado plástico y luego, mediante la aplicación de una presión se produce la unión de superficies. [25]

En general, este tipo de procesos tiene como ventaja la no utilización de materiales de aporte o consumibles, al ser un proceso programable, se asegura su repetibilidad con resultados similares.

La soldadura por fricción permite realizar soldadura a distintos tipos de materiales, metales ferrosos y no ferrosos, pudiendo unir materiales con distintas propiedades térmicas y mecánicas, esto se debe a que el proceso se realiza a temperaturas bajo la fusión con bajos tiempo de soldadura, lo que evita que se formen fases del material frágiles y con malas propiedades mecánicas como en otros procesos. [21, 25]

### **3.2.1 Soldadura por Fricción Rotacional [3, 31, 19]**

El proceso de soldadura rotacional es el precursor de los procesos por fricción. En este, el calor se genera al hacer girar una pieza de trabajo sobre otra que se encuentra estática. Luego de un periodo de tiempo establecido, la rotación se detiene bruscamente y aumenta la presión entre las piezas de trabajo hasta conseguir la unión de las superficies.

El proceso se aplica en una máquina similar a un torno convencional, este requiere un sistema de frenado de husillo, medio de aplicación y control de la presión axial, un contador de tiempo de ciclo.

Este método se limita a la unión de piezas de trabajo cilíndrica, sin embargo, es una buena opción para la unión de materiales disímiles. [3, 31, 19]

### **3.2.1 Soldadura por Fricción Lineal**

En este proceso se realiza al presionar dos piezas de trabajo, donde se hace vibrar una a alta frecuencia, generando la fricción y por lo tanto calor en la unión, luego de un tiempo determinado, la vibración se detiene para aumentar la presión en las superficies hasta lograr la unión.

Su principal ventaja es la rapidez con la que se produce, debido a que con la vibración se obtiene un movimiento en toda la superficie, por lo que no hay un aumento significativo del tiempo de proceso al aumentar el tamaño de piezas, además requiere poca preparación de las superficies a soldar, las imperfecciones e impurezas se eliminan con una capa de metal como sobrante de la operación. [3, 31, 19]

### **3.2.1 Soldadura por Fricción- Inercia**

La disposición inicial de este proceso de soldadura es similar a la soldadura rotacional, en donde tenemos una de las piezas de trabajo se encuentra estática y otra se encuentra sobre una plataforma o mordaza que le transmite potencia al hacerla girar. La diferencia está en que se agrega además un volante o pieza encargada de aumentar la inercia del movimiento de rotación.

En este caso, se comienza la aceleración de la pieza rotatoria sin estar en contacto con la superficie estática, esto se mantiene hasta que alcanza una velocidad angular determinada, luego, se deja este husillo en rotación libre, el motor

se desacopla, y se inicia el contacto entre las superficies de trabajo. Así, la energía cinética acumulada por la pieza más el volante comienza a disiparse como en forma de calor por la fricción producida. En este proceso, la presión ejercida sobre ambas superficies es constante hasta que el volante se detiene totalmente, punto en que la presión aumenta para alcanzar finalmente la presión de forja del material trabajado.

Como principal diferencia con la soldadura rotacional, se tiene que la velocidad angular de trabajo, en ella se mantiene constante durante el proceso, y en inercia, la velocidad se reduce durante todo el procedimiento. [3, 31, 19]

### **3.3 Soldadura por fricción- agitación**

El FSW es un método de soldadura por fricción desarrollado por “The Welding Institute” (TWI) de Inglaterra en 1991 por Wayne Thomas, el método se desarrolla como solución a los problemas que presentan los métodos convencionales de soldadura para el aluminio, largamente utilizado en la industria de transporte, como la fabricación de buques, aeroplanos y trenes [25].

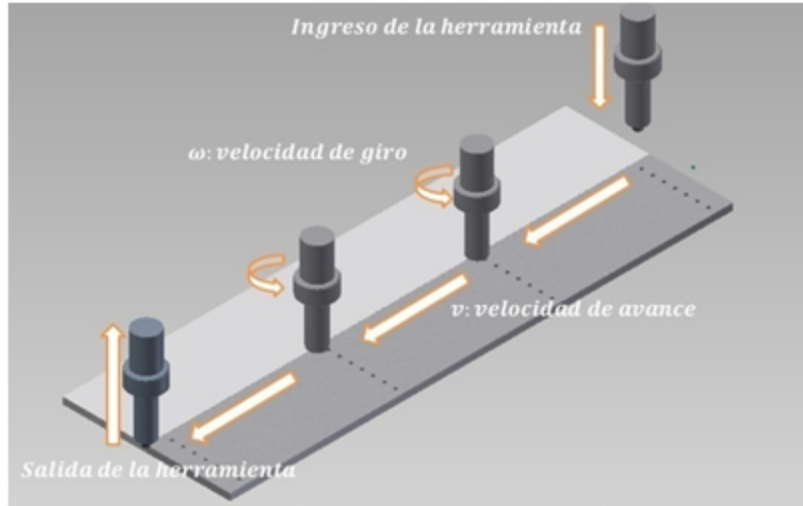
Al igual que el resto de las soldaduras por fricción, este proceso tiene la ventaja de no necesitar un material de aporte, lo que genera una unión con propiedades mecánicas que no difieren notoriamente en las propiedades del material base y con una vida útil a la fatiga mayor que las soldaduras tradicionales, es un proceso limpio que no genera emisiones contaminantes, la pérdida de material es mínima y no se requieren atmósferas controladas ni equipos demasiado especializados.

A pesar de que el principio de funcionamiento del proceso es simple a primera vista, las condiciones de unión de las superficies soldadas dependen de muchos factores, los cuales no están del todo estudiados, como lo son la geometría de la herramienta utilizada o los parámetros de operación.

La disposición básica del proceso consta de dos superficies planas en contacto directo mediante cualquier sistema de sujeción acorde a la geometría de la pieza, que impida la separación de las piezas de trabajo. Por otro lado, a diferencia de los métodos por fricción descritos, se requiere una herramienta, que como geometría general consta de un cilindro mayor y en una de sus caras planas un cilindro de menor diámetro, que es la encargada de generar el calor necesario. La forma de esta herramienta puede variar dependiendo del uso, esto se clarifica más adelante. Finalmente se requiere de un sistema que regule el avance y rotación de la herramienta sobre el espacio de trabajo.

En la figura 1 se puede observar un esquema básico del proceso.

**Figura 1: Esquema General FSW**



Las principales aplicaciones de FSW se tienen para la unión de aleaciones de aluminio, estas utilizadas principalmente en la fabricación de transbordadores espaciales, aviones, vehículos militares y la industria automotriz en general. En particular para el cobre, las aplicaciones se dan para la industria de la informática y conexiones eléctricas. En los últimos años se ha estudiado su aplicación en la fabricación de contenedores de residuos nucleares, contenedores cilíndricos fabricados completamente de cobre sobre los 50 mm de espesor. [4]

### **3.4 Fundamentos del proceso de FSW**

#### **3.4.1 Principio de Funcionamiento.**

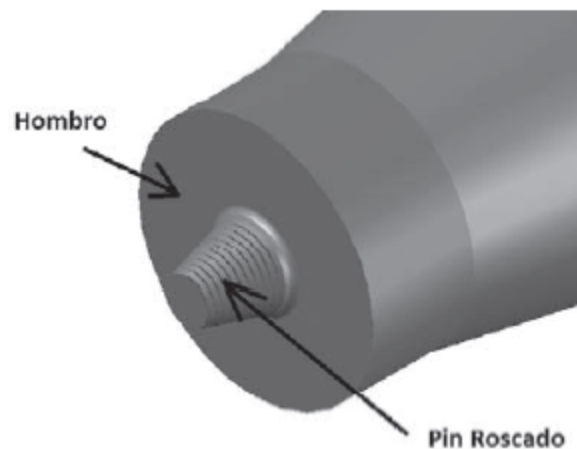
El proceso consiste en la rotación de una herramienta no consumible, ver figura 2, en la que se reconocen 2 partes principales, el hombro, y el pin. Este último, ya en movimiento comienza la penetración en las piezas de trabajo, hasta que el hombro queda en contacto con la superficie de las placas. Luego este avanza por la zona de unión a una velocidad de avance y rotación determinadas previamente, gracias a que el material con el calor generado comienza a ablandarse, y, al terminar el recorrido de soldadura, la herramienta, sin detenerse comienza a salir de la junta soldada.

La función de la herramienta se divide en 2, el hombro es el encargado de generar el mayor porcentaje de calor para elevar la temperatura, y por otro lado, el

pin complementa la generación de calor y se encarga de provocar el flujo de material desde la zona frontal de la herramienta hacia el lado posterior, llenando el volumen de vacío que esta deja al avanzar. Por lo tanto, el diseño cuidadoso de la herramienta utilizada es importante para la generación de una junta soldada sin mayores defectos.

Este proceso de soldadura se puede realizar en maquinaria especializada como también en maquinaria convencional, como fresadoras tradicionales y controladas numéricamente, y como en este estudio, en centros de mecanizado CNC, de ahí su fácil implementación y automatización.

**Figura 2: Esquema Herramienta FSW**



### 3.4.2 Flujo de Material

El pin de la herramienta genera un flujo de material al avanzar por la junta, la forma de este movimiento depende de factores geométricos de la herramienta como de los parámetros de operación. Considerando esto, se pueden reconocer dos zonas principales en el movimiento del material, de avance y retroceso, como se ve en la figura 3.

Se puede observar, el área más afectada es la zona de retroceso de rotación de la herramienta, donde el material de la zona frontal fluye hacia la parte posterior. En el lado de avance, el material entra en una zona de rotación cercano al pin, donde se mantiene por una o más revoluciones antes de ser depositado en la parte

posterior de la herramienta, este flujo de material depende además del factor de fricción que existe entre el material del pin y el de trabajo.

El flujo de material se puede dividir en 2 componentes: el impulsado por el hombro, que se genera en mayor proporción en la zona directamente debajo del hombro, y el impulsado por el pin, siendo el material más profundo impulsado, generando calor y deformación, estos dos se complementan para generar la soldadura.

**Figura 3: Flujo de Material alrededor PIN**



### 3.4.3 Parámetros de operación

Los parámetros son los que definen la calidad de la junta soldada que se genera, a continuación, se explicita la influencia de cada uno de ellos en el material [1]:

- **Material de la Herramienta:** la elección de este parámetro depende directamente del material que se quiere trabajar por FSW. Este debe tener una dureza apropiada para soportar los esfuerzos producidos en el movimiento de material, una buena resistencia al desgaste y al creep a la temperatura de soldadura, una resistencia a la fractura alta para las temperaturas ambientes y de trabajo, además de una buena compatibilidad en fricción con el material base, pues de este factor depende la capacidad de generar calor [18, 15] Alguno de los materiales más ocupados son el acero rápido (H13), Carburo Tungsteno o Nitruro de Boro.



- **Geometría de la herramienta:** el diámetro del hombro determina la cantidad de calor capaz de generar de la herramienta, al aumentar, aumenta el calor, sin embargo, se debe tener cuidado con la temperatura que se pueda alcanzar, siempre debe ser menor a la temperatura de fusión del material de trabajo. El pin puede tener forma cilíndrica o cónico, con o sin estrías, lo que tiene directa relación en la capacidad de generar deformación del material. Su principal dimensión es el largo del pin, que define la profundidad máxima que puede alcanzar soldadura.
- **Velocidad de Avance (mm/min):** corresponde a la velocidad con la que la herramienta se mueve por toda la línea de unión. Tiene relación directa entre este valor y el calor generado, si la velocidad aumente, el calor transferido y la temperatura alcanzada en la unión disminuye, y viceversa. La determinación de este valor depende del material que se quiere trabajar, sus propiedades mecánicas y su temperatura de fusión.
- **Velocidad de Rotación (RPM):** al igual que la velocidad de avance, este parámetro está relacionado con el calor que se transfiere a la zona de soldadura, en este caso, tiene un efecto mayor en el tamaño de las zonas afectadas térmicamente (HAZ) y termo mecánicamente(TMAZ).
- **Ángulo de Inclinación de la herramienta:** Este ángulo aumenta la fuerza de compresión sobre la zona de soldadura aplicada por el hombro de la herramienta, y por lo tanto la presión y roce entre los materiales. Aumentando el roce aumenta el calor generado, los estudios realizados para el cobre, establece un rango de 1° a 3° para la inclinación.

Los factores fácilmente controlables por cualquier máquina son la velocidad de avance y rotación. Por otra parte, el material de herramienta se determina con anterioridad, sin embargo, el ángulo de inclinación es totalmente ajeno al control. A continuación, se presenta el conjunto de parámetros de operación probados en cobre.

**Tabla 1: Condiciones de operación utilizados en otros estudios.**

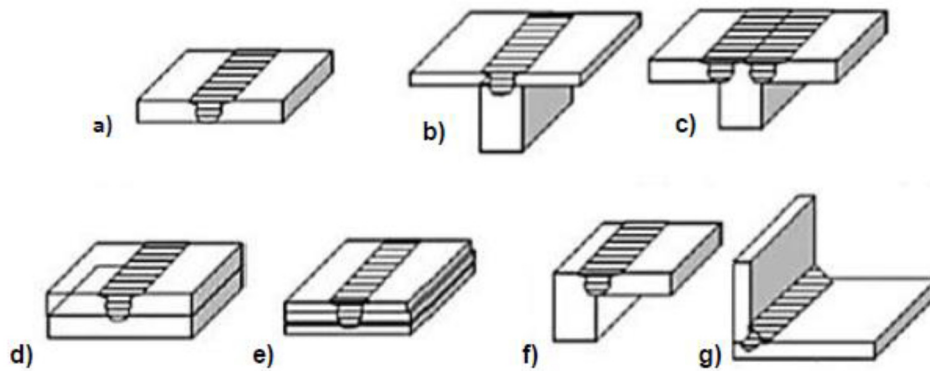
Referencia	Espesor placa (mm)	Velocidad Rotación RPM	Velocidad de avance (mm/min)
[2]	3,1	400-1200	20-60
[5]	6	1300-1600	30-45
[6]	4	1250	61
[7]	2	400-1000	200-800

#### **3.4.4 Tipos de Juntas Soldadas**

Para terminar de definir el proceso de FSW, se debe determinar la configuración final de las juntas soldadas a desarrollar. Con esto se puede definir cómo debe estar posicionado el material antes del proceso y cómo debe ser fijado a la mesa de trabajo.

Las configuraciones posibles de mayor uso son las mostradas en la figura 4, siendo la principal, la junta de placas a tope, que se utiliza en este estudio. La junta en T se utiliza principalmente en la unión de perfiles de aluminio y estructuras soldadas. Por otra parte, se tiene la unión de placas sobrepuestas, en donde la capacidad de generación de calor del Pin de forma individual toma gran importancia, para lograr la plastificación del material de las placas inferiores. Para esto se desarrollaron herramientas de soldadura de diámetro mucho mayor a las utilizadas en soldadura a tope. Finalmente, las juntas en L, son ocupadas principalmente en la fabricación de perfiles, sin embargo, la implementación total de FSW se dificulta por los defectos que se forman a la raíz de la junta soldada.

**Figura 4: Configuración de Juntas Soldadas, a) tope, b,c,) en T, d,e) Sobrepuesta, f,g) en L**



### 3.4.5 Estructura interna Soldadura

Al hacer un corte transversal a la zona de soldadura, se pueden reconocer 4 zonas del material base luego de la realización de FSW, cada una de ellas sufrió de distinta manera con el calor y deformación plástica generada por el paso de la herramienta entre las superficies. En la figura 5 se muestran las zonas afectadas para un proceso de FSW para una aleación de aluminio 2024, se considera que es un comportamiento general para el resto de los materiales.

**Figura 5: Zonas características en FSW, sección transversal, para aleación 2024 Aluminio**



A) **Material de base:** Esta zona conserva la estructura cristalográfica y propiedades mecánicas del material original, a pesar de haber elevado su temperatura, no es lo suficiente como para sufrir algún efecto.

- B) **Zona Afectada por el Calor (HAZ):** en esta zona, el calor transferido es el suficiente como para provocar cambios en la microestructura del material base, pero no se sufre ningún tipo de deformación plástica producto del movimiento de material. Aunque se alcanzan temperaturas menores que en la (TMAZ), esta temperatura puede tener efecto, generando peores propiedades mecánicas en materiales que se endurecen por envejecimiento.
- C) **Zona afectada Termo-mecánicamente (TMAZ):** en esta región se tiene el efecto directo de la deformación plástica producido por la herramienta, además, el calor permite una recristalización parcial del material.
- D) **Zona “Nugget”:** Para aleaciones de cobre se tiene una zona particular en donde se tiene efectos de deformación plástica, pero en donde el calor es el suficiente para generar una recristalización total. Corresponde a la zona que ocupó el pin por su paso por el material, se generan unos granos de menor tamaño que en el material base. [13,32]

### 3.4.6 Defectos de Soldadura

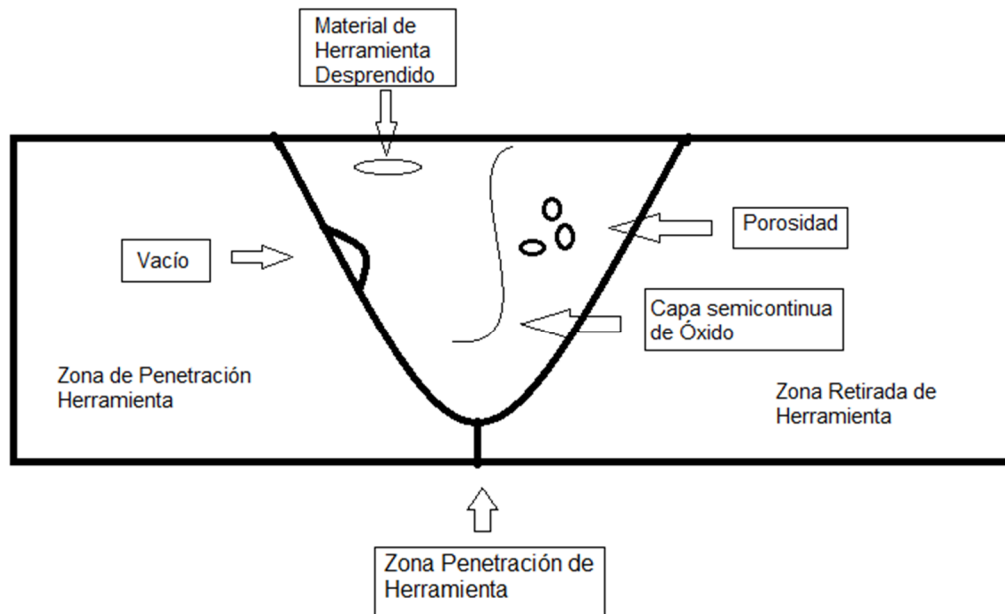
Como todo proceso, existen diversos tipos de defectos que se pueden producir en FSW, para este caso podemos identificar 3 principales. Por un lado, tenemos la formación de vacíos dentro del cordón de soldadura, esto se provoca dado que el material en estado plástico a alta temperatura no es capaz de fluir desde la parte frontal hacia la zona que se deja atrás luego del avance de la herramienta, para rellenar completamente. Esto es producido por dos efectos, la entrega de calor no suficientes, por mal diseño de herramienta o parámetros de operación (V. angular, V. avance), donde el material se enfría antes de completar el vacío, o un mal diseño de pin, que no permite el flujo correcto de material. Este tipo de defectos se encuentra en las zonas interiores del cordón [1].

