

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**ESTUDIO DE LA SOLDABILIDAD DE LA UNIÓN DISIMILAR DE UN  
COBRE CON 5 % DE Zn CON ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller:

**Ricardo André Ramos Llerena**

**ASESOR: Dr. Ing. Paul Pedro Lean Sifuentes**

Lima, Diciembre de 2013

## RESUMEN

Debido a la poca práctica en el soldeo y obtención de uniones disimilares (materiales de diferente composición química y propiedades mecánicas), los conocimientos sobre estos tipos de uniones son muy reducidos en comparación con las uniones similares. El problema principal de este tipo de uniones es que las características de cada unión son muy particulares según los metales bases que se quieran unir y el material de aporte que se use.

En el presente trabajo se estudió la soldabilidad de una unión disimilar formada por una aleación de Cu-5Zn y acero estructural ASTM A36, ambos de 3,0 mm de espesor. El proceso de soldeo empleado fue SMAW. Luego de ensayos previos, se obtuvieron uniones soldadas con propiedades mecánicas satisfactorias empleando como aportes (electrodos) ECuSn-A (Cu-6Sn) y ECuSn-C (Cu-9Sn-3Ni).

Las uniones soldadas obtenidas con ambos aportes, fueron ensayadas a tracción, rompiendo en el metal Cu-5Zn. Estas uniones presentan una resistencia máxima a tracción promedio que varía entre el 80% y 84% de la resistencia del metal base Cu-5Zn. Las uniones obtenidas con el aporte ECuSn-C alcanzan una resistencia a la tracción de 243 MPa; mientras que, las uniones obtenidas con el aporte ECuSn-A logran alcanzar 234 MPa. Los valores de elongación (ductilidad) obtenidos a través del ensayo de tracción muestran que con ambos aportes se alcanzan valores muy similares (22 %). De los ensayos de microdureza Vickers realizados, se aprecia que no existe mayor diferencia en los valores de dureza encontrados en ambas ZACs y metales de aporte.

De acuerdo a los resultados encontrados en la presente tesis, se recomienda el empleo del aporte ECuSn-C (Cu-9Sn-3Ni) para las uniones soldadas mediante el proceso SMAW entre el acero estructural ASTM A36 y la aleación Cu-5Zn, ambos de 3,0 mm de espesor. Este aporte presenta un costo que es un 8% menor que el aporte ECuSn-A (Cu-5Sn); además, que las uniones presentan un mejor acabado superficial.

A mis padres y familia  
por su incondicional apoyo y confianza.



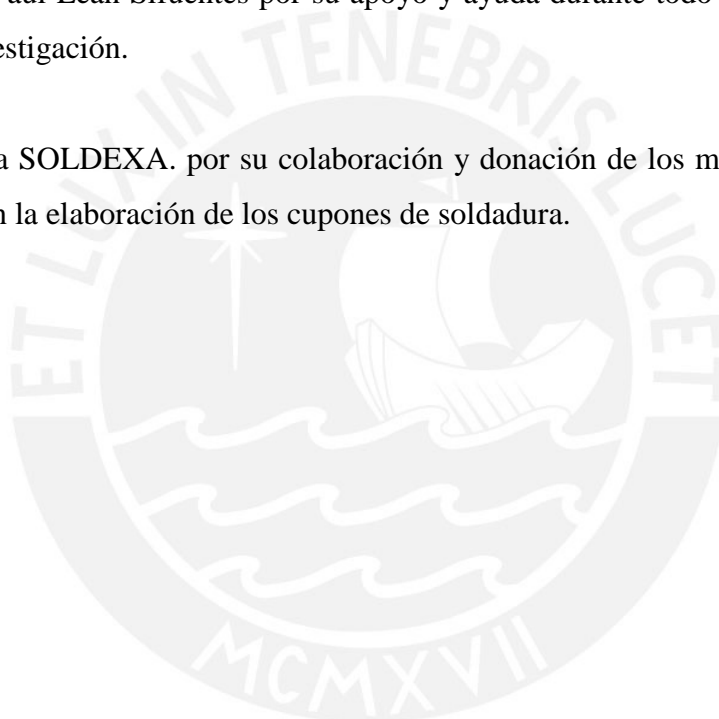
## AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Manufactura por las facilidades proporcionadas para elaborar los cupones de soldadura y recomendaciones recibidas.

Al personal del Laboratorio de Materiales por su ayuda y consejos en la etapa de experimentación de esta tesis.

Al Dr. Ing. Paul Lean Sifuentes por su apoyo y ayuda durante todo el desarrollo de la presente investigación.

A la empresa SOLDEXA. por su colaboración y donación de los materiales de aporte necesarios en la elaboración de los cupones de soldadura.



## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE.....	3
1.1. Acero al Carbono.....	3
1.1.1. Microestructuras.....	3
1.1.1.1. Ferrita $\delta$ .....	4
1.1.1.2. Ferrita $\alpha$ .....	5
1.1.1.3. Cementita.....	5
1.1.1.4. Austenita ( $\gamma$ ).....	5
1.1.1.5. Perlita.....	6
1.1.1.6. Bainita.....	7
1.1.1.7. Martensita.....	7
1.1.2. Clasificación del acero según su porcentaje de carbono.....	7
1.1.2.1. Aceros de bajo carbono.....	7
1.1.2.2. Aceros de medio carbono.....	8
1.1.2.3. Aceros de alto carbono.....	8
1.1.3. Denominación según normas para acero al carbono y de baja aleación....	8
1.1.4. Acero Estructural.....	9
1.1.4.1. Características.....	10
1.1.4.2. Soldabilidad.....	11
1.2. Cobre.....	15
1.2.1. Generalidades.....	15
1.2.1.1. Aleaciones del cobre.....	16
1.2.2. Propiedades del Cobre Puro.....	18
1.2.3. Aplicaciones del Cobre.....	20
1.2.4. Soldabilidad del Cobre.....	21
1.2.4.1. Generalidades.....	21
1.2.4.2. Cobre Soldado Bajo Proceso GTAW.....	22
1.2.4.3. Cobre Soldado Bajo Proceso GMAW.....	24
1.2.4.4. Cobre Soldado Bajo Proceso SMAW.....	25
1.3. Uniones Disimilares.....	27
1.3.1. Introducción.....	27
1.3.2. Aspectos a Considerar al Desarrollar una Unión Disimilar.....	27
1.3.2.1. Rangos de Temperatura de Fusión.....	27
1.3.2.2. Conductividad Térmica.....	28
1.3.2.3. Expansión Térmica.....	29
1.3.3. Unión Acero con Cobre.....	29
1.3.3.1. Recomendaciones.....	30
1.3.3.2. Aplicaciones.....	31

