



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

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE ELECTRODOS COMERCIALES Y CU-TIC- AL₂O₃ PARA SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

FRANCISCO BELLEDONNE SOTO

PROFESOR GUÍA:

RODRIGO PALMA HILLERNS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

AQUILES SEPULVEDA OSSES

ALI AKBARI FAKHRABADI

SANTIAGO DE CHILE

2015

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil Mecánico**

POR: Francisco Belledonne Soto

FECHA:28/08/2015

PROFESOR GUÍA: Rodrigo Palma Hillerns

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE ELECTRODOS COMERCIALES Y CU-TIC-
AL₂O₃ PARA SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA**

El objetivo principal de este trabajo es hacer una evaluación del desempeño comparado de electrodos usados en el proceso de soldadura por resistencia eléctrica.

Los electrodos a comparar son: Electrodo comercial de cobre, níquel, cobalto, electrodo de cobre catódico comercial y electrodo de cobre, carburo de titanio y alúmina desarrollado por el alumno en las instalaciones del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile. El electrodo desarrollado por el alumno es obtenido mediante molienda reactiva y extrusión.

Se cuenta con experiencias anteriores que sirven de comparación y guía para éste trabajo. El desempeño de los electrodos es medido en base a 3 parámetros principalmente: Acortamiento del electrodo, aumento de diámetro del mismo y pérdida de masa, también se hace un exhaustivo proceso de caracterización de los materiales en estudio.

La fabricación del electrodo de Cu-2,5%v TiC-2,5%v de Al₂O₃ consta de 3 etapas principales, que son, molienda reactiva de polvos, extrusión y finalmente el maquinado de los electrodos.

Una vez que se tienen todos los electrodos listos, se someten a desgaste, es decir, sucesivas pasadas de soldadura, con el objetivo de medir regularmente los parámetros antes mencionados.

Los resultados obtenidos muestran que ambas aleaciones son ampliamente superiores en casi todos los parámetros al cobre puro. El electrodo de Cu-2,5%v TiC-2,5%v de Al₂O₃ presentó un acortamiento promedio de un 6,6%, un aumento del diámetro de un 22,2% y una pérdida de masa de 0,3%. El electrodo de Cu-Ni-Co presento unos valores respectivos de 7,9%, 2,1% y 1,06% mientras que el cobre comercial presentó un 40%, 20%, 1,64% respectivamente.

Se desprende que el electrodo de Cu-2,5%v TiC-2,5%v de Al₂O₃ es el mejor desempeño presenta, sin embargo la aleación de Cu-Ni-Co también es muy superior al cobre puro.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Rodrigo Palma, que fue de gran ayuda en todas las etapas de este trabajo, estando siempre disponible para el alumno en los momentos que este lo requirió.

A Hugo Barrera, cuya ayuda en la parte experimental de este trabajo fue invaluable. Sin duda el trabajo no habría sido terminado a tiempo de no ser por él.

A Juan Carlos Salgado, que con su buena disposición siempre ayudó al alumno en lo respectivo a compra de materiales y maquinado de las piezas.

A la profesora Marta López de la Universidad de Concepción, que ayudó en las mediciones de conductividad eléctrica de las muestras.

A Edgardo Jara de la empresa Molymet, que aportó con los análisis químicos y SEM de las muestras.

A la empresa Promalad, quienes me permitieron hacer uso de sus máquinas de soldar en la etapa de pruebas.

A mis amigos tanto mecánicos como de plan común, por su incondicional apoyo y ayuda a lo largo de la carrera.

A mi equipo Old Locks, que ha estado conmigo en todas y quienes me han ayudado en incontables ocasiones con trabajos y apoyo a lo largo de mi carrera.

A María Soledad Puelma, que siempre estuvo dispuesta entregar un buen consejo y aportar en lo que fuera necesario para mi formación, tanto profesional como personal.

Y para terminar, sin duda mi mayor agradecimiento va para mi familia, en especial para mis padres Andrés y Teté, quienes han sido un cable a tierra a lo largo de toda la carrera, ayudándome en todo lo que han podido.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Alcances.....	3
2. Antecedentes.....	4
2.1 Mecanismos de Endurecimiento a Bajas Temperaturas	4
2.1.1 Deformación en Frío	4
2.1.2 Solución Sólida	4
2.1.3 Refinamiento del Tamaño de Grano	5
2.1.4 Precipitación o Dispersión.....	5
2.2 Mecanismos de Deformación a Altas Temperaturas	6
2.2.1 Ascenso de las Dislocaciones de Borde al Enfrentar una Partícula Incoherente	7
2.2.2 Flujo Difusional	7
2.2.3 La Relajación del Campo de Deformaciones Asociado al Segmento de Línea de la Dislocación en Contacto con la Partícula.....	7
2.3 Características y Requerimientos de los Dispersoides	7
2.4 Métodos de Producción de Dispersoides Cerámicos.....	8
2.4.1 Oxidación Interna.....	8
2.4.2 Precipitación	8
2.4.3 Molienda de Alta Energía de Polvos de Metal.....	8
2.4.4 Molienda Reactiva	9
2.5 Antecedentes Específicos	10
3. Metodología	11
3.1 Condiciones de Operación de los Equipos	11
3.1.1 Condiciones de Fabricación del Electrodo	12
3.1.2 Condiciones de Operación del Molino.....	12
3.1.3 Parámetros de Soldadura	12
3.2 Método de Evaluación de Respuestas	13
3.3 Procedimiento Experimental.....	13
3.3.1 Molienda Reactiva de Polvos	13
3.3.2 Análisis Químico, SEM y Difracción de Rayos X.....	18
3.3.3 Compactación de Polvos y Encapsulamiento al Vacío.....	18
3.3.4 Extrusión en Caliente.....	19
3.3.5 Porta Electrodo y Maquinado	20
3.3.6 Respuestas Evaluadas	22

3.3.7 Pruebas en Fábrica.....	24
4. Resultados y Discusión.....	25
4.1 Microdureza	25
4.2 Temperatura en la Unión Soldada	27
4.3 Análisis Químico de los Electrodo, SEM y Difracción de Rayos X	29
4.4 Análisis de Conductividad	32
4.5 Ensayo de Compresión de los Electrodo	33
4.6 Densidad de las Muestras	34
4.7 Acortamiento del Electrodo	35
4.8 Aumento del Diámetro del Electrodo	38
4.9 Pérdida de Material	43
4.10 Resistencia de la Unión Soldada	45
4.11 Análisis Microestructural de la Unión Soldada	47
4.13 Resumen de Resultados	52
4.14 Comparación de Resultados con Memorias Guías	54
5. Conclusiones	56
6. Bibliografía.....	58

1. Introducción

En la industria manufacturera actual, al momento de ensamblar las distintas componentes de un equipo se requiere unir piezas metálicas, lo cual generalmente se hace mediante el proceso de soldadura. Hay casos, como la industria automotriz y de línea blanca entre otras, en que las cargas a las cuales se ven sometidas las componentes no justifican un cordón de soldadura completo, y es en éstos casos cuando se puede usar el método de soldadura de resistencia eléctrica por puntos. La ventaja que ofrece el método antes nombrado radica principalmente en el ahorro de materiales y tiempo.

Uno de los componentes más importantes para la correcta realización de la soldadura por puntos, es el electrodo. Actualmente en las industrias se utilizan electrodos de Cu-Ni-Co y cobre puro y el objetivo de este proyecto es diseñar y probar un electrodo de Cu-TiC-Al₂O₃, con la finalidad de comparar los desempeños de los mismos. La comparación se hará en base a parámetros tales como la pérdida de peso del electrodo, su deformación, duración, dureza y resistencia a la compresión.

La fabricación del nuevo electrodo se realizará mediante la sinterización de polvos, aleados por molienda reactiva de alta energía de los metales indicados, durante el proceso de extrusión, para obtener una probeta cilíndrica que posteriormente será maquinada para darle la forma final.

El proceso de soldadura por punto fue presentado por Eliu Thompson en 1877; sin embargo no alcanzó su pleno desarrollo hasta después de la segunda guerra mundial [1].

Las máquinas de soldadura por puntos se constituyen principalmente por un transformador con una pequeña diferencia de potencial pero con una gran capacidad de corriente cuando se cierra el circuito. El cierre del circuito secundario se realiza mediante las piezas a soldar [1].

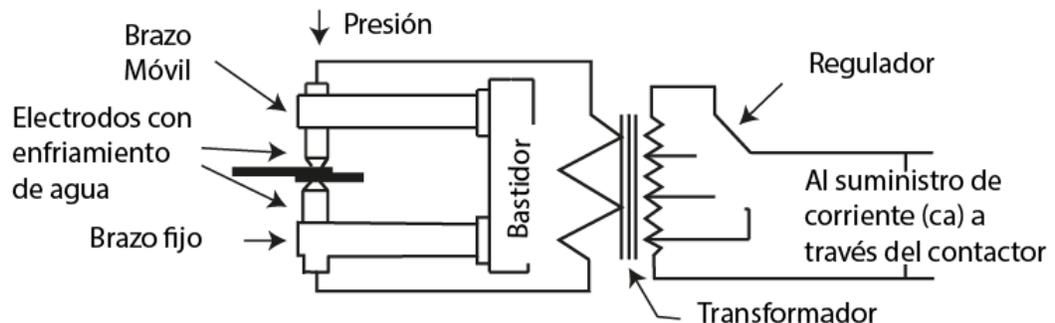


Figura 1.1 Diagrama de equipo de soldadura por resistencia eléctrica
Fuente: Elaboración Propia en base a [1]

Al pasar la corriente por entre las piezas, el efecto Joule genera calor suficiente para producir la fusión local que, en conjunto con la presión efectúan una unión forjada, perteneciendo así este tipo de soldadura al grupo de las autógenas o sin aporte de material [2].

Debido a las condiciones de temperatura, electricidad y desgaste que deben aguantar los electrodos, se hace importante encontrar un material que cubra todas éstas necesidades. El cobre presenta una muy buena conductividad tanto térmica como eléctrica, sin embargo no presenta buenas propiedades mecánicas. Debido a lo anterior es que se buscan métodos para mejorar éstas propiedades sin perjudicar en demasía las conductividades.

Un método para aumentar la resistencia mecánica del cobre es la inclusión de dispersoides nanométricos, los cuales anclan las dislocaciones, aumentando considerablemente las propiedades mecánicas del material.

Mediante técnicas de pulvimetalurgia, se puede introducir dentro de la matriz de un material, dispersoides cerámicos homogéneamente distribuidos, éstos deben poseer estabilidad térmica y un tamaño nanométrico.

En el marco de lo anterior se persigue fabricar electrodos que cumplan propiedades específicas para su correcto desempeño. Entre ellas se encuentran [2]:

Mecánicas: Una de las características requeridas es la alta resistencia mecánica (hasta 50 [kg/mm²] de presión en la superficie de contacto con las piezas). Además, las pequeñas asperezas superficiales que presentan las piezas a soldar erosionan al electrodo, produciendo un desgaste que debe contrarrestarse con una elevada dureza superficial, por lo que generalmente se requiere que esta última sea superior a 120 Brinell.

Eléctricas: Se necesita de una elevada conductividad eléctrica del material empleado que tiende a anular al máximo el efecto Joule. Usualmente dichas conductividades, utilizadas para soldar materiales ferrosos, son mayores al 60% IACS del cobre recocido, y las utilizadas para soldar aluminio y aleaciones es mayor al 83% de la conductividad del cobre puro patrón.

Térmicas: Poseer una gran conductividad térmica que tienda a favorecer la refrigeración de los electrodos.

1.1 Objetivos

El objetivo general de éste trabajo de título es: Estudiar el desempeño de electrodos comerciales de Cu-Ni-Co, cobre comercial y Cu-TiC-Al₂O₃, éste último obtenido por molienda reactiva y extrusión, como electrodos de soldadura por resistencia eléctrica.

Los objetivos específicos del trabajo son:

- Diseñar y fabricar electrodos de Cu-TiC-Al₂O₃

- Comparar el desempeño del electrodo fabricado con los utilizados actualmente en las empresas de los rubros antes mencionados (Cu-Ni-Co y Cu puro)
- Probar los electrodos en una empresa en condiciones reales, de manera de acercarse lo más posible a las condiciones de la industria.

1.2 Alcances

Tal como se mencionó en los puntos anteriores, el alcance de éste trabajo consiste en comparar el desempeño y las propiedades tanto eléctricas como mecánicas del nuevo electrodo con las de los electrodos comerciales existentes, para lo cual se consideran las siguientes limitaciones:

- Todas las pruebas y procedimientos serán realizados acorde a los recursos disponibles en el departamento de ingeniería mecánica de la Universidad de Chile.

- Los polvos necesarios para la fabricación de la probeta serán de uso comercial y no se fabricarán en la universidad.

- La máquina de soldadura será solo una herramienta de trabajo, por lo que no se estudiará la teoría detrás de su operación.

- La metodología a seguir será la misma que la de las memorias guías (Roberto Montiglio [3] y Daniel Vera [4]).

- No se realiza un análisis de factibilidad económica de la fabricación del electrodo de Cu – TiC – Al₂O₃.

2. Antecedentes

2.1 Mecanismos de Endurecimiento a Bajas Temperaturas

En sólidos metálicos cristalinos el principal mecanismo de deformación plástica se produce por el movimiento de dislocaciones. Estas dislocaciones se producen por tensiones aplicadas sobre el material, lo cual genera y provoca el movimiento de las mismas.

Los principales mecanismos de reforzamiento en metales a temperaturas inferiores al 30% de la temperatura de fusión son los siguientes:

- Deformación en frío
- Solución sólida
- Refinamiento del tamaño de grano
- Precipitación o dispersión

2.1.1 Deformación en Frío

Al someter al material a deformación plástica se logra aumentar la densidad de dislocaciones, lo que fortalece al mismo producto de las obstrucciones a su movimiento.

Este mecanismo está gobernado por la siguiente ecuación [5]:

$$S_d = 2\alpha Gb\sqrt{\rho} \quad (2.1)$$

Dónde:

S_d : Esfuerzo de dislocaciones [Pa]

b: Vector de Burger [m]

α : Coeficiente de reforzamiento por dislocaciones ($\alpha=0,2$)

G: Módulo de corte [N/m^2]

ρ : Densidad de dislocaciones en el estado final [m^{-2}]

2.1.2 Solución Sólida

Se adicionan átomos de soluto a la matriz, originando campos de tensiones que dificultan el movimiento de las dislocaciones. La efectividad de éste mecanismo

depende principalmente de la diferencia de tamaño entre el soluto y el solvente y del porcentaje de soluto agregado.

2.1.3 Refinamiento del Tamaño de Grano

También conocido como el método de Hall-Petch o mecanismo de reforzamiento indirecto, éste mecanismo aprovecha la dificultad de las dislocaciones para moverse a través de los bordes de grano para fortalecer el material. Si se logra refinar el tamaño de grano del material, entonces habrán más bordes de grano y por ende mayor dificultad para el movimiento de dislocaciones. Este mecanismo se rige por la siguiente ecuación [6]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (2.2)$$

Dónde:

σ_y : Límite elástico [Pa]

d: diámetro promedio del grano [m]

K y σ_0 : constantes que dependen del material

2.1.4 Precipitación o Dispersión

Se introducen partículas en el material para obstaculizar el avance de las dislocaciones. Las dislocaciones en tanto, para evitar estos obstáculos tienen dos opciones, cortar el dispersoide o rodearlo (conocido como mecanismo de Orowan), dejando anillos circulares en torno al mismo y provocando mayor dificultad al movimiento.

El esfuerzo requerido para arquear dislocaciones alrededor de partículas de radio r y espaciado d es conocido como el esfuerzo de Orowan, S_0 , y se define mediante la siguiente ecuación [7]:

$$S_0 = \left[\frac{1}{1.18} \frac{M G b}{2\pi\sqrt{(1-\nu)}} \ln \left(\frac{r}{b} \right) \right] \left(\frac{1}{d} \right) \quad (2.3)$$

Dónde:

S_0 : Esfuerzo de Orowan [Pa]

M: factor de Taylor

G: Módulo de Rigidez [N/m²]

b: Vector de Burger [m]

v: Razón de Poisson

Todos los valores anteriores corresponden a la matriz. En la precipitación se forma una segunda fase dentro de los granos de la matriz, y con distintas propiedades que ella. En cambio los dispersoides son partículas introducidas artificialmente por diversos métodos a la matriz. Según la aplicación del material a endurecer se elige el método a utilizar entre dispersión y precipitación. En el caso de los electrodos para soldadura por resistencia eléctrica, se utiliza cobre debido a su gran capacidad para conducir la electricidad y el calor, por lo que estas propiedades no deben verse afectadas en demasía. La conductividad eléctrica del cobre disminuye al aumentar la cantidad de elementos en solución sólida, por lo que se debe escoger con cuidado el método de endurecimiento. El endurecimiento por dispersión es la forma más útil de obtener un reforzamiento de la matriz sin pérdidas de conductividad eléctrica significativas ya que es más fácil de controlar.

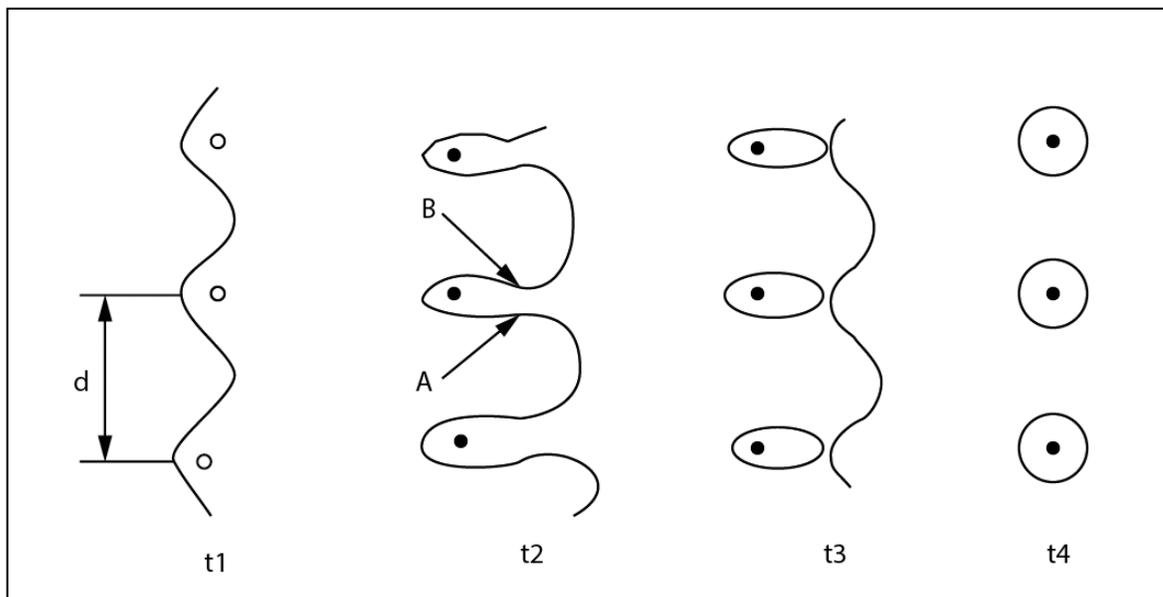


Figura 2.0.1 Mecanismo de Orowan
Fuente: Elaboración propia en base a [7]

2.2 Mecanismos de Deformación a Altas Temperaturas

Al aumentar la temperatura, los mecanismos de endurecimiento antes vistos disminuyen su efecto, sin embargo, en el caso de los dispersoides, se ha observado que la incoherencia de la interfase matriz-dispersoide aumenta el esfuerzo requerido

para separar las dislocaciones de esa interfase, lo que aumenta su resistencia a la deformación. Además, partículas con una interfase semicoherente ubicadas en los límites de grano disminuyen la movilidad de éstos últimos, aumentando la resistencia al creep del material, lo que hace más interesante aún al mecanismo de reforzamiento por dispersión [7]. Los mecanismos de deformación plástica a altas temperaturas son:

2.2.1 Ascenso de las Dislocaciones de Borde al Enfrentar una Partícula Incoherente

Este es un mecanismo controlado por la energía de difusión de las vacancias, el cual es un proceso térmicamente activado. La dislocación se aleja de los obstáculos que obstruyen su deslizamiento ya que los átomos se mueven a uno y otro lado de la dislocación por difusión, haciendo que la dislocación se mueva perpendicularmente a su plano de deslizamiento.