El efecto residual permanente, corresponde a una capa semi continua de óxido en la superficie de los materiales a unir. Esto se provoca por un mal manejo y preparación del material de trabajo y específicamente de las superficies a unir.

Finalmente se tiene una penetración incompleta de la herramienta o de la soldadura resultante, lo que causa que la unión no se produzca en el total del espesor de material a unir. La principal causa de este defecto es el mal diseño de la totalidad de la herramienta.

El efecto general de estos defectos de soldadura es reducir o dejar una soldadura de peor calidad, respecto de las propiedades mecánicas de la junta soldada. A continuación, se muestra un esquema de los defectos descritos.

**Figura 6: Esquema defectos de Soldadura**



### 3.5 Generación de calor

Como se ha mencionado, la herramienta la principal encargada de generar el calor necesario en el proceso de soldadura, mediante la fricción de su superficie con el material de trabajo. Por lo tanto, es crucial comprender la forma en que desarrolla la fricción durante este proceso. La ley de Coulomb predice la fuerza de roce máxima que existe entre dos superficies en contacto. En general, la ley estima la fuerza de corte producida como:

$$\tau_{fricción} = \mu p$$

Donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción entre ambos materiales,  $p$  es la presión de contacto. Sin embargo, esta ley considera a los materiales como elementos rígidos, ignorando los esfuerzos internos que se produce en ellos, por los que no es suficiente para describir el fenómeno en FSW. Para solucionar esto, se desarrollaron 3 diferentes condiciones de contactos entre la superficie de la herramienta y la pieza de trabajo, estas son:

- A) **Condición de Deslizamiento:** en este caso se asume que el esfuerzo cortante producido entre la superficie de la herramienta y el material de

trabajo menor al esfuerzo de fluencia en corte, por lo tanto, el material de base se mantiene estático y la herramienta gira sobre él, generando calor solo por fricción.

- B) **Condición de Adherencia:** cuando el esfuerzo de corte supera al esfuerzo de fluencia interno en corte, una porción de material se mantiene pegado a la superficie de la herramienta, y comienza un movimiento solidario con esta, acelerando hasta alcanzar un equilibrio entre los esfuerzos producidos y el esfuerzo de corte.
- C) **Condición Mixta Deslizamiento/Adherencia:** En este caso se tiene una combinación de ambas condiciones. El material alcanza una velocidad menor a la velocidad que tiene la superficie de la herramienta, en donde el equilibrio se alcanza cuando el esfuerzo de corte producido se equipara al esfuerzo de corte máximo interno del material, considerando la tasa de deformación plástica estacionaria.

Como resumen, la condición de deslizamiento favorece la generación de calor por fricción pura, y la condición de adherencia, genera un aumento de temperatura por deformación plástica [36].

### 3.5.1 Variable de estado de contacto.

En procesos de soldadura reales, se tiene una condición mixta de contacto entre las superficies, por lo tanto, se define la variable ( $\delta$ ) que determine la razón de un efecto con el otro. La variable de estado de contacto relaciona la velocidad que alcanza el material de trabajo en contacto, y la velocidad real de la superficie de la herramienta. Este es un parámetro adimensional, definido de la siguiente manera:

$$\delta = \frac{v_{material}}{v_{herramienta}} = 1 - \frac{\dot{\gamma}}{v_{herramienta}} = \frac{w_{material}}{w_{herramienta}}$$

Donde  $\dot{\gamma} = v_{herramienta} - v_{material}$ ,  $\dot{\gamma}$  tasa de deslizamiento;  $v = wr$ ,  $v$  velocidad tangencial,  $w$  velocidad angular, para el material y la herramienta y  $r$  el radio de herramienta.

Para esto, se asume que la velocidad transversal de la herramienta no influye en el tipo de condición de contacto que se presenta.

**Tabla 2: Resumen Variables Estado de Contacto**

Condición de Contacto	Relación de Velocidad	Variable estado de contacto
Adherencia	$w_{material} = w_{herramienta}$	$\delta = 1$
Deslizamiento	$w_{material} = 0$	$\delta = 0$
Mixta	$w_{material} < w_{herramienta}$	$0 < \delta < 1$

### 3.5.2 Estimación analítica de Generación de Calor

La generación de calor se produce en las zonas cercanas a la superficie de contacto, la que, dependiendo del diseño de la herramienta utilizada en el proceso, puede tener geometrías bastante complejas. Para la simplificación del modelo desarrollado en [37], se presenta una herramienta simple, de hombro plano o cónico, y un pin totalmente cilíndrico. El ángulo del cono del hombro se caracteriza por el ángulo  $\alpha$ , que es 0 cuando se tiene un hombro plano.

El diseño de la herramienta simplificada se presenta en la figura 7, en donde las dimensiones son  $R_{hombro}$ ,  $R_{pin}$ ,  $H_{pin}$ , radio de hombro, pin, y altura de pin respectivamente. El ella también se define el calor generado por cada una de las superficies  $Q_1, Q_2, Q_3$ , calor generado por la superficie del hombro, el manto de pin, y la tapa del pin. Finalmente, el calor total generado se tiene como:

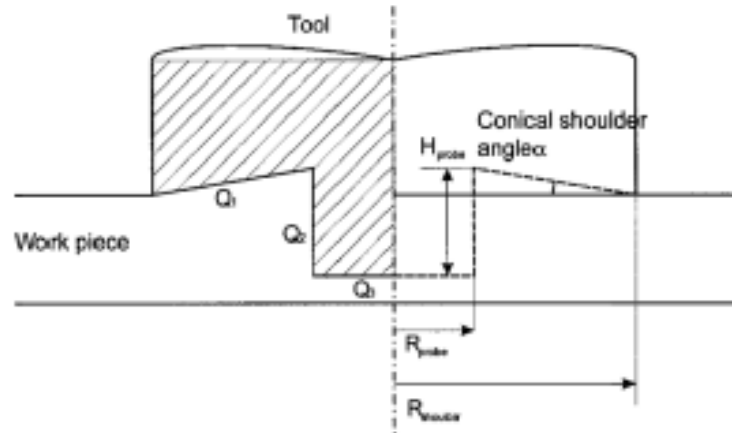
$$Q_{Total} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Por otro lado, el calor generado en cada superficie puede ser calculado por:

$$dQ = w dM = wr dF = wr \tau_{contacto} dA$$

En donde M es el momento producido en el contacto, F la fuerza, A el área de contacto.

**Figura 7: Diseño herramienta simplificada.**



La estimación final del calor generado se tiene por:

- A) Superficie del hombro: La integración sobre el área del hombro, desde el pin hasta el radio del hombro se calcula de la siguiente manera:

$$Q_1 = \int_0^{2\pi} \int_{R_{pin}}^{R_{hombro}} w\tau_{contacto} r^2 (1 + \tan(\alpha)) dr d\theta$$

$$Q_1 = \frac{3}{2} \pi w \tau_{contacto} (R_{hombro}^3 - R_{pin}^3) (1 + \tan(\alpha))$$

- B) Manto Pin: La primera contribución del pin a la generación de calor se tiene como:

$$Q_2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{H_{pin}} w\tau_{contacto} R_{pin}^2 dz d\theta = 2\pi w \tau_{contacto} R_{pin}^2 H_{pin}$$

- C) Tapa Pin:

$$Q_3 = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{pin}} w\tau_{contacto} r^2 dr d\theta = \frac{2}{3} \pi w \tau_{contacto} R_{pin}^3$$

Finalmente se tiene que la potencia total generada es la suma de los aportes de cada superficie:

$$Q_{Total} = \frac{2}{3} \pi w \tau_{contacto} ((R_{hombro}^3 - R_{pin}^3) (1 + \tan(\alpha)) + R_{pin}^3 + 3R_{pin}^2 H_{pin}^2) \quad [23]$$



### 5.3 Efecto de la condición de contacto

Como ya se definió en las secciones anteriores, el valor del factor de esfuerzo de cortes producido,  $\tau_{contacto}$ , depende de la condición de contacto que existe entre las superficies.

Si se asume una condición total de adherencia, significa que el material en contacto directo con la superficie de la herramienta gira solidariamente con ella, en este caso el esfuerzo de corte producido, considerando el criterio de máxima esfuerzo de corte de Von Mises, se puede estimar como

$$\tau_{contacto} = \tau_{fluencia} = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sqrt{3}}$$

En una condición de deslizamiento, en donde el material se mueve a una velocidad mucho menor a la superficie de la herramienta, según la ley de Coulomb, el esfuerzo de corte máximo necesario para la condición de deslizamiento es de:

$$\tau_{contacto} = \tau_{fricción} = \mu p$$

Con lo anterior, y teniendo definida la variable de estado de contacto, la estimación analítica de la potencia aportada por la herramienta al material se puede calcular como;

$$Q_{Total} = \frac{2}{3} \pi w (\delta \tau_{fluencia} + (1 - \delta) \mu p) ((R_{hombro}^3 - R_{pin}^3)(1 + \tan(\alpha)) + R_{pin}^3 + 3R_{pin}^2 H_{pin}^2)$$

Es de destacar, que, por el momento, el factor  $\delta = 0,35$  se ha determinado solo de forma experimental en [37]

### 3.5.4 Modelos de Distribución de Temperatura.

A partir del calor entregado por la herramienta, se puede realizar una estimación de la distribución de temperatura que se genera con el paso de la herramienta por el material de trabajo.

Como una primera simplificación, se puede considerar que la totalidad del calor entregado se genera en la zona de contacto material/hombro de herramienta. Yilbas y Sahin en [21], desarrollan una serie de ecuaciones que describen la distribución de temperatura que se genera al aplicar calor sobre un material de distintas maneras, considerando al material como un medio infinito, semi infinito o totalmente definido.

Teniendo definida la fuente de calor, la distribución de temperatura se obtiene al resolver la ecuación de conducción de calor:

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \nabla^2 T$$

En donde T corresponde a la temperatura, t tiempo,  $\alpha = k/\rho C_p$ , la difusividad térmica, k conductividad térmica,  $\rho$ , densidad del material,  $C_p$ , calor específico del material. Definiendo las condiciones iniciales del modelo desarrollado se puede tener una solución para esta ecuación. Para el desarrollo de este trabajo se utilizan dos casos la formulación del cálculo final buscado.

#### **3.5.4.1 Liberación continua puntual de Q, Medio Semi Infinito.**

Considerando la diferencia de conductividad térmica entre el cobre y el aire, se puede considerar que la superficie superior del material está aislada completamente. Por otro lado, se considera que la liberación de calor está en un estado estacionario, por lo tanto, se ignora la solución del estado transiente de la ecuación, con lo que se simplifica de la forma:

$$\nabla^2 T = 0$$

Considerando que la energía se libera a una tasa de  $\dot{q}$ (W) en el punto, la distribución de temperatura en el medio se tiene por:

$$T(r, t) = T_i + \frac{2\dot{q}}{\rho C_p 4\pi \alpha t} * \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{\sqrt{\alpha t}}\right)$$

#### **3.5.4.2 Liberación Continua en Área Circular, Medio Semi Infinito.**

Al considerar que el calor es entregado por el hombro de la herramienta, esto necesita modelarse como una superficie de la forma de la herramienta como fuente de calor. Para una fuente de calor en un área circular de radio R, las condiciones de borde son.

$$\frac{-kdT}{dz} = \begin{cases} \dot{q}'' & \text{con } z = 0, \quad 0 < r < R \\ 0 & \text{con } z = 0, \quad r > R \end{cases}$$

$$T = T_i \text{ cuando } t = 0$$

En este caso, la solución no considera la fuente en movimiento. La solución para la temperatura transiente a lo largo del eje Z, cuando  $r=0$ , se tiene como:

$$T(0, z, t) = T_i + \frac{2\dot{q}''R}{k} \sqrt{For} \left\{ ierfc\left(\frac{1}{2\sqrt{For}}\right) - ierfc\left(\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{z}\right)^2}}{2\sqrt{For}}\right) \right\}$$

Donde:

- $k = 390 \left[\frac{W}{mK}\right]$  la conductividad térmica
- $R = 0.016 [m]$  Radio área
- $For = \frac{\alpha t}{R^2}$
- $ierfc(x) = \frac{\exp(-x^2)}{\sqrt{\pi}} - x * erfc(x)$

### 3.6 Centro de mecanizado

Las maquinas-herramientas con control numérico computacional (CNC), permiten la automatización de los procesos de producción, y así disminuir la variación entre piezas del mismo tipo. Esta tecnología tiene aplicación para niveles de medios a altos de producción de piezas sencillas y volúmenes medios y bajos para geometrías más complejas. Su beneficio principal está en la replicación de procesos y la facilidad de cambio de modelo mediante el cambio de programa y las herramientas a ocupar.

Para realizar la programación de los procesos a realizar se ocupan diversos lenguajes de programación, todos ellos ocupan códigos numéricos. Se destacan los lenguajes normalizado internacional (ISO), HEIDENHAN, Fagor y Siemens. Para desarrollar un programa, habitualmente se utilizan simuladores que, mediante la utilización de computadoras, permite comprobar la secuencia de operaciones programadas.

Un centro de mecanizado es una máquina-herramienta que evoluciona a partir de las fresadoras tradicionales, por la necesidad de aumentar producción, precisión y flexibilidad de los procesos.

El centro de mecanizado disponible en la PEC es un Hatford Modelo HCMC-2082, el que tiene 3 ejes de control, y presenta un husillo vertical. A continuación, se presenta la tabla 3 con sus especificaciones técnicas principales.

**Tabla 3: Ficha Técnica CNC Hatford HCMC-2082 [27]**

Hatford Modelo HCMC-2082		
Dimensión	Valor	Unidades
Superficie de Trabajo	2150 x 820	mm x mm
Carga Máxima	2600	kg
Carrera X	2060	mm
Carrera Y	820	mm
Carrera Z	600	mm
Rotación Husillo	0-8000	RPM
Capacidad Herramientas	24	kW
Potencia Husillo	15	kW
Potencia Servo X	4	kW
Potencia Servo Y	4	kW
Potencia Servo Z	4	kW

#### 4.- Metodología.

El estudio busca, a través de la realización de experiencias, determinar la capacidad del CM de realizar FSW, los pasos a seguir en la metodología son:

- Estimación previa de potencia necesaria para FSW en Cobre
- Diseño de sistema de refrigeración.
- Selección y diseño de herramienta.
- Inspección visual y por radiografías del cordón de soldaduras.
- Medición de propiedades mecánicas: resistencia a la tracción, dureza.
- Caracterización metalográfica del material soldado.

Para la realización del trabajo se consideró la utilización de cobre electrolítico comercial (norma ASTM B-152 DHP), en formato plancha de 8 mm de espesor, este es un cobre desoxigenado con presencia de fósforo (99,9% Cu, 0.015-0.04% P). El conformado de este material incluye laminación en caliente y frío.

**Tabla 4: Propiedades cobre utilizado**

Propiedades cobre b-152 DHP		
Densidad	8940	kg/m <sup>3</sup>
Conductividad térmica	390	W/mK
Calor específico	0,39	J/gK
Difusividad térmica	$1,11 \cdot 10^{-4}$	m <sup>2</sup> /s
Esfuerzo de fluencia	70	MPa
Resistencia a la tracción	270	MPa
Coef. Roce (Cu-WC)	0,35	

#### 4.1 Cálculo Potencia Teórico

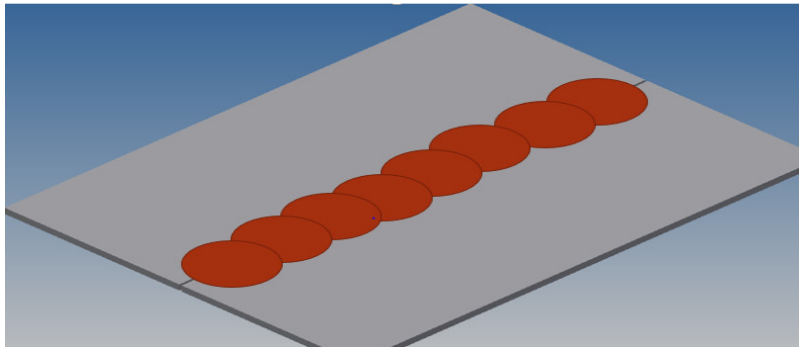
Para el cálculo de la potencia mínima necesaria que se debe aplicar sobre el husillo que porta la herramienta de FSW para generar una junta soldada, se consideran las ecuaciones presentadas en la sección 3.4.5.

Para el desarrollo del modelo se consideraron los siguientes puntos: la potencia necesaria para el movimiento transversal de la herramienta es despreciable respecto a la potencia aplicada en el husillo; la temperatura mínima necesaria de trabajo es de  $0,8 T^{\circ}$  de fusión del material trabajado, esto según lo presentado en [37], para el límite del espesor de placa; se considera la fuente de calor de liberación continua estática, se discretiza el cordón de soldadura como se muestra en la figura 8; la variable de estado de contacto se asume constante para

cualquier combinación de parámetros de operación; se asume la fuerza normal constante 15 kN; se considera la evolución del límite de fluencia del material con la temperatura; finalmente, la herramienta utilizada es de hombro plano, con esto la ecuación del calor total aportado se simplifica a:

$$Q_{Total} = \frac{2}{3} \pi W \tau_{contacto} (R_{hombro}^3 + 3 R_{pin}^3 H_{pin})$$

**Figura 8: Esquema discretización cordón de soldadura**



De las ecuaciones de distribución de calor se tiene que, al entregar calor en una porción de material, el resto aumenta su temperatura por la transferencia de calor, según la ecuación de distribución de temperaturas. Para introducir el cambio de límite de fluencia con la temperatura es necesario discretizar el tiempo de permanencia de la herramienta en cada punto.

El proceso que sigue el modelo de cálculo es el siguiente:

- 1) Cálculo de potencia generada por la herramienta: Con lo mostrado en la sección 3.5.2, se puede estimar el calor generado por la herramienta, bajo las condiciones de operación determinadas, en primera instancia se asume el esfuerzo de fluencia a temperatura ambiente.
- 2) Variación de potencia con temperatura: Se estima la temperatura alcanzada por el punto pasado 1 segundo, se evalúa el esfuerzo de fluencia a esta nueva temperatura. Luego se vuelve a obtener la potencia generada.
- 3) Aumento de temperatura en el resto de la placa: después de abarcar el tiempo total de permanencia en el punto, se obtiene el aumento de temperatura en el resto de la placa.

- 4) Avance de la herramienta: Se considera la temperatura del siguiente punto de lo obtenido en 3), se evalúa el esfuerzo de fluencia a esta nueva temperatura, y se repiten los pasos 2) y 3), hasta completar el cordón

## **4.2 Montaje Experimental**

A partir del tipo de junta soldada que se buscó realizar, a tope, se define el método de sujeción de las placas, por otra parte, se definen los parámetros de operación del CM.