CAPÍTULO II: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	32
2.1. Elaboración de cupones de soldadura.....	32
2.1.1. Características del material base.....	32
2.1.2. Equipamiento de soldadura.....	32
2.1.2.1. Máquina de soldadura SMAW.....	32
2.1.3. Consumibles.....	33
2.1.4. Cupones de soldadura realizados.....	35
2.1.5. Ejecución de uniones.....	36
2.1.5.1. Elaboración de cupones.....	36
2.1.5.2. Tipo de juntas.....	36
2.1.5.3. Limpieza de bordes.....	37
2.1.5.4. Procedimiento de soldadura.....	37
2.2. Técnicas de caracterización de las uniones.....	39
2.2.1. Caracterización mecánica.....	39
2.2.1.1. Ensayo de tracción.....	39
2.2.1.2. Ensayo de microdureza Vickers.....	41
2.2.1.3. Ensayo de doblado.....	44
2.2.2. Caracterización microestructural.....	45
2.2.2.1. Metalografía.....	45
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
3.1. Elaboración de cupones de soldadura.....	47
3.2. Inspección visual.....	47
3.3. Ensayo de tracción.....	48
3.3.1. Materiales base.....	48
3.3.2. Cupón de soldadura 1.....	49
3.3.3. Cupón de soldadura 2.....	50
3.3.4. Cupón de soldadura 3.....	51
3.3.5. Discusión de los resultados de los ensayos de tracción.....	52
3.4. Ensayo de microdureza Vickers.....	54
3.4.1. Cupón de soldadura 1.....	54
3.4.2. Cupón de soldadura 2.....	55
3.4.3. Cupón de soldadura 3.....	57
3.5. Ensayo de doblado.....	59
3.6. Metalografía.....	60
3.7. Factor económico.....	61
CONCLUSIONES.....	62
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	64

## INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad se ha tratado de unir elementos metálicos entre ellos, un método usado en la edad media consistía en calentar el metal con la ayuda de una fragua y después golpear con un martillo los metales uno encima de otro hasta que los dos elementos se junten. En el año 1800, Sir Humphry Davy descubrió el arco eléctrico y con este hallazgo se produjo una serie de mejoras y descubrimientos que ampliaron los conocimientos sobre la ciencia de la soldadura.

En la industria moderna se emplea ampliamente las uniones soldadas; ya sea en máquinas, estructuras, etc. La gran ventaja de una buena unión soldada es el hecho que permite juntar dos partes o piezas que terminan siendo un solo componente que es tan o más resistente como si fuera uno solo. Esto permite una gran cantidad de opciones de fabricación. Sin embargo no todos los materiales se comportan igual (debido a su composición química y microestructura) por lo que cada material presentará diferentes características y comportamiento a la hora de ser soldado.

En la gran mayoría de casos de uniones soldadas que se realizan en la industria se tratan de uniones similares, es decir ambos metales bases son los mismos. En las uniones disimilares se debe de elegir un metal de aporte que sea adecuado para ambos metales bases y de manera similar el proceso y parámetros de soldadura. Contar con mayor información sobre las uniones disimilares brindaría una gama de opciones de fabricación muy amplia, pudiendo diseñar un componente que presente propiedades mecánicas completamente diferentes en ciertas partes del mismo.

Dos metales usados en la actualidad son el acero estructural ASTM A36 (acero estructural) y el cobre con 5% de Zn; ambos empleados en diferentes condiciones de trabajo debido a sus propiedades y características. Existe amplia información sobre uniones soldadas similares de estos metales, por lo que creemos que son materiales adecuados para iniciar una investigación sobre las uniones disimilares. En el presente trabajo se estudiará la soldabilidad de la unión de estos metales con la finalidad de obtener recomendaciones para poder realizar uniones satisfactorias, así como incrementar los conocimientos sobre las uniones disimilares. Para poder llegar a conseguir las mencionadas recomendaciones se debe comparar propiedades y

características entre cobre y acero estructural ASTM A36, se estudiará la estructura de la zona afectada por el calor y el baño fundido a través de ensayos y se analizará las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos.