2.2.2 Flujo Difusional

El flujo difusional puede ocurrir a bajas tensiones pero requiere altas temperaturas. Este mecanismo implica el movimiento de vacancias y ocurre por la formación espontánea de vacancias en las regiones de los bordes de grano que se encuentran esencialmente normales a la tensión aplicada. Esta distribución desigual produce un flujo de vacancias hacia zonas de menor concentración. Acompañando a este flujo de vacancias habrá un flujo de átomos en sentido contrario. Como resultado de estos mecanismos de difusión de vacancias y de átomos, se producirá una redistribución del material que conduce a un estiramiento en la dirección de la tensión aplicada.

2.2.3 La Relajación del Campo de Deformaciones Asociado al Segmento de Línea de la Dislocación en Contacto con la Partícula

La energía por unidad de longitud de la línea de la dislocación disminuye desde su valor completo, cuando está en la matriz, al valor de la energía relajada, cuando está en la interfase partícula-matriz. Así, se requiere de un esfuerzo adicional para separar la dislocación de la partícula. Este mecanismo es importante a altas temperaturas bajo condiciones de creep.

2.3 Características y Requerimientos de los Dispersoides

Los requerimientos necesarios para mejorar el comportamiento mecánico del cobre son las características que pueden ofrecer los dispersoides y basándose en ello

la selección del dispersoide es fundamental para mejorar el comportamiento de los electrodos. Estas características se detallan a continuación:

- Estabilidad de las partículas a temperaturas elevadas, tanto de procesamiento como de operación. Estas partículas deben ser estables, sin transformaciones de fase hasta aproximadamente los 1300 K además de ser compatibles químicamente con la matriz.
- Efectividad como obstáculos a los mecanismos de deformación en caliente de las partículas; para ello se necesita que el tamaño sea menor a 10 a 30 nm, que estén uniformemente distribuidas y que posean baja solubilidad y difusividad en la matriz para evitar el engrosamiento.
- Bajo efecto sobre la conductividad, de manera de alterar lo menos posible esta propiedad de la matriz. Esto se logra seleccionando los elementos que forman el dispersoide de manera que tenga muy baja solubilidad en la matriz.

2.4 Métodos de Producción de Dispersoides Cerámicos

Los procesos usados para producir una dispersión de partículas en una matriz metálica son los siguientes [6]:

2.4.1 Oxidación Interna

Polvos prealeados atomizados son expuestos a una atmósfera oxidante; combinaciones adecuadas de las condiciones experimentales, actuando sobre la solubilidad, difusividad y reactividad, permiten que el soluto se oxide internamente y que el cobre no se oxide ni que se forme una capa superficial de óxido.

2.4.2 Precipitación

El metal es enfriado desde una fase líquida, usando técnicas de solidificación fuera del equilibrio para obtener pequeños tamaños de dispersoides.

2.4.3 Molienda de Alta Energía de Polvos de Metal

Se realiza la molienda de polvos del metal con polvos de cerámicas o con óxidos presentes en los mismos polvos metálicos; así se puede generar una fina dispersión de partículas incoherentes con la matriz. Los tamaños de polvos más finos disponibles comercialmente varían entre 30 y 50 nm.

2.4.4 Molienda Reactiva

Proceso en el que polvos elementales o prealeados son atricionados en un molino de alta energía en presencia de una atmósfera, medio de molienda o polvos, que aportan O,C o N, para producir la precipitación en la matriz, de óxidos, carburos o nitruros, respectivamente. Las partículas más finas así obtenidas tienen tamaños de 10 a 30 nm.

Los dos últimos métodos son procesos en el que dos o más tipos de polvos son continuamente mezclados, soldados, deformados en frío y fragmentados, resultando soluciones sólidas o mezclas de fases, de tamaños micro o nanométrico, y de estructura amorfa o cristalina, como se muestra en la figura 2.

Los métodos de molienda se realizan en molinos de alta energía y tienen la gran ventaja que, además de producir la dispersión de partículas, producen un refinamiento microestructural (el tamaño de grano o subgrano puede llegar a ser del orden de 10 ó 100 nm) y aumentan considerablemente la densidad de dislocaciones. En presencia de una adecuada dispersión de partículas nanométricas que anclen dislocaciones, subgranos y granos, se puede lograr un retardo o eliminación de los fenómenos de recuperación y recristalización

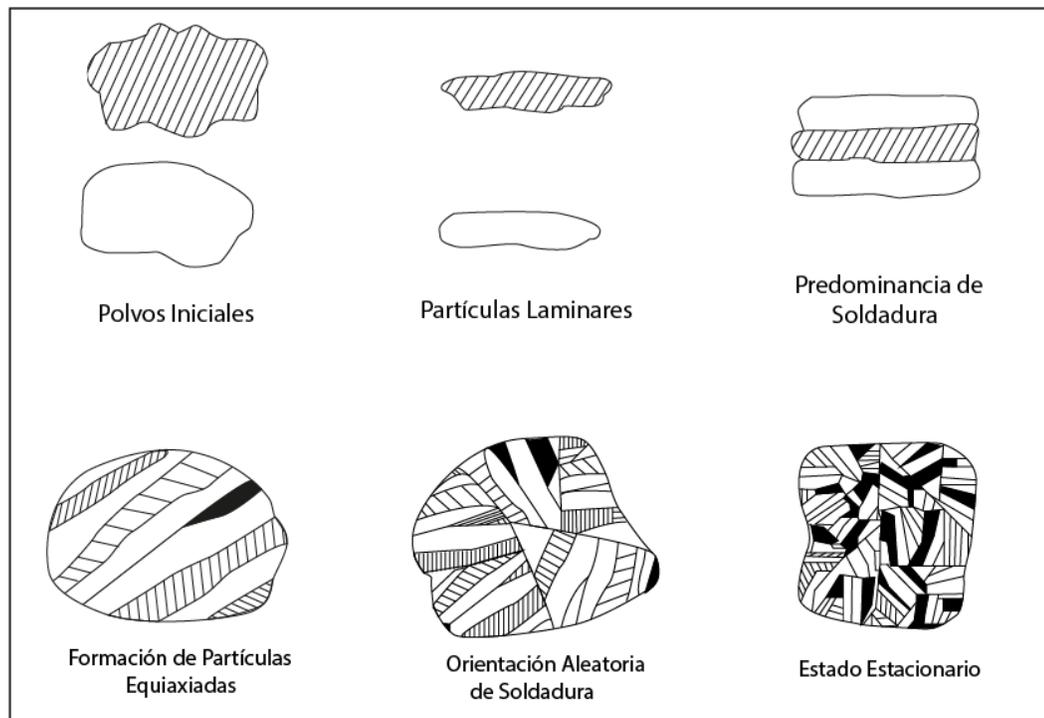


Figura 0.2.2 Etapas para el aleado mecánico para materiales dúctiles

Fuente: Elaboración Propia en base a [6]

2.5 Antecedentes Específicos

La soldadura de punto se produce cuando la corriente fluye a través de los electrodos y las piezas a soldar, provocando la fusión y la unión de una pequeña parte de éstas. La fusión ocurre debido a la resistencia al paso de corriente eléctrica del metal de base.

Las variables de operación del proceso son la corriente eléctrica (que depende del material a soldar y de los espesores de las placas), el tiempo en que se mantiene la presión sobre las piezas a soldar, el material del cual están hechos los electrodos y la geometría de los electrodos.

Para la medición del comportamiento de los electrodos, el estudio bibliográfico realizado arrojó que la normativa ASTM contempla la medición de desgaste mediante un testeado de líquidos penetrantes, en los cuales una probeta sólida es impactada en reiteradas oportunidades por gotas de líquido o chorros. Este método no sería aplicable a éste estudio por ser un ensayo de carácter destructivo, lo que se pretende en este trabajo es medir el comportamiento durante el proceso de soldadura y el desgaste sufrido por los electrodos, opuestamente.

Por lo anterior, se determinó realizar a las muestras mediciones que si bien no se encuentran normadas, al ser aplicadas de igual manera en los electrodos mejorados y en los convencionales, se espera sean concluyentes para este trabajo comparativo.

3. Metodología

La metodología a seguir se puede observar claramente en la figura:

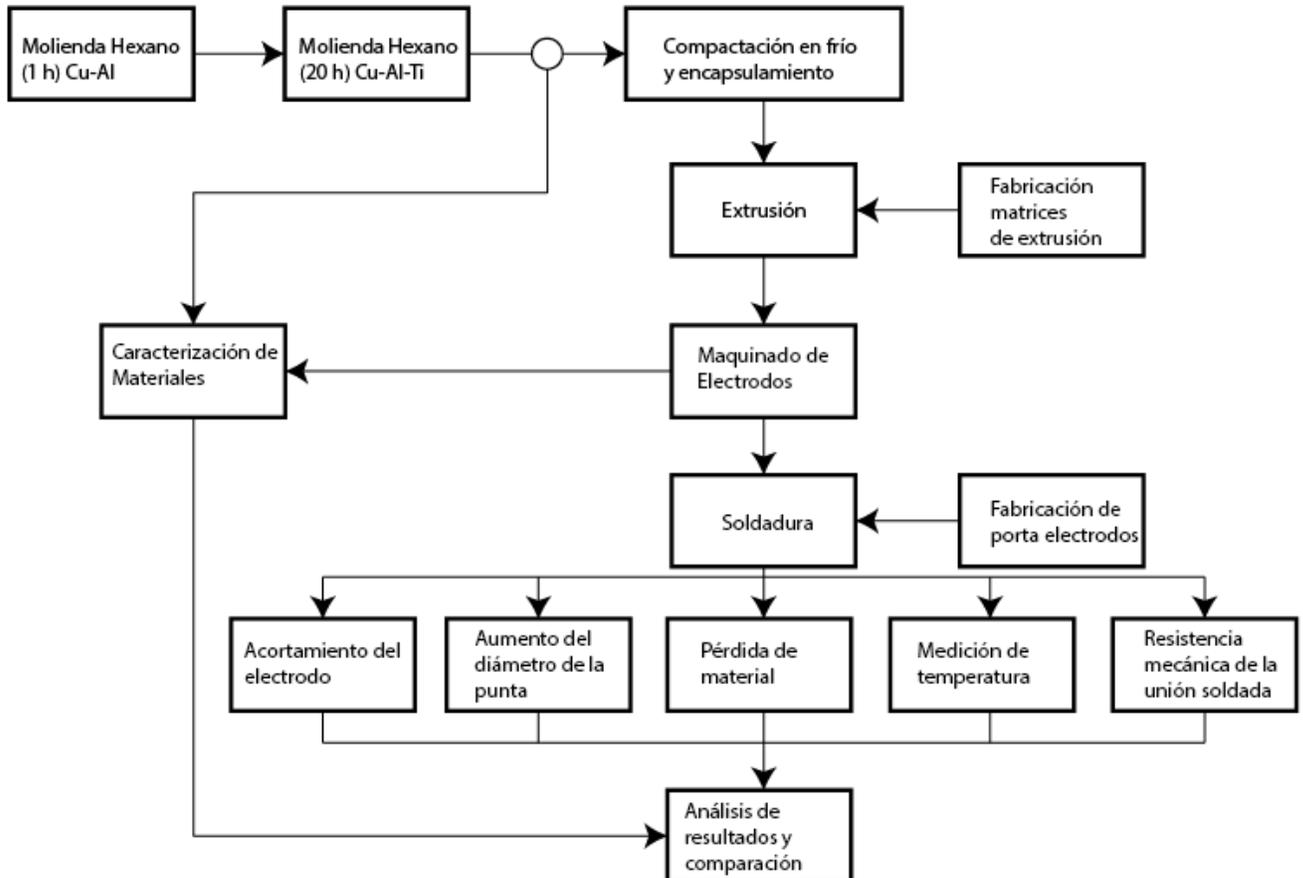


Figura 3.1 Metodología de trabajo

La metodología de este trabajo consiste principalmente en realizar un análisis comparado del desempeño de electrodos de soldadura por resistencia eléctrica, según la metodología utilizada por Montiglio [3] y Vera[4] para los siguientes materiales:

- Cu-Ni-Co comercial
- Cu puro (datos obtenidos de [4])
- Cu - 2,5%v TiC –2,5%v Al₂O₃ realizada íntegramente en este trabajo

3.1 Condiciones de Operación de los Equipos

A continuación se presentan las condiciones de operación de los distintos equipos utilizados en éste trabajo.

3.1.1 Condiciones de Fabricación del Electrodo

El electrodo se fabrica con polvos aleados de cobre, titanio y aluminio, los cuales son mezclados siguiendo los pasos descritos en el capítulo de procedimiento experimental. La composición que se busca obtener es la siguiente: Cu 2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃

3.1.2 Condiciones de Operación del Molino

Para hacer la molienda correctamente, es necesario cumplir con las siguientes condiciones:

Molienda: Molino = Atritor
Líquido = Hexano
Tiempo = 20 hr
BPR = 10:1

Razón y temperatura de extrusión: 10:1 ; 750°C

3.1.3 Parámetros de Soldadura

Los parámetros de soldadura se definen de acuerdo a las condiciones de trabajo de las soldadoras de la maestranza Promalad Ltda. Ésta maestranza es proveedora de grandes empresas de línea blanca, por lo que sus parámetros cumplen con los requeridos en éste trabajo, ya que uno de los objetivos de ésta comparación es acercarse lo más posible a las condiciones de la industria.

Parámetros de Soldadura: Corriente Primaria = 20 A

Corriente Secundaria = 34 A

Tiempo de Soldadura = 0,1 s

Tiempo de Enfriamiento = 1 s

Presión = 6 bar

3.2 Método de Evaluación de Respuestas

Los electrodos se utilizan para la soldadura por resistencia eléctrica por puntos, donde se mide su desempeño según:

- Acortamiento (largo inicial-largo final)
- Aumento de diámetro (diámetro final – diámetro inicial)
- Pérdida de masa
- Microdureza
- Ensayo de tracción sobre las piezas soldadas
- Ensayo de compresión a los electrodos

El acortamiento de la punta del electrodo se mide con un pie de metro, realizando para cada valor 3 medidas las cuales son promediadas. Se mide la punta del electrodo nueva, luego de 20, 40 ,60 y 80 pasadas de soldadura, obteniéndose así 5 valores a lo largo de la punta para cada punta utilizada.

El aumento del diámetro se mide de manera análoga al acortamiento de la punta.

La pérdida de masa de la punta del electrodo se mide pesando cada una de ellas en una báscula antes de ser usadas y luego de las 80 soldadas. Debido a que es necesario retirar la punta del porta electrodos, es imposible la medición a intervalos.

La microdureza se mide mediante un ensayo de dureza Vickers a los electrodos.

Se realizan ensayos de tracción sobre las piezas soldadas para evaluar la calidad de la soldadura.

Se realiza un ensayo de compresión a los electrodos para obtener sus respectivos límites de fluencia.

3.3 Procedimiento Experimental

Es de suma importancia para éste trabajo la elaboración de la aleación con la que se fabrica el electrodo de Cu- 2,5%v TiC- 2,5%v Al₂O₃. Es por esto que la molienda reactiva se define como la primera etapa de la experiencia a realizar. La molienda se lleva a cabo de la siguiente manera:

3.3.1 Molienda Reactiva de Polvos

La molienda reactiva consta de varias sub-etapas necesarias para su correcta realización. Entre ellas se destacan las siguientes:

3.3.1.1 Pesaje de Polvos

El pesaje de polvos es de vital importancia para poder obtener las proporciones requeridas de cada material en el electrodo. Es por esto que se realiza con una balanza de precisión en el laboratorio de metalografía del taller de Molina. Para determinar las cantidades en peso de cada uno de los polvos se usan las siguientes ecuaciones:

$$X_{Cu} = \frac{(\rho * \alpha)_{Cu}}{(\rho * \alpha)_{TOTAL}} \quad (3.1)$$

$$X_C = \frac{(\rho * \alpha)_{TiC}}{(\rho * \alpha)_{TOTAL}} * \frac{1}{(a+1)} \quad (3.2)$$

$$X_{Ti} = \frac{(\rho * \alpha)_{TiC}}{(\rho * \alpha)_{TOTAL}} * \frac{a}{(a+1)} \quad (3.3)$$

$$X_{O_3} = \frac{(\rho * \alpha)_{Al_2 O_3}}{(\rho * \alpha)_{TOTAL}} * \frac{1}{(b+1)} \quad (3.4)$$

$$X_{Al_2} = \frac{(\rho * \alpha)_{Al_2 O_3}}{(\rho * \alpha)_{TOTAL}} * \frac{b}{(b+1)} \quad (3.5)$$

$$\alpha = \frac{Pa_{Ti}}{Pa_C} \quad (3.6)$$

$$b = \frac{Pa_{Al_2}}{Pa_{O_3}} \quad (3.7)$$

$$(\rho * \alpha)_{TOTAL} = \rho_{Cu} * \alpha_{Cu} + \rho_{TiC} * \alpha_{TiC} + \rho_{Al_2 O_3} * \alpha_{Al_2 O_3} \quad (3.8)$$

$$P_i = X_i * P_T \quad (3.9)$$

Donde:

X_i : Fracción en peso del elemento i.

ρ_i : Densidad del elemento i en $[g/cm^3]$.

α_i : Fracción Volumétrica del elemento i.

Pa_i : Peso atómico del elemento i en [g/mol].

P_T : Peso total de la mezcla en [g].

P_i : Peso del elemento i en [g].

Con las ecuaciones anteriores se obtiene, que para 100 [g] de mezcla, las proporciones de cada material son:

Tabla 3.1 Proporción de los elementos que conforman los polvos

	Fracción en Peso [%]	Peso [gr]
Cu	97,5	97,47
Al	0,6	0,59
Ti	1,1	1,13
O	0,5	0,53
C	0,3	0,28
TOTAL	100,0	100,00

Fuente: Elaboración Propia

Cabe mencionar que el oxígeno necesario para la formación de alúmina se obtiene del óxido proveniente de los polvos a mezclar, y el carbono necesario para la formación de carburo de titanio se extrae del líquido de molienda hexano. Por lo tanto sólo se deben pesar los polvos de cobre, aluminio y titanio.

3.3.1.2 Limpieza de las Bolas y el Vaso de Molienda

Se tiene 1 kg de bolas de acero, las cuales están contaminadas con aceites y partículas provenientes de la manipulación de las mismas. Es por esto que es necesario hacer una limpieza exhaustiva de las mismas para asegurar que los resultados de la molienda no se vean comprometidos. Los pasos a seguir para esta limpieza son los siguientes:

- Se ponen las bolas dentro del vaso de molienda del molino Atritor (Fig 3.2), con una carga de 700 ml de Alcohol Metílico de tal forma que se sumerja totalmente la carga de bolas.
- Se tapa el vaso de molienda mediante le montaje del molino
- Se enciende el sistema de refrigeración del molino
- Se hace girar el molino durante 1 hora a 1470 r.p.m
- Al completar la hora, se extraen las bolas y se cuelan para extraer el metanol
- Se dejan secar las bolas en el colador

- Una vez secas las bolas se repite el proceso 2 veces más.