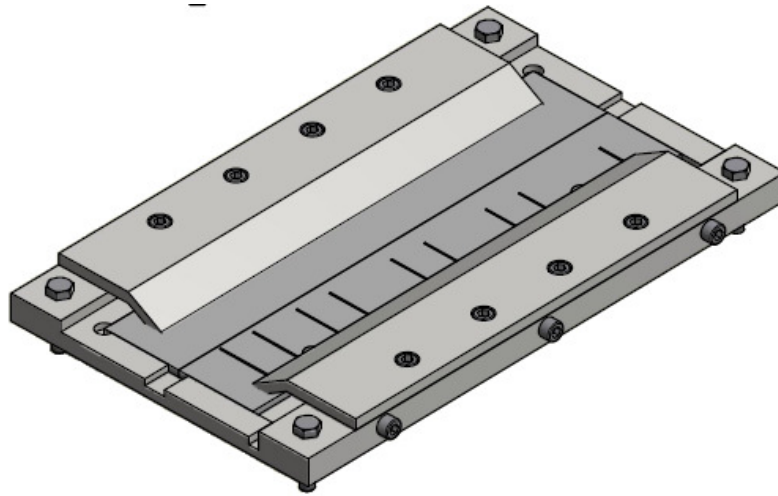
### **4.2.1 Placa de sujeción**

El diseño de este sistema debe considerar, mantener la rigidez del material durante todo el proceso; la seguridad; rentabilidad; simplicidad y capacidad de fabricación.

El diseño desarrollado por Mena D. en [31], en etapas anteriores del proyecto, se basa en lo propuesto por Akinlabi E. [33], donde el objetivo principal es mantener al mínimo el movimiento y vibración de las placas en la soldadura. La mesa consta de 3 partes principales, como se muestra en la figura 9, La base, que se encuentra en contacto con la mesa de trabajo del CM, y 2 mordazas, piezas simétricas que ejercen la presión vertical sobre las placas de material.

Para la fabricación de estas piezas el material elegido es acero A36, de fácil mecanizado a bajo costo y buena resistencia mecánica. Las dimensiones principales del sistema son 500 mm de largo, 300 mm de ancho, con un espesor máximo de 25 mm, El acople de mordazas y de la mesa de trabajo considera pernos Allen M10X16 y M14X50 respectivamente.

**Figura 9: Modelo 3D mesa de sujeción**



#### **4.2.2 Placa de refrigeración**

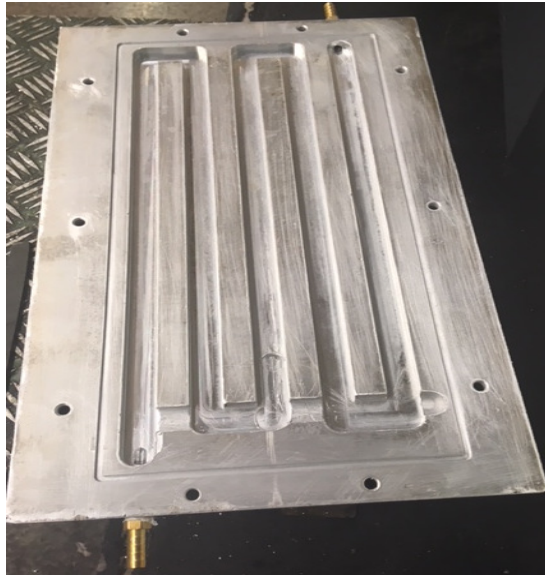
En experiencias previas realizadas por la CCHEN en soldadura de aluminio, el material alcanzó una temperatura que permitió la adhesión de la mesa de sujeción con el material de trabajo. Considerando que la temperatura de trabajo del cobre es mayor a la de aluminio ( $T^{\circ}$  fusión aluminio  $575^{\circ}\text{C}$ -  $650^{\circ}\text{C}$ ,  $T^{\circ}$  fusión cobre  $1083^{\circ}\text{C}$ ), se fabricó una mesa de refrigeración para disminuir la temperatura en la zona de contacto acero-cobre.

El sistema de refrigeración consta de un circuito de líquido refrigerante, aceite soluble en agua, por un serpetín bajo toda la superficie de trabajo de la mesa de sujeción, el material de fabricación fue acero A36. La capacidad de extracción de calor no es determinada.

Para el armado del sistema completo se usa el sello O-Ring 3mm de diámetro, pernos Allen M8x20, y terminales de bronce (12mm diámetro) para entrada y salida de refrigerante.



**Figura 10: Placa de refrigeración construida**



#### **4.2.3 Diseño de herramienta**

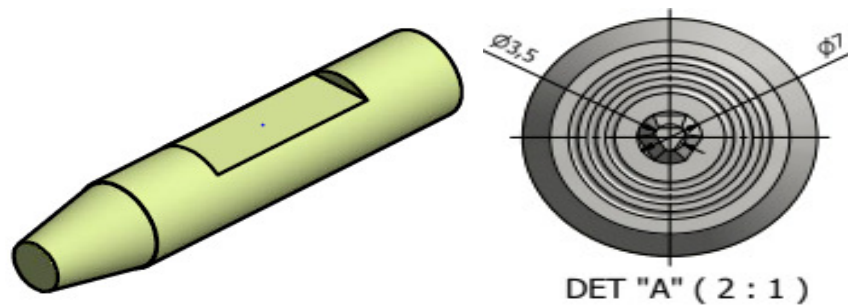
Los puntos considerados en el diseño de herramienta fueron los siguientes:

- A) **Material:** Se utilizó carburo tungsteno, material de buen comportamiento a altas temperaturas, con aplicación en distintos materiales a soldar.
- B) **Herramienta de dos cuerpos:** Como ya se mencionó, las partes de la herramienta consta de un hombro (mayor diámetro) y un pin (menor diámetro). Para el estudio, la herramienta tiene estos cuerpos separados, como se muestra en la figura 11, esto permite regular la altura del pin según la necesidad y, en caso de fractura, no existe pérdida completa de ella.
- C) **Dimensiones Generales:** teniendo en cuenta las dimensiones utilizadas en distintos estudios, tabla 5, las dimensiones de la herramienta utilizada son: diámetro hombro 17 mm; diámetro medio pin 6 mm, altura pin 7 mm.
- D) **Geometría hombro y pin:** para aumentar el roce entre el hombro y el material de trabajo se trabaja con un patrón espiral sobre su superficie. Dado que el pin debe facilitar el flujo de material dentro del cordón, se genera el perfil de la figura 11.

**Tabla 5: Dimensiones de herramientas de otros estudios**

Diámetro Hombro			Diámetro pin		
Referencia	Espesor placa (mm)	D. hombro (mm)	Referencia	Espesor placa (mm)	D. pin (mm)
[1]	3	12	[1]	5	5,5
[3]	4	13	[2]	6	4,5
[5]	6	15	[5]	3	3
-	-	-	[7]	2	4

**Figura 11: Modelo hombro y pin**



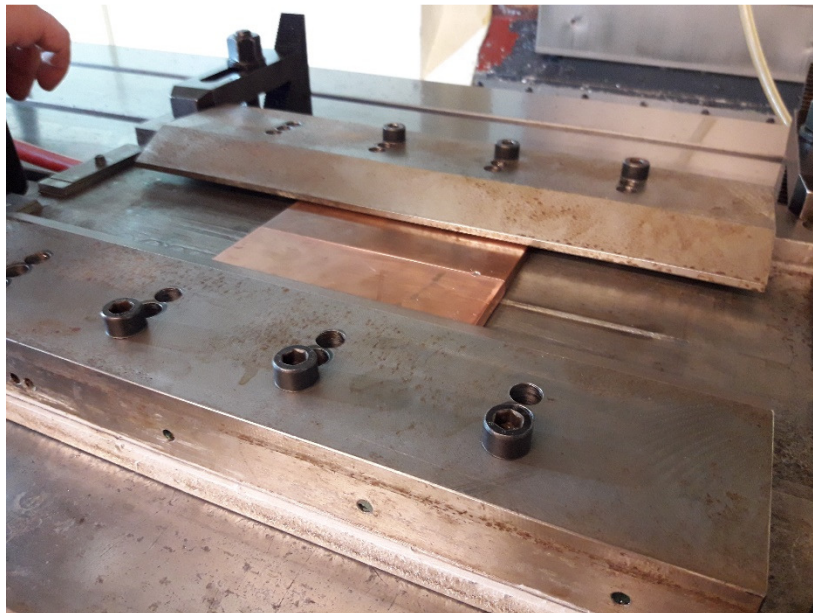
#### 4.2.4 Parámetros de operación

Los parámetros controlables por el centro de mecanizado son: velocidad de avance, constante, velocidad de rotación de herramienta, variable del estudio, y la penetración de herramienta en la placa a soldar.

El rango de velocidad de rotación de husillo se define de 800-1600 RPM, considerando los parámetros usados en la literatura (tabla 5). en cuanto a la velocidad de avance, en principio se planificó usar 25 mm/min, pero al realizar la primera prueba, para ajuste de parámetros y programa CNC, el pin de la herramienta se fracturó al alcanzar los 15 mm/min, por lo tanto, se modifica la velocidad de avance a 5 mm/min constante, lo que asegura la durabilidad de las siguientes herramientas.

En cuanto a la penetración del hombro sobre la superficie, del estudio desarrollado por Mena D. en [31] y experiencias realizadas sin orden en la CCHEN, de soldadura para placas de aluminio 6061-T3, fue utilizado un valor de 0,5 mm, obteniendo buenos resultados.

**Figura 12: Configuración inicial de experiencias**



### 4.3 Realización de experiencias

Para el estudio se unieron placas de cobre ASTM B-152 DHP de dimensiones 150 mm x 75 mm x 8 mm, compradas en ACERMET en formato placa 500 mm x 150 mm x 8 mm. La preparación del material consistió en el corte con sierra circular, y refrentado de superficie cortada en fresa universal H. Ernault Somua, Modelo ZHV1, disponible en el laboratorio de procesos mecánicos del Depto. de ingeniería mecánica

La soldadura de placas se realiza en el centro de mecanizado CNC Hatford HCMC 2082 disponible en la planta de elementos combustibles de la CCHEN. La tabla 6 muestra la combinación de parámetros de cada experiencia.

**Tabla 6: Etiqueta y condiciones de operación**

N° Experiencia	RPM	V. avance (mm/min)
P0	800	0-15
P1	800	5
P2	1200	5
P3	1600	5

### 4.4 Procedimiento Ensayos

#### 4.4.1 Radiografías

La radiografía es un tipo de ensayo no destructivo que consiste en la irradiación de un haz electromagnético ionizante sobre un cuerpo a inspeccionar, que absorbe la radiación en mayor o menor medida, dependiendo de la densidad del cuerpo o la existencia de discontinuidades, produciendo una impresión fotográfica de la energía.

El haz de rayos X se define por la potencia del haz (kV), parámetro que define la penetración en el cuerpo; la intensidad del haz, define la cantidad de rayos X proyectados y la definición del registro fotográfico; el tiempo de exposición, determina la cantidad de energía recibida por el cuerpo, se requiere sea la menor posible.

La toma de rayos X se realizó sobre la placa soldada completa, esta fue limpiada de virutas y grasas superficiales con alcohol etílico. El procedimiento se realizó en la cámara de rayos X disponible en la planta de elementos combustibles de la CCHEN.

**Tabla 7: Parámetros toma de Radiografías**

Energía Aplicada [keV]	Intensidad [mA]	Tiempo de Exposición [s]
200	8	30

#### 4.4.2 Metalografías

Se realizó la toma de metalografías de una muestra por cada experiencia realizada, para poder identificar las zonas afectadas por la soldadura, la muestra fue tomada a 40 mm del inicio del cordón.

La preparación de muestras comenzó con el pulido de la superficie, esto se realiza en una pulidora rotatoria disponible en el laboratorio de materiales del Dpto. de ciencia de los materiales. El procedimiento se realiza usando lijas de 220, 320, 500, 600, 1200, 2500 (granos/ cm<sup>2</sup>), para cada papel, se inicia el pulido en una dirección, luego se busca una rotación de la probeta de 90° para lograr líneas de pulidos uniforme, este procedimiento se repite hasta tener una superficie lisa, para pasar a la siguiente etapa. Se terminó el pulido de las probetas con un paño húmedo con alúmina con tamaño de partícula de 0,5 µm hasta lograr eliminar las rayas superficiales, superficie espejo.

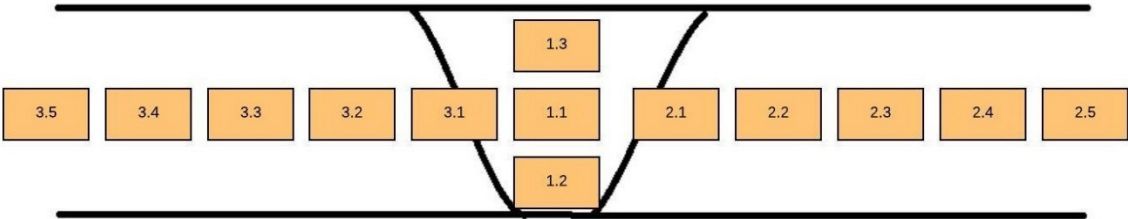
Para poder identificar las microestructuras y el tamaño de grano las muestras fueron atacadas químicamente, la tabla 8, muestra lo ataques químicos recomendados para micrografías de cobre. Los mejores resultados se obtuvieron aplicando la opción 3 por un periodo de 20 segundos. Para finalizar el ataque la probeta fue limpiada con agua y sacada por aire caliente.

**Tabla 8: Ataques químicos recomendados para cobre**

Opción	Componente	Cantidad
1	Agua Destilada	50 [ml]
	Ácido Nítrico	50 [ml]
2	Agua Destilada	25 [ml]
	Hidrox. Amonio	25 [ml]
	Agua Oxigenada	25 [ml]
3	Agua Destilada	100 [ml]
	Etanol	50 [ml]
	FCI3	10 [gr]

Luego de realizado el ataque químico, se observó la junta soldada con mediante un microscopio digital marca Optika modelo XDS 3MET, con lente de aumento 20x. Las imágenes fueron tomadas por la cámara integrada del microscopio y conectada al computador, siguiendo el patrón mostrado en la figura13. La medición del tamaño de grano se realiza por el método de las intersecciones descrito en la norma ASTM E-112

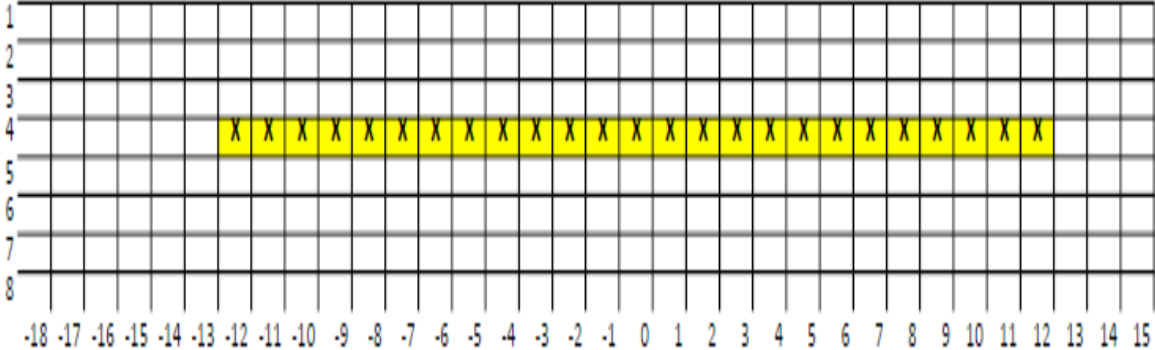
**Figura 13: Ubicación de toma de micrografías**



**4.4.3 Micro dureza**

Para determinar el perfil dureza transversal del cordón de soldadura, se realizaron las mediciones de dureza siguiendo el patrón mostrado en figura 14, este se extiende desde el centro de la probeta 12 mm hacia cada lado, las mediciones fueron tomadas con un paso de 1 mm, teniendo un total de 25 mediciones.

**Figura 14: Patrón de medición ensayo de micro dureza**



El ensayo de micro dureza se realizó siguiendo la norma ASTM E384, considerando una carga de 0,2 kg, aplicados durante 10 segundos en el durómetro marca Struers modelo duramin-2, con capacidad máxima de carga 2kg.

**Figura 15: Durómetro STRURS, Duramin-02**

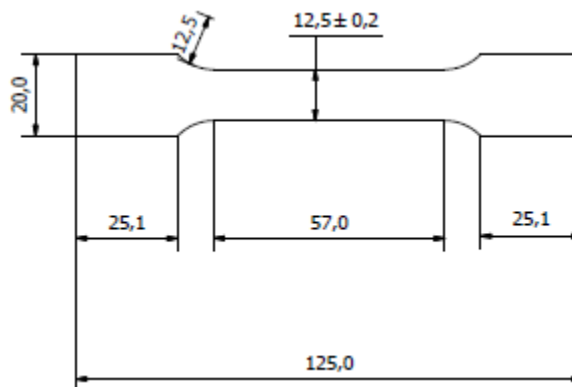


#### **4.4.4 Ensayos de tracción**

El ensayo de tracción se realizó en máquina de ensayos mecánicos marca Zwick Roell modelo Z100 con una capacidad de carga máxima 100 kN disponible en el dpto. de ingeniería mecánica.

El diseño de probetas y condición de ensayos se determinan bajo la norma ASTM E8, son fabricadas 3 probetas por cada conjunto de condiciones de operación realizadas, como lo muestra la figura 16. La velocidad de separación de cabezales utilizada fue de 5 mm/min.

**Figura 16: Diseño final probeta tracción**



El diseño de probetas propuesto en la norma requiere un largo total de 200 mm, pero, el largo máximo con que se pudieron fabricar las probetas dado el diseño de la mesa de sujeción es de 125 mm, sin embargo, el ensayo fue realizado sin problemas.

**Figura 17: Máquina universal de ensayos mecánicos, Zwick/Roell, Z100**





## 5.- Resultados y discusión

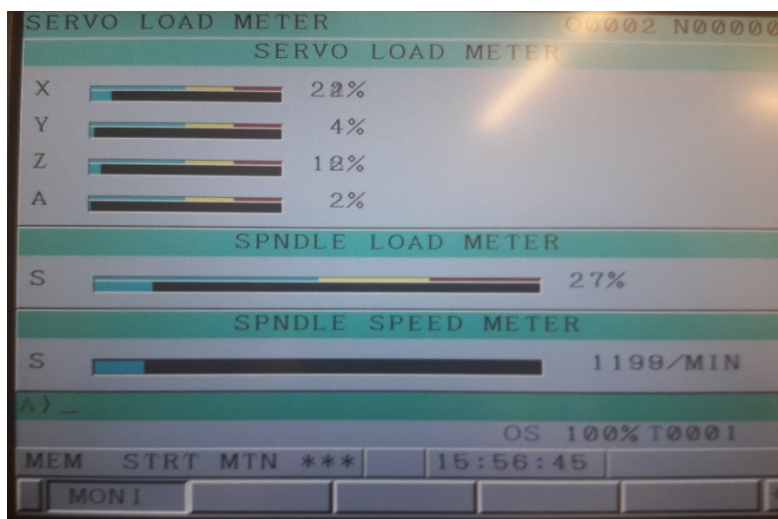
Se muestra primero los resultados obtenidos del cálculo teórico previo de potencia mínima necesaria para FSW y se comparan con los datos de potencia reportados por el centro de mecanizado en cada una de las experiencias.