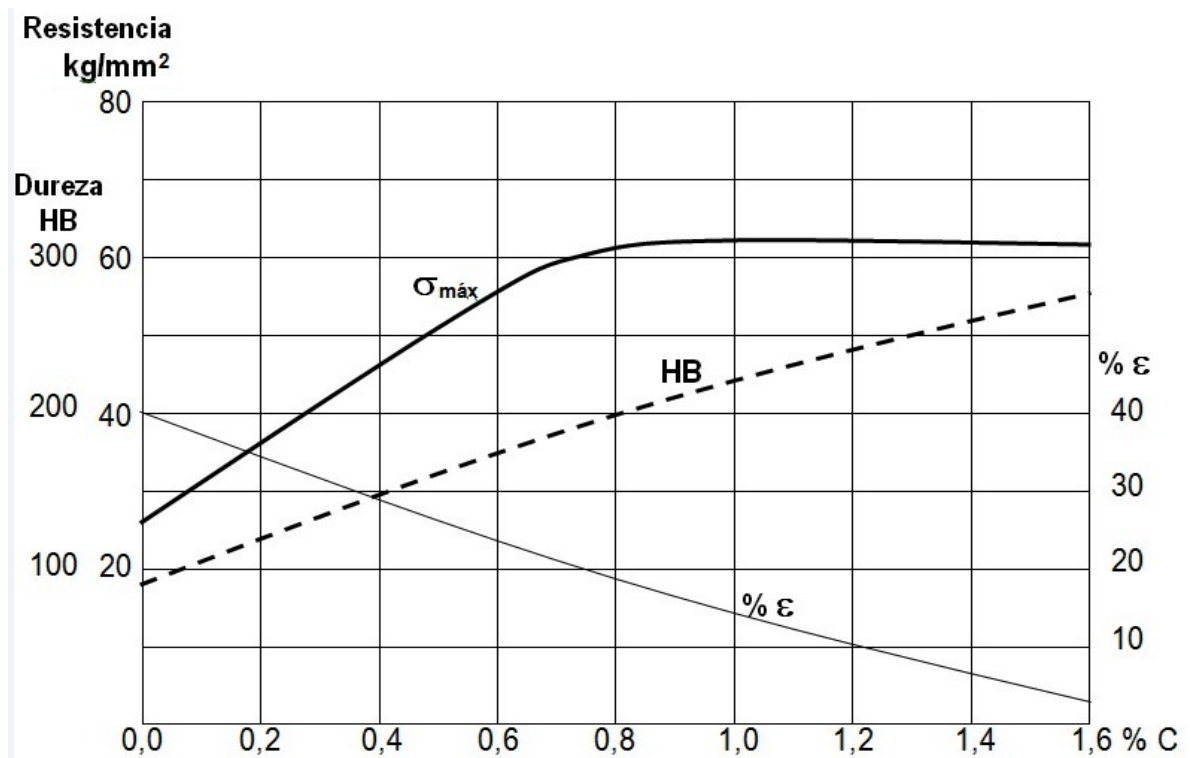




## 1. ESTADO DEL ARTE

### 1.1. ACERO AL CARBONO

El acero al carbono es una aleación ferrosa, basado en hierro y carbono. En esta aleación el carbono proporciona la resistencia y dureza; mientras que el hierro, la ductilidad. Con pequeñas variaciones del porcentaje en peso del carbono las propiedades cambian considerablemente en estado de equilibrio como se muestra en la figura 1.1.



**Figura 1.1.** Cambio de las propiedades mecánicas según el contenido de carbono [1]

El acero es ampliamente usado en el mundo en muchos rubros y en diversas maneras como aceros al carbono, aceros de alta aleación y aceros de baja aleación.

#### 1.1.1. Microestructuras

La figura 1.2 muestra el diagrama de fases de las aleaciones Fe-C, las cuales se obtienen cuando la aleación es enfriada lentamente o en equilibrio.

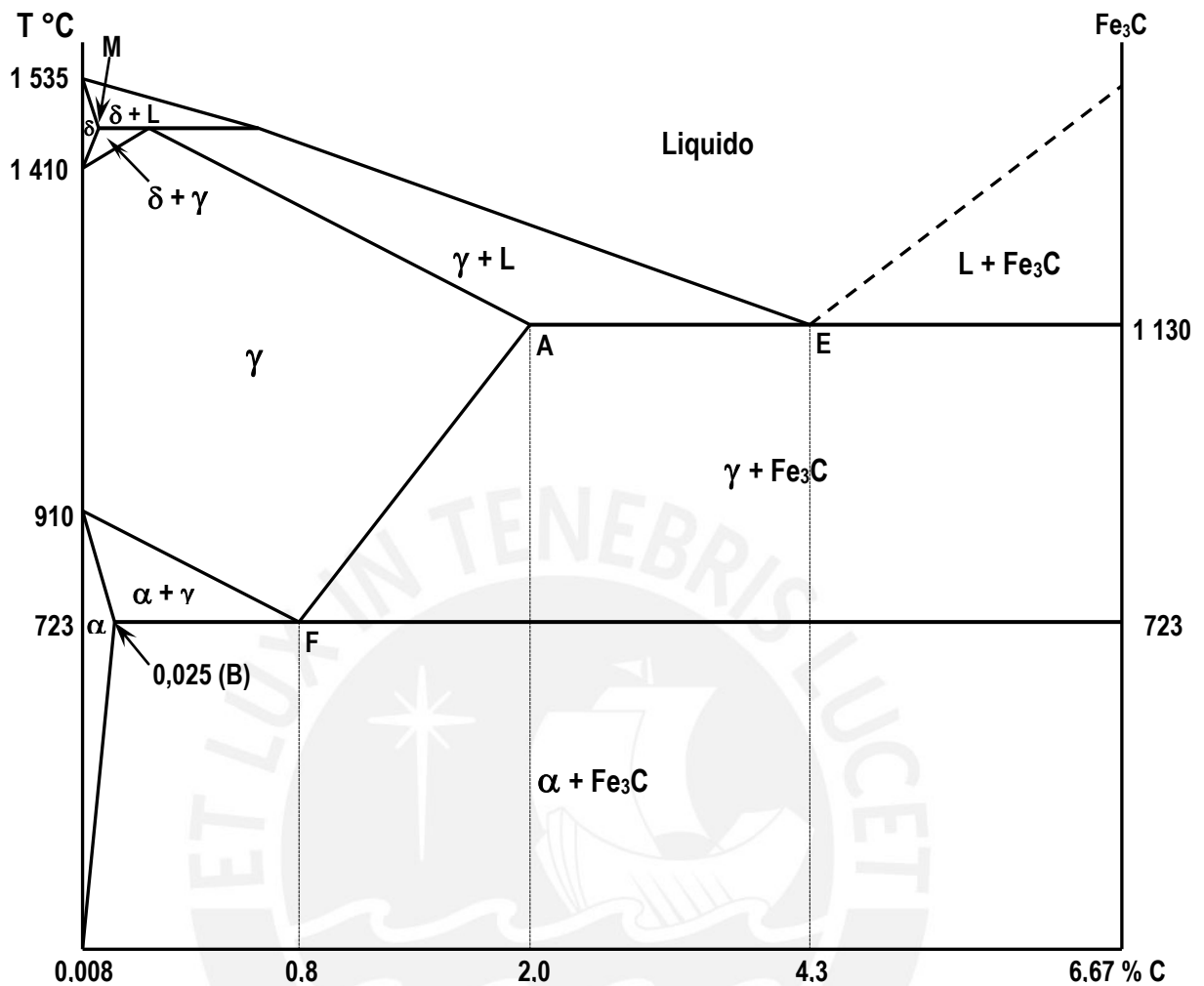


Figura 1.2. Diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C [1]

Para un contenido de 2.0% C se encuentra la división entre acero y hierro fundido. El punto eutectoide, F en la figura 1.2, se encuentra en 0.8% C el cual marcará una clasificación del acero que se mencionará más adelante.