Figura 3.2 Molino Atritor

3.3.1.3 Primera homogenización de polvos

En ésta primera etapa se mezclan los polvos de cobre con los de aluminio y se hacen girar en un torno a 50 r.p.m durante una hora. Con lo anterior se asegura la correcta homogenización de los polvos.

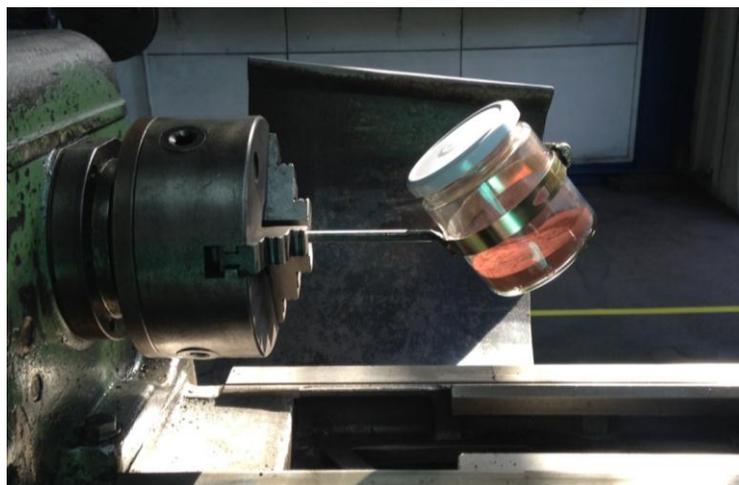


Figura 3.3 Montaje del sistema mezclador de polvos

3.3.1.4 Primera etapa de molienda

Para poder formar la alúmina de la mejor manera y que no queden excedentes considerables de oxígeno dentro de la mezcla, se debe hacer la molienda en 2 etapas. Esto también evita que se formen compuestos indeseados como TiO_2 o CO , los cuales podrían perjudicar la formación de TiC .

- Se introduce en el vaso 1 kg de bolas lavadas
- Se agregan los polvos provenientes de la primera etapa de homogenizado
- Se vierten aproximadamente 700 ml de hexano, de manera de cubrir completamente las bolas e inclusive sobrepasar en un par de centímetros el límite de las mismas
- Se introduce nitrógeno gaseoso al molino, para mantener una atmósfera controlada libre de O .
- Se realiza la molienda durante 1 hora
- Se secan los polvos con la ayuda de una lámpara halógena.

3.3.1.5 Segunda etapa de homogenización

Luego de secados los polvos provenientes de la etapa 3.3.1.4 se le agregan los polvos de titanio a la mezcla y se procede de la misma manera que en el punto 3.3.1.3.

3.3.1.6 Segunda etapa de molienda

Luego de la segunda homogenización, se limpia nuevamente el vaso de molienda y las bolas de acero. Luego se procede de la siguiente forma:

- Se introduce en el vaso de molienda 1 kg de bolas lavadas
- Se agregan los polvos previamente homogenizados
- Se vierten aproximadamente 700 ml de hexano, de manera de cubrir completamente las bolas e inclusive sobrepasar en un par de centímetros el límite de las mismas
- Se introduce nitrógeno gaseoso al molino, para mantener una atmósfera controlada libre de O .
- Se realiza la molienda durante 20 horas
- Se secan los polvos con la ayuda de una lámpara halógena

Finalmente con los polvos obtenidos en ambos procesos se hace una última homogenización de 1 hora a 50 r.p.m.

3.3.2 Análisis Químico, SEM y Difracción de Rayos X

Se envían muestras de las probetas a la empresa Molymet, donde se les hace un análisis químico y un análisis SEM para determinar la composición exacta de los materiales, también se toma una muestra de los polvos obtenidos y se envía al laboratorio de cristalografía del departamento de física de la Universidad de Chile para ser analizados, con el objetivo de determinar la cantidad de fases presentes en la muestra.

3.3.3 Compactación de Polvos y Encapsulamiento al Vacío

La fabricación de las cápsulas se encarga a un proveedor externo de confianza y el encapsulado se realiza en el taller de Molina. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Se fabrican vasos de cobre a partir de una cañería de 3/4 de pulgada y una lámina de 1 mm de espesor mediante soldadura TIG.
- Se llena el vaso con los polvos y se compactan con ayuda de una prensa hidráulica que funciona hasta aproximadamente 8000 psi
- Una vez llenos los vasos se les suelda la tapa, la que a su vez posee un vástago por donde se realiza el vacío.
- Se realiza el vacío mediante una bomba disponible en el taller de molina durante una hora hasta aproximadamente 10^{-2} mbar. Luego se sella el vástago golpeándolo con un martillo y generando un cierre hermético. Con la cápsula sellada se procede a la etapa de extrusión.



Figura 3.4 Cápsula con polvos de Cu-TiC-Al₂O₃

3.3.4 Extrusión en Caliente

Esta etapa permite consolidar los polvos y consiste en inducir un cambio de diámetro de la cápsula a través de la extrusión en caliente. El cambio de diámetro va desde los 38 mm hasta los 10 mm finales.

Para lo anterior es necesario contar con el juego de matrices y el respectivo punzón, los cuales están fabricados en acero de matricería AISI H13 para trabajo en caliente.

Las matrices se calientan en un horno hasta los 650°C durante una hora, los punzones se calientan en otro horno a 150°C durante el mismo período de tiempo. La cápsula es calentada en un horno a 700°C durante 15 minutos, para luego ser introducida en la matriz. Luego, con la ayuda de una prensa hidráulica que trabaja a cerca de 2000 psi se hace la extrusión en caliente.

Finalmente se obtiene una barra de 10 mm de diámetro y aproximadamente 12 cm de largo. Esta barra debe ser maquinada debido a que posee un recubrimiento de cobre procedente de la cápsula. Esto se observa claramente en la figura 3.5. En la figura 3.6 se observan las matrices utilizadas para la extrusión y en la figura 3.7 se ve la prensa utilizada para la extrusión.

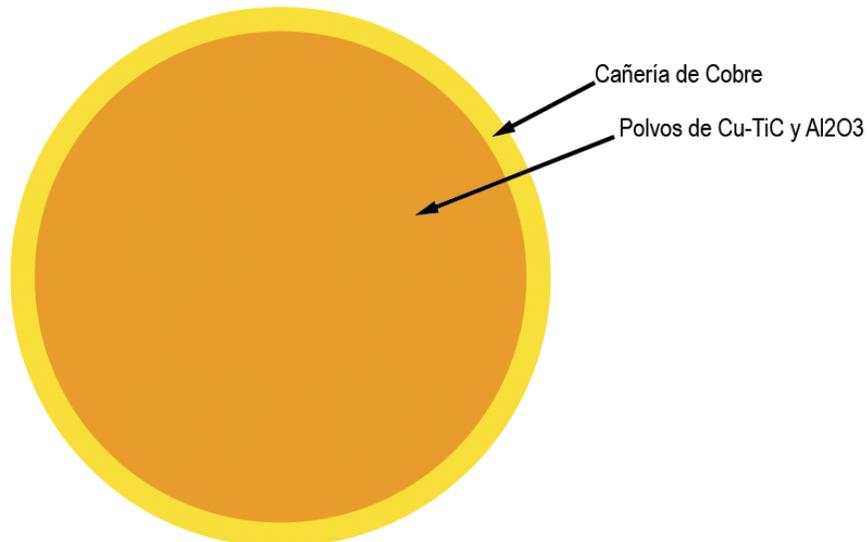


Figura 3.5 Sección Transversal Electrodo
Fuente: Elaboración propia



Figura 3.6 Matriz y punzón utilizados para la extrusión



Figura 3.7 Prensa utilizada para la extrusión en caliente

3.3.5 Porta Electrodo y Maquinado

Luego de extruida la probeta es necesario maquinar su superficie en un torno, debido a que queda con una capa de cobre proveniente de la cápsula. La probeta disminuye su diámetro aproximadamente en 2 mm quedando en su tamaño final. Luego se corta la probeta en varios trozos de 12 mm de largo y se les hace un biselado de 45°.

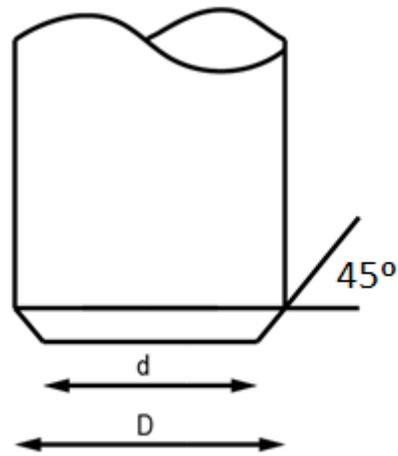


Figura 3.8 Punta del Electrodo
Fuente: Elaboración propia

Para la elaboración de los porta electrodos se usan barras de cobre electrolítico de 1 pulgada de diámetro. El diseño del mismo se basa en un porta electrodo antiguo proporcionado por el señor Oriel Feliu. En la figura 3.9 se pueden observar los portaelectrodos con y sin puntas insertadas.



Figura 3.9 Porta Electrodo con y sin electrodo montado

3.3.6 Respuestas Evaluadas

Para observar un desgaste significativo y comparable en las puntas de los electrodos, es necesario realizar un gran número de pasadas de soldadura, es por esto que el proceso de soldadura se realiza 80 veces, lo que permite apreciar claramente un acortamiento en la punta del electrodo, un aumento en el diámetro o cabeceo del electrodo y una disminución de la masa del mismo. Las características anteriores se miden cada 20 pasadas. También se le hace un ensayo de tracción a la placa soldada número 20, 40, 60 y 80 para evaluar la calidad de la soldadura.

3.3.6.1 Material perdido

Se realiza el pesaje de cada punta de electrodo antes de insertarlas en el porta electrodo. Luego de las 80 pasadas de soldadura se vuelve a pesar el electrodo, con lo cual se puede medir la pérdida de masa existente. La pérdida de masa se debe a la adición de material del electrodo a las placas soldadas, producto de la capilaridad al estar a temperaturas tan altas y a la rotura del material sobresaliente producto del cabeceo.

3.3.6.2 Acortamiento de la punta

Se mide el largo sobresaliente de la punta del electrodo desde la base del inserto en el cuerpo antes de realizar las soldadas y cada 20 pasadas. De esta manera se puede determinar el acortamiento porcentual que es producto tanto de la pérdida de material como del cabeceo de la punta del electrodo

3.3.6.3 Cabeceo del extremo libre de la punta

Se observa la formación de una forma parabólica en el extremo libre de la punta del electrodo luego de varias soldaduras, esto se traduce un aumento del diámetro del extremo. Este dato se mide al comienzo y cada 20 pasadas.

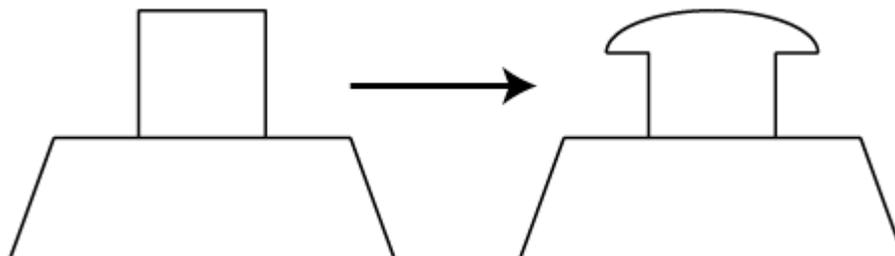


Figura 3.10 Cabeceo de la punta del electrodo

3.3.6.4 Resistencia mecánica de la soldadura

Se realizan ensayos de tracción a las placas soldadas en los intervalos 1, 20, 40, 60 y 80 pasadas de soldadura, con la idea de realizar un análisis cualitativo y comparado del desempeño de la unión soldada en función del material utilizado para el electrodo y su relación con el desgaste. Las placas a soldar son de acero SAE 1020 de 25 mm de ancho, 100 mm de largo y 0,5 mm de espesor.

También se realizan análisis de desprendimiento a las placas soldadas número 10, 30, 50 y 70 de manera de observar que la calidad de la soldadura se mantenga en un rango correcto. El análisis de desprendimiento consiste en poner la placa soldada en un tornillo y mediante el uso de un alicate se intenta romper la soldadura. Un buen resultado para este análisis es que falle la placa de acero, ya que el punto de soldadura no debe romperse ni despegarse.



Figura 3.11 Fotos del análisis de desprendimiento

3.3.6.5 Caracterización de Materiales

Tanto para los ensayos de microdureza como para los ensayos de resistencia mecánica son necesarios equipos de alta tecnología, para el caso de la medición de microdureza se utiliza el microdurómetro perteneciente al departamento de ciencias de los materiales y para los ensayos de resistencia mecánica se utiliza la máquina Zwick/Roell modelo Z100 perteneciente al departamento de ingeniería mecánica.

Para el ensayo de microdureza se utiliza una carga de 100 [g] sobre probetas pulidas a espejo. Se realizan 10 mediciones en cada una de manera de obtener un promedio característico.

Los ensayos de compresión se realizan a probetas de 6,5 mm de diámetro y 10 mm de largo.

3.3.7 Pruebas en Fábrica

Luego de hacer todas las soldaduras se prueba el electrodo en condiciones reales de funcionamiento, es decir, trabajando en acero galvanizado y haciendo cerca de 30 puntos de soldadura por minuto. El acero galvanizado desgasta mucho más el electrodo que el acero normal debido a la capa de zinc que lo recubre.

Las pruebas se hacen en la empresa Promalad Ltda., donde se usa como electrodo el cobre puro. La idea es determinar las sensaciones de los soldadores con los electrodos mejorados, de manera de tener una opinión experta con respecto al desempeño de los mismos.

En general las empresas grandes tienden a usar electrodos de Cu-Ni-Co, mientras que las maestranzas más pequeñas usan electrodos de cobre puro.

4. Resultados y Discusión

A los datos obtenidos para las dos aleaciones en estudio se le agregan también los datos asociados al electrodo de cobre puro desarrollado por Vera [4], ya que el cobre puro también es utilizado como electrodo de soldadura por resistencia eléctrica. Lo anterior se hace sólo con propósitos comparativos, y como una manera de observar de mejor manera como la inclusión de dispersoides cambia radicalmente las propiedades de las aleaciones.

4.1 Microdureza

El análisis de microdureza está enfocado en la comparación de los materiales y aleaciones presentadas en éste trabajo, que son Cu – 2,5%v TiC – 2,5%v Al₂O₃, Cu–Ni–Co y cobre puro. Las mediciones se hicieron en el microdurómetro perteneciente al departamento de Ciencias de los Materiales con una carga de 100 [g].

Se hacen 10 mediciones por cada electrodo y luego se promedian. Los valores promedio obtenidos para la aleación de Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃ es de 272 Hv, para la aleación de Cu-Ni-Co se obtuvo el valor de 269 Hv mientras que el cobre puro presenta un valor de 130 Hv. Los resultados se pueden observar claramente en la figura 4.1. Los ensayos se hicieron a distintas temperaturas.

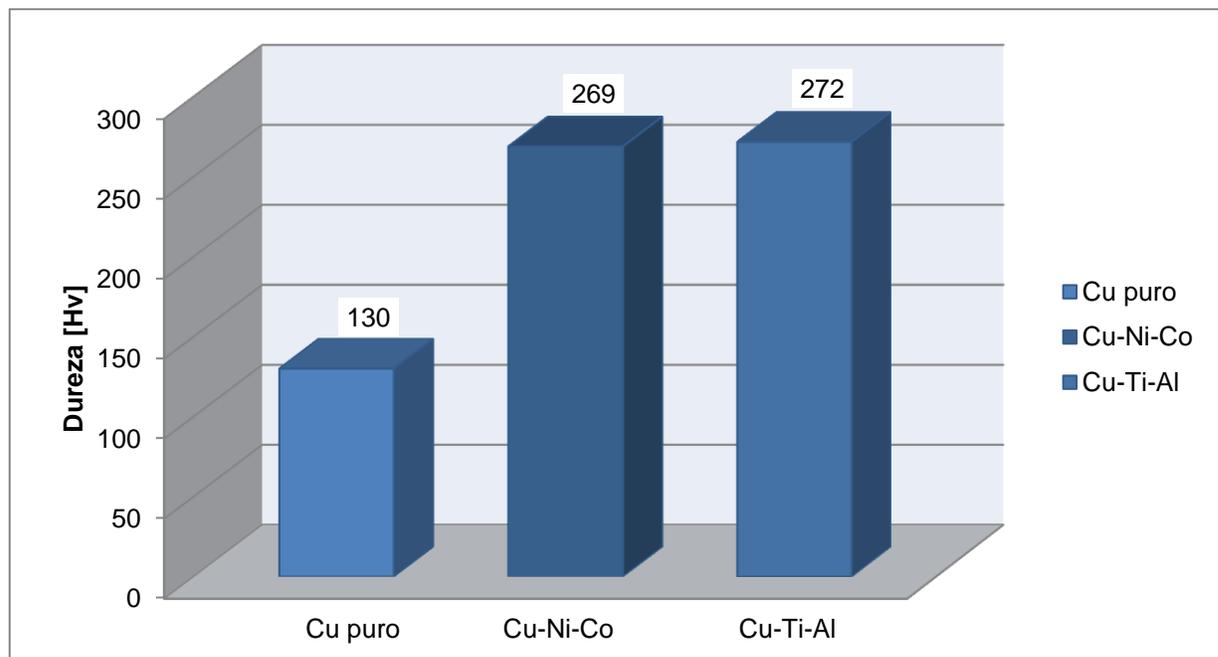


Figura 4.1 Microdureza de las diferentes aleaciones a temperatura ambiente

Como se puede observar claramente en el gráfico el cobre puro presenta valores muy inferiores a las otras dos aleaciones en estudio, demostrando la importancia en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de la inclusión de dispersoides en la matriz inicial.

La mayor dureza de la aleación de Cu-TiC-Al₂O₃ y de Cu-Ni-Co es sumamente importante para que el electrodo no se deforme con los golpes a los que es sometido en cada punto de soldadura. Esto se ve reflejado en los resultados asociados al acortamiento de la punta y aumento del diámetro de la punta. La baja dureza del cobre comercial es una constante queja de los soldadores de la empresa Promalad Ltda, ya que se ven obligados a limar sus electrodos constantemente, perdiendo eficiencia en su trabajo.

Adicionalmente se determina la resistencia al recocido de los materiales, midiéndoles su dureza luego de someterlos a dicho proceso, durante una hora a distintas temperaturas. Los resultados se muestran en la tabla 4.1 y en la figura 4.2:

Tabla 4.1 Microdureza de los materiales en estudio vs temperatura de recocido.