Luego se muestra la superficie del cordón de soldadura resultante de cada experiencia, seguidos de los resultados obtenidos de las radiografías y micrografías tomadas, finalmente se muestran los resultados de los ensayos mecánicos, tracción y dureza.

### 5.1 Potencia calculada y reportada

La interfaz de usuario del centro de mecanizado entrega los valores de potencia utilizados por los distintos motores que actúan durante el proceso como lo muestra la figura 18, La tabla 9 muestra un resumen de las potencias reportadas para cada experiencia, junto a los valores obtenidos a partir de modelo teórico de potencia mínima requerida.

**Figura 18: Interfaz CNC, reporte de potencias**



**Tabla 9: Potencias reportadas y calculadas**

N° experiencia	Potencia reportada CM			Potencia Modelo
	Potencia husillo (kW)	Potencia servo X (kW)	Potencia servo Z (kW)	Potencia Calculada (kW)
P0	3,51	0,91	0,43	2,32
P1	4,05	0,91	0,47	2,32
P2	3,91	0,79	0,43	3,48
P3	3,78	0,76	0,32	4,64

La potencia utilizada por el centro de mecanizado muestra que, al aumentar las RPM de la herramienta, esta disminuye de forma continua. Esto se explica de la siguiente manera, a RPM más bajas, el calor entregado al material es menor, alcanzando el material una temperatura menor, con esto, el material necesita de un mayor torque de parte de la herramienta para poder fluir desde la zona de avances a la zona de retroceso en el cordón de soldadura. Por otra parte, la potencia utilizada por el servo X, es un reflejo de la respuesta del material al avance transversal de la herramienta, si el material fluye con menor facilidad (a menores RPM), la potencia necesaria para este movimiento es mayor.

La potencia utilizada por el servo Z es un reflejo de la fuerza normal existente entre la superficie del hombro de herramienta y el material de trabajo, por lo tanto, del roce entre ellas, con esto se ve que el calor generado por fricción tiene un mayor aporte al reducir las RPM.

En cuanto a los resultados obtenidos de modelo teórico, se tiene un aumento de la energía necesaria para FSW, esto se contrapone al comportamiento de la potencia real reportada, muestran tendencias contrarias. Las fuentes de error del modelo se tienen en considerar constantes las propiedades físicas (conductividad térmica, densidad, calor específico), y el coeficiente de roce Cu-WC, respecto al aumento de temperatura del material, pero las de mayor influencia son asumir la fuerza normal al hombro constante, las potencias registradas por el servo Z, muestra que existe un aumento de esta fuerza en la realidad, con esto se aumenta el esfuerzo cortante producido entre el hombro y el material, por lo tanto se aumenta la potencia generada por roce, además, el comportamiento de la potencia del husillo real demuestra que existe un aumento del calor generado por deformación plástica a menores RPM, por lo tanto el valor de variable de estado de contacto debiese aumentar, sin embargo este valor solo ha sido estimado de forma experimental, por

lo tanto el desarrollo del modelo teórico se ve limitado a la existencia de un cálculo de la variable de estado de contacto dependiente de la temperatura del material.

## 5.2 Presentación del cordón de soldadura

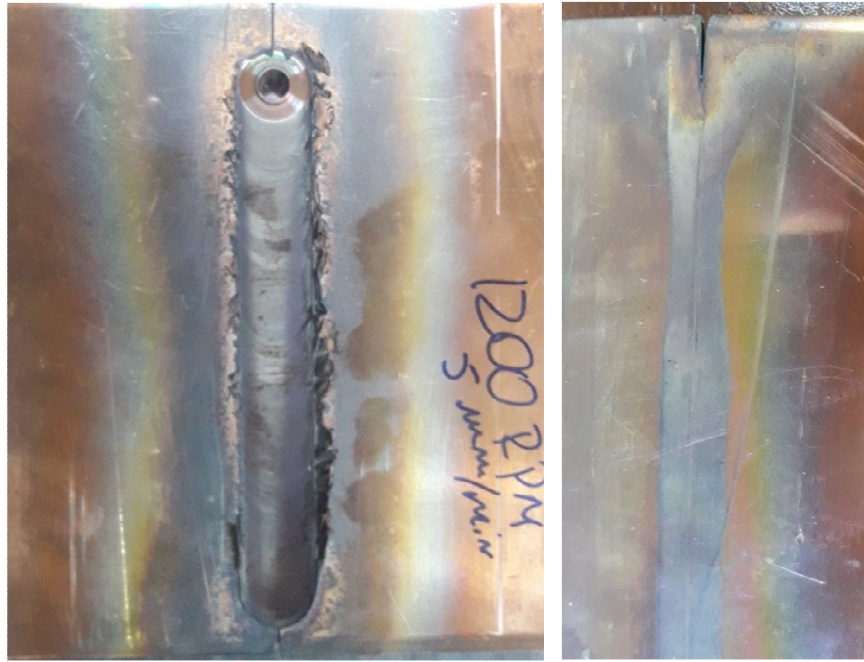
A continuación, se muestra la superficie frontal y posterior de los cordones de soldadura obtenidos en cada experiencia. La vista frontal muestra la zona de material en contacto directo con el hombro de la herramienta, esta superficie en todos los casos es totalmente regular, sin la presencia de fallas de soldadura como fisuras o discontinuidades. En la vista posterior se puede identificar la línea de contacto de las superficies originales, de esto se puede inferir que la penetración del pin de la herramienta no fue suficiente, dado que no se logra una unión completa de las superficies.

Por otro lado, al aumentar la RPM de las pruebas, existe una formación de rebaba en la zona de retroceso de la herramienta, esta alcanza su máximo en la prueba P3 (figura 21), con dimensiones de 5,5 mm de ancho máximo y 0,5 mm de espesor, en todo el largo de cordón.

**Figura 19: Cordón de soldadura P1, 5 mm/min 800 RPM**



**Figura 20: Cordón de soldadura P2, 5 mm/min 1200 RPM**



**Figura 21: Cordón de soldadura P3, 5 mm/min 1600RPM**



La formación de rebaba es un indicio de que el material tiene una mayor facilidad de fluir antes los esfuerzos provocados por la herramienta en la superficie, esto se puede explicar, como ya se mencionó, el material alcanza una mayor temperatura disminuyendo el esfuerzo de fluencia.

Considerando que el pin de la herramienta, dados los parámetros de operación, alcanza una profundidad máxima de 7,5 mm en la placa, a pesar de que el material eleva su temperatura, la deformación plástica generado por el pin no alcanzar a generar la mezcla o agitación del material en estado plástico. Por otra parte, inclusión de la mesa de refrigeración puede provocar que el material no alcance la temperatura necesaria para fluir y formar la unión.

### 5.3 Radiografías

Las radiografías permiten analizar la existencia de vacíos dentro del cordón de soldadura. Para la radiografía de P1, figura 22, se notó que el material tiene una densidad contante en el área del material original y la zona soldada. Para las imágenes obtenidas en P2 y P3, figuras 23 y 24, existe una línea de menor densidad de material hacia la zona de avance de la herramienta, esto se origina dado que el material fluyes de esta zona hacia la zona de retroceso.

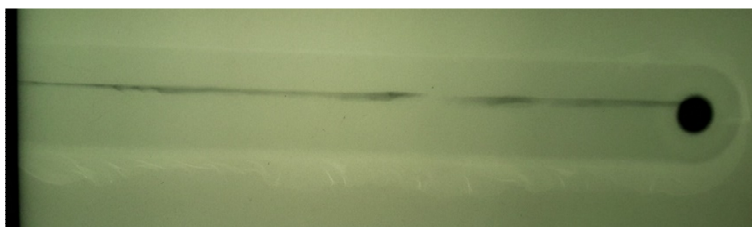
**Figura 22: Radiografía P1**



**Figura 23: Radiografía P2**



**Figura 24: Radiografía P3**



#### **5.4 Ensayos de tracción.**

Fueron fabricadas 3 probetas por cada experiencia para el ensayo de tracción, más una probeta del material base. A partir de este se obtuvo resultados de resistencia máxima a la tracción, y el porcentaje de alargamiento de la probeta luego de la fractura, fueron calculados los valores promedios de los resultados y se compararon los comportamientos generales.

La figura 25 muestra el gráfico esfuerzo-deformación de una probeta representativa de cada experiencia junto al ensayo del material base. El material base mostró el comportamiento dúctil característico de los metales, con un valor de resistencia máxima a la tracción de 274,8 MPa, punto a partir del cual existió una disminución del área transversal de la probeta hasta la fractura.

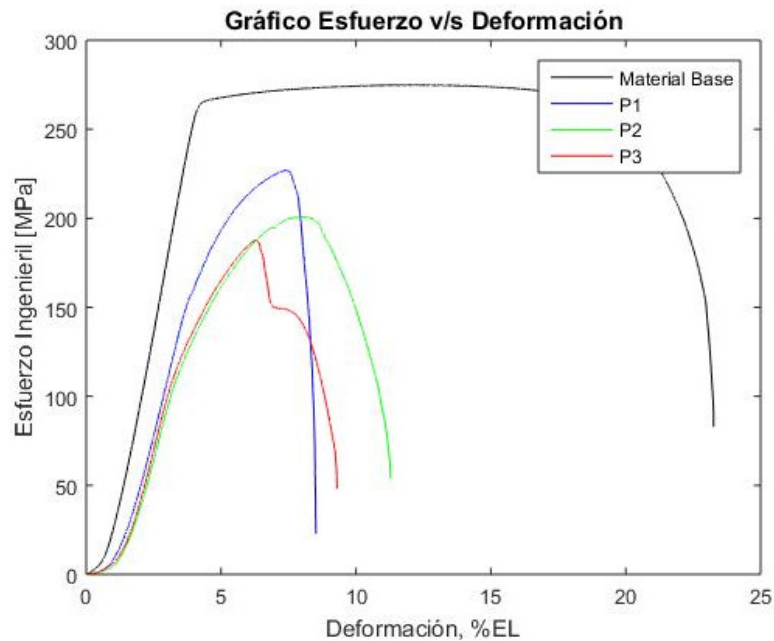
En el caso de las probetas soldadas, la resistencia a la tracción bajó en comparación al material base entre un 18%-41% del valor obtenido para este. Durante la realización del ensayo, la primera fisura se produce en la parte posterior del cordón de soldadura y luego se propaga hacia adelante. La superficie de fractura mostró que en las zonas cercanas a la penetración máxima del pin se fracturaron por capas coincidente a las ranuras del perfil del pin, al acercarse a la zona de contacto con el hombro, el material se comportó de una manera más dúctil, para 1600 RPM (P3), presenta un comportamiento similar al material base. En la figura 25, la curva de P3, muestra que luego de alcanzar el máximo esfuerzo, el material se fractura para luego tener una segunda etapa que corresponde a la zona en contacto con el hombro.

De la figura 26, se observa que luego de soldadas, las placas tienen una capacidad mucho menor de deformación plástica, por lo tanto, se requiere una menor cantidad de energía para lograr la fractura. En esta misma línea, la figura 31, muestra un aumento del porcentaje de elongación conforme aumenta la velocidad de rotación, directamente proporcional.

La norma ASME VIII define como parámetro de aprobación de materiales soldados el factor eficiencia de soldadura, como la razón entre la resistencia a la

tracción del material soldado respecto al material base. El cordón es aceptado cuando este valor supera el 70% para el caso de una soldadura a tope con una inspección visual. Se observa de la tabla 10 que la experiencia P1 es la única que cumplió con esta condición.

**Figura 25: Comparación gráficos esfuerzo deformación**

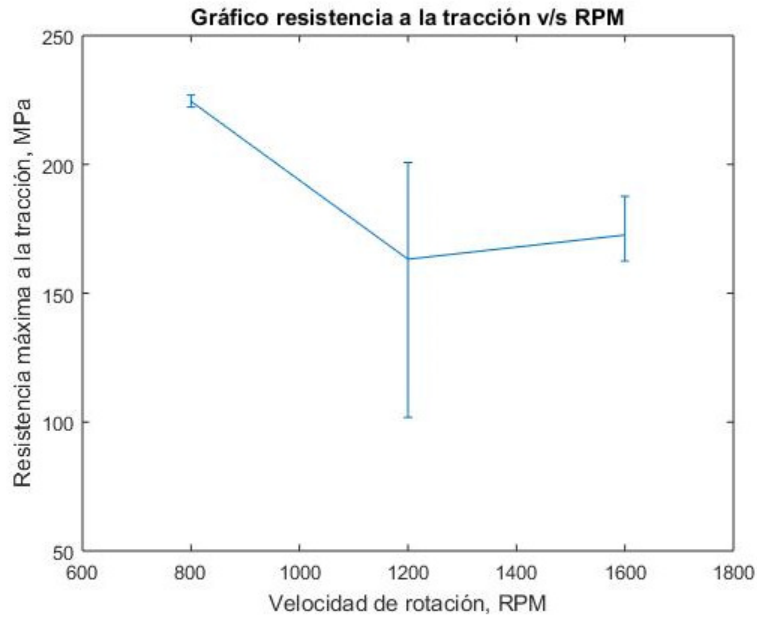


**Tabla 10: Resultados ensayo de tracción**

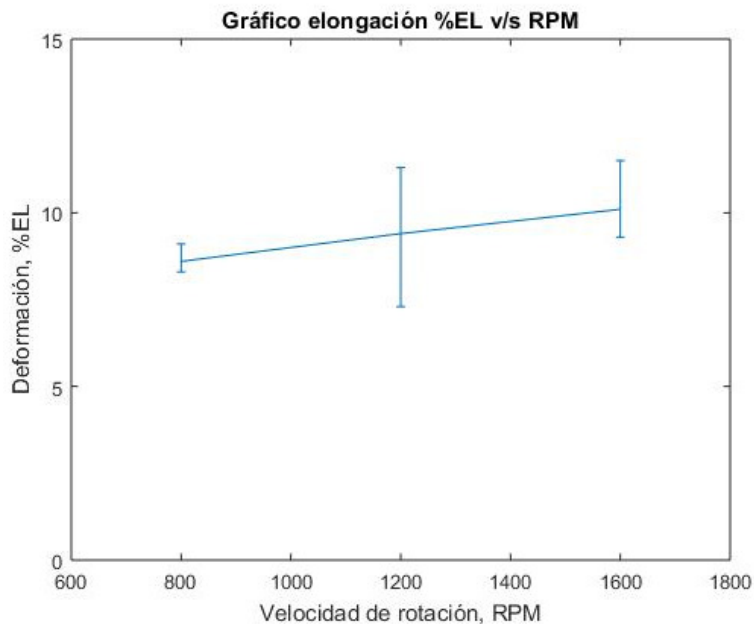
N° experiencia	$\sigma_{UTS}$ MPa	$\sigma_{UTS}$ , medio MPa	Desviación est.	Eficiencia de Unión	%EL	%EL, medio
Material Base	274,8	-	-	-	23,3	-
P1	222,2	224,5	2,4	0,82	9,1	8,6
	224,4				8,3	
	226,9				8,5	
P2	101,8	163,2	53,6	0,59	7,3	9,4
	200,7				11,3	
	187,2				9,6	
P3	167,6	172,6	13,3	0.63	11,5	10,1
	187,6				9,3	
	162,5				9,5	

Las figuras 26 y 17, muestran el comportamiento la resistencia a la tracción y la elongación alcanzada por las probetas respecto de la velocidad de rotación de la herramienta. El porcentaje de elongación alcanzado aumenta respecto a la RPM de la experiencia. Esto se explica dado que la cantidad de calor entregada a mayores RPM es mayor, el material en zonas más cercanas al hombro el material cambia su microestructura permitiendo al material tener un mayor porcentaje de deformación plástica.

**Figura 26: Evolución resistencia a la tracción con RPM**



**Figura 27: Evolución elongación máxima con RPM**

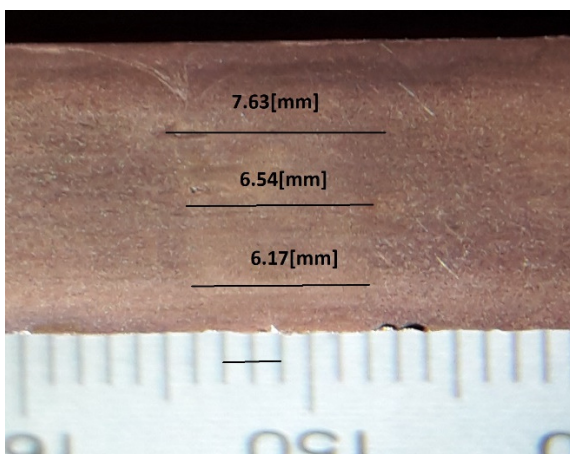




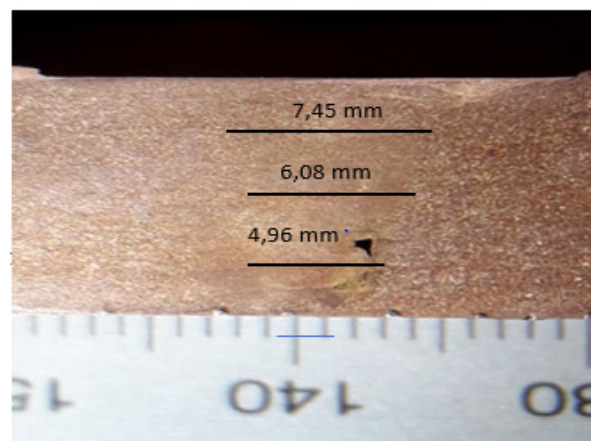
## 5.5 Metalografías

Se muestra el perfil macroscópico del corte transversal de soldadura, para definir el tamaño de las zonas afectadas, luego en las tablas 12, 13, 14, 15, se presenta el tamaño de grano medio de cada una, siguiendo el patrón de ubicaciones de figura 13, para así comparar con el material base y luego se analizó el efecto de la RPM en la microestructura.