Las fases que posee el acero en estado de equilibrio (enfriamiento muy lento) son 4: ferrita  $\alpha$  y ferrita  $\delta$ , austenita ( $\gamma$ ) y cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), la formación de estas fases dependerá de la temperatura y del contenido de carbono.

#### 1.1.1.1. Ferrita $\delta$

Es una solución sólida de carbono en una matriz de Fe  $\delta$  (cúbica centrada en el cuerpo), la soldabilidad del carbono en esta fase es muy reducido, llegando a un máximo de 0,1% C a 1495°C.

Debido a las altas temperaturas en las que aparece esta fase, resulta difícil tenerla en equilibrio a temperatura ambiente, así se use técnicas de temple muy severas. Por este motivo se tiene poca información sobre sus propiedades. Esta fase no es primordial para poder realizar un estudio correcto del acero.

#### **1.1.1.2. Ferrita $\alpha$**

La ferrita  $\alpha$  de manera análoga a la ferrita  $\delta$  es una solución sólida intersticial de carbono en Fe  $\alpha$  cúbico centrado en el cuerpo. Al poder tenerla en equilibrio a temperatura ambiente en aceros con menos de 0,8% C se conoce más datos en comparación al Fe  $\delta$ .

El Fe  $\alpha$  solo puede disolver hasta 0,025% C a 723°C, es la fase del acero con menos cantidad de carbono por lo tanto tendrá la mayor ductilidad con un alargamiento de rotura de hasta 35%, baja resistencia (280 MPa) y baja dureza de 90 unidades Brinell.

#### **1.1.1.3. Cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )**

Como se puede apreciar de su fórmula química, la cementita es una fase que posee hierro y carbono, siendo el último 6,67% del peso total. Al ser la fase con mayor cantidad de carbono la convierte en la más dura y frágil del acero. Tiene una dureza de 750 unidades Brinell, una resistencia a la tracción de 35 MPa y ductilidad nula.

#### **1.1.1.4. Austenita ( $\gamma$ )**

Es una solución sólida del acero y es la más densa. La matriz es de hierro  $\gamma$  (cúbico centrada en las caras) y puede llegar a tener a 1130°C un porcentaje de 2% de carbono.

En el diagrama de fase se aprecia que la austenita solo se encuentra estable a temperaturas sobre 723°C, y tiene granos de forma poliédrica. Si se enfría lentamente la austenita se transforma en ferrita y cementita.

Las anteriores fases son las que presenta el acero en equilibrio y también los tipos de microestructura que puede presentar el acero; sin embargo, no son todas. En el diagrama de equilibrio existe una microestructura la cual se llama perlita y fuera del equilibrio encontramos a la martensita y la bainita.

### 1.1.1.5. Perlita

Es un microconstituyente que está formado por ferrita y cementita. Estas dos fases forman láminas intercalando una de cementita con una de ferrita formando así la perlita, debido a que es la combinación de la fase más blanda y la más dura genera una microestructura con buenas propiedades mecánicas.

La perlita tiene un 88% de peso en ferrita y 12% en cementita; siendo el contenido medio de carbono de 0,8%C; este valor de porcentaje es el punto eutectoide. La perlita es estable a temperatura ambiente. Los aceros con menos de 0,8%C se denominan aceros hipoeutectoides y presentan a temperatura ambiente una microestructura de ferrita con perlita como se muestra en la figura 1.3, los aceros de más de 0,8%C son aceros hipereutectoides y su microestructura esta formada por cementita y perlita a temperatura ambiente; y para el acero de 0,8%C es el acero eutectoide y su microestructura es 100% perlita.