Material	Temperatura [°C]				
	500	600	700	800	900
Cu-Ti-Al	260,7	248,2	239,9	226,6	212,4
Cu-Ni-Co	251,8	199,2	141,9	108,5	98,3

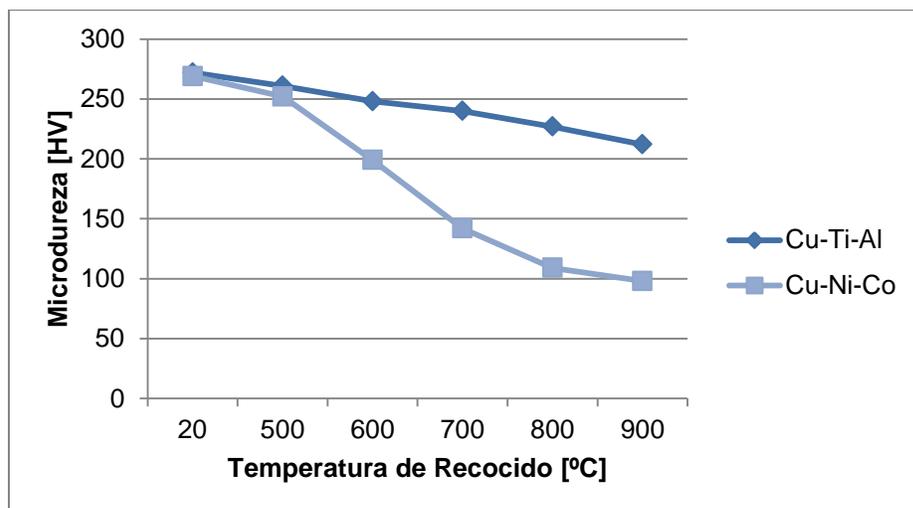


Figura 4.2 Microdureza de los materiales en estudio vs temperatura de recocido

Se observa que el mejor comportamiento a altas temperaturas lo presenta la aleación de Cu-Ti-Al, ya que disminuye su dureza sólo en un 22%, mientras que la aleación de Cu-Ni-Co disminuye su dureza en un 64%. Lo anterior se explica debido a que el material desarrollado por el alumno se endureció por dispersión, mientras que el electrodo comercial se endureció por solución sólida.

4.2 Temperatura en la Unión Soldada

La temperatura correcta en la unión soldada es de vital importancia para obtener una buena unión. La temperatura debe ser suficiente para fundir el material, pero no demasiada para no provocar el colapso de los electrodos. Es importante conocer la temperatura que se genera durante la soldadura porque de ésta manera se puede predecir en gran forma el comportamiento del electrodo.

Cabe destacar que el tiempo de soldadura es muy corto, por lo que el material se ve sometido a altas temperaturas por breves periodos de tiempo, lo que disminuye el riesgo de colapso de los electrodos, sin embargo introduce otro problema que es la fatiga térmica del material.

Las temperaturas fueron medidas con el pirómetro óptico marca Minolta Cyclops 152, el cual se usa a una distancia de 1 metro y mide temperaturas desde 500 a 3200 grados Celsius. Debido a la imposibilidad de medir la temperatura en el interior de las placas, se mide la temperatura en punto de contacto entre el electrodo y la placa superior.

Los parámetros de soldadura utilizados para medir la temperatura en la unión soldada son los siguientes:

Parámetros de Soldadura: Corriente Primaria = 20 A

Corriente Secundaria = 34 A

Tiempo de Soldadura = 0,2 s

Tiempo de Enfriamiento = 1 s

Presión = 6 bar

En la tabla 4.2 se observan los valores medidos de temperatura para un electrodo de Co-Ni-Co:

Tabla 4.2 Temperatura en la interfase de soldadura

Temperatura en la Interfase	
Medida	Temperatura [°C]
1	891
2	917
3	886
4	898
5	910
6	901
7	912
8	896
9	914
10	903
Promedio	902,8

Los resultados obtenidos en la tabla 4.2 se pueden observar claramente en la figura 4.3:

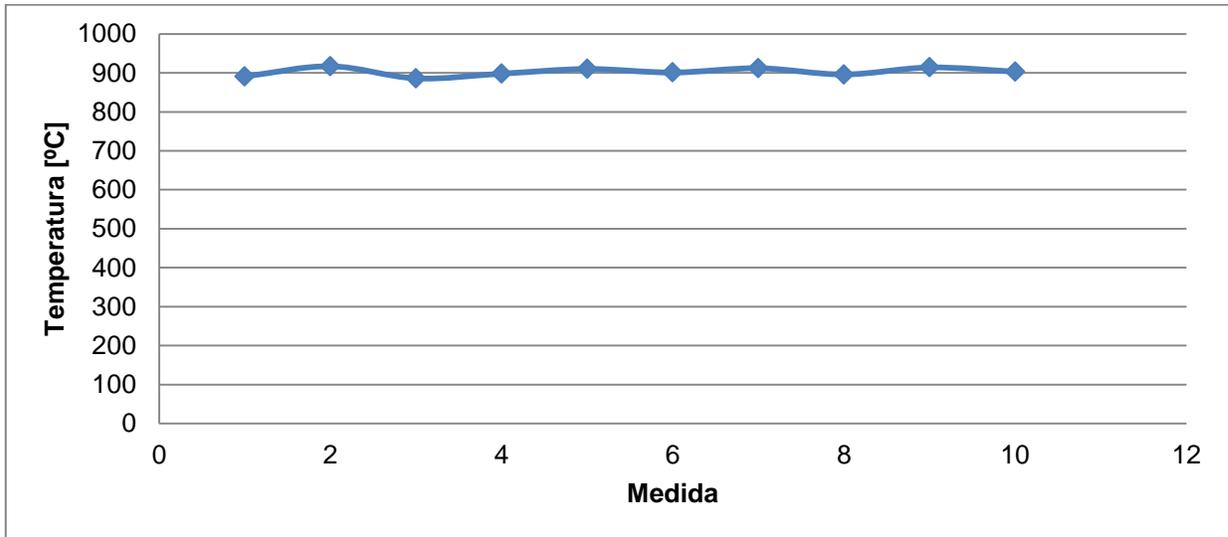


Figura 4.2 Temperaturas medidas en la unión soldada

Para confirmar que el rango de temperaturas es correcto se pule una de las muestras soldadas hasta prácticamente eliminar la placa superior, de manera de poder observar directamente el punto de soldadura. En la figura 4.3 se observan estructuras martensíticas en el punto de soldadura y sus alrededores, por lo que el rango de temperaturas medidas se valida, ya que la martensita se comienza a formar a aproximadamente 800°C en el acero SAE 1020.

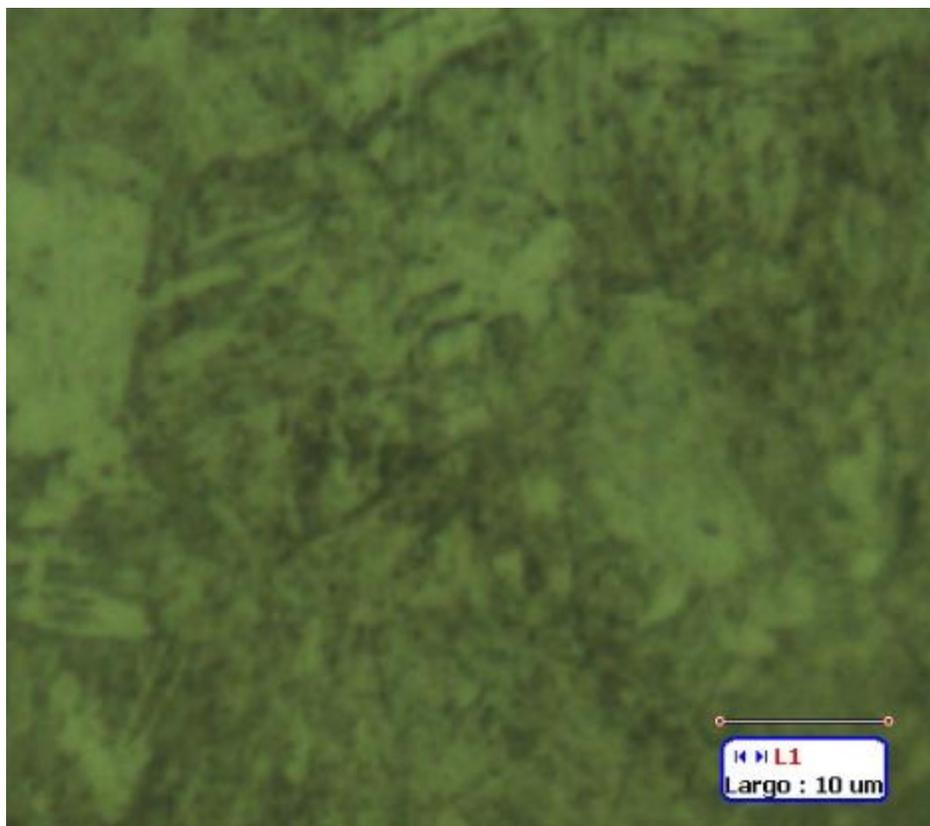


Figura 4.3 Martensita presente en la unión soldada (zoom 500x)

4.3 Análisis Químico de los Electrodo, SEM y Difracción de Rayos X

Se enviaron los polvos de la aleación de Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃ al laboratorio de cristalografía de la Universidad de Chile para determinar la cantidad de fases presentes en los mismos. También se enviaron muestras de los electrodos a la empresa Molytmet para hacer un análisis SEM (Scanning Electron Microscope) y un análisis químico, para determinar la composición exacta de las probetas. El resultado asociado al análisis de difracción de rayos x se ve en el gráfico de la figura 4.5 y los resultados se detallan en las tablas 4.3 y 4.4:

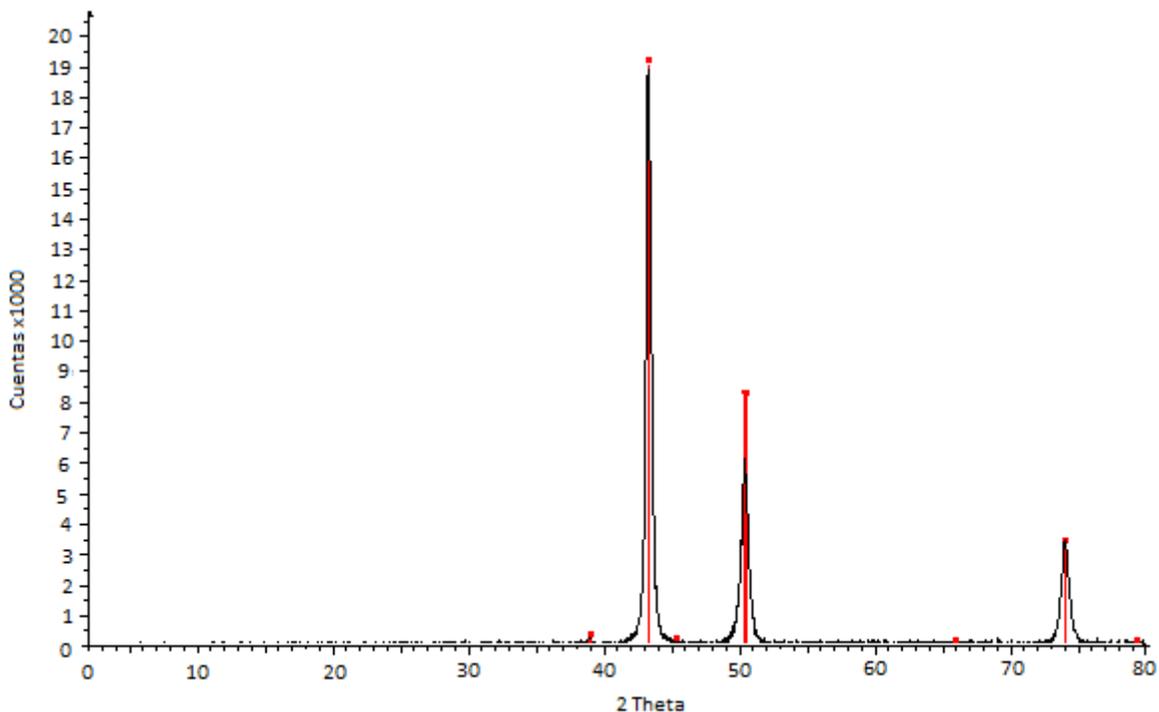


Figura 4.5 Gráfico difracción de rayos x

Se observa que los datos obtenidos (negro) son consistentes con la presencia de cobre (rojo), sin embargo no se detecta la presencia de aluminio ni titanio, esto se debe a que las cantidades de éstos materiales son muy pequeñas y están por debajo del rango de percepción del ensayo.

Tabla 4.2 Composición de electrodo Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃

Muestra\Elemento	%Cu		%C		%O		%Al		%Ti	
	Obt	Esp	Obt	Esp	Obt	Esp	Obt	Esp	Obt	Esp
Cu-Ti-Al (SEM)	87,2	95	8,9	0,3	2,3	0,5	0,7	0,6	0,9	1,1
Cu-Ti-Al (Análisis Químico)	97,1		0,3		s/d *		0,5		0,6	

Por desgracia, el equipo para medir oxígeno en Molymet estaba fuera de servicio, por lo que no hay datos de la cantidad de este elemento en el análisis químico.

Tabla 4.3 Composición de electrodo Cu-Ni-Co

Muestra\Elemento	%Cu		%C		%O		%Al		%Co		%Ni	
	Obt	Esp	Obt	Esp	Obt	Esp	Obt	Esp	Obt	Esp	Obt	Esp
Cu-Ni-Co	93,2	97	3,7	0	1,3	0	0,3	0	0,7	0,9	0,8	1,1

Los datos entregados en las tablas anteriores son graficados en las figuras 4.6 y 4.7 respectivamente para su mejor comprensión:

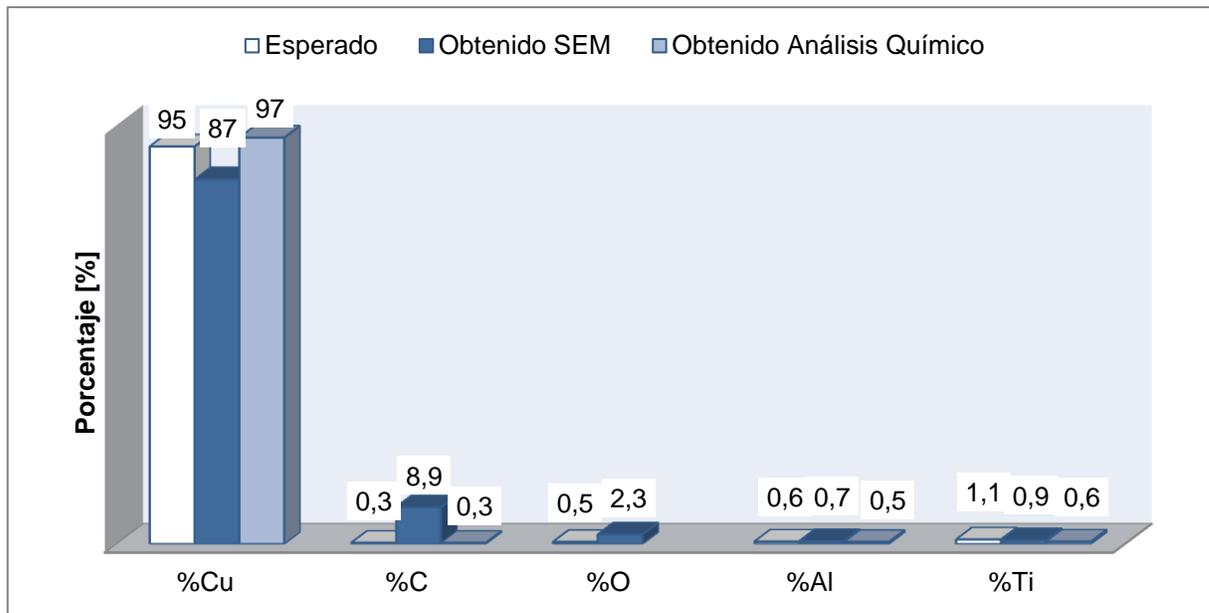


Figura 4.6 Porcentajes obtenidos vs porcentajes esperados en muestra Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃

Según el análisis SEM, el aluminio y el titanio son similares a lo esperado, sin embargo la gran variación la presenta el carbono que está muy por sobre lo esperado. Según el informe entregado por la empresa Molymet, éste carbono en su gran mayoría se debe a contaminación superficial. Esta contaminación superficial proviene del proceso de pulido, en el cual se inserta la muestra a analizar en un molde de baquelita (compuesta en su mayoría por carbono ya que es un polímero plástico) para facilitar la manipulación de la muestra y así poder llegar al acabado tipo espejo más fácilmente. Lo anterior es confirmado por el análisis químico, el cual arroja que la cantidad de carbono presente en la muestra es exactamente la cantidad esperada. De acuerdo a lo anterior, se estima que los resultados reafirman las suposiciones iniciales en cuanto a la composición de la aleación de Cu-2,5%v TiC- 2,5%v Al₂O₃.

Respecto a la figura 4.6, se observa que presenta 3 elementos que no debería, éstos son aluminio, carbono y oxígeno. Sin embargo, en el informe entregado por la empresa se detalla que estos 3 elementos presentes se deben a contaminación superficial.

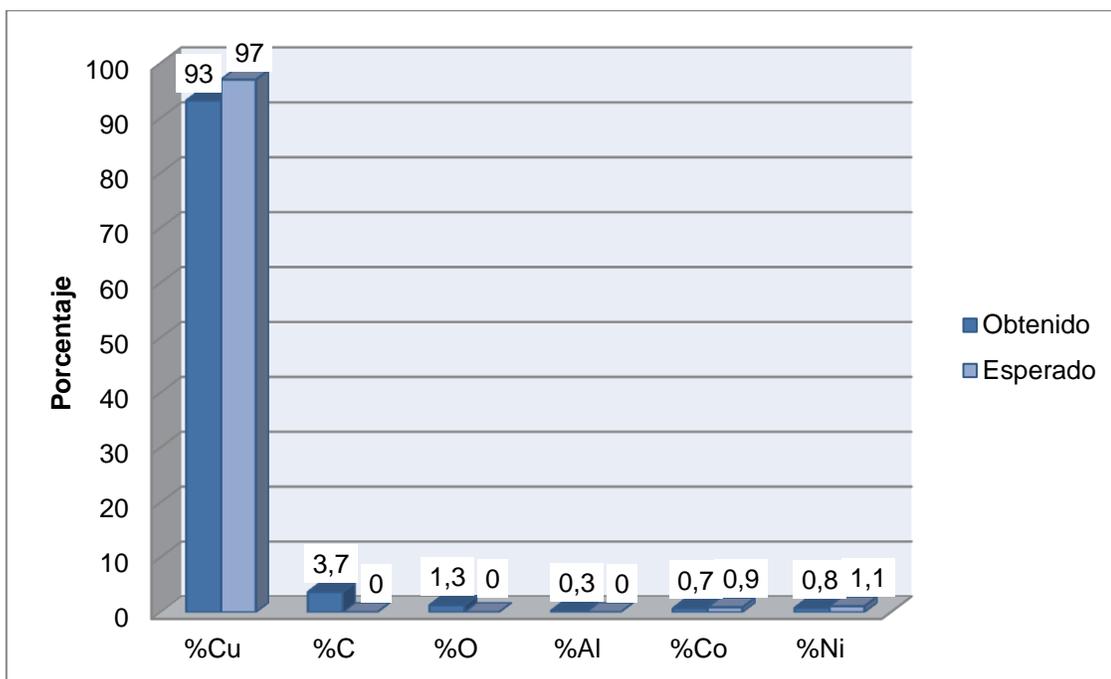


Figura 4.7 Porcentajes obtenidos vs porcentaje esperado en muestra Cu-Ni-Co

4.4 Análisis de Conductividad

Una buena conductividad es de vital importancia para favorecer el paso de la corriente a través de los electrodos. De esta manera se genera una buena soldadura sin provocar un aumento excesivo de la temperatura de los mismos ni tampoco se necesitan grandes tiempos de enfriamiento. Es por lo anterior que se hace importante saber cuáles son los valores de la misma para los distintos materiales en estudio.

Para la muestra de Cu-TiC-Al₂O₃ se tuvo que enviar una probeta al departamento de Ciencias de los Materiales de la Universidad de Concepción donde la profesora Marta López amablemente realizó las pruebas y envió los resultados. Los datos de conductividad del electrodo Cu-Ni-Co fueron entregados por el proveedor. Los datos correspondientes al cobre puro son obtenidos de la memoria de Vera [4] solo con propósitos comparativos. En la tabla 4.5 se observan los datos obtenidos.