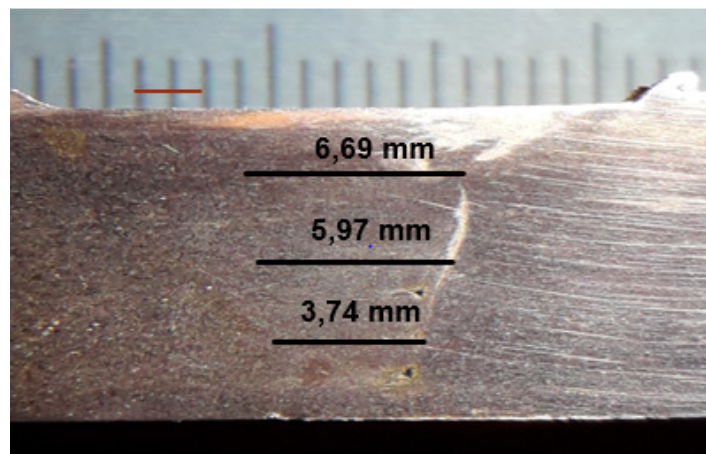
**Figura 28: Perfil transversal cordones de soldadura**



A) Perfil P1



A) Perfil P2



A) Perfil P3

La figura 28 muestra la forma y el tamaño de la zona nugget, esta coincide con la geometría del pin de la herramienta. Se notó una disminución del tamaño general de esta zona, especialmente en la zona inferior de la soldadura al disminuir

las RPM. Esto indica que existió una disminución en el volumen de material que fue sometido a deformación plástica, esto demuestra que el calor producido por este efecto es mayor en el porcentaje total de calor producido

**Tabla 11: Tamaño de grano material base**

Tamaño de grano $\mu\text{m}$		
<b>1.3</b>	<b>1.1</b>	<b>1.2</b>
21,4	21,6	19,2

**Tabla 12: Tamaño de grano P1 (800 RPM, 5 mm/min)**

Tamaño de grano $\mu\text{m}$										
					<b>1.3</b>					
					12,7					
<b>3.5</b>	<b>3.4</b>	<b>3.3</b>	<b>3.2</b>	<b>3.1</b>	<b>1.1</b>	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>	<b>2.4</b>	<b>2.5</b>
20,0	18,9	17,9	17,7	13,2	7,3	16,3	15,6	16,9	19,8	20,0
					<b>1.2</b>					
					7,6					

**Tabla 13: Tamaño de grano P2 (1200 RPM, 5 mm/min)**

Tamaño de grano $\mu\text{m}$										
					<b>1.3</b>					
					13,7					
<b>3.5</b>	<b>3.4</b>	<b>3.3</b>	<b>3.2</b>	<b>3.1</b>	<b>1.1</b>	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>	<b>2.4</b>	<b>2.5</b>
19,6	18,5	16,6	16,0	13,4	11,3	10,8	21,0	21,2	24,2	21,6
					<b>1.2</b>					
					12,5					

**Tabla 14: Tamaño de grano P3 (1600 RPM, 5 mm/min)**

Tamaño de grano $\mu\text{m}$										
					<b>1.3</b>					
					23,2					
<b>3.5</b>	<b>3.4</b>	<b>3.3</b>	<b>3.2</b>	<b>3.1</b>	<b>1.1</b>	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>	<b>2.4</b>	<b>2.5</b>
23,8	24,2	22,2	21,5	17,7	10,8	16,8	19,2	21,9	26,6	27,9
					<b>1.2</b>					
					10,8					

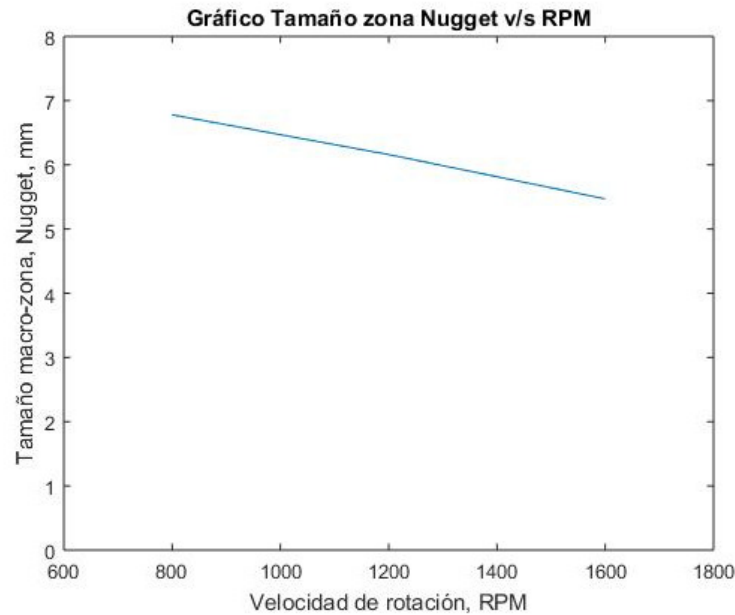
La experiencia P1, muestra una unión regular, sin vacíos visibles, con una zona nugget definida a simple vista. La tabla 12 muestra el tamaño de grano medido en cada ubicación del perfil transversal, se notó que el tamaño de grano mínimo se alcanza en zona nugget, y el tamaño máximo es similar al tamaño de grano que presenta el material base. La ubicación 1.3, tabla 12, siendo parte de la zona nugget, presenta un tamaño de grano mayor a las zonas más profundas, esto se explica por su cercanía al hombro de la herramienta, en donde se alcanza una mayor temperatura y esto permite un crecimiento de grano, sin embargo, se mantiene pequeño. La zona termo mecánicamente (TMAZ) afectada se define por tener un tamaño de grano inferior al material base, dado que se genera una recristalización, a menor escala que en la zona nugget. En este caso la TMAZ se extiende desde las zonas 2.4 a 3.4, un ancho de 17.5 mm.

La figura 28-B, mostró para la experiencia P2 un vacío dentro del perfil, que explica el comportamiento irregular de la resistencia a la tracción en las probetas ensayadas, además el crecimiento de grano de la zona nugget respecto de P1, explica el comportamiento más dúctil. Además de la tabla 13, se mostró una disminución de tamaño de la zona TMAZ, por otra parte, la zona térmicamente afectada (HAZ), se muestra dentro de la zona de estudio, en esta el tamaño de grano alcanzó un máximo de 24.5  $\mu\text{m}$ , tabla 13.

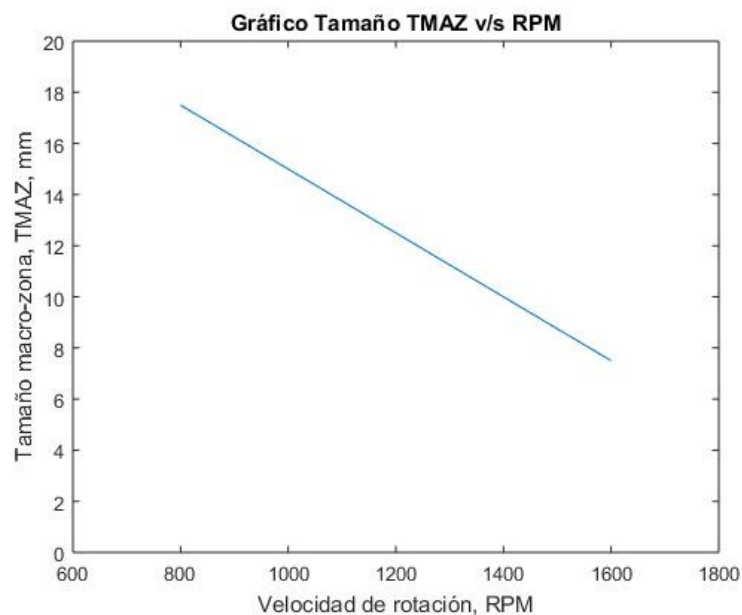
Se dio un caso especial para P3, donde la ubicación superior de la zona nugget presenta un tamaño de grano superior incluso al grano base (19 -20  $\mu\text{m}$ ), de esto se intuyó que el material cercano al hombro alcanzo una temperatura más allá de lo esperado, pudiendo incluso fusionarse, esto explicaría el crecimiento de grano homogéneo y de tales dimensiones (23,2  $\mu\text{m}$ ), junto con esto, la capacidad de fluir del material aumento, por lo que la potencia requerida por el servo X disminuye considerablemente como se mostró en la sección 5.1. En cuanto a la definición del resto de las macro-zonas, la TMAZ nuevamente volvió disminuir su dimensión, la HAZ presenta un crecimiento de grano hasta alcanzar el máximo de 27,9  $\mu\text{m}$ , dado el aumento de calor entregado al material, tabla 14.

El comportamiento general de las experiencias mostró una relación directa entre el tamaño de macro-zonas, tamaño de grano y la RPM de la herramienta. Esto indica que la proporción de calor generado por deformación plástica y por roce mecánico evoluciona en cada experiencia, por lo tanto, el valor de  $\delta$ , variable de estado de contacto, no es constante para el proceso, reafirmando lo dicho anteriormente.

**Figura 29: Evolución tamaño de zona nugget con RPM**



**Figura 30: Evolución tamaño de zona TMAZ con RPM**

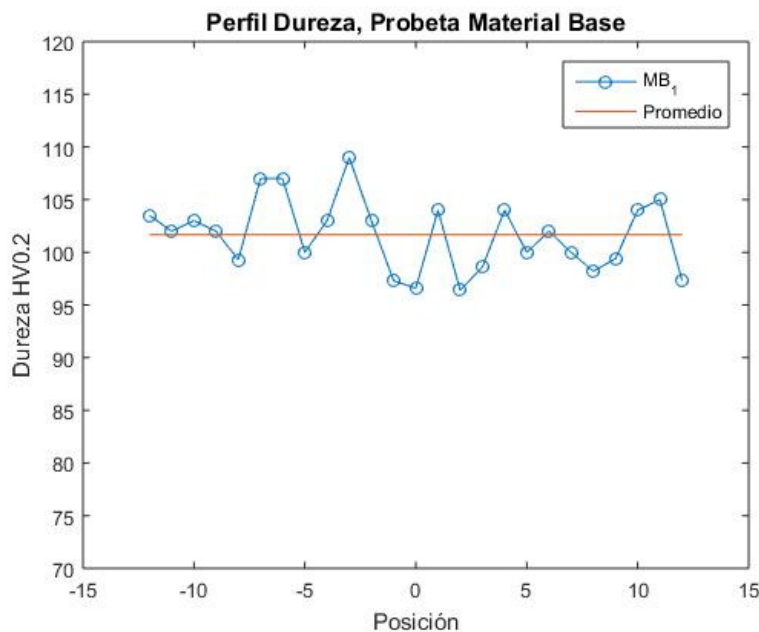


## 5.6 Ensayos de dureza

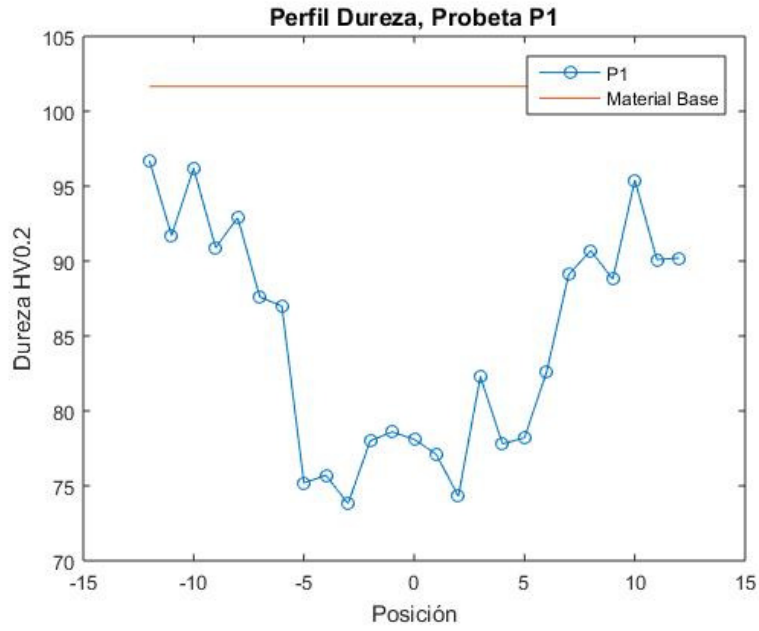
Las figuras 31, 32, 33 y 34, se muestran los perfiles de micro-dureza que se obtuvieron de cada experiencia. El material base presenta una dureza promedio de HV0,2 101.6, se debe tener presente que la conformación de la plancha de cobre utilizado considera un porcentaje de deformación plástica, esto aumenta la dureza del material respecto de un material trabajado en caliente, o tratado térmicamente.

Existe una disminución generalizada de la dureza en todo el perfil transversal de las placas soldadas, considerando lo anterior, esto se provocó por la liberación de tensiones superficiales, y discontinuidades de la estructura cristalina. El perfil de dureza tiene directa relación con los tamaños de macro-zonas determinados anteriormente. En la HAZ, existe una disminución de la dureza directamente relacionada con el efecto de la temperatura alcanzada por el material, en este caso solo existe la liberación de tensiones existente desde la deformación en frío. En las zonas nugget y TMAZ, el proceso de recristalización hace que la dureza baje drásticamente, la diferencia entre ellas se tiene que en la zona nugget la agitación es directa sobre el material, en tamaño de grano es mucho menor, en cambio la TMAZ, la recristalización no es masiva, además de tener el calor y tiempo para asegurar un crecimiento de grano, con esto la dureza de la zona disminuye respecto al nugget como se muestra en las figuras 32 y 34, correspondientes a P1 y P3 respectivamente.

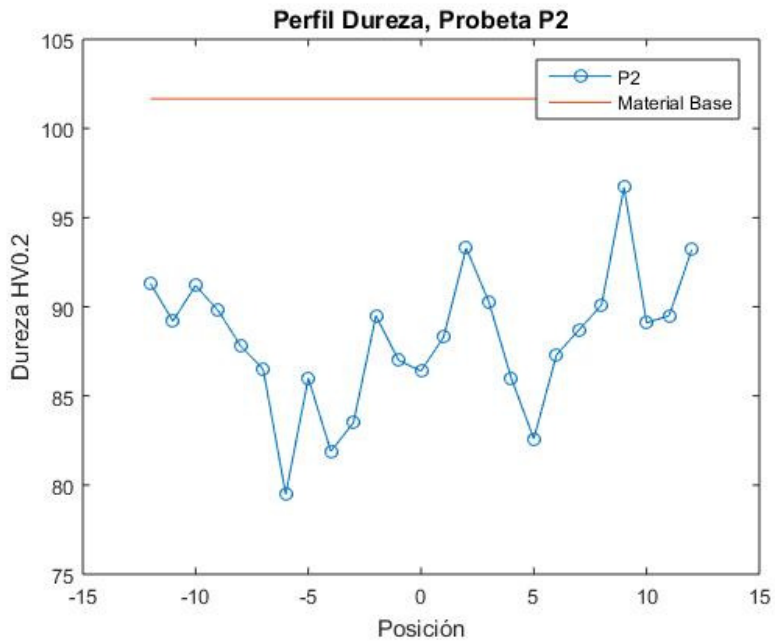
**Figura 31: Perfil de dureza material base**



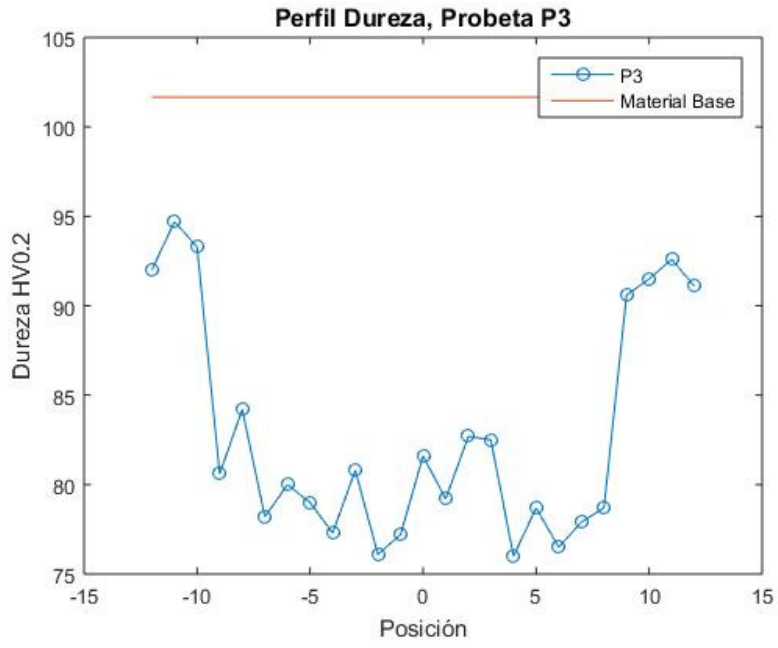
**Figura 32: Perfil de dureza experiencia P1**



**Figura 33: Perfil de dureza experiencia P2**



**Figura 34: Perfil de dureza experiencia P3**



## 6.- Conclusiones

Del trabajo realizado se puede determinar en primer lugar que el centro de mecanizado Hatford HCMC 2082, tiene la capacidad técnica de desarrollar soldadura por fricción agitación específicamente para placas de cobre B-152 DHP, considerando en primer lugar, las capacidades geométricas de la mesa de trabajo y la movilidad entregada por los 3 ejes de interés, y en segundo lugar, por la capacidad de los motores involucrados en el proceso, motor Husillo, Servo motor eje X, Servo motor eje Y, Servo motor eje Z. Relacionado con esto, el modelo de cálculo de energía predictivo desarrollado, no representa de manera fiel el comportamiento del gasto energético del proceso real, las suposiciones de propiedades físicas como calor específico, conductividad térmica, y de parámetros como la variables de estado de contacto, constantes, además de ignorar el trabajo realizado por el movimiento transversal (eje X) y el calor generado por deformación plástica, hacen que el modelo sea poco acorde a una predicción exacta. A pesar de esto, el modelo entrega un acercamiento a la magnitud de la potencia exigida por el proceso como referencia para determinar la capacidad máxima de operación.

A partir de los resultados obtenidos, se determina los parámetros de operación óptimos para la generación de una soldadura de buena calidad en una placa de 8 [mm] de espesor, 800 RPM velocidad de rotación herramienta, 5 mm/min de velocidad de avance.

El centro de mecanizado es capaz de genera uniones soldadas de buenas terminaciones superficiales cuando se tiene una buena preparación de superficies a trabajar. En una primera inspección, se determina que las soldaduras no presentan grietas superficiales, solo muestran la línea de unión en la parte posterior del material de trabajo. El rango de velocidades utilizados muestra un comportamiento regular del proceso, donde no se produce una fractura de la herramienta o una sobre exigencia, ni se alcanza un estado líquido completo del material, aspecto importante en el desarrollo de FSW.

Para que el proceso sea totalmente replicable es de importancia asegurar que los esfuerzos y temperaturas involucradas no dañen de forma estructural y funcional al centro de mecanizado utilizado, por esto mismo, la existencia de la mesa de sujeción y refrigeración permite disminuir el impacto en la misma máquina, sin embargo, el calor generado por la herramienta también se conduce por ella hacia la zona de toma de herramienta en el husillo, esto al largo plazo puede tener consecuencias negativas. Por lo mismo, para tener un proceso de producción continuo con esta soldadura, es necesario generar un mecanismo de refrigeración del cabezal, estos sistemas ya han sido desarrollados por MegaStir para maquinaria



de su propia fabricación. Este ítem ya está en el programa de desarrollo de la Planta de Elementos Combustibles.

El diseño de una herramienta en dos bloques, hombro y pin, es un beneficio al proceso de fabricación, permitiendo que, ante la fractura del pin, elemento más susceptible, no exista una pérdida total de la herramienta, tiene una reparación rápida y sin mayores efectos sobre la calidad de soldadura final al tener un mismo diseño. Por otra parte, el utilizar un hombro recto permite que no exista una disminución importante del espesor de la placa trabajada al insertar la herramienta en la soldadura. Los ensayos de tracción muestran que la fractura del material se produce desde la parte posterior de la probeta, como ya se mencionó, esto significa que no existe una penetración completa de la soldadura. Una forma de mejorar el proceso y evitar este problema, es desarrollar un método de soldadura por fricción que considera el contacto de un hombro en ambas superficies, sin embargo, esto, a priori, no sería aplicable en el centro de mecanizado actual.