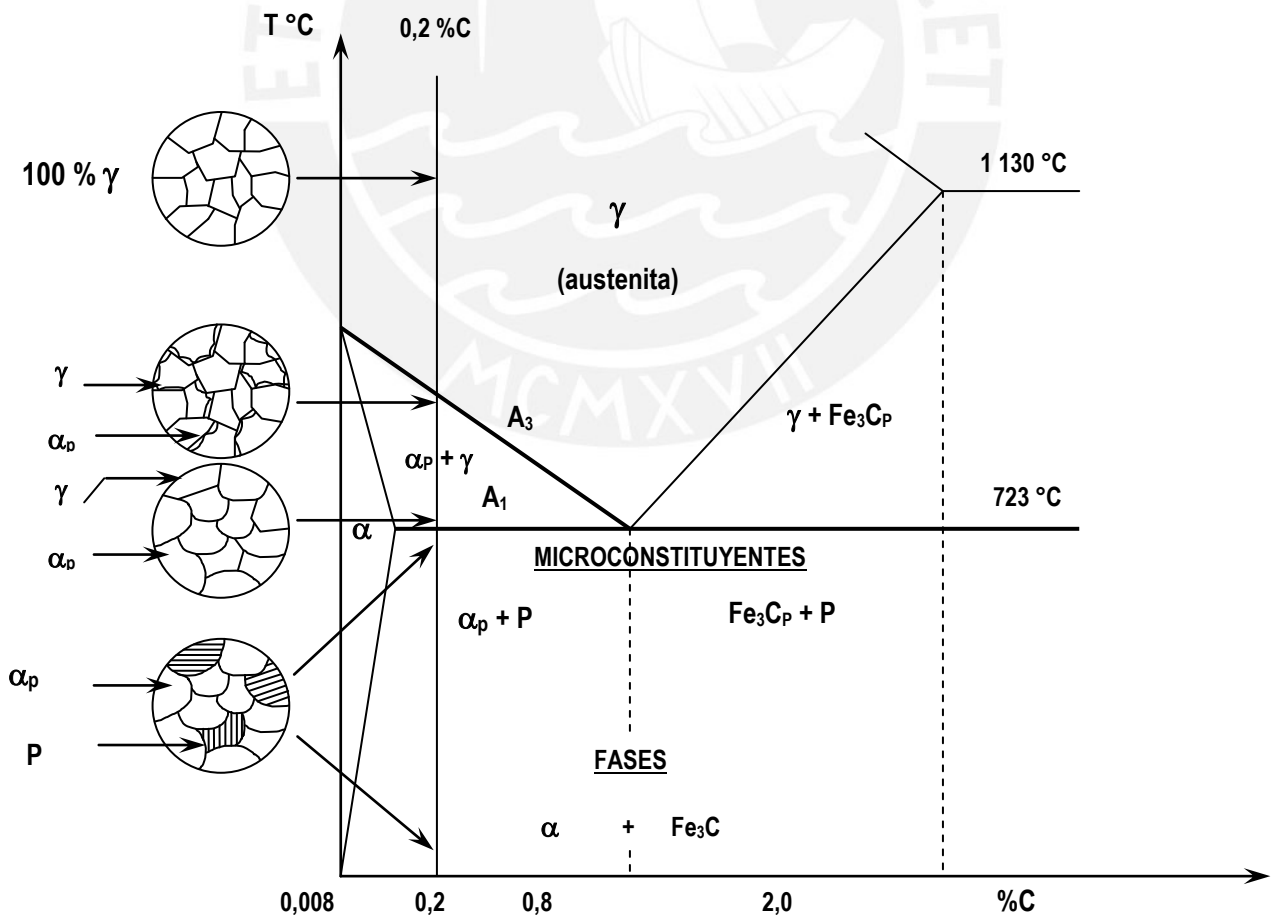


Figura 1.3. Microestructura de un acero de 0,2% C [1]

Las distancias entre las laminas que componen la perlita (ferrita + cementita) pueden variar entre 400 nm (perlita gruesa) hasta 250 nm (perlita fina), esta distancia afecta las propiedades de la perlita siendo más dura cuando es fina. A mayor velocidad de enfriamiento la perlita que se presenta será más fina.

#### **1.1.1.6. Bainita**

Es una microestructura del acero fuera del equilibrio. Existen dos tipos de bainita, la bainita superior que aparece a partir de la transformación de la austenita entre 550°C y 230°C, su microestructura se asemeja a una pluma de ave y, la inferior entre los 400°C y 250°C es de forma acicular muy semejante a la martensita.

#### **1.1.1.7. Martensita**

Es otro microconstituyente que se obtiene a partir de una transformación de la austenita en condiciones fuera del equilibrio (enfriamiento rápido). Debido a que la transformación de la martensita es rápida se le considera una transformación sin difusión. La microestructura de la martensita es acicular como la de la bainita inferior, es una solución sólida sobresaturada de carbono con una estructura tetragonal. La martensita es bastante dura y muy frágil, por lo que se debe evitar su formación en la soldadura del acero. Su dureza depende del contenido de C. Se debe tener en cuenta que los procesos de soldeo por arco eléctrico presentarán una mayor posibilidad de formación de martensita en aceros con mayor contenido de C y de elementos aleantes.

### **1.1.2. Clasificación del acero según su porcentaje de carbono**

Debido a que el carbono es el elemento más importante de la mayoría de aceros, se puede clasificar a los aceros según el contenido en porcentaje en peso del carbono.

#### **1.1.2.1. Aceros de bajo carbono**

Son los aceros que poseen un porcentaje de carbono hasta de 0,3%C. Se usan en carrocerías de automóviles, planchas, en elementos estructurales como perfiles, barras corrugadas, alambres y otros.

### 1.1.2.2. Aceros de medio carbono

Contienen de 0,3 a 0,6% de carbono. Se emplean en la fabricación de elementos de maquinas para minas y naval, engranajes, cigüeñales, levas y ejes; equipos para remover tierra.

### 1.1.2.1. Aceros de alto carbono

Su contenido de carbono es de entre 0,6 a 2% de carbono. Se usan para fabricar herramientas, muelles, ruedas de ferrocarriles, matrices y rodillos de laminación.

### 1.1.3. Denominación según normas para aceros al carbono y de baja aleación

Debido a la gran cantidad de tipos de acero que existen, era necesario designarlos según un código para poder ordenarlos.

La institución AISI (American Iron and Steel Institute) junto con SAE (Society of Automotive Engineers) realizaron un sistema para catalogar los aceros usando un número de entre cinco y cuatro dígitos; serán cinco dígitos si el acero contiene más de 1% de carbono y de cuatro cuando presente menos de 1% de carbono. Es decir: AISI XXXX (acero con menos de 1% de carbono) y AISI XXXXX (acero con más de 1%).

En los primeros dos dígitos se trata de referenciar los elementos aleantes principales que posee el acero. Por ejemplo:

10 = Acero al carbono.

12 = Acero al carbono, con alto azufre, alto fósforo.

15 = Acero al manganeso (% Mn > 1,0 % en peso).

40 = Acero al molibdeno (% Mo = 0,25%, en peso).

Los restantes tres o dos dígitos expresan el porcentaje de carbono multiplicado por 100. Es decir si el porcentaje de carbono es 0,1%C será 10, si tiene 1,3%C será 130.

Entonces un acero al carbono con 0,4% de carbono se denominará como AISI 1040.

Otra norma muy usada en el Perú es la norma alemana DIN (Deustcher Industrie Normen). En la norma DIN los aceros al carbono se clasifican tomando como referencia



si son adecuados para tratamientos térmicos o si son aceros estructurales. Para los que son tratables térmicamente se usa la siguiente nomenclatura:

- DIN CXX; C = acero al carbono adecuado para tratamiento térmico
- DIN CKXX; CK = acero al carbono con bajo contenido de impureza (0.025% máx. de P y 0,035% máx. de S).

En ambos casos XX viene a ser el porcentaje de carbono  $XX = \%C \times 100$ . Los ejemplos se muestran en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1.** Ejemplos de la norma DIN para aceros adecuados para tratamientos térmicos

Acero	Resistencia a la tracción(MPa)*	%C	Carbono Equivalente (%)
DIN CK 35	480-670	0,35	0.56
DIN CK 55	700-890	0,55	0.78
DIN C 60	Min. 670	0,60	0.83

\*. Para diámetros de 17-100 mm

Para denominación de los aceros estructurales se mostrará la norma antigua DIN 17006 debido a que es la que se emplea en la actualidad en el Perú. La norma usa la siguiente nomenclatura:

- DIN St XX; St = representa la propiedad mecánica resistencia a la tracción; XX el valor mínimo de esta propiedad en kg/mm<sup>2</sup>. Los ejemplos se muestran en la tabla 1.2.