Tabla 4.5 Conductividad eléctrica de las muestras

Muestra	R[uohm]	Área [cm ²]	Largo [cm]	ρ (resistividad) [uohm*cm]	%IACS
Cu-Ti-Al	50,70	0,50	8,00	3,19	54
Cu-Ni-Co	34,30	0,50	8,00	2,16	80
Cu puro	21	0,26	3,85	1,42	121

Se observa que el cobre puro tiene una conductividad IACS mayor a 100%, esto es debido a que toma como referencia 100% la conductividad del cobre recocido, por lo tanto cualquier compuesto o elemento que tenga una conductividad mayor va a marcar valores superiores al 100%.

Cabe destacar que la conductividad del electrodo fabricado es la más baja, sin embargo son resultados bastante satisfactorios ya que 54 %IACS sigue siendo un valor funcional para los objetivos de éste estudio. Esta conductividad se podría aumentar si se contara con equipos más precisos que permitan controlar de mejor manera las contaminaciones a las que se ve expuesta la muestra y los polvos. Para tener una referencia, el aluminio tiene una conductividad de 65% IACS y el hierro tiene una conductividad de 26%IACS. Una posible explicación para la diferencia de conductividades entre ambas aleaciones es que los dispersoides de la aleación Cu-TiC-Al₂O₃ son cerámicos y por ende no conductores, mientras que los dispersoides de la aleación de Cu-Ni-Co son metálicos por lo que la corriente se ve menos obstruida ya que puede viajar a través de los obstáculos. Otra explicación es que a menor tamaño de grano es menor la conductividad, ya que la mayor cantidad de superficie de borde de grano impide el movimiento de los electrones. También afecta la cantidad de oxígeno en los polvos, la cual es alta, provocando la formación de óxidos de cobre que reducen la conductividad.

4.5 Ensayo de Compresión de los Electrodo

Es necesario hacer ensayos mecánicos a los electrodos para poder caracterizar de buena manera los materiales en estudio. Se les hacen ensayos de compresión a las probetas para obtener el valor del límite de fluencia de cada material. Para lo anterior se usa un ensayo de compresión y no de tracción por dos razones, porque lo electrodos están sometidos a este tipo de esfuerzos en sus condiciones de trabajo y porque el ensayo de tracción podría arrojar datos falseados, debido a que la porosidad de las aleaciones en estudio podría facilitar la rotura de las probetas.

La compresión se realizó en la máquina Zwick/Roell Z100 perteneciente al departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile. Las probetas ensayadas tenían las mismas dimensiones que las utilizadas por Montiglio [3] y Vera [4], las cuales corresponden a 6,5 mm de diámetro y 9,8 mm de largo. La velocidad de avance fue de 0,5 mm/min.

En la figura 4.8 se observa el gráfico esfuerzo vs deformación correspondiente al ensayo realizado. En dicho gráfico se aprecia que los límites de fluencia de ambas aleaciones son similares, 626 MPa para la aleación Cu-TiC-Al₂O₃ y 650 MPa para la aleación de Cu-Ni-Co, mientras que el cobre puro tiene un límite de fluencia de 215 MPa. Se puede observar que ambas aleaciones presentan un límite de fluencia de casi

el triple que el cobre puro, sin embargo, ni siquiera éste material debería fallar por fluencia en las pruebas, ya que los esfuerzos a los cuales están sometidos los electrodos son considerablemente menores. Otro punto importante a destacar es que la aleación desarrollada de Cu-TiC-Al₂O₃ presenta una mayor capacidad de deformación elástica, ya que se deforma elásticamente hasta un 6,6% mientras que la aleación de Cu-Ni-Co lo hace hasta el 5,7%.

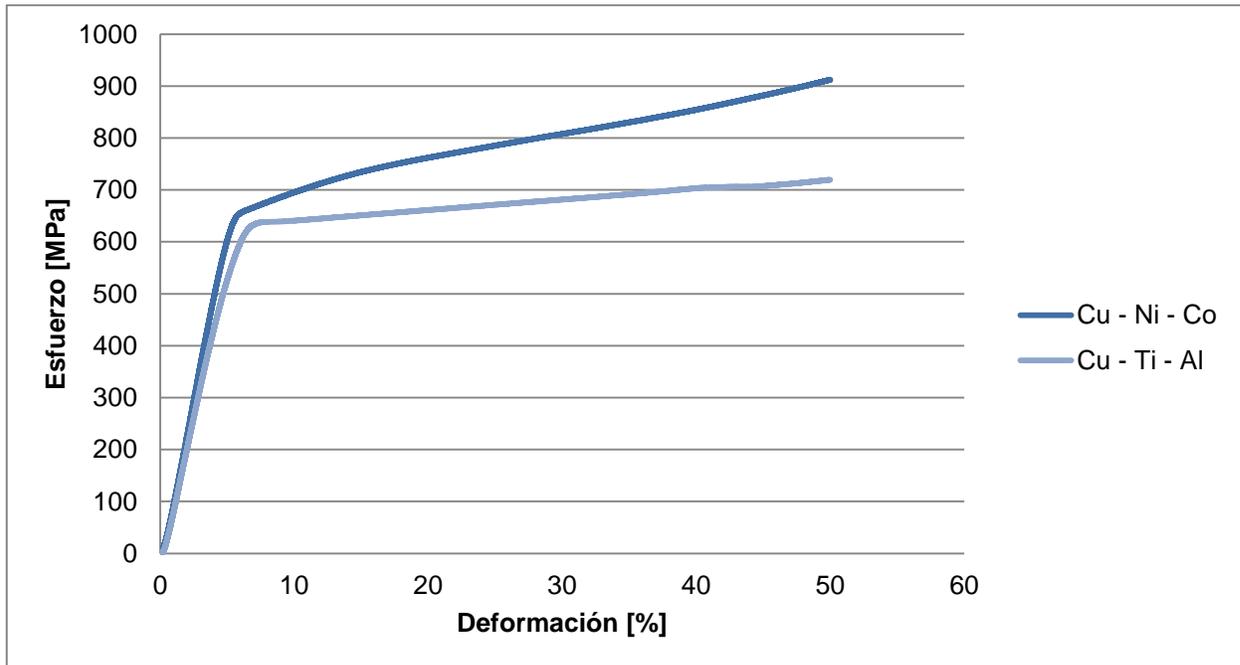


Figura 4.8 Esfuerzo vs Deformación para las aleaciones en estudio

4.6 Densidad de las Muestras

Siguiendo con la caracterización de materiales, se procede a calcular la densidad de las muestras para compararlas con la densidad teórica que deberían presentar.

Para el cálculo de la densidad teórica se utilizó la siguiente expresión:

$$\rho_t = \alpha_{Cu} * \rho_{Cu} + \alpha_{Al_2O_3} * \rho_{Al_2O_3} + \alpha_{TiC} * \rho_{TiC} \quad (4.1)$$

Dónde:

α_i : Fracción en volumen del elemento i

ρ_i : Densidad del constituyente i en [g/cm³]

Usando lo anterior se calculan las siguientes densidades:

Tabla 4.6 Densidades Teóricas de las Muestras en Estudio

	Densidad Teórica [g/cm ³]
Cu-Ti-Al	8,88
Cu-Ni-Co	9,14
Cu puro [4]	8,96

Luego con éstos valores, se puede obtener la tabla 4.7 donde se detallan las densidades reales y normalizadas con respecto a las teóricas.

Tabla 4.7 Densidad Real y Densidad Normalizada de las Muestras

	Densidad Real [g/cm ³]	Densidad Normalizada [%]
Cu-Ti-Al	8,53	96,01
Cu-Ni-Co	9,02	98,72
Cu puro [4]	8,93	99,67

Los resultados anteriores muestran un error de menos del 5% con respecto a los valores teóricos, lo que termina de validar los resultados correspondientes al material extruido. Se puede decir sin lugar a dudas que el material cumple con las expectativas en cuanto a sus propiedades mecánicas, por lo que se procede a hacer las pruebas correspondientes a la etapa de soldadura.

4.7 Acortamiento del Electrodo

La medición del acortamiento de la punta del electrodo es una de las principales formas de comparar cuantitativamente el desempeño de los mismos, ya que la disminución del largo de la punta es la principal forma de desgaste sufrida por el material en el proceso de soldadura por resistencia eléctrica. Debido a lo anterior, se hace importante monitorear permanentemente el valor asociado, por lo que se mide el largo sobresaliente del electrodo cada 20 pasadas de soldadura.

Si bien la medición del acortamiento del electrodo es una de las formas de comparar desempeño, no es la única, de hecho en éste trabajo se abordan dos métodos adicionales de comparación, el aumento del diámetro de la punta del electrodo y la pérdida de masa del mismo. Todos los parámetros anteriores están relacionados, ya que al disminuir el largo del electrodo, el material debe ir a algún lado, una opción es generar un cabeceo de la punta y la otra es depositando material en las placas soldadas.

Los largos de los electrodos fueron medidos desde el punto en que sobresalen del porta electrodo hasta su cabeza, para lo anterior se usa un pie de metro calibrado acorde a las recomendaciones de la empresa CTI S.A. (Principal empresa manufacturera de línea blanca en Chile) y se asume que los electrodos están insertos hasta el fondo dentro de la cavidad cilíndrica del porta electrodo. En la tabla 4.8 se observan los resultados obtenidos:

Tabla 4.8 Acortamiento del Electrodo

Material	Posición	Largo Inicial [mm]	L20 [mm]	L40 [mm]	L60 [mm]	L80 [mm]
Cu-Ti-Al	Arriba	7,50	7,35	7,30	7,10	6,85
Cu-Ti-Al	Abajo	6,70	6,65	6,60	6,50	6,40
Cu-Ni-Co	Arriba	7,35	7,10	7,10	7,05	7,00
Cu-Ni-Co	Abajo	6,85	6,40	6,25	6,15	6,10
Cu Puro [4]	Arriba	5,20	4,78	4,00	3,70	3,55
Cu Puro [4]	Abajo	4,55	3,80	3,10	2,45	2,35

Usando los datos de la tabla anterior se puede obtener la tabla 4.9 que representa el acortamiento porcentual y la figura 4.9 que representa un gráfico que compara el acortamiento porcentual contra el número de pasadas.

Tabla 4.9 Acortamiento porcentual de los electrodos

Material	Posición	Acortamiento Porcentual [%]
Cu-Ti-Al	Arriba	8,67
Cu-Ti-Al	Abajo	4,48
Cu-Ni-Co	Arriba	4,76
Cu-Ni-Co	Abajo	10,95
Cu Puro [4]	Arriba	31,73
Cu Puro [4]	Abajo	48,35

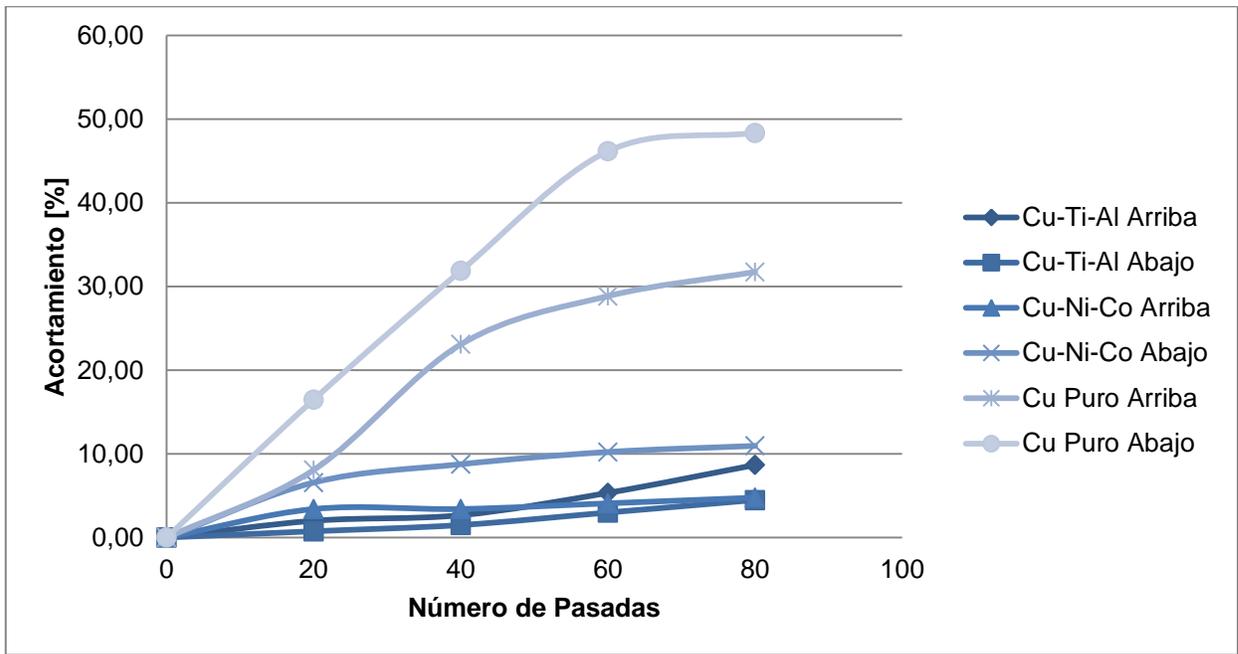


Figura 4.9 Acortamiento porcentual vs número de pasadas

Con lo anterior y a modo de aclarar aún más los resultados se hace el gráfico presente en la figura 4.10 que representa el acortamiento porcentual promedio para los distintos materiales.

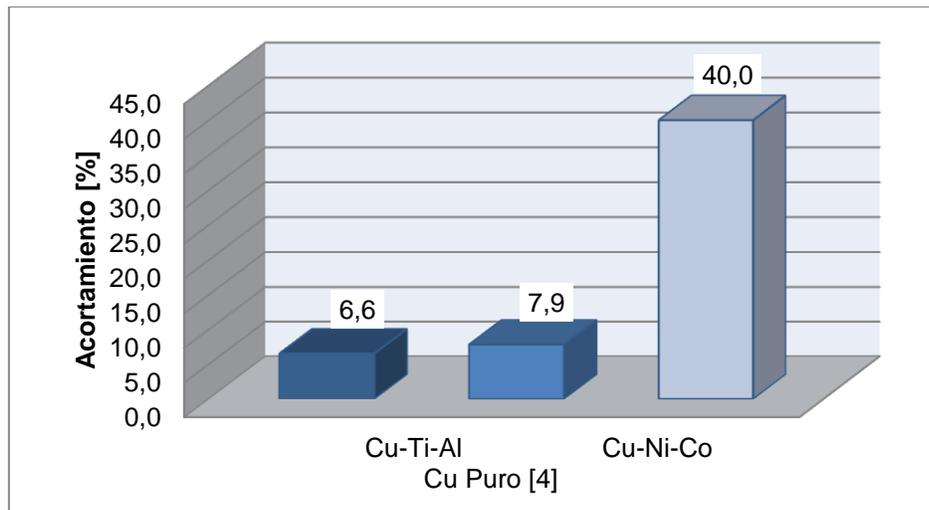


Figura 4.10 Acortamiento porcentual promedio para cada material

Se observa en la figura 4.10 que el electrodo que presenta un menor acortamiento porcentual y por ende un mejor desempeño en ésta índole, es el fabricado por el alumno. Sin embargo el electrodo comercial de cobre níquel cobalto también presenta poco desgaste. Mientras que el electrodo de cobre puro presenta un desgaste de más del quintuple que los otros. Estos datos son consistentes tanto con los

resultados obtenidos en los análisis de compresión como con lo expuesto en el capítulo de procedimiento experimental, donde se detalla que los trabajadores que soldaban con electrodos de cobre puro debían cambiar permanentemente los mismos, ya que se desgastaban muy rápido.

Montiglio [3] en su memoria llega a la conclusión de que hay una leve diferencia entre el acortamiento presentado por los electrodos puestos en los brazos superiores y los inferiores, siendo mayor el de los primeros. Esta diferencia, a su parecer, se debe a la tracción realizada por el brazo al momento de separarse de las placas después de la soldadura, sin embargo, ni la memoria de Vera [4] ni los datos obtenidos en éste trabajo presentan datos concluyentes al respecto, ya que en el caso del cobre puro y de la aleación Cu-Ni-Co el desgaste es considerablemente mayor en los electrodos inferiores. Ese desgaste se explica porque ocasionalmente las placas quedan pegadas al electrodo inferior, por lo que se debe hacer tracción para quitarlas, desprendiendo material.

4.8 Aumento del Diámetro del Electrodo

Otro punto importante de comparación de desempeño de los electrodos es el aumento del diámetro de la punta del mismo. Esta medida es complementaria a la del acortamiento del electrodo, ya que si sólo se toma en cuenta la anterior, se podría pensar que toda la disminución del largo se debe a pérdida de material, lo cual no es consistente con las medidas de pérdida de masa. Lo que ocurre es que con la presión y la temperatura provenientes del proceso de soldadura la punta aumenta su diámetro y forma una capa delgada de material con forma cónica (cabeceo).

Las mediciones del diámetro de la punta se hicieron cada 20 pasadas de soldadura, es decir, al comienzo del experimento, a la pasada 20, 40, 60 y 80. Lo anterior permite obtener una relación entre el aumento del diámetro de la punta y el número de pasadas.

Es importante mencionar que la capa formada en el ensanchamiento de la punta es muy delgada y presenta una forma irregular, por lo que se optó por medir los puntos de ancho máximo y mínimo para obtener un promedio.

En la tabla 4.10 se observan los datos asociados al aumento del diámetro de la punta del electrodo y en la tabla 4.11 se observan los datos de aumento porcentual del diámetro de la misma.

Tabla 4.10 Medición de diámetros de la punta del electrodo en función del número de pasadas

Material	Posición	Ø inicial [mm]	Ø 20 [mm]	Ø 40 [mm]	Ø 60 [mm]	Ø 80 [mm]
Cu-Ti-Al	Arriba	3,60	4,40	4,00	4,20	4,30
Cu-Ti-Al	Abajo	3,60	4,30	4,20	4,45	4,50
Cu-Ni-Co	Arriba	3,65	3,65	3,60	4,00	3,75
Cu-Ni-Co	Abajo	3,60	3,50	3,55	3,40	3,65
Cu Puro [4]	Arriba	6,80	7,35	7,80	8,10	8,20
Cu Puro [4]	Abajo	6,70	7,30	7,70	7,80	8,00

Tabla 4.11 Aumento porcentual del diámetro de la punta del electrodo

Material	Posición	Aumento Porcentual [%]
Cu-Ti-Al	Arriba	19,44
Cu-Ti-Al	Abajo	25,00
Cu-Ni-Co	Arriba	2,74
Cu-Ni-Co	Abajo	1,39
Cu Puro [4]	Arriba	20,59
Cu Puro [4]	Abajo	19,40

De la tabla anterior se desprende que tanto el cobre puro como la aleación Cu-Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃ son considerablemente más dúctiles que la aleación de Cu-Ni-Co ya que alcanzan deformaciones mucho mayores. Observando la figura 4.11 que presenta el aumento porcentual del diámetro en función del número de pasadas se puede observar que si bien todos los electrodos terminan con un diámetro mayor al inicial, se presentan variaciones no esperadas de disminución del diámetro en algunos intervalos. Lo anterior se puede explicar porque la capa cónica que se forma en la punta del electrodo se fractura con los golpes del brazo de la máquina de soldar, disminuyendo el diámetro. Por lo tanto los materiales menos dúctiles presentan un aumento mínimo del diámetro de la punta ya que prácticamente cuando se forma la “cabeza”, ésta se fractura al siguiente golpe. Otro resultado digno de ser mencionado es que el cobre puro presenta menos ductilidad que la aleación fabricada. Esto ocurre porque la aleación tiene un tamaño de grano considerablemente menor, debido a la molienda reactiva de los polvos con los que fue fabricado el electrodo.