La caracterización mecánica muestra que la resistencia a la tracción de las probetas soldadas alcanza un valor entre el 59% y el 82% de valor obtenido del material base (290 [MPa] máximo nominal, 274,8 [MPa] real), alcanzando su máximo valor 226,9 [MPa], a 5 [mm/min] de velocidad de avance y 800 RPM. Considerando la estructura cristalográfica generada, las experiencias a 1600 y 1200 RPM entregan una cantidad de energía excesiva para el trabajo de material, por esto es necesario aumentar la velocidad de avance para estas combinaciones y obtener resultados de mejor calidad. Junto con esto, las metalografías muestran una relación entre el perfil obtenido y las propiedades mecánicas, siendo el perfil de la experiencia a 800 RPM, la que se presenta más compacta.

Aunque la medición de temperaturas durante el proceso está fuera de los alcances de este estudio, las metalografías dan indicio de que en algún momento el material alcanza una temperatura muy cercana a la fusión, generando microestructuras distintas a las esperadas, si es que el proceso se produjera solo en estado plástico. Con el fin de mejorar el estudio y las conclusiones que se puedan extraer de él, es necesario medir y estudiar el perfil de temperaturas durante la soldadura.

Finalmente, es necesario difundir la utilización de FSW en la industria chilena, ya que con este estudio más el desarrollado por Parrao [3] y Mena [31], se demuestra que se generan soldaduras de buena calidad, y lo destacable, es que se puede realizar en maquinaria totalmente convencional, como fresadoras tradicionales o centros de mecanizado, siendo metódicos en el diseño del proceso, dependiendo del contexto y objetivos.

## 6.1 Trabajo Futuro

Los pasos sugeridos para profundizar el estudio son:

- Optimización de parámetros de operación FSW en cobre: estudiar, manteniendo velocidad de avance, aplicar FSW a velocidades de rotación menores a 800 RPM.
- Estudiar el efecto de la velocidad de avance de herramienta en la calidad de esta.
- Modelar la potencia necesaria para FSW, considerando evolución de propiedades físicas del cobre con la temperatura.

## 7.-Bibliografía

- [1] P. Mitesh S, D. Utsav M y J. Mēhul G, «Effects of FSW on Mechanical properties and Microestructure of copper at Weld Joint,» *International Journal of Engineering Development and Research (IJEDR)*, ISSN:2321-9939, Volume.3, Issue 4, pp. 967-978, 2015.
- [2] Y. M. Hwang , P. L. Fan y C. H. Lin , «Experimental study on Friction Stir Welding of coper metals,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, n° 12, pp. 1667-1672, 2010.
- [3] J. A. Parrao Ramírez, *Estudio y Desarrollo del Procesos de Soldadura por Fricción-Agitación (FSW) para Placas de Cobre de Espesor 4 Milímetros*, Santiago: Universidad de Santiago de Chile , 2016, pp. 32 - 61.
- [4] T. Källgren, *Friction Stir Welding of Copper Canisters for Nuclear Waste*, Estocolmo : Royal Institute of Technology, 2005, pp. 10-50.
- [5] N. SriranjaraJalu y A. Rajadurai, «Microestructure and Mechanical Behaviour of Friction Stir Welded ETP Copper,» *ResearchGate*, vol. 108, pp. 13-20, 2016.
- [6] L. Won-Bae y J. Seung-Boo, «The Joint Properties of Copper by Friction Stir Welding,» *Material Letters* , vol. 58, n° 6, pp. 1041-1046, 2004.
- [7] Y. F. Sun y H. Fujii, «Investigation of the Welding Parameter Dependent Microestructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Pure Copper,» *Materials Science and Engineering*, vol. 527, n° 26, pp. 6879-6886, 2010.
- [8] E. G. Maffia , *Estructura y Propiedades de las Aleaciones, Cobre y sus Aleaciones*, 2013.
- [9] CASTI, *Metal Red Book: NonFerrous Metals*, 4ta ed., Alberta: Casti Publishing Inc., 2003.
- [10] N. W. Lejeune, *Welding Coppers and Copper Alloys: THE WELDING HANDBOOK*, C. d. Association, Ed., Miami, 1997.
- [11] F. F. Wang , W. Y. Li , J. Shen , S. Y. Hu y J. F. dos Santos , «Effect of Tool Rotational Speed on the Microestructure and Mechanical Properties of Bobbin tool Friction Stir Welding of Al-Li Alloy,» *Materials & Design*, vol. 86, pp. 933-940, 2015.
- [12] J. Perrett, J. Martin , J. Peterson, R. Steel y S. Packer , «Friction Stir Welding of Industrial Steels,» de *TMS Annual Meeting*, San Diego, Ca, EE. UU, 2011.

- [13] P. L. Threadgill, A. J. Leonard , H. R. Shercliff y P. J. Withers , «Friction Stir Welding of Aluminium Alloys,» *International Materials Review*, vol. 54, nº 2, pp. 49-93, 2009.
- [14] R. S. Mishra y Z. Y. Ma, «Friction Stir Welding and Proccesing,» *Materials Science and Engineering: R: Reports* , vol. 50, nº 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [15] MegaStir, *Catalog, Friction Stir Welding Tool*, 2014.
- [16] H. Mehdi y R. S. Mishra, «Mechanical Properties and Microestructure Studies in Friction Stir Welding (FSW) Joint Dissimilar Alloy,» *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* , vol. 76, nº 1, 2016.
- [17] R. Johnson y P. L. Threadgill, «Progress in Friction Stir Welding of Aluminium and Steel for Marine Aplications,» de *RINA conference: Advanced Marine Materials: Technology and Applications*, 2003.
- [18] W. Thomas , E. D. Nicholas y S. D. Smith , «Friction Stir Welding - Tool Developments,» de *TMS Annual Meeting*, 2001.
- [19] L. R. López González, *Soldadura por Fricción*, Universidad de Bío-Bío, 2013, pp. 15-60.
- [20] K. J. Quintanilla , F. Franco , N. Alba de Sanchez y R. Falla, «Propiedades Mecánicas de Soldadura por Fricción Agitación de Punto en Aleación de Aluminio AA6063-T5,» *Revista Prospectiva*, vol. 10, nº 1, 2012.
- [21] B. S. Yilbas y A. Z. Sahin , *Friction Welding: Thermal and Metallurgical Characteristics*, Aveiro, Portugal: Springer , 2014.
- [22] W. Jenkins, T. Digges y C. Johnson, «Tensile Properties of Copper, Nickel, And 70-Percent-copper-30-Percent-Nickel Alloys at Hight Temperatures,» *Journal of Research of the National Bureau of Standars* , vol. 58, nº 4, 1957.
- [23] M. B. Durdanovic , M. M. Mijajlovic, D. S. Milcic y D. S. Stemenkovic, «Heat Generation During Friction Stir Welding Process,» vol. 31, 2012.
- [24] The Welding Institute, «Capabilities: Friction Stir Welding,» [En línea]. Available: <https://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies/friction-welding/friction-stir-welding/>. [Último acceso: 15 Octubre 2018].
- [25] O. Nguyen, «An introducion to SMAW Shielded Metal Arc Welding,» The Welding School, 2 Agosto 2014. [En línea]. Available: <https://www.weldingschool.com/blog/welding/an-introduction-to-smaw-shielded-metal-arc-welding/>. [Último acceso: 15 Octubre 2018].

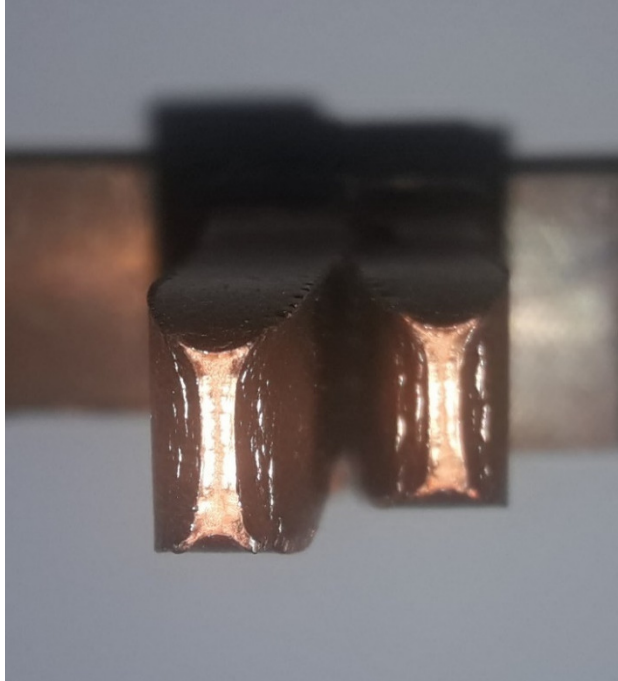
- [26] Hatford Innovation , «Super Tornado / HCMC Series,» Hatford, [En línea]. Available: <http://www.hartford.com.tw/en/Product/Vertical-Machining-Center/HCMC>. [Último acceso: 15 Octubre 2018].
- [27] Codelco, «Codelco,» [En línea]. Available: <https://www.codelco.com/>. [Último acceso: 15 Octubre 2018].
- [28] V. Prado, R. Vidal y C. Durán , «Aplicación de la Capacidad Bactericida del Cobre en la Práctica Médica,» *Revista Médica de Chile*, vol. 140, nº 10, pp. 1325-1332, 2012.
- [29] Copper Development Association , «Cost Effective Manufacturing: Joining Copper and Copper Alloys,» vol. 98, 1994.
- [30] D. A. Mena Contreras , *Implementar soldadura por Fricción-Agitación (FSW) para Unir Aleaciones de Aluminio 6061-T6 a Tope*, Santiago: Universidad Técnica Federico Santa María, 2015.
- [31] P. L. Threadgill , A. J. Leonard , H. R. Shercliff y P. J. Whithers , «Friction Stir Welding of Aluminium Alloys,» *International Materials Review* , vol. 54, nº 2, pp. 49-93, 2009.
- [32] E. Akinlabi, A. Levy y S. Akinlabi , «Desing of a Suppor Sistem for a Re-configured Milling Machine to Achive Friction Stir Welding,» *Procceding of the Worl Congress of Engineering* , vol. 1, pp. 978-988, 2013.
- [33] A. Souper, «El cobre como modelo de desarrollo sostenible,» *La tercera*, 20 Julio 2018.
- [34] V. Prado, R. Vidal y C. Durán , «Apliación de la capacidad bactericida del cobre en la práctica médica,» *Revista medica de Chile* , vol. 140, nº 10, pp. 1325-1332, 2012.
- [35] D. Mariano y P. Neto, «Numerical modeling of friction stir welding process: a literature review,» *Int J adv manuf technol*, vol. 65, pp. 115-126, 2014.
- [36] D. Mariano y P. Neto , «Numerical Modeling of the Friction Stir Welding Process: A Literature Review,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 65, pp. 115-126, 2013.
- [37] M. B. Durdanovic, M. M. Mijajlovic, D. S. Micic y D. Stamenkovic, «Heat generation during friction stir welding process,» *Triboly in industry*, vol. 31, nº 1 y 2, 2009.
- [38] P. Davim, «Introduction to FSW,» de *Modern manufacturing engeneering*, Aveiro Portugal, Springer, 2015, p. 181.

## 8.- Anexos

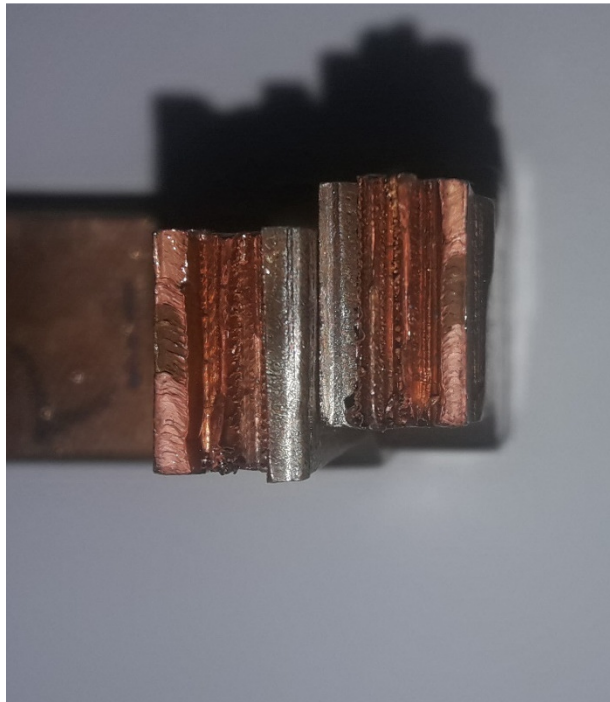
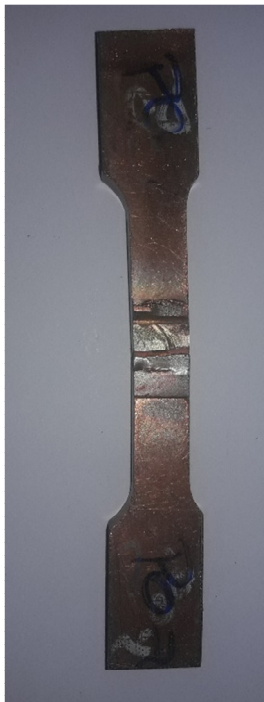
### Anexo A

En este anexo se presenta las imágenes de las fracturas registradas en los ensayos de tracción realizados a cada probeta.