**Tabla 1.2.** Ejemplos de la norma DIN para aceros estructurales

Acero	Resistencia a la tracción (kg/mm <sup>2</sup> )	Carbono Equivalente (%)
DIN St 37	37-49	0.40
DIN St 45	45-57	0.44
DIN St 52	52-63	0.48

#### 1.1.4. Acero estructural

Es un acero al carbono con menos de 0,3% de carbono, tiene buena ductilidad y es muy adecuado para fabricar elementos estructurales como perfiles, barras, etc. y también para elementos de unión estructurales como pernos, tuercas, etc. El bajo contenido de

carbono y la ausencia de elementos aleantes hacen que tenga una mala templabilidad por lo que estos aceros tienen buena soldabilidad, aumentando la gama de diseños realizables con estos materiales. A continuación se detallará más sobre el acero estructural normalizado por la norma ASTM A36, el cual es el material a usar en este trabajo de tesis.

#### 1.1.4.1. Características

##### - Composición química del acero ASTM A 36

El acero ASTM A36 se puede adquirir en forma de perfiles, planchas y barras; cada presentación tiene una composición con ligeras diferencias, en la tabla 1.3 se muestra las composiciones químicas nominales del acero ASTM A 36 según su presentación y espesor.

La figura 1.3 muestra un esquema de la microestructura de un acero ASTM A36 a temperatura ambiente y enfriado en condiciones de equilibrio, por lo que se asume que presentará una microestructura constituida por ferrita y perlita.

**Tabla 1.3.** Composición química del ASTM A36 [2]

Producto	Perfil					
	Perfiles			Planchas		
Espesor mm	Todos	Hasta 20	De 20 a 40	De 40 a 65	De 65 a 100	De 100 más
Carbón máx %	0.26	0.25	0.25	0.26	0.27	0.29
Manganeso %	...	...	0.8-1.2	0.8-1.2	0.85-1.2	0.85-1.2
Fosforo máx %	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Azufre máx %	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Silicio %	0.40 máx.	0.04 máx.	0.04 máx.	0.15-0.4	0.15-0.4	0.15-0.4
Cobre min %	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

##### - Tratamientos térmicos y mecánicos

El acero ASTM A36 no gana gran dureza al templearlo. Debido a que hay tratamientos mecánicos en los cuales se deforma el material en frío el acero ASTM A36 puede ser sometido a un recocido para aliviar tensiones residuales. Un tratamiento de recocido



esferoidal no es útil en este acero debido a que sería demasiado blando y de muy baja dureza y resistencia mecánica.

- Propiedades mecánicas

En la tabla 1.4 se muestra los valores de las propiedades nominales del acero ASTM A36.

**Tabla 1.4.** Propiedades mecánicas del acero ASTM A36 [2]

Planchas, perfiles y barras	
Resistencia a la tracción, ksi [MPa]	58 - 80 [400 - 550]
Resistencia a la fluencia, ksi [MPa]	36 [250]
Planchas y barras	
Elongación en 8 pulgadas [200 mm] min, %	20
Elongación en 2 pulgadas [50 mm] min, %	23
Perfiles	
Elongación en 8 pulgadas [200 mm] min, %	20
Elongación en 2 pulgadas [50 mm] min, %	21

En la tabla 1.4 se puede apreciar que es un material dúctil, lo cual lo hace adecuado para el ámbito estructural de ahí su nombre comercial “Acero estructural ASTM A36”.

#### 1.1.4.2. Soldabilidad

La soldabilidad es la facilidad que tiene un material a ser soldado y de la tenacidad (en comparación al metal base) que tenga la unión soldada final.

Es muy común que los aceros se empleen en uniones soldadas; sin embargo, no todos los aceros presentan la misma soldabilidad; esta propiedad del acero depende del %C que tenga, cuanto menos %C posea mejor soldabilidad presentará; también se debe tener en consideración los elementos aleantes, debido a que a mayor contenido se espera que disminuya la soldabilidad del acero

Un parámetro que existe para poder catalogar a los aceros según su soldabilidad es el carbono equivalente, tratando de relacionar la dureza que tenga la zona afectada por el calor (ZAC) con el %C y los elementos aleantes, si se tiene demasiada dureza en la

ZAC ocasionará problemas como fisuras, fragilidad entre otros. Este incremento de dureza en la ZAC es ocasionada por la templabilidad que tiene el acero, pues generará fácilmente una transformación martensítica, la cual vuelve frágil al acero.

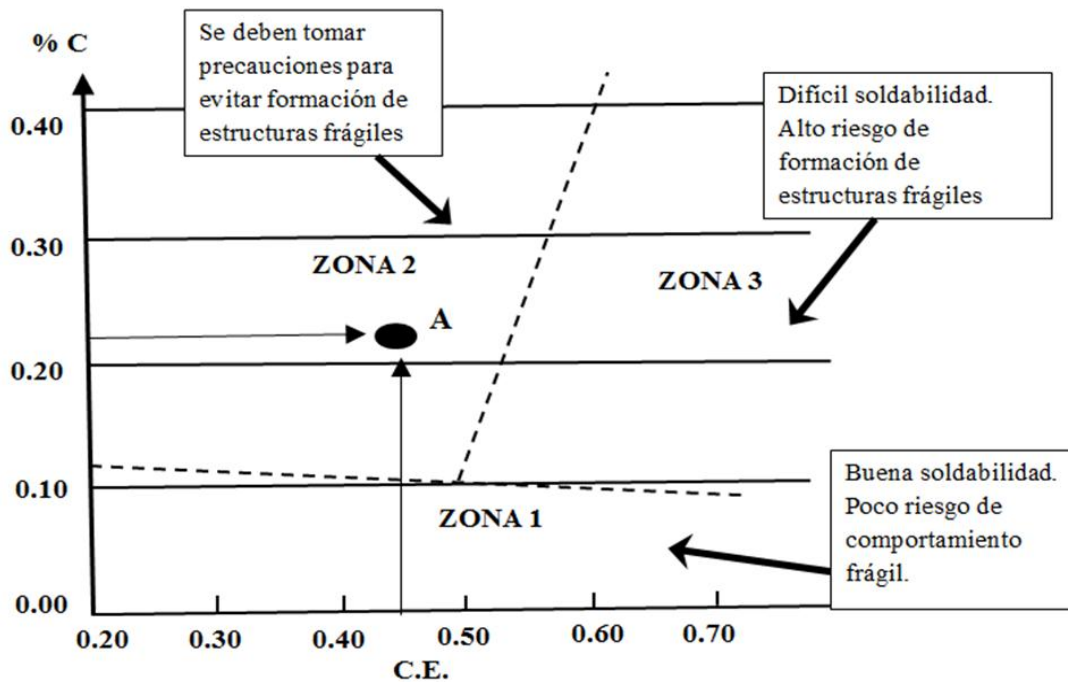
Debido a las diferentes composiciones químicas que pueden tener los aceros al carbono y aleados, se necesita de un parámetro que pueda servir para comparar esta soldabilidad de manera referencial. A este parámetro se le denomina carbono equivalente (CE), debido a que como se mencionó antes el carbono es el elemento que más influye en la soldabilidad. El CE es una fórmula que se basa en las cantidades de los componentes químicos en peso del acero. Dependiendo del valor de CE, también es posible obtener recomendaciones para el precalentamiento del acero y así obtener mejores resultados en la unión.