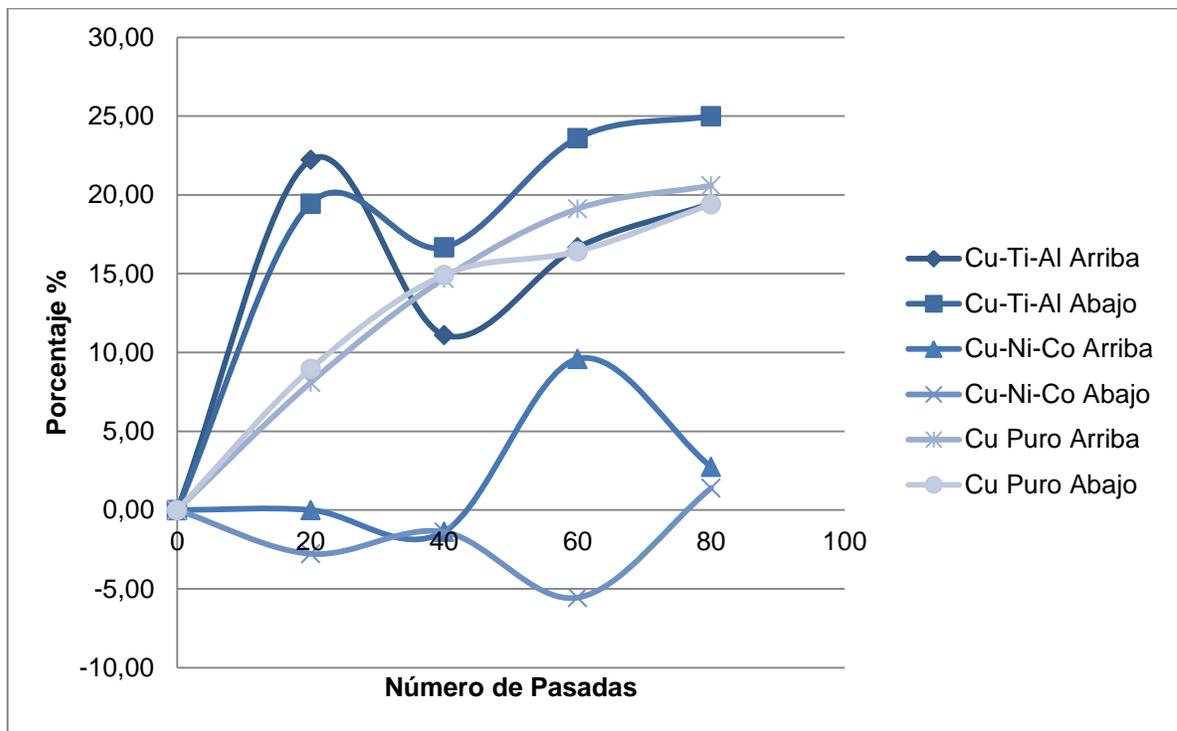


Figura 4.11 Aumento porcentual del diámetro en función del número de pasadas

En las figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, se observa la comparación entre los tamaños de grano tanto de Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃ como de Cu-Ni-Co.

Como se observa en las figuras, incluso en una imagen aumentada 800 veces es imposible distinguir claramente los granos en la aleación Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃, mientras que en la aleación Cu-Ni-Co se observan de manera clara los granos desde un aumento de 200x. El menor tamaño de grano es la explicación principal al porque la aleación Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃ es más dúctil.

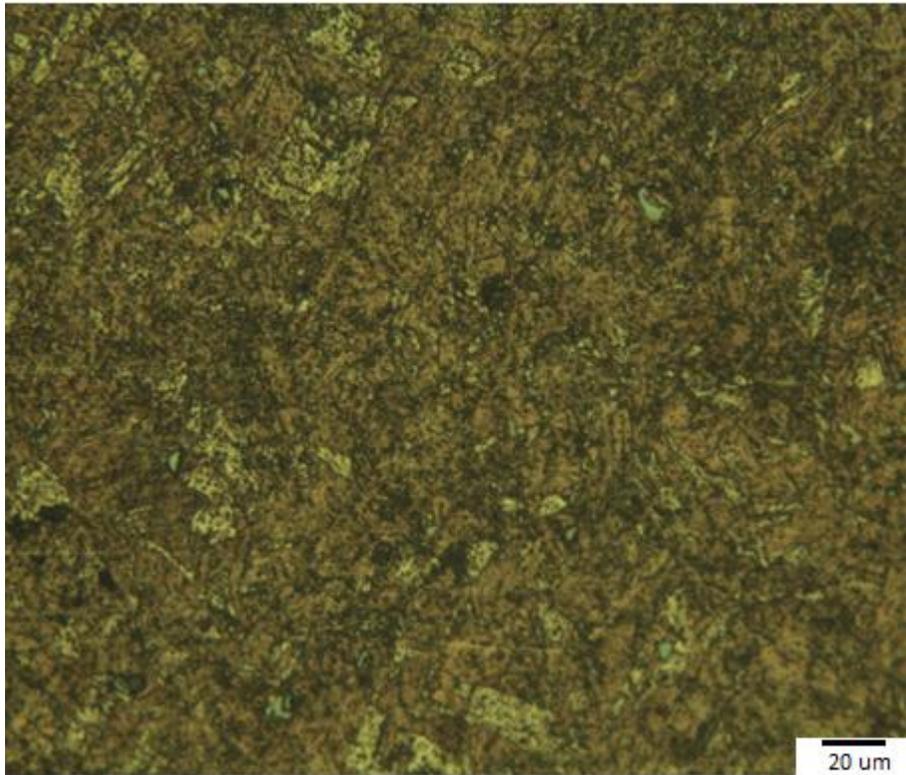


Figura 4.12 Zoom 200x de Aleación Cu-Ni-Co

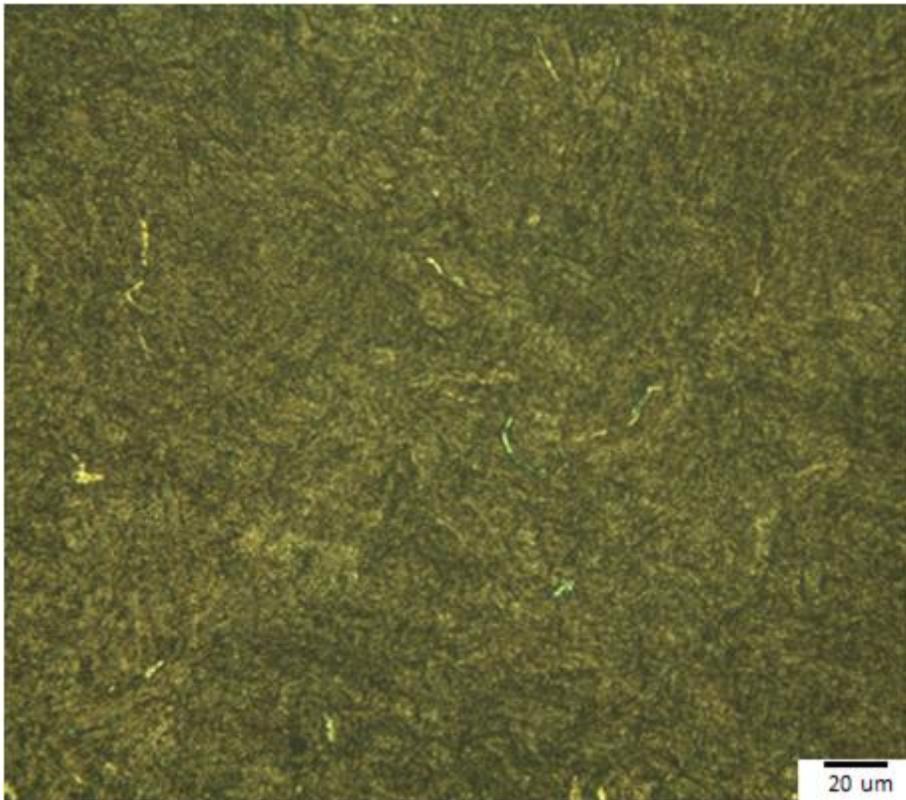


Figura 4.13 Zoom 200x Aleación Ti-Ti-Al

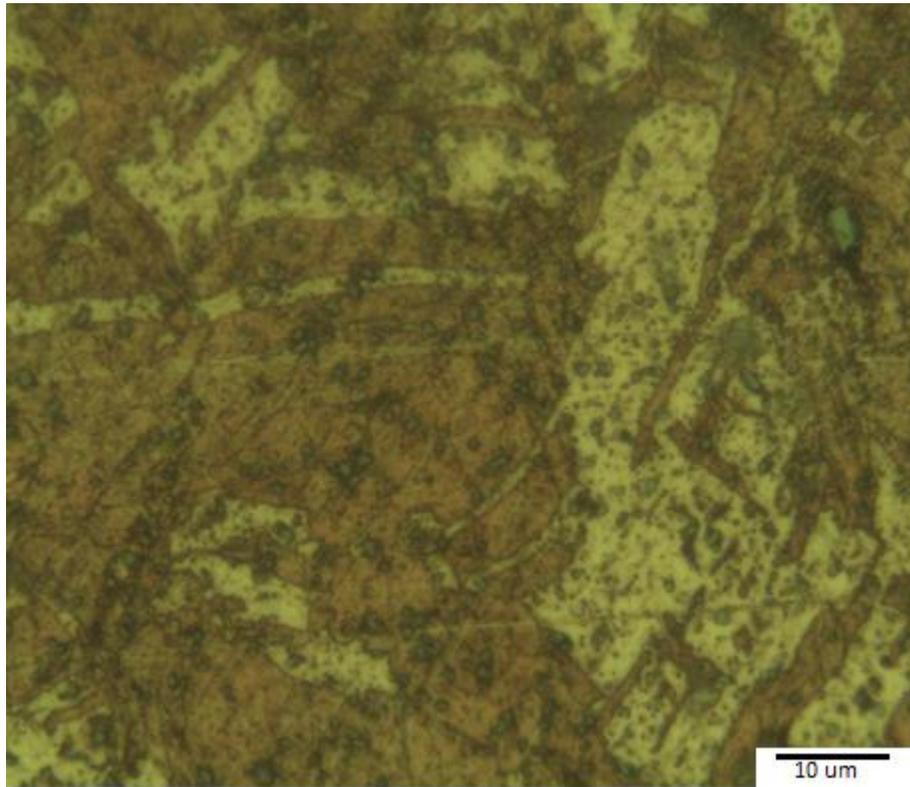


Figura 4.14 Zoom 800x Aleación Cu-Ni-Co

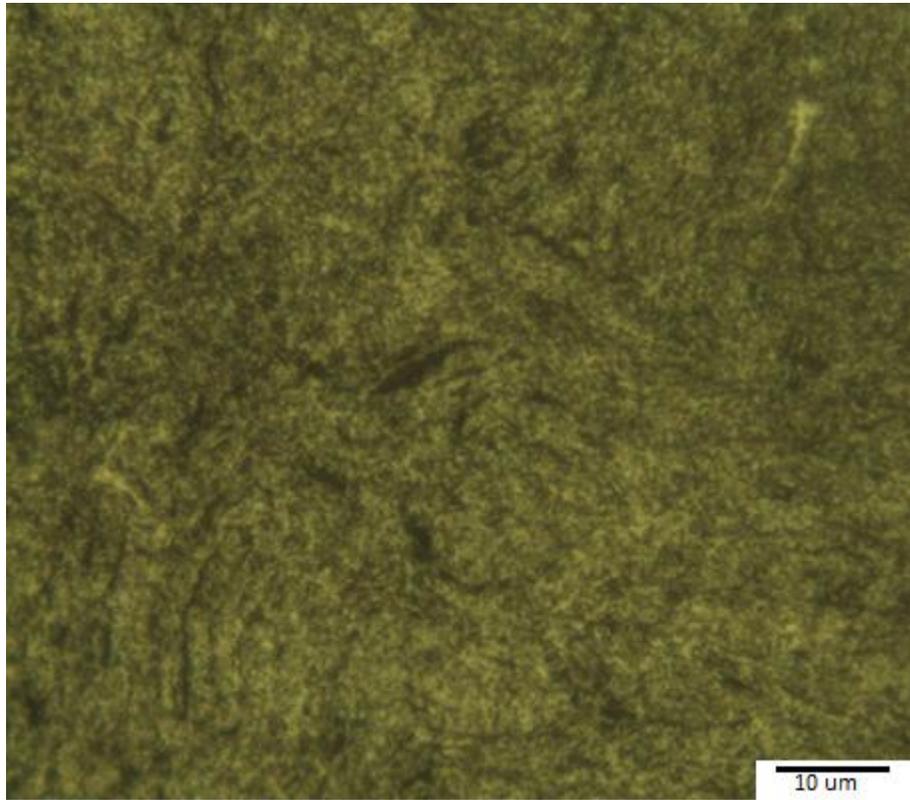


Figura 4.15 Zoom 800x Aleación Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃

En la figura 4.16 se observa un gráfico correspondiente al aumento del diámetro de la punta promedio para los distintos electrodos.

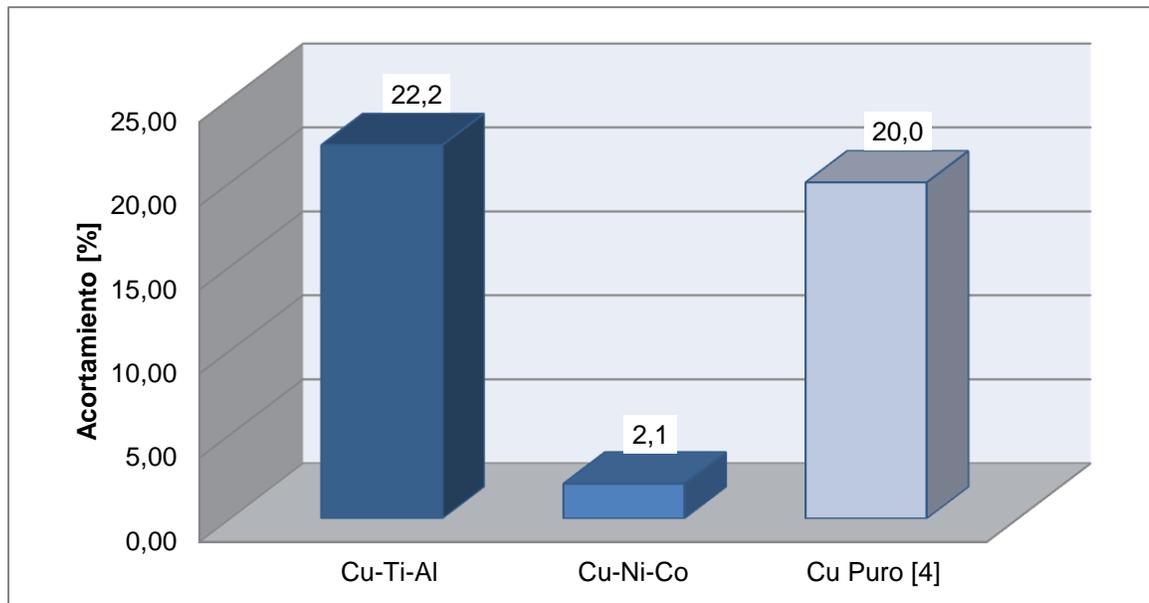


Figura 4.16 Aumento porcentual del diámetro promedio para cada material

Se observa que el mejor desempeño en cuanto a aumento del diámetro del electrodo lo presenta el de cobre níquel y cobalto, ya que es el que más tiende a mantener el diámetro inicial. Sin embargo, el hecho de que los electrodos de Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃ y cobre puro no lo hagan no significa que su desempeño en la soldadura sea menor, ya que sólo se mide el ancho de una pequeña capa de material en la punta, la cual no genera presión a la hora de soldar, por lo que el diámetro del punto no aumenta.

Debido a lo anterior, se confirma que la medición del aumento del diámetro de la punta no es una medida de desempeño por sí sola, sino que es un complemento para las otras mediciones hechas en este trabajo, como el acortamiento del electrodo y la pérdida de masa.

4.9 Pérdida de Material

En el momento que ocurre la soldadura, además de la unión entre las placas, también ocurre una fusión del material de la punta del electrodo debido a la alta temperatura localizada, provocando la unión entre el electrodo y la placa. Esta unión se rompe al momento de separar los brazos de la máquina, dejando parte del material en la placa, provocando pérdida de material, disminución del largo y aumento del diámetro

de la punta. Lo anterior se puede apreciar claramente por el color cobrizo presente en los puntos de soldadura.

Tanto el acortamiento del electrodo como el aumento del diámetro del mismo son inversamente proporcionales, por lo que los resultados de los capítulos 4.7 y 4.8 no implican necesariamente una pérdida de material. Es por lo anterior que es necesario medir la masa del electrodo antes y después de las 80 pasadas de soldadura, de manera de obtener el decrecimiento porcentual de la masa del mismo.

La masa del electrodo se mide antes y después de las 80 pasadas, ya que para medir su masa es necesario quitarlo del porta electrodos, lo que provoca que al volver a insertarlo hayan posibilidades de no volver a las condiciones iniciales, afectando a las otras mediciones del estudio.

En la tabla 4.12 se observa la masa inicial, final y la pérdida porcentual de masa de los electrodos estudiados:

Tabla 4.12 Masa inicial, final y pérdida porcentual de masa para los electrodos

Material	Posición	Masa Inicial [g]	Masa Final [g]	Pérdida de masa [%]
Cu-Ti-Al	Arriba	4,98	4,97	0,20
Cu-Ti-Al	Abajo	4,98	4,96	0,40
Cu-Ni-Co	Arriba	4,79	4,74	1,04
Cu-Ni-Co	Abajo	4,63	4,58	1,08
Cu Puro [4]	Arriba	3,89	3,82	1,80
Cu Puro [4]	Abajo	3,40	3,35	1,47

Con los datos de la tabla anterior se pueden obtener las figuras 4.17 y 4.18 que representan el desgaste porcentual y el desgaste porcentual promedio de los electrodos respectivamente. En la tabla 4.12 se observa que no hay una relación clara entre desgaste y posición del electrodo. Se observa también que la aleación Cu-2,5%v Al₂O₃-2,5%v TiC presenta la menor pérdida de masa entre los materiales en estudio, desgastándose incluso 3 veces menos que el electrodo comercial de Cu-Ni-Co. El cobre puro presenta un desgaste 5 veces mayor que el electrodo fabricado por el alumno, por lo que se confirma el mejor desempeño en éste ámbito del mismo. Otro punto importante a tener en cuenta es que se confirma lo planteado en el capítulo 4.8 acerca de la rotura de la capa delgada de material formada en la cabeza del electrodo de Cu-Ni-Co. Se reafirma también lo dicho por los trabajadores correspondiente a la duración

de sus electrodos de cobre puro, ya que se observa que la pérdida de masa es considerable en solo 80 soldadas.