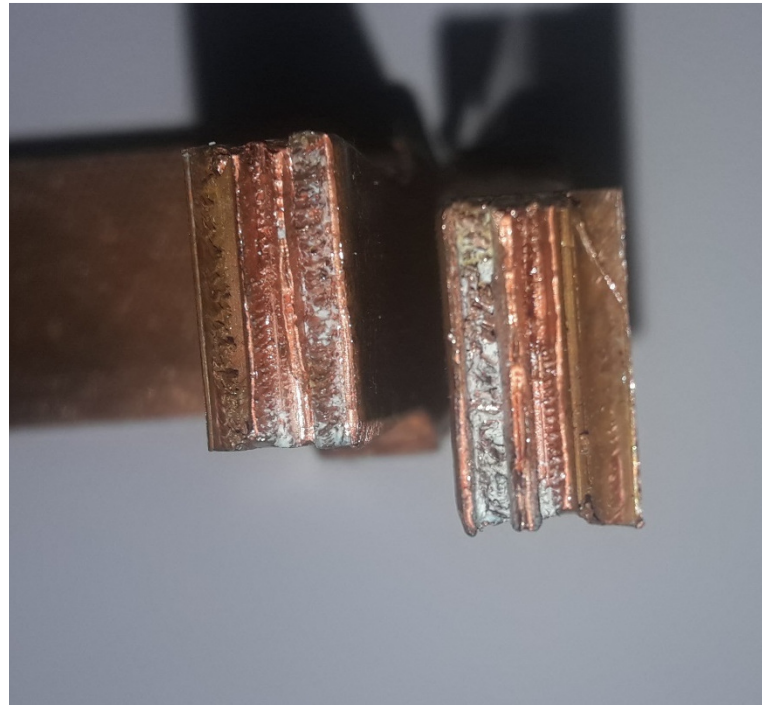
#### a) Probeta Tracción Material Base



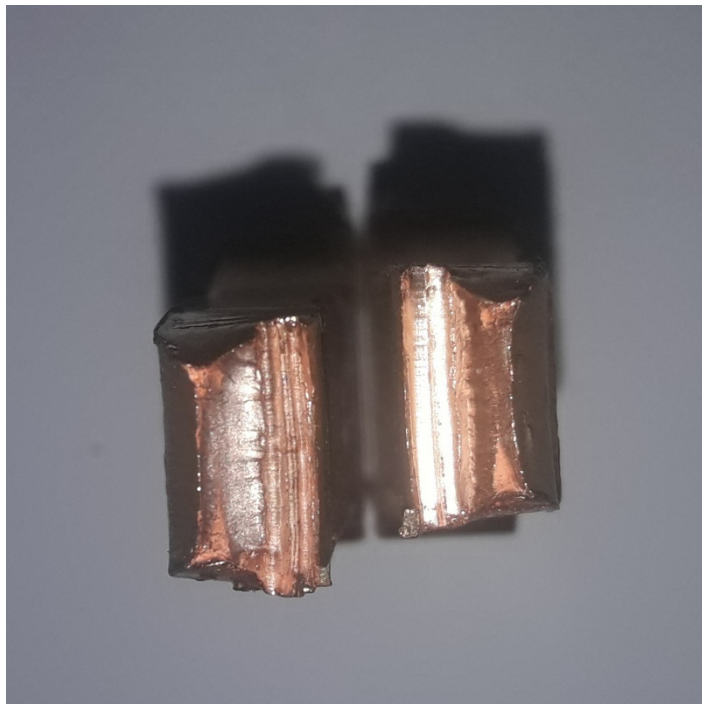
#### b) Probeta Tracción P0-2



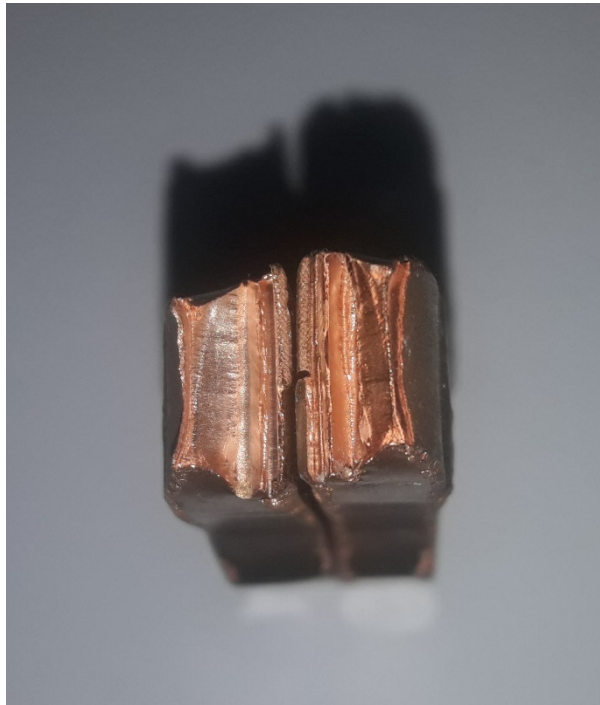
c) Probeta Tracción P0-3



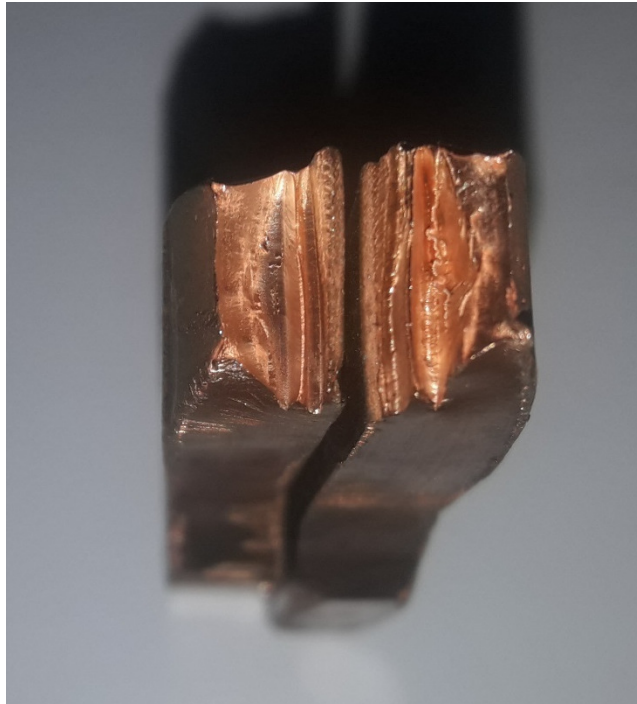
d) Probeta Tracción P1-2



e) Probeta Tracción P1-3

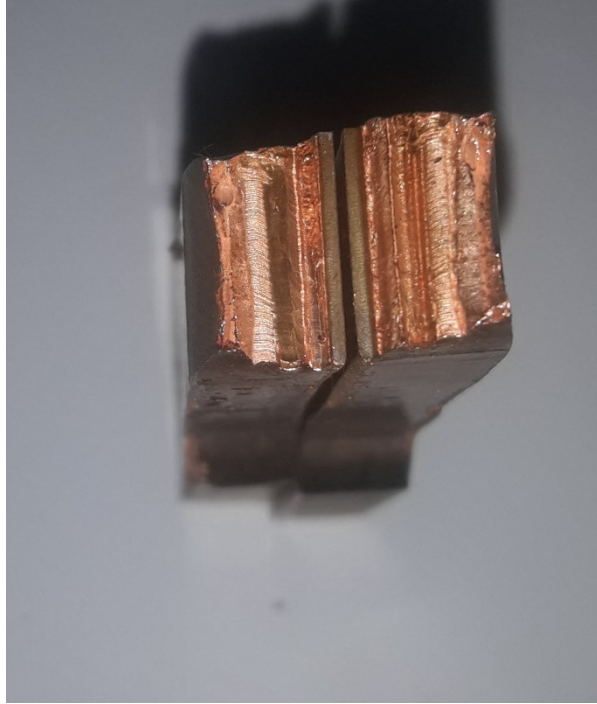


f) Probeta Tracción P1-4

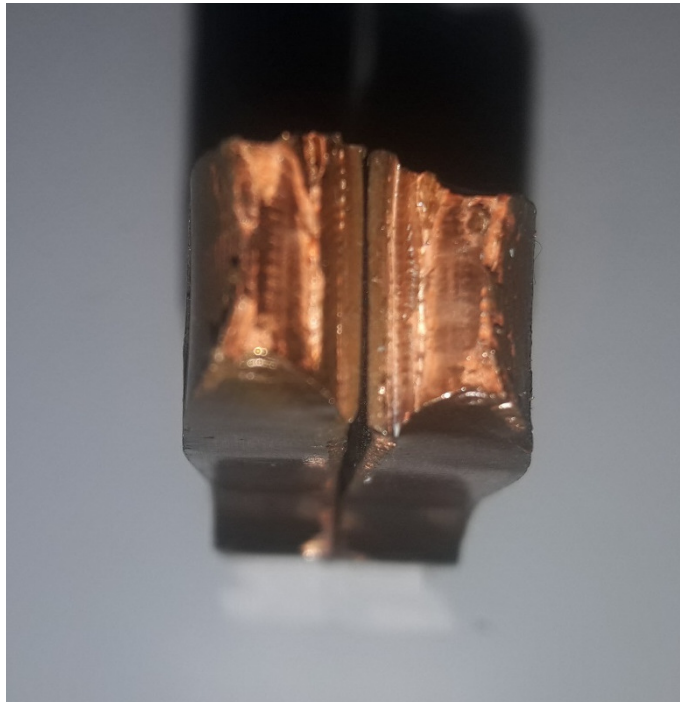




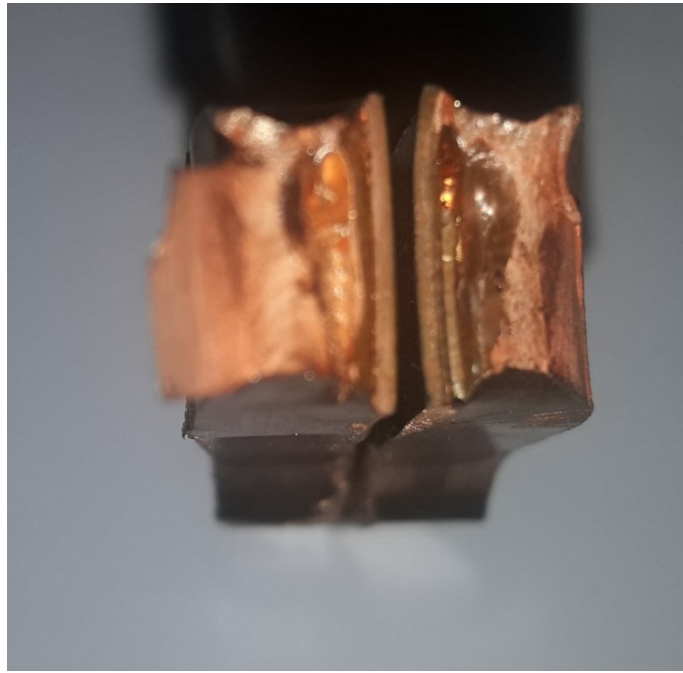
g) Probeta Tracción P2-2



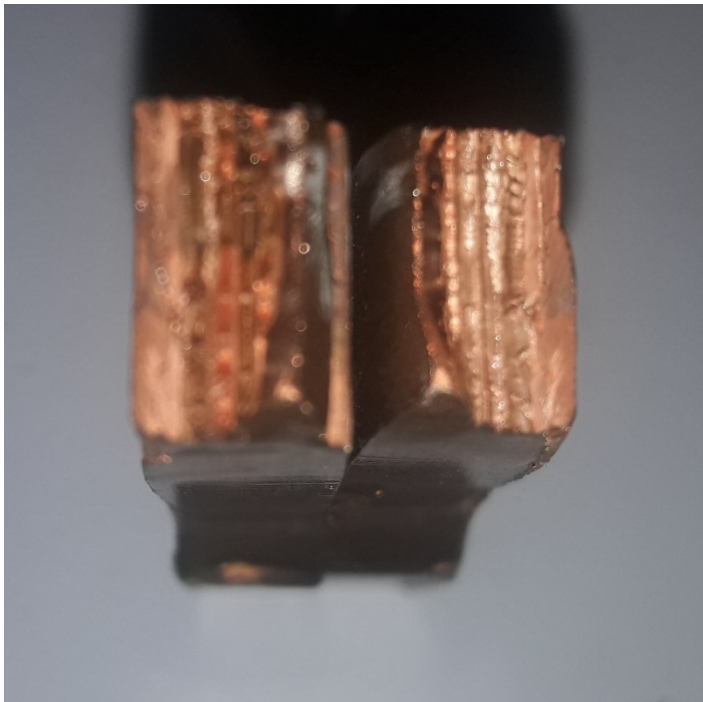
h) Probeta Tracción P2-3



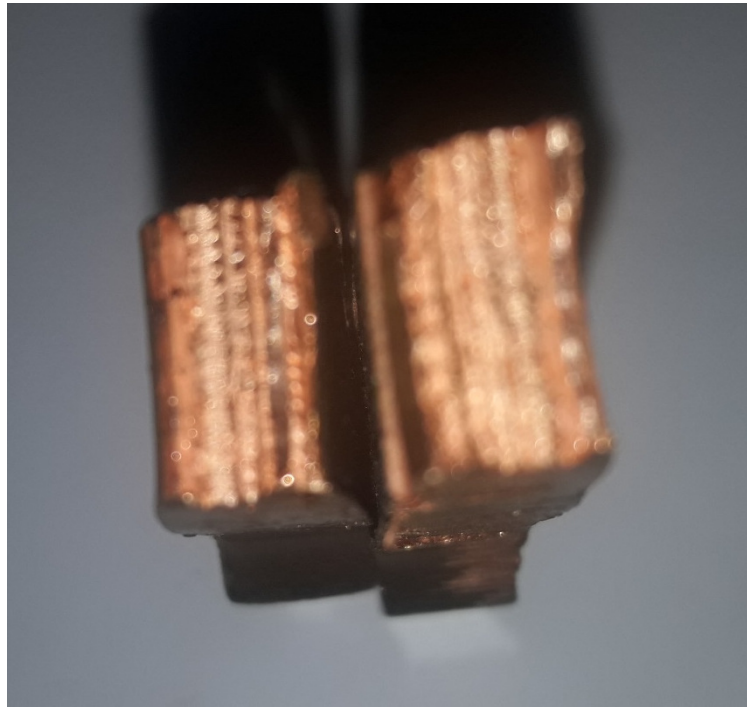
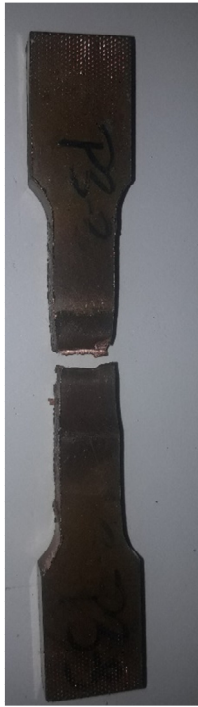
i) Probeta Tracción P2-4



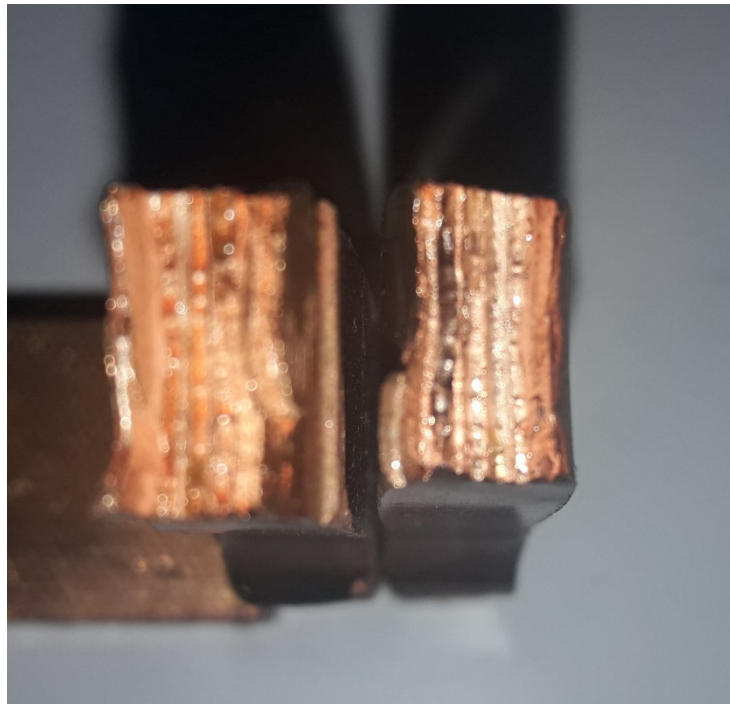
j) Probeta Tracción P3-2



k) Probeta Tracción P3-3






l) Probeta Tracción P3-4



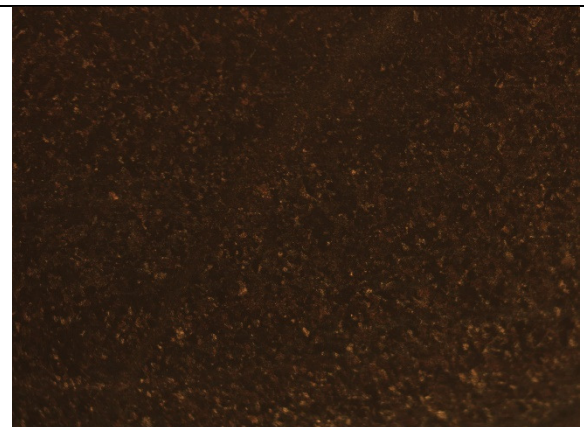


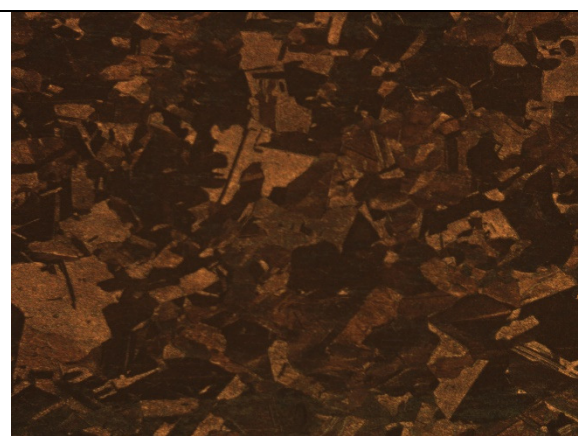




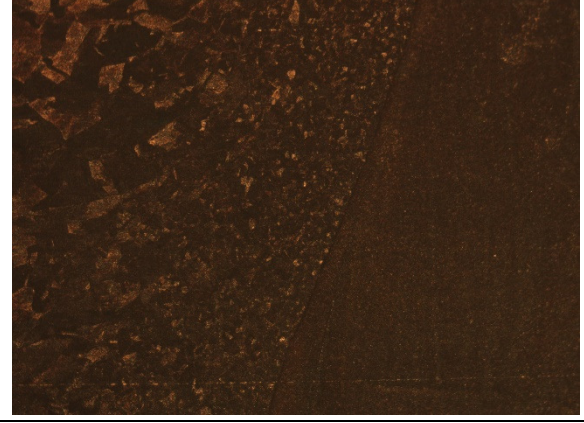



## Anexo B

Se presenta el detalle de las imágenes obtenidas de la microscopía para cada experiencia.




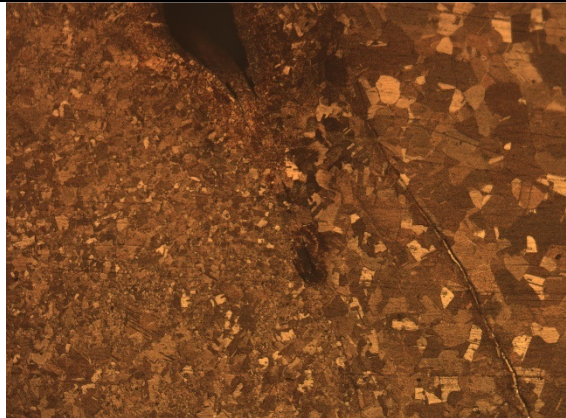
### Anexo B.1: Microscopias con lente X20 de aumento


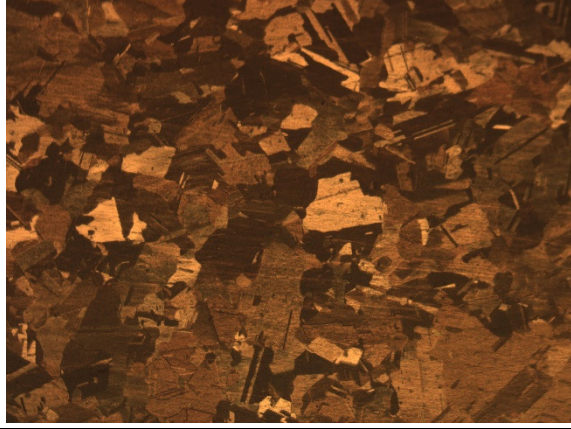
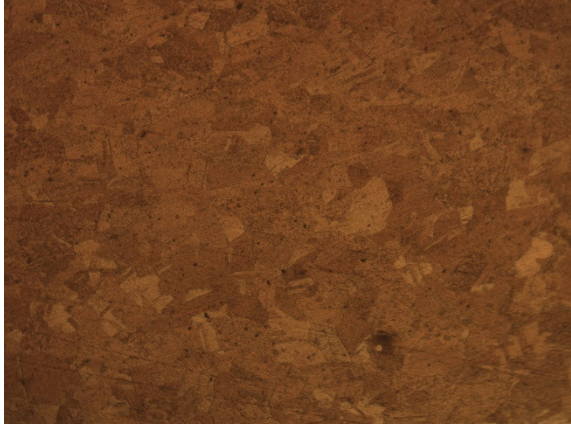

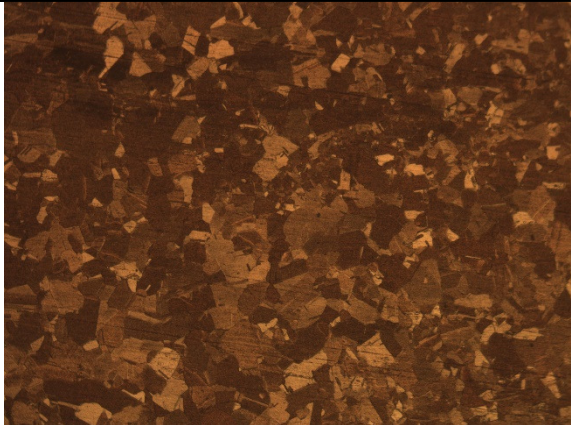
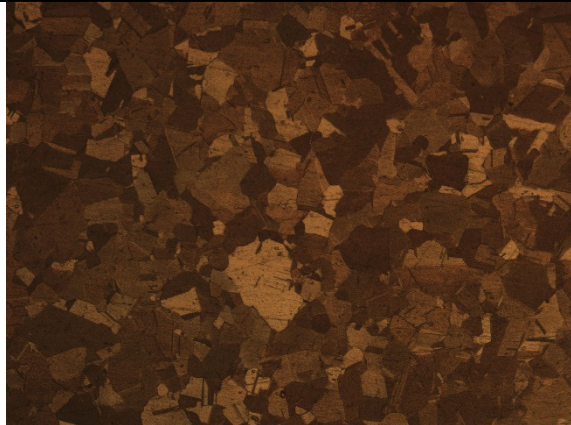
MB-1.1	MB-1.2
	
MB-1.3	
	

P0-1.1	P0-1.2
	
P0-1.3	P0-2.1
	
P0-2.2	P0-2.3
	


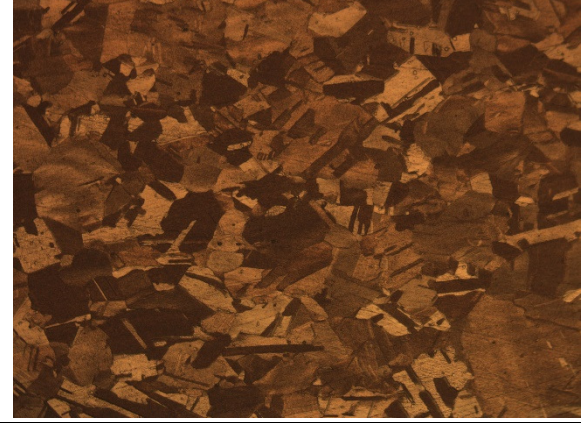
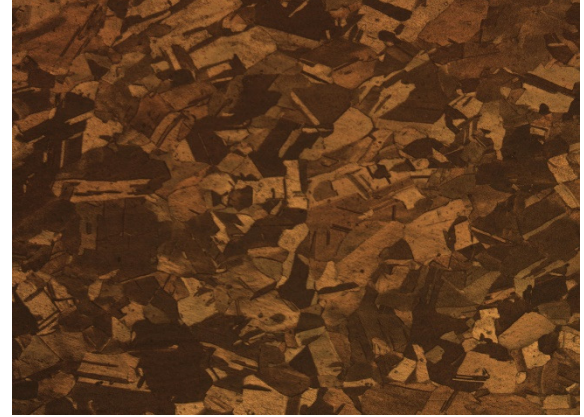
P0-2.4	P0-2.5
	