Para hallar el CE existen varios métodos, el más empleado es el propuesto por el IIW (Instituto Internacional de Soldadura), la ecuación para calcular el carbono equivalente es la siguiente:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} (\%)$$

Usando la anterior formula se obtiene que el carbono equivalente (CE) en promedio del acero ASTM A36 es de 0,43 lo cual según la figura 1.4 lo ubica en la zona 2. Zona que muestra que el acero presenta una adecuada soldabilidad con cierto control en la temperatura de precalentamiento.

El uso del CE no es algo completamente preciso, pues solo analiza la composición química y deja de lado la microestructura, el enfriamiento usado, el espesor del material, la configuración de la unión, etc. Sin embargo, resulta sumamente útil para tener una referencia sobre la soldabilidad.



**Figura 1.4.** Gráfica que muestra la relación del CE con la soldabilidad y el C% [3]

a) Procesos de soldadura

El acero ASTM A36 se puede soldar bajo diferentes procesos de soldadura de arco eléctrico. Entre los procesos más conocidos tenemos:

- GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)
- GMAW (Gas Metal Arc Welding)
- SMAW (Shielded Metal Arc Welding)
- FCAW (Flux Core Arc Welding)
- SAW (Submerged Arc Welding)

En las soldaduras del acero ASTM A36 mediante arco eléctrico manual con electrodos revestidos (SMAW), se recomienda el precalentamiento en espesores mayores a 25 mm, el precalentamiento deberá mantenerse durante todo el proceso para evitar fisuras.

Con respecto al enfriamiento, debido a que el acero ASTM A36 tiene la posibilidad de formar martensita acicular si se enfría muy rápidamente se recomienda un enfriamiento al aire y en caso de piezas grandes recurrir a un recubrimiento de arena o cal para evitar que la velocidad de enfriamiento aumente.

## b) Metales de aporte

A continuación en la tabla 1.5 se muestra los elementos de aporte comunes en la industria peruana para este acero y su respectivo proceso de soldadura.

**Tabla 1.5.** Metales de aporte que se pueden utilizar para soldar el ASTM A36

Proceso	Clasificación	Norma	Posición de soldadura
SMAW	E6010	AWS A5.1	1,2,3,4G
SMAW	E7024	AWS A5.1	1G,2F
SMAW	E7018-1	AWS A5.1	1,2,3,4,5 G
GMAW	ER70S-6	AWS A5.18	1,2,3,4,5 G
GMAW	ER80S-D2	AWS A5.28	1,2,3,4,5 G
GTAW	ER70S-6	AWS A5.18	1,2,3,4,5 G
FCAW	E71T-1C	AWS A5.20	1,2,3,4,5 G
FCAW	E70T-4	AWS A5.20	1G,2F
SAW	EL 12 (ALAMBRE) F7A0 (FUNDENTE)	AWS A5.17:	1G,2F



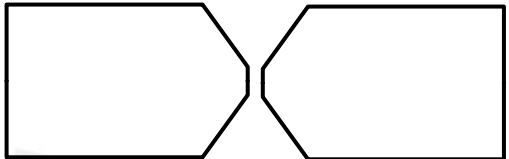
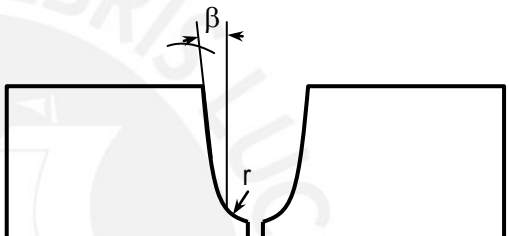

1G = plana; 2G = horizontal; 3G = vertical; 4G = sobrecabeza; 2F = En ángulo 90°

El proceso de soldadura más empleado en la soldadura de este acero es el SMAW debido a su versatilidad y costos menores.

## c) Tipo de juntas más usuales

Las juntas usadas en la soldabilidad del acero ASTM A36 se muestran en la tabla 1.6 y éstas se eligen en función del espesor.

**Tabla 1.6.** Las especificaciones de las juntas más usadas para el acero ASTM A36

Junta a tope	Medidas	Esquema de la junta
De bordes rectos	$e < 4\text{-}5 \text{ mm}$ $s = 0 - 1 \text{ mm}$	
En V	$5 \text{ mm} < e < 12 \text{ mm}$ $s = 1,5 - 2 \text{ mm}$ $t = 2 - 3 \text{ mm}$ $\alpha = 60^\circ - 70^\circ$	
En X ó doble V	$12 \text{ mm} < e < 20 \text{ mm}$ $s = 1 - 3 \text{ mm}$ $t = 1,5 - 2,5 \text{ mm}$ $\alpha = 60^\circ$	
En U	$12 \text{ mm} < e < 20 \text{ mm}$ $s = 1,5 - 2,0 \text{ mm}$ $t = 2 - 3 \text{ mm}$ $\beta = 15^\circ$ $r = 4 - 8 \text{ mm}$	
En doble U	$e > 20 \text{ mm}$ $s = 1,5 - 2,5 \text{ mm}$ $t = 2 - 3 \text{ mm}$ $\beta = 10^\circ$ $r = 4 - 8 \text{ mm}$	

e: espesor, s: separación, t: talón,  $\alpha$ : ángulo del canal,  $\beta$ : ángulo del chaflán, r: radio

## 1.2. COBRE

### 1.2.1. Generalidades

El cobre es un metal muy usado por el hombre, se le conoce antes que el hierro, tiene un punto de fusión (1084 °C). Es uno de los pocos metales que se usan casi completamente puro hasta 99,95% de pureza mediante refinación electrolítica que se emplean en su mayoría como conductores eléctricos debido a su alta conductividad.