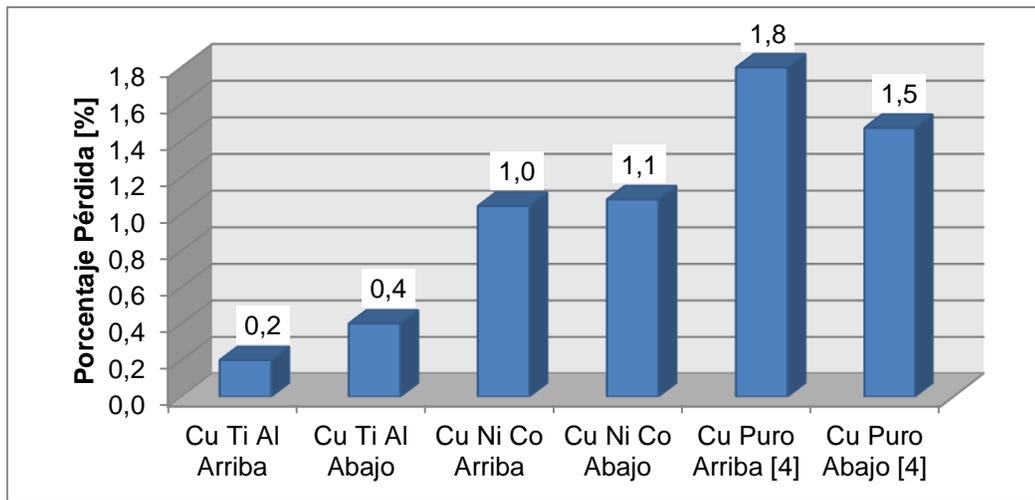


Figura 4.17 Desgaste porcentual del electrodo

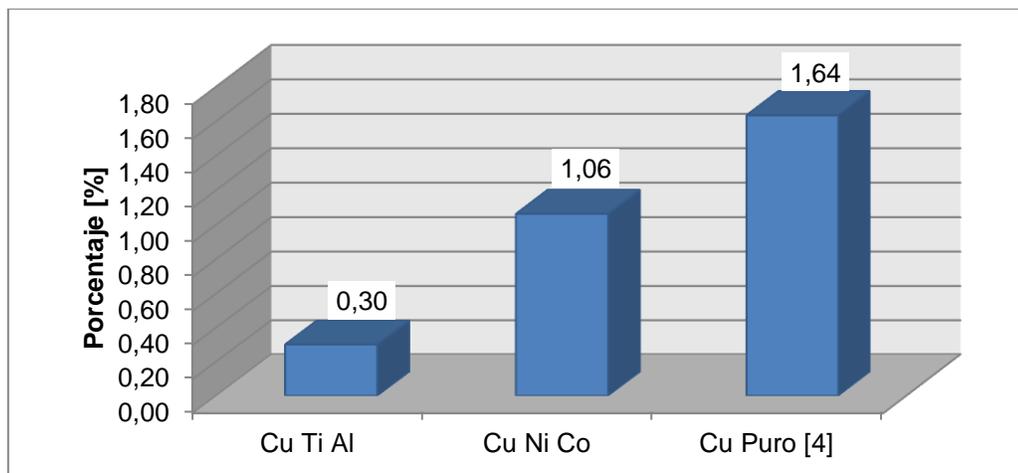


Figura 4.18 Desgaste porcentual promedio del electrodo

4.10 Resistencia de la Unión Soldada

En vista de que no se cuenta con una norma que rijan los ensayos de tracción de uniones soldadas en probetas planas, se debe determinar otra manera de cuantificar correctamente el desempeño de las uniones soldadas con los distintos electrodos.

Debido a lo anterior se realiza un análisis comparado de la resistencia mecánica de las placas soldadas en función de los distintos electrodos utilizados.

Las placas son de 0,5 mm de espesor, 100 mm de largo y 25 mm de ancho y la velocidad de avance de la máquina de tracción Zwick/Roell Z100 es de 2,5 mm/min. Las condiciones serán iguales para todas las placas, lo que hará que sus resultados sean comparables entre sí. También se le hizo un ensayo de tracción a una placa de las mismas dimensiones pero sin unión soldada, de manera de obtener un valor patrón.

Es importante destacar que si bien el ensayo es de tracción, debido a la configuración de la máquina y a la posición de las placas, lo que se está midiendo es el esfuerzo de corte necesario para romper la unión soldada.

El valor obtenido para la resistencia mecánica de la placa de acero patrón es de 335 [MPa]. En la tabla 4.13 se presentan los valores asociados a la resistencia mecánica de las diferentes placas en función del número de pasadas de soldadura.

Tabla 4.13 Resistencia de la Unión Soldada [MPa]

Material	Pasadas de Soldadura			
	20	40	60	80
Cu-Ti-Al	332	334	331	334
Cu-Ni-Co	340	324	331	337
Cu Puro [4](*)	216	229	225	260

(*) El ensayo de tracción al cobre puro realizado por Vera fue a una velocidad de avance de 0,5 mm/min, por lo que los datos no son comparables.

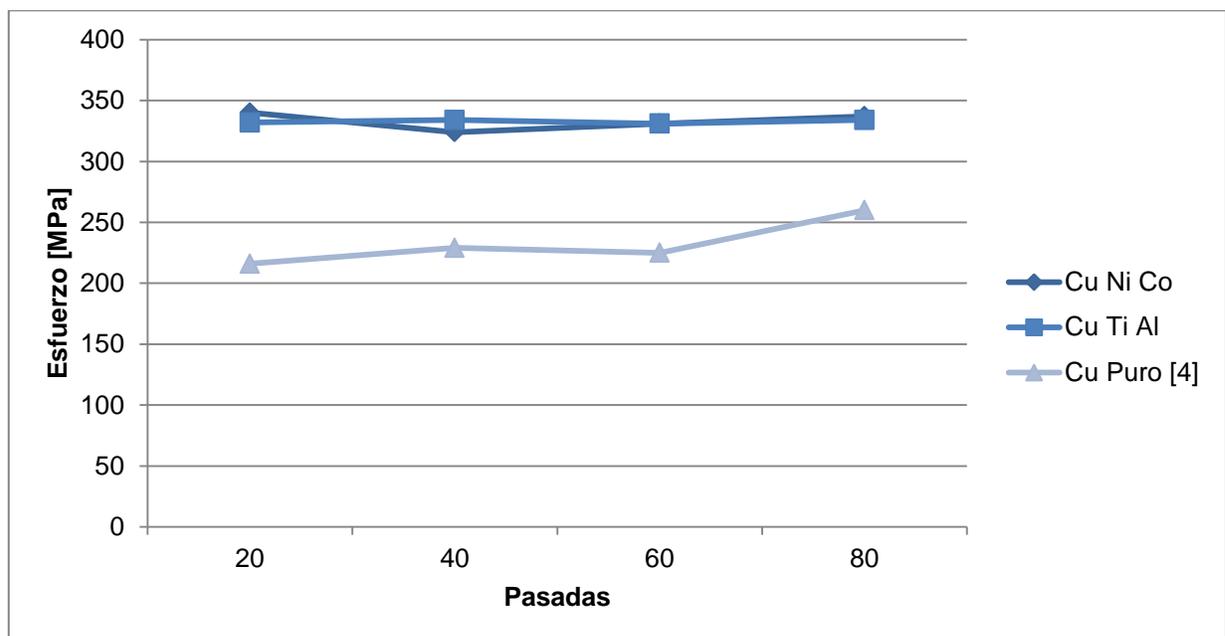


Figura 4.19 Resistencia de la unión soldada vs número de pasadas de soldadura

Con la intención de comparar los valores de una manera aún más clara se hace el gráfico de la figura 4.20:

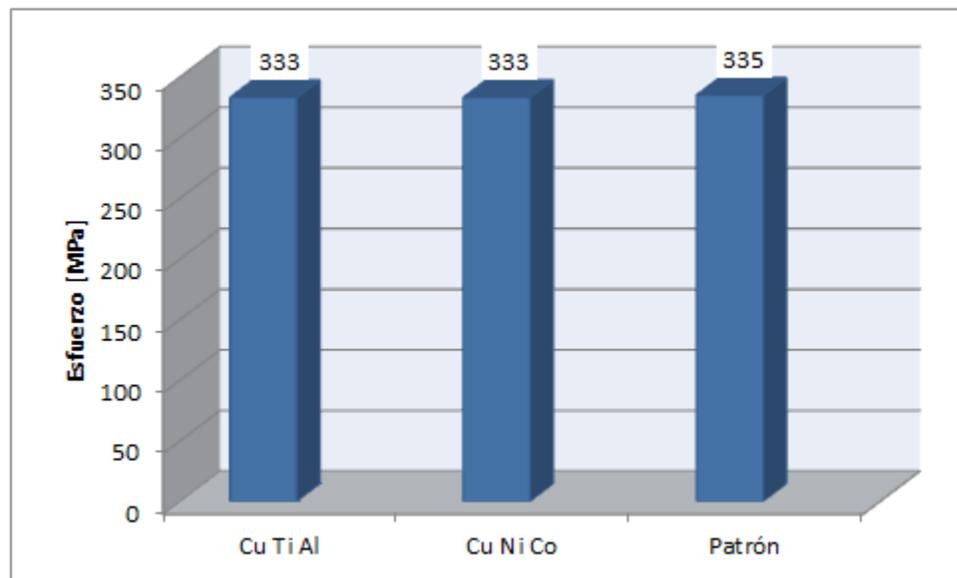


Figura 4.20 Resistencia promedio de las uniones soldadas

Lamentablemente, como las condiciones del ensayo para el cobre son diferentes a las condiciones del ensayo de las aleaciones, los resultados no son comparables, por lo que el cobre quedará fuera de éste análisis.

Se observa que los valores promedio de resistencia mecánica son casi iguales al 100% del valor de resistencia mecánica de la placa patrón, esto se debe a que en los ensayos no es la soldadura la que falla, sino que es la placa de acero en los alrededores del punto la que falla por fluencia. Por lo que la conclusión que se puede desprender de éste capítulo es que las uniones soldadas no fallan y que la composición del material no es lo más importante en la resistencia mecánica de éste tipo de soldadura. Lo anterior es consistente con los análisis de desprendimiento practicados a las placas soldadas, donde las placas se ponen en un tornillo y son sometidas a esfuerzos hasta que se desgarran el metal. Debido a lo anterior, no se puede determinar el valor real de resistencia mecánica de la soldadura, ya que siempre va a fallar el material unido antes.

4.11 Análisis Microestructural de la Unión Soldada

Se hace un análisis micrográfico de la zona del punto de soldadura, para poder estudiar las diferencias en las estructuras. Lo anterior sirve también para validar

mediciones hechas en capítulos anteriores, como las mediciones de temperatura. El electrodo utilizado para la unión de la placa a estudiar es de Cu-Ni-Co.

Hay dos formas de tener acceso al nugget de soldadura, una es cortando transversalmente las placas soldadas y la otra es puliendo la zona hasta prácticamente eliminar la primera placa. Se optó por la segunda ya que al momento de cortar se genera calor que podría afectar la microestructura en estudio.

Para el proceso de pulido se corta la placa y se introduce en un molde de baquelita, para facilitar su manipulación. Luego se pule con lijas al agua disminuyendo paulatinamente el tamaño del grano de las mismas. Finalmente se usa un paño para pulir con una solución de agua con alúmina. Luego se somete la muestra a un ataque químico usando una solución de alcohol etílico y ácido nítrico, la cual ayuda a ver más claramente los límites de los bordes de grano. En la figura 4.21 se observa la muestra en el molde de baquelita y en la figura 4.22 se observa la vista microscópica del punto de soldadura con un aumento de 50x.

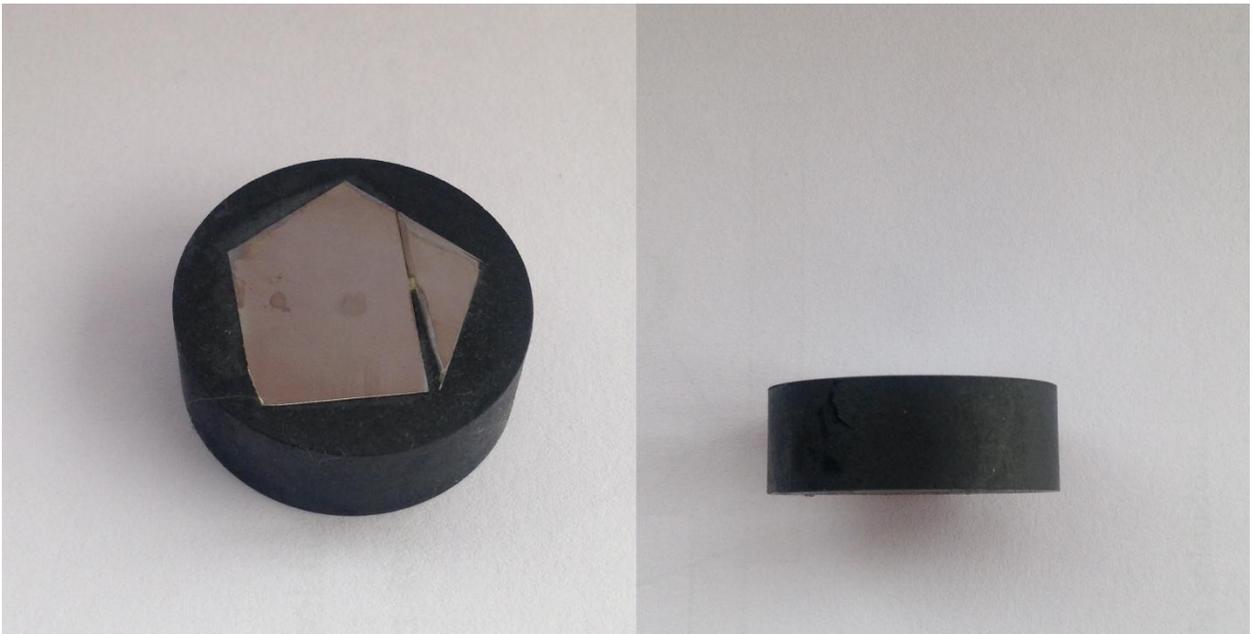


Figura 4.21 Placa soldada en molde de baquelita

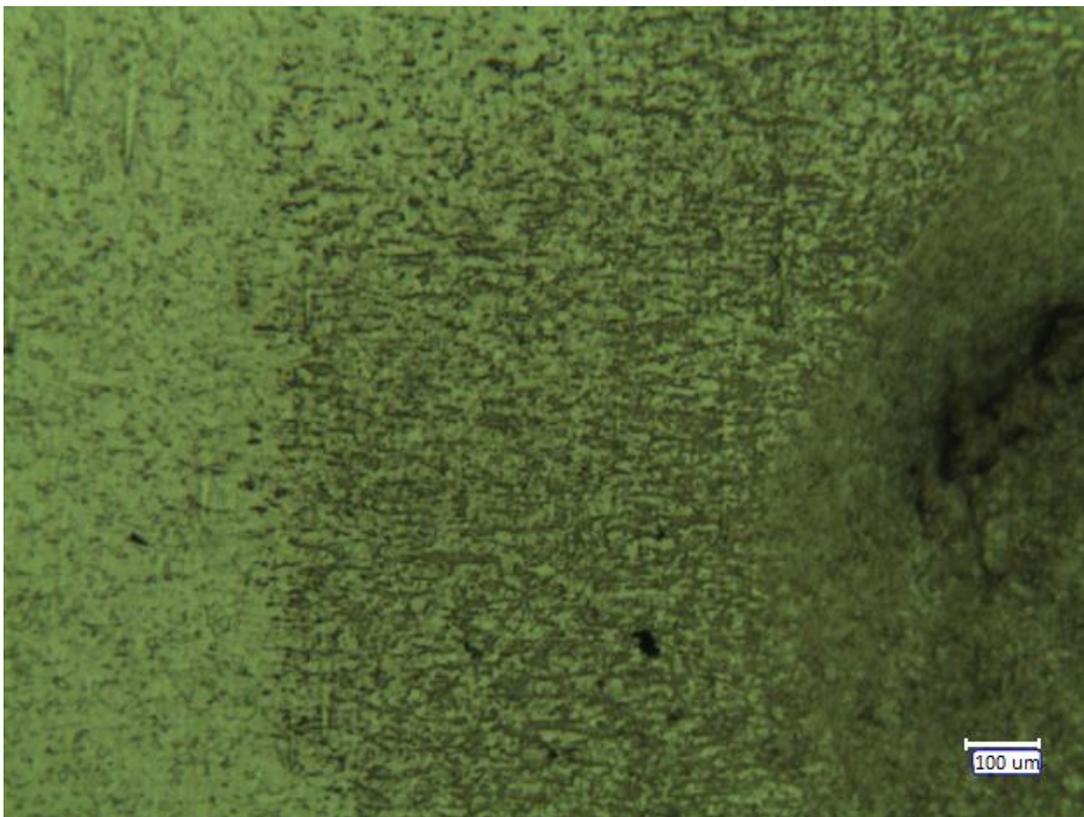


Figura 4.22 Visión microscópica del punto de soldadura con zoom 50x

En la figura 4.23 se observa una visión ampliada del punto con un zoom de 100x. Los números marcan las imágenes que son mostradas más adelante.