P0-3.1	P0-3.2
	
P0-3.3	P0-3.4
	

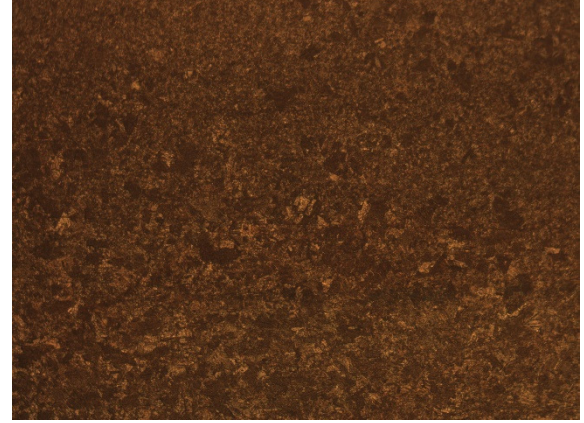
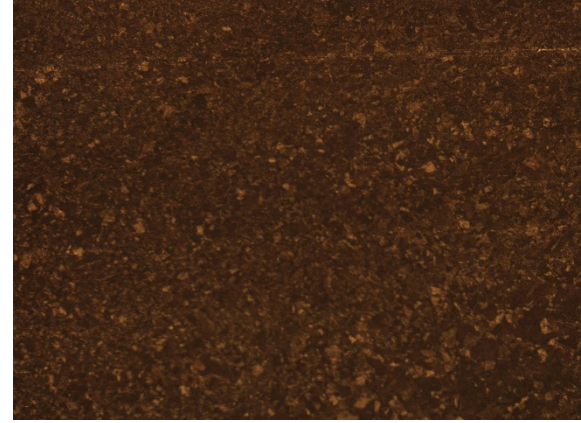
P0-3.5	
	

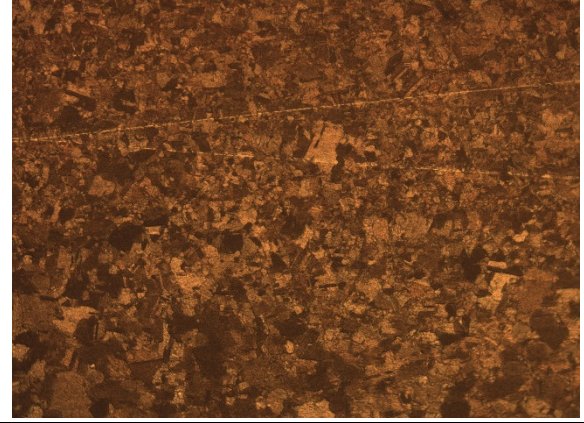
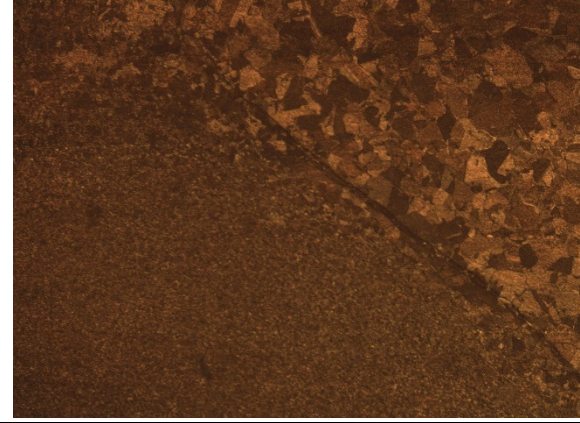
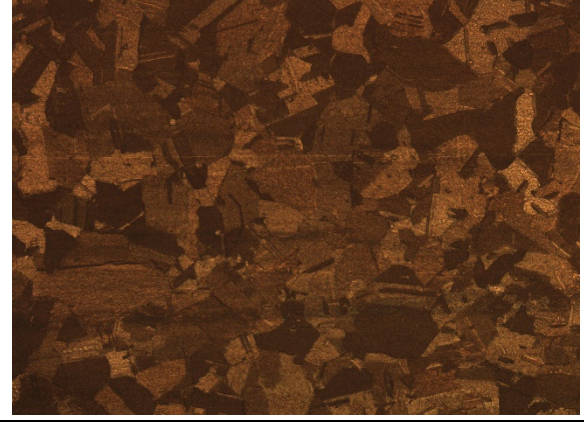

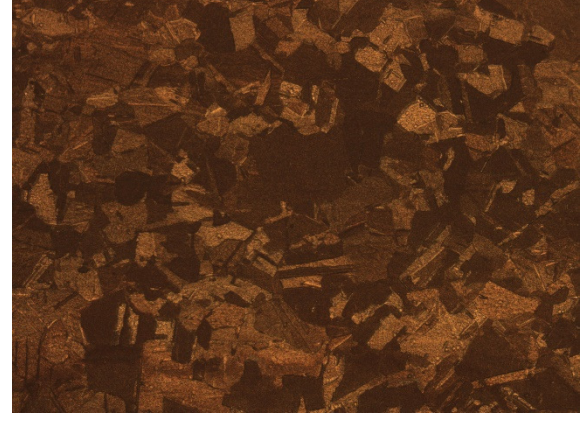
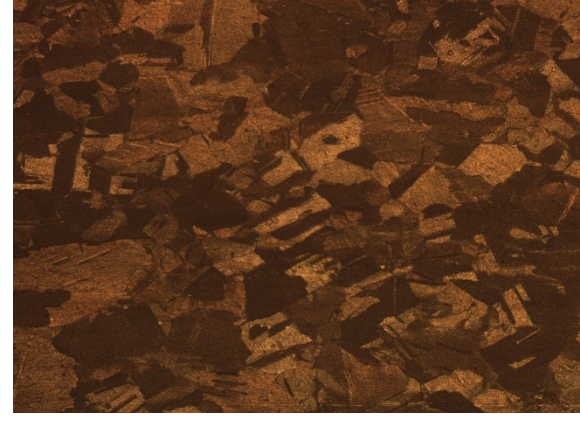
P1-1.1	P1-1.2
	
P1-1.3	P1-2.1
	

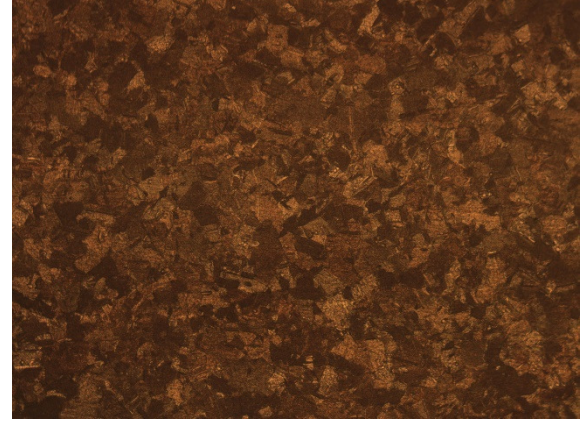
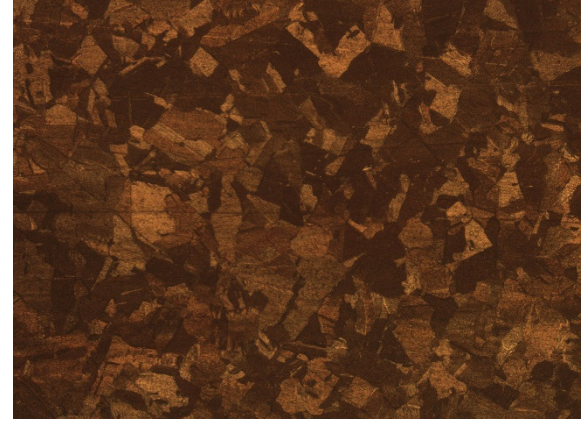


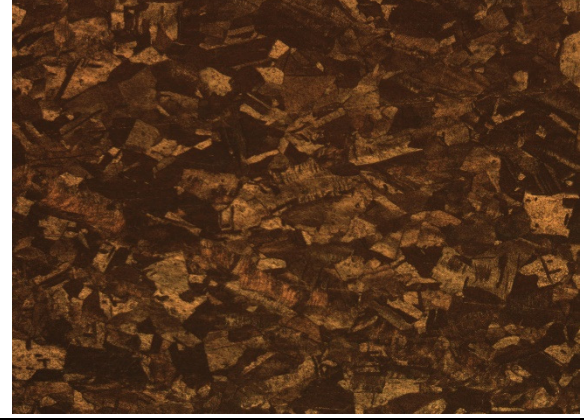
P1-2.2	P1-2.3
	
P1-2.4	P1-2.5
	
P1-3.1	P1-3.2
	

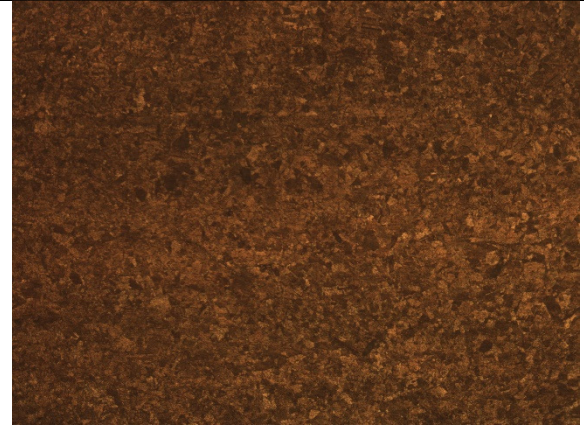
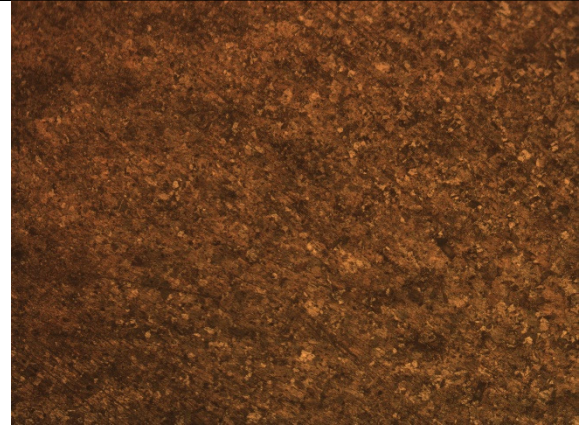
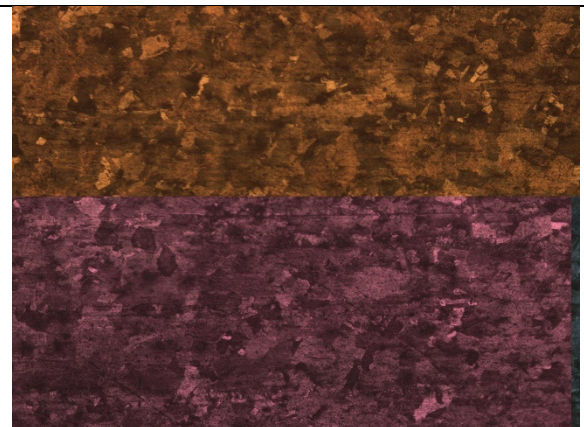

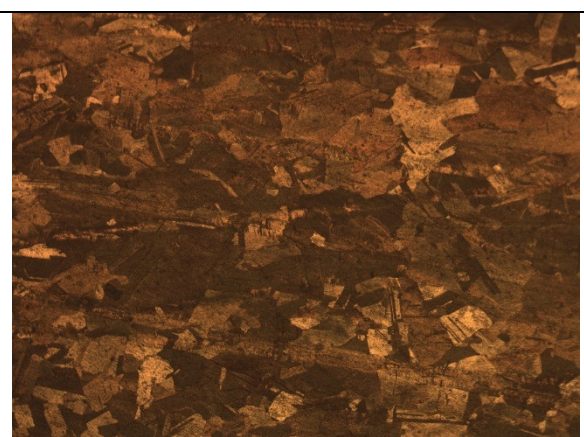




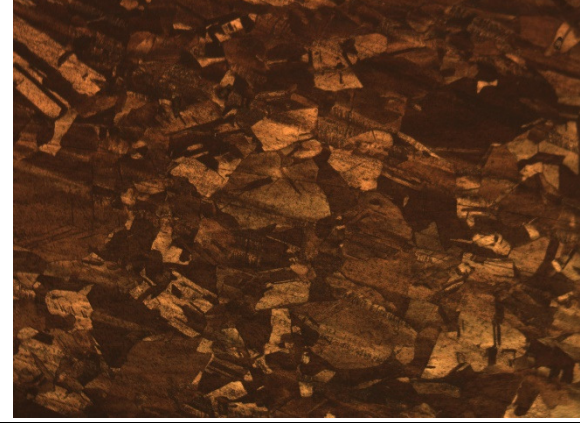




P1-3.3	P1-3.4
	
P1-3.5	
	

P2-1.1	P2-1.2
	

P2-1.3	P2-2.1
	
P2-2.2	P2-2.3
	
P2-2.4	P2-2.5
	

P2-3.1	P2-3.2
	
P2-3.3	P2-3.4
	
P2-3.5	
	

P3-1.1	P3-1.2
	
P3-1.3	P3-2.1
	
P3-2.2	P3-2.3
	

P3-2.4	P3-2.5
	
P3-3.1	P3-3.2
	
P3-3.3	P3-3.4
	

P3-3.5



## Anexo C

### Código modelo de cálculo de potencia necesario

```
%Datos Placa
e=0.0075;           %[m] Espesor Placa
l=0.2;             %[m] Largo de placa
puntos=30;
lugar=0:1/puntos:1;

%Datos Material
rho=8940;          %[kg/m3] Densidad
cp=0.39;           %[kJ/kgK] Calor Especifico
k=390;             %[W/mK] Conductividad Térmica
alpha=0.000111;   %[m2/s] Difusividad Térmica
mu=0.35;

%Datos Herramienta
Rh=0.008;          %[m] Radio Hombro
Rp=0.0035;         %[m] Radio pin
Hp=0.007;          %[m] Altura pin
area=pi*Rh^2;

% Datos de operación
Va=5/60/1000;     %[m/s] Velocidad de Avance
rpm=800;          %[RPM] Velocidad Rotación Husillo
w=rpm/60*2*pi;    %[rad/s] Velocidad Rotación Husillo
F=15000;          %[N] Fuerza normal
P=F/(pi*Rh^2);    %[kPa] Presión en Material
deltha=0.35;      % relacion condicion sticking/sliding

% tiempo
tp=1;
ttotal=l/Va/puntos;
t=0:tp:ttotal;
%temperaturas
ti=293;
tr=800;
temp05=zeros(length(t),length(lugar));

%calculo
radio=sqrt(e^2+lugar.^2);
q1=zeros(length(t),length(lugar));% calor entregado
qq=zeros(length(lugar),1); % Calor entregado en cada punto
%-----
%-----
q1(1,1)=heat(Rh,Rp,Hp,w,P,mu,deltha,ti)/area;
parentesis=(ierfc(1/(2*sqrt(For(alpha,tp,Rh))))-
ierfc(sqrt(1+(Rh/e)^2/2*sqrt(For(alpha,tp,Rh)))));
temp05(1,1)=ti+2*q1(1)*Rh/k*sqrt(For(alpha,tp,Rh))*parentesis;

for i=2:length(t)
    q1(i,1)=heat(Rh,Rp,Hp,w,P,mu,deltha,temp05(i-1,1))/area;
    temp05(i,1)=temp05(i-1,1)+2*q1(i,1)*Rh/k*sqrt(For(alpha,tp,Rh))*parentesis;
```

```

end

for i=1:length(t)
    qq(1)=qq(1)+q1(i,1);
end
qq(1)=qq(1)/tttotal*area;

templargo=zeros(puntos,puntos);
templargo(1,1)=temp05(length(t),1);
for i=2:puntos

templargo(i,1)=ti+2*qq(1)/1000/(rho*cp*4*pi*alpha*radio(i))*erfc(radio(i)/(sqrt(alpha*tttotal)));
end

%-----
%-----

for j=2:puntos
    q1(1,j)=heat(Rh,Rp,Hp,w,P,mu,delta,templargo(j,j-1))/area;

    temp05(1,j)=templargo(j,j-1)+2*q1(1)*Rh/k*sqrt(For(alpha,tp,Rh))*parentesis;
    for i=2:length(t)
        q1(i,j)=heat(Rh,Rp,Hp,w,P,mu,delta,temp05(i-1,j))/area;
        temp05(i,j)=temp05(i-
1,j)+2*q1(i,j)*Rh/k*sqrt(For(alpha,tp,Rh))*parentesis;
    end
    for i=1:length(t)
        qq(j)=qq(j)+q1(i,j);
    end
    qq(j)=qq(j)/tttotal*area;
    templargo(j,j)=temp05(length(t),j);
    for i=j+1:puntos
        templargo(i,j)=templargo(i,j-1)+2*qq(j)/1000/(rho*cp*4*pi*alpha*radio(i-
j+1))*erfc(radio(i-j+1)/(sqrt(alpha*tttotal)));

    end
end
end
%templargo-273
a=0;
for i=1:length(qq)
    a=a+qq(i);
end

```

```

%Cálculo Función For Definida
function [X1]=For(alpha, t, R)
X1=alpha*t/R^2;
end

```



```

%Función Cálculo del Calor entregado por Herramienta
function [x1]=heat(rh, rp, hp, w, p, mu, deltha, t)
qsl=toolsl(rh, rp, hp, w, p, mu);
qst=toolst(rh, rp, hp, w, yield(t));
x1=deltha*qst+(1-deltha)*qsl;
end

```

```

%Cálculo de la integral de la función error
function [X1]=ierfc(x)
X1=exp(-x^2)/sqrt(pi)-x*erfc(x);
end

```

```

%Cálculo del Calor Generado en Condición de deslizamiento
function [x1]=herramientasl(rh, rp, hp, w, p, mu)
tcsl=mu*p;
Q1=2/3*pi*w*tcsl*(rh^3-rp^3);
Q2=2*pi*w*tcsl*rp^2*hp;
Q3=2/3*pi*w*tcsl*rp^3;
x1=Q1+Q2+Q3;
end

```

```

%Cálculo del Calor Generado en Condición de adherencia
function [x1]=toolst(rh, rp, hp, w, sigma)
tcst=sigma/sqrt(3);
Q1=2/3*pi*w*tcst*(rh^3-rp^3);
Q2=2*pi*w*tcst*rp^2*hp;
Q3=2/3*pi*w*tcst*rp^3;
x1=Q1+Q2+Q3;
end

```

Anexo D

Planos Sistema de Sujeción y Refrigeración