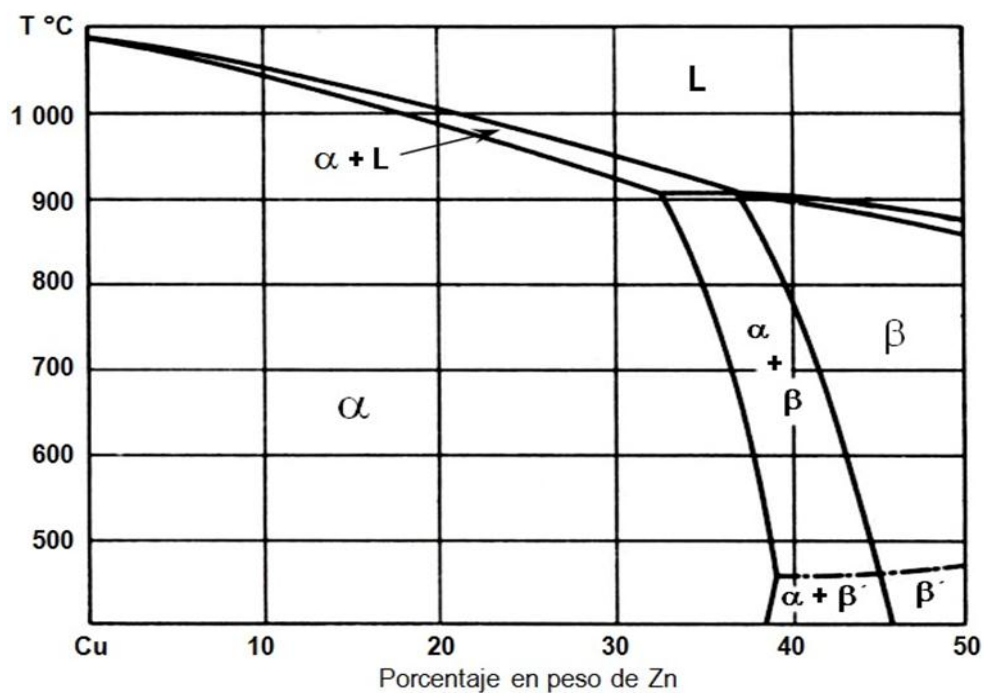
### 1.2.1.1. Aleaciones del cobre

El cobre puede alearse con otros elementos para cambiar ciertas propiedades como la resistencia mecánica, para ser empleado en la industria en diferentes campos. La resistencia y dureza aumenta con el contenido de elementos aleantes.

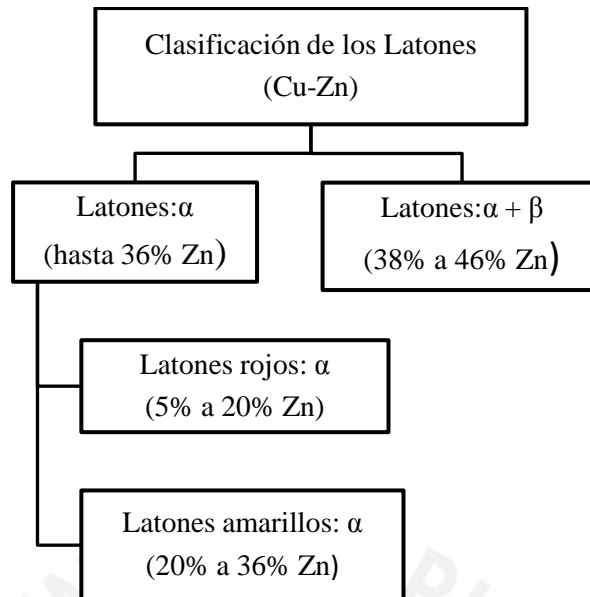
Las aleaciones más comunes del cobre son las siguientes:

#### a) Latones

Son aleaciones de cobre con zinc y otros elementos en pequeñas proporciones como aluminio o estaño. Como se aprecia en la figura 1.5 las aleaciones cobre con zinc pueden presentar una fase ( $\alpha$ ) o dos fases ( $\alpha+\beta$ ) a temperatura ambiente y lo que lleva a una clasificación de los latones que se muestra en la figura 1.6.



**Figura 1.5.** Muestra el diagrama de fase del Cu Zn [1]



**Figura 1.6.** Muestra un cuadro con la clasificación de los latones

Los latones alfa tienen hasta 36% de zinc y solo presentan la fase alfa que posee buenas propiedades de trabajo en frío y buena resistencia a la corrosión. Esta categoría del latón puede subdividirse en:

- Latón alfa rojo: Posee entre 5 y 20 % de zinc, se diferencia del amarillo al tener mejor resistencia a la corrosión
- Latón alfa amarillo: Posee entre 20 y 36% de zinc, presentan mejores propiedades en la deformación en frío.

Los latones bifásicos (alfa más beta) contienen entre 38% y 46 % de zinc. Al contrario que los latones alfa, estos latones no son recomendados para trabajos en frío, pero si son adecuados para el trabajo en caliente debido a que la fase beta es más dura que la alfa a temperatura ambiente y a altas temperaturas la fase beta posee buena plasticidad.

#### b) Bronces

Son aleaciones de cobre con otro elemento que no sea zinc o níquel y que posea hasta 12% del elemento aleante. Los bronce más comunes son los siguientes:

- Bronces al estaño: Antiguamente estos eran los únicos bronce que se conocían y también se les denominaba bronce al fósforo ya que se debe usar una pequeña cantidad de fósforo (entre 0,01 y 0,5%) como desoxidante. Contiene entre 1% y



11% de estaño; de los