Figura 4.23 Visión microscópica del punto de soldadura con zoom 100x

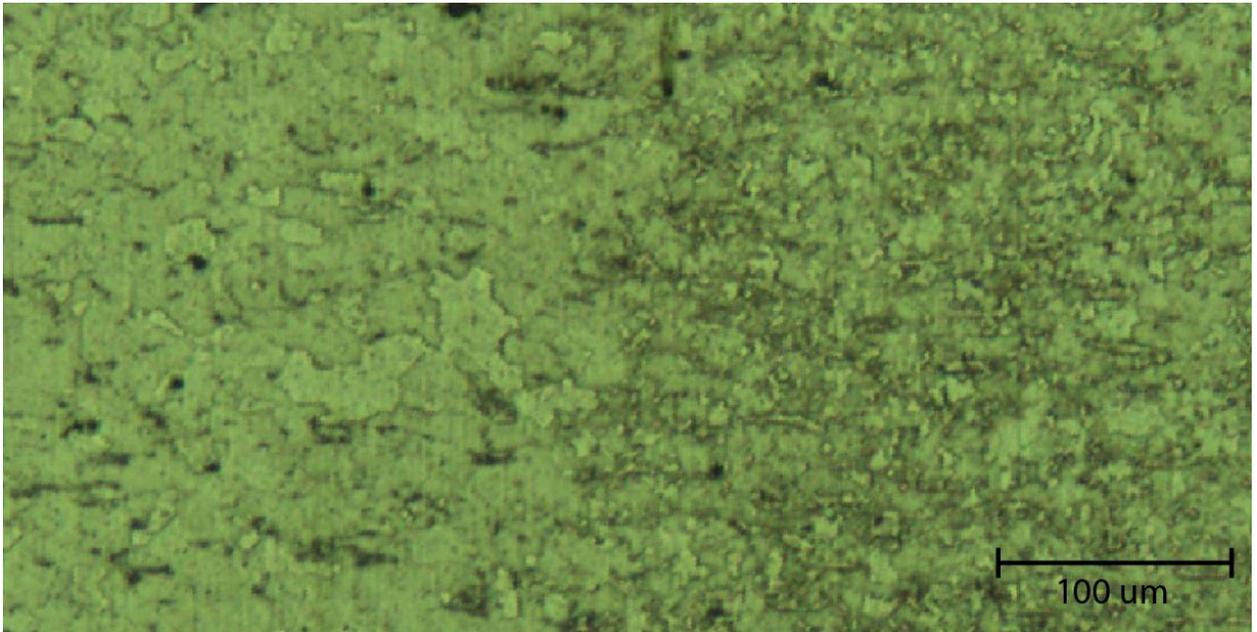


Figura 4.24 Vista 200x del punto 1

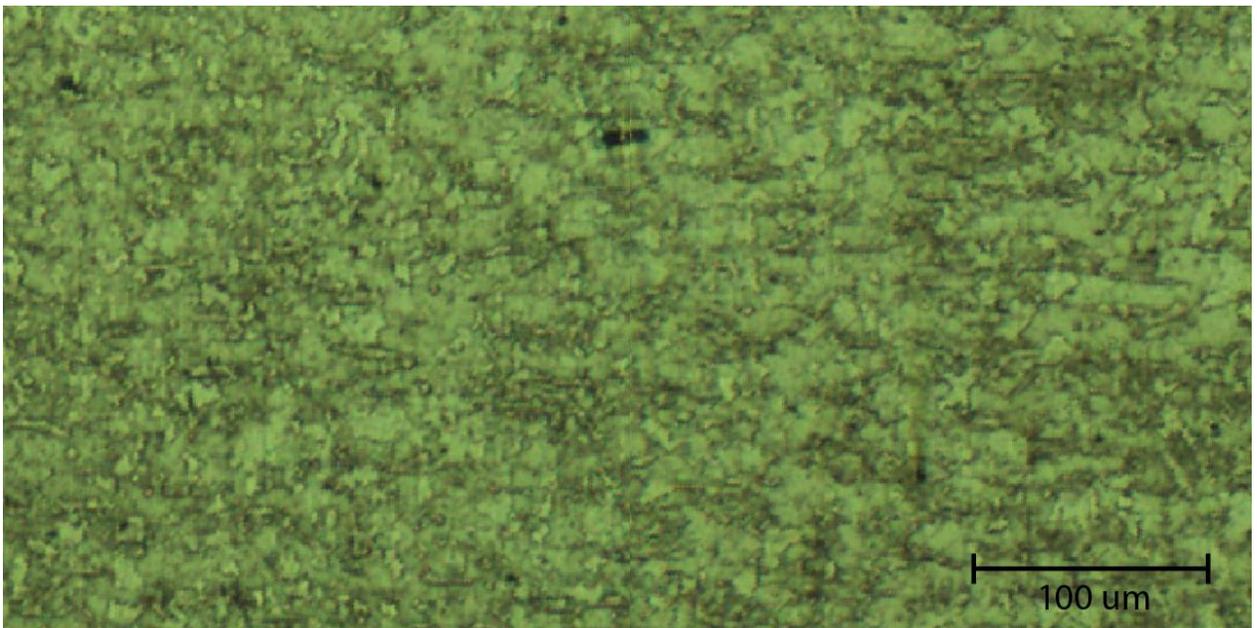


Figura 4.25 Vista 200x del punto 2

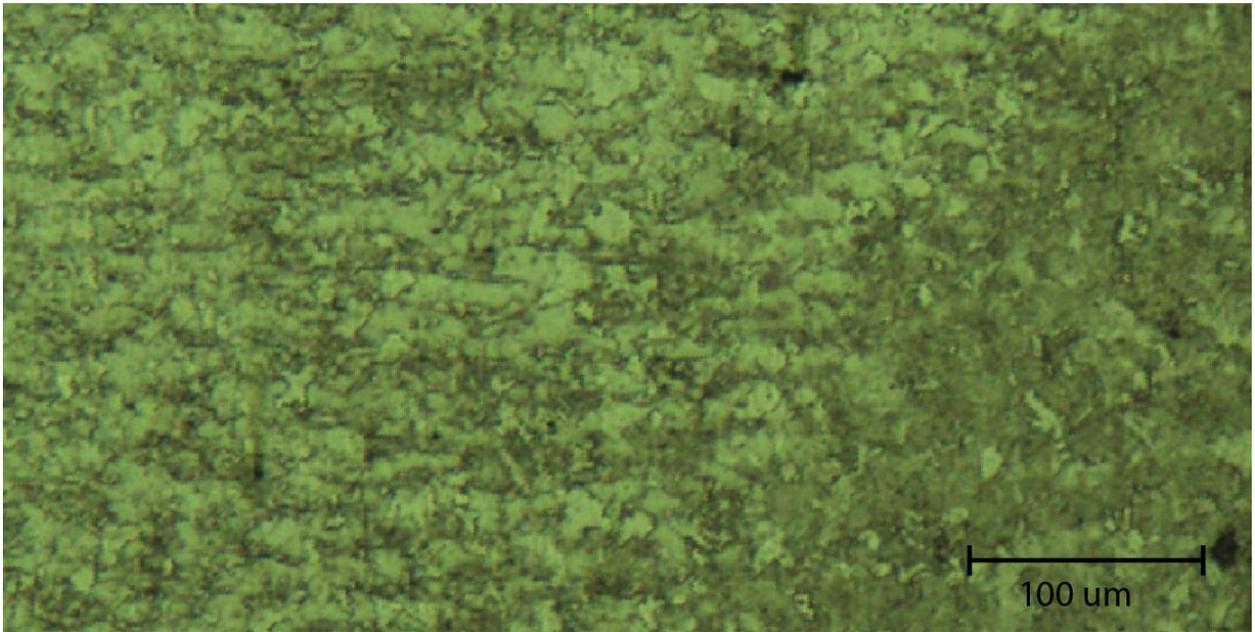


Figura 4.26 Vista 200x del punto 3

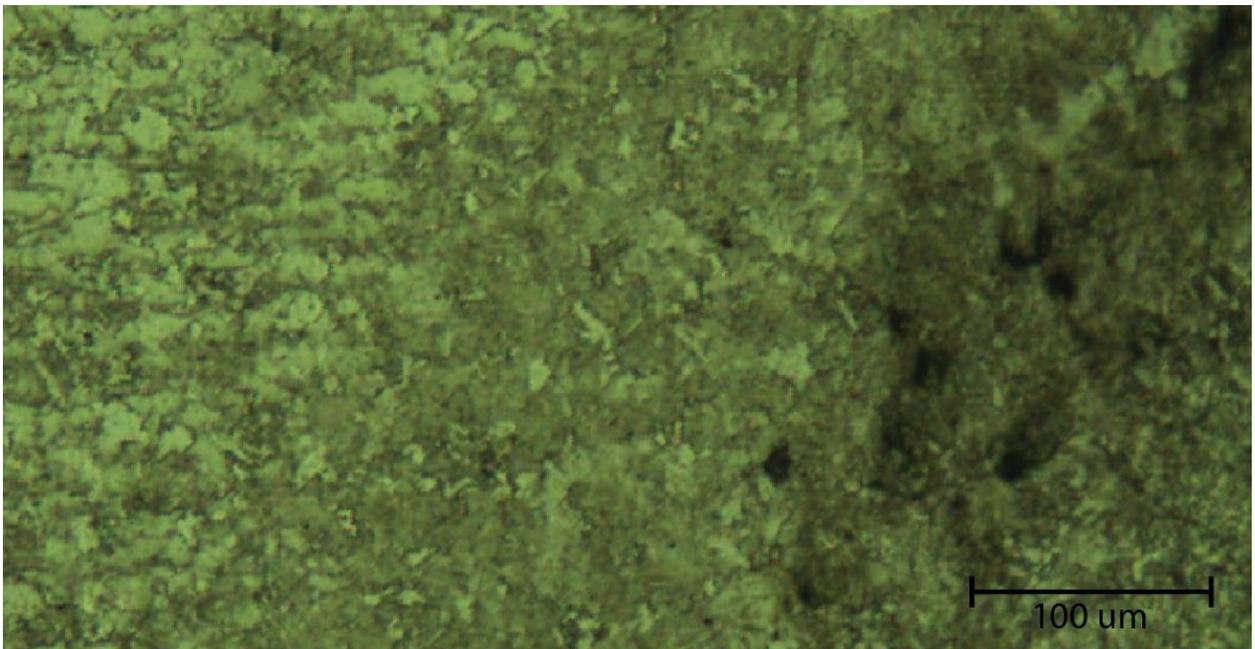


Figura 4.27 Vista 200x del punto 4

En la figura 4.24 se observa claramente el límite de la influencia de la temperatura provocada por la soldadura del material. Este límite está representado por una marcada disminución en el tamaño del grano producto del enfriamiento rápido inherente del proceso de soldadura.

Se ve en las figuras 4.25, 4.26, 4.27 un aumento paulatino en el tamaño de grano, ya que el material más cercano al punto se ve expuesto a temperatura por más tiempo, favoreciendo el crecimiento de los mismos.

No se observan estructuras de solidificación como frentes de solidificación planos o dendritas, por lo que se deduce que el material nunca sobrepasó su punto de fusión (aproximadamente 1400°C), sin embargo se encontraron algunas estructuras martensíticas que demuestran que se sobrepasó el límite de los 800°C. Debido a lo anterior es posible validar las mediciones de temperatura efectuadas con el pirómetro.

4.13 Resumen de Resultados

Luego de obtener y analizar todos los resultados, es posible determinar que tanto el electrodo de Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃ como el de Cu-Ni-Co comercial tienen desempeños similares y muy superiores a los electrodos de cobre puro. La superioridad se fundamenta bajo las bases de:

- Mayor dureza producto de los dispersoides que tienen ambas aleaciones. En el caso de la aleación de Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃, la dureza también se explica por el proceso de molienda reactiva con que fue fabricado, lo que produce un menor tamaño de grano con una gran densidad de dislocaciones.
- Límite de fluencia 3 veces superior para ambas aleaciones con respecto al cobre puro, lo que implica una mayor resistencia a la deformación y por ende una mayor resistencia al acortamiento del electrodo en sus condiciones de trabajo.
- Acortamiento del electrodo 5 veces menor en las aleaciones en estudio que en el cobre puro, siendo incluso menor en el electrodo de Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃.
- El material que presentó un mejor comportamiento en cuanto al aumento del diámetro del electrodo fue la aleación de Cu-Ni-Co, la cual casi no varió su diámetro, mientras que la aleación de Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃ y el cobre puro presentaron grandes deformaciones cercanas al 20% producto de su gran ductilidad.
- Se descarta la medición del aumento del diámetro de la punta como un parámetro de desempeño por sí sólo, ya que la capa cónica de material formada no ejerce presión sobre la soldadura, por lo que el diámetro del punto no aumenta. Sin embargo, se usa ésta medida como un complemento a las medidas de acortamiento y pérdida de masa.

- La aleación de Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃ presenta el mejor comportamiento en cuanto a pérdida de masa, perdiendo sólo entre un 0,2 y 0,4% de la misma en las 80 pasadas.
- La resistencia mecánica de la unión soldada no pudo ser medida de forma estandarizada porque no se cuenta con la norma correspondiente, sin embargo el análisis determinó que tanto para la aleación de Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃ como para la aleación de Cu-Ni-Co las resistencias son similares y equivalentes al punto de ruptura de la placa.
- Como la placa de acero se desgarraba antes de que fallara la soldadura, no fue posible medir la resistencia total de la soldadura. En vista de lo anterior, la soldadura se considera exitosa, ya que falló el material a unir y no la unión.
- La conductividad eléctrica de la aleación de Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃ es la más baja en estudio, en parte porque los dispersoides utilizados en la aleación son cerámicos no conductores y en parte por el considerable menor tamaño de grano presente producto del proceso de molienda. También afecta a la conductividad eléctrica la cantidad de oxígeno presente en los polvos, la cual es bastante alta, disminuyendo la conductividad debido a la formación de óxidos de cobre.
Sin embargo, igualmente está dentro de parámetros aceptables para el uso en electrodos de soldadura por resistencia.
- Se probaron los electrodos en la maestranza Promalad Ltda en piezas comerciales de acero galvanizado, teniendo una buena recepción por parte de los soldadores y demostrando su buena calidad de soldadura y gran durabilidad.
- Las sensaciones de los soldadores de la empresa Promalad al momento de utilizar tanto el electrodo de Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃ como el de Cu-Ni-Co fueron muy positivas. Se mostraron muy complacidos con el bajo desgaste presentado por ambas aleaciones, comentando que los electrodos de cobre puro deben ser limados permanentemente para mantenerlos con punta, mientras que esto no es necesario para los de aleación. También se sorprendieron por la baja pérdida de material de los electrodos. Se probaron también en las piezas que se fabrican en la empresa, que son quemadores para hornos hechos de acero galvanizado, el cual desgasta considerablemente más los electrodos, sin embargo el resultado fue el mismo, una considerable mejoría de los electrodos de aleaciones de cobre con respecto a los electrodos de cobre puro.
- En la tabla 4.14 se detallan todas las propiedades estudiadas:

Tabla 4.14 Resumen resultados obtenidos

Ensayo	Electrodo		
	Cu-2,5%v TiC-2,5%v de Al ₂ O ₃	Cu – Ni - Co	Cu Puro [4]
Microdureza [Vickers]	272	269	130
Conductividad [%IACS]	54	80	121
Límite de Fluencia [MPa]	626	650	215
Densidad [g/cm ³]	8,53	9,02	8,93
Acortamiento del Electrodo [%]	4,5 a 8,7	4,8 a 11,0	31,7 a 48,4
Aumento del Diámetro [%]	19,4 a 25,0	1,4 a 2,7	19,4 a 20,6
Pérdida de Material [%]	0,2 a 0,4	1,0 a 1,1	1,8 a 1,5
Resistencia Unión Soldada [MPa]	333	333	233(*)

(*) No es comparable porque el ensayo se realizó a una velocidad de avance diferente.

4.14 Comparación de Resultados con Memorias Guías

En el presente capítulo se hace una comparación de los resultados obtenidos para los electrodos en estudio, respecto a los utilizados en las memorias guías, con el objetivo de determinar si las propiedades de la aleación fabricada superan a las propiedades de las aleaciones estudiadas por Montiglio [3] y Vera [4]. Los resultados se observan en la tabla 4.15.

Los materiales usados por Vera [4] fueron Cu-1%v Al₂O₃, Cu-2,5%v TiC-2,5%v Al₂O₃ y cobre catódico puro, mientras que la aleación utilizada por Montiglio [3] fue Cu-5%v TiC.

Se observa que la aleación Cu-Ti-Al desarrollada por Vera presenta mejores propiedades y resultados. Lo anterior se debe principalmente a que ese trabajo fue realizado hace 10 años, por lo que las máquinas utilizadas, tales como la prensa y el molino, estaban en mejor estado que en la actualidad. En particular el buen estado del molino es primordial para éste trabajo ya que le traspasa mayor energía a los polvos en forma de dislocaciones. Sin embargo, independientemente de lo anterior, se observa que la aleación desarrollada por el alumno es ampliamente superior a todas las otras

aleaciones y materiales estudiados tanto en las propiedades mecánicas como en los resultados obtenidos.

En cuanto a las propiedades eléctricas, la aleación de Cu-Ti [3] presenta la mayor conductividad, la explicación está en la relación directa entre el aumento del tamaño de grano y la conductividad, ya que la molienda de sus polvos constituyentes duró solo 10 horas, por lo que el tamaño de grano de la aleación es considerablemente mayor al de la aleación fabricada por el alumno.

Tabla 4.15 Comparación de resultados con memorias guías

Ensayo	Electrodo					
	Cu-Ti-Al	Cu-Ni-Co	Cu Puro [4]	Cu-Al [4]	Cu-Ti-Al [4]	Cu-Ti [3]
Microdureza [Vickers]	272	269	130	215	300	105
Conductividad [%IACS]	54	80	121	52	63	77
Límite de Fluencia [Mpa]	626	650	215	580 aprox	680	n/d
Densidad [g/cm ³]	8,53	9,02	8,93	8,53	8,61	n/d
Acortamiento del Electrodo [%]	4,5 a 8,7	4,8 a 11,0	31,7 a 48,4	19,0 a 27,0	6,0 a 7,0	7,3 a 13,8
Aumento del Diámetro [%]	19,4 a 25,0	1,4 a 2,7	19,4 a 20,6	39,0 a 51,0	3,0 a 4,0	20,6 a 22,1
Pérdida de Material [%]	0,2 a 0,4	1,0 a 1,1	1,8 a 1,5	1,5 a 1,8	0,9 a 1,4	3,1 a 3,3
Resistencia Unión Soldada [Mpa]	333	333	233(*)	242 (*)	266 (*)	n/d

(*) Las velocidades del ensayo de tracción fueron distintas, por lo que los resultados no son comparables.

5. Conclusiones

Finalmente y luego de llevar a cabo una acabada discusión de todos los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

- A modo de conclusión general, se puede determinar que la inclusión de dispersoides por medio de técnicas pulvimetalúrgicas en la matriz de cobre es de gran ayuda para mejorar el rendimiento de los electrodos para soldadura por resistencia eléctrica, ya que aumenta de gran manera tanto las propiedades mecánicas como la resistencia al desgaste.
- Los materiales mejorados, tanto el comercial como el fabricado por el alumno, mostraron mejores resultados que el cobre puro en cuanto al acortamiento del electrodo, aumento del diámetro de la punta y a la pérdida de material.
- Las variables seleccionadas para la comparación de los electrodos fueron correctas, sin embargo, la medida de aumento del diámetro de la punta fue descartada como medida de desempeño por sí sola, ya que aunque haya un aumento significativo en ésta medida, no representa un cambio en la calidad de la soldadura, debido a que la capa de material formado no ejerce presión al momento de soldar. Por lo tanto se usa como medida complementaria a la pérdida de material y al acortamiento del electrodo.
- La conductividad eléctrica obtenida es menor a la esperada y se puede deber a numerosos factores, como el menor tamaño de grano de la aleación, la mayor presencia de oxígeno proveniente de los polvos y a la presencia de dispersoides cerámicos no conductores.
- Es importante destacar que la importancia del material de los electrodos radica en la durabilidad y la resistencia al desgaste del mismo, no por la calidad de la soldadura. Esto debido a que la soldadura por resistencia eléctrica es un tipo de soldadura sin aporte de material. Por lo que lo único que se necesita es un material conductor para provocarla. Lo anterior queda demostrado en que las placas, durante el ensayo de tracción, fallan por fluencia antes de que se rompa la soldadura.
- Los datos obtenidos luego de los análisis SEM y químico entregaron resultados satisfactorios que validaron todo lo hecho por el alumno durante el procedimiento experimental.
- Tal como se detalla en el capítulo 1.2 Alcances, el presente trabajo no incluye un estudio de factibilidad económica para la fabricación masiva del electrodo de Cu-TiC-Al₂O₃, sin embargo, en vista de los resultados positivos obtenidos respecto de su desempeño, tanto en este trabajo como en la memoria guía [4], sería

recomendable evaluar los procesos de manufactura disponibles hoy en la industria y su factibilidad económica para fabricar masivamente el electrodo estudiado. Lo anterior resulta necesario debido a que los procesos de fabricación del electrodo son difíciles de realizar a mayor escala, por lo que es posible que se tengan que buscar procesos alternativos de fabricación que entreguen resultados similares.

- La realización de este estudio sirvió para completar de forma satisfactoria la formación de pregrado del alumno, aplicando conocimientos de diversas áreas aprendidas durante la carrera.

6. Bibliografía

- [1] Begeman, Myron. "Manufacturing Processes". 3rd ed. John Wiley & Sons. NY. 1952.
- [2] Jiménez Balboa, Luis. "Tratado de Soldadura por Resistencia." 1º Edición. Ed. Técnicas Macombo, Barcelona. 1962.
- [3] Montiglio E, Roberto Carlo. "Evaluación del desempeño de electrodos de aleaciones de cobre para soldadura por Resistencia eléctrica". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile. 2002
- [4] Vera E, Daniel Alejandro. "Evaluación del desempeño de electrodos de aleaciones de Cu endurecidas por dispersión para soldadura por resistencia eléctrica". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile. 2004
- [5] M. Besterci. "Structure Analysis of Dispersion Strenthening". Scripta Metalurgica et Materialia. 30,9,(1994). 1145.1150
- [6] J.R Groza and J.C Gibeling. "Principles of Particle Selection for Dispersion Strengthened Copper". Materials Science and Engineering. A 171 (1993). 115-125
- [7] M.F Ashby. "Stengthening Methods in Crystals". A.Kelly y Rb. Nicholson. Ed. Elsevier, NY. 1971
- [8] William D. Callister. "Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales" Ed. Reverté, Utah
- [9] García G, José Ignacio. "Deformación en Caliente de Aleaciones de Cobre Endurecidas por Dispersión", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile. 2002.
- [10] Rodrigo Palma H, Aquiles Sepúlveda, Rodrigo Espinoza and Roberto Montiglio. "Performance of Cu-TiC alloy electrodes developed by reaction milling for electrical-resistance welding". J.Mater Procces Tech, Publicación en prensa: Abril 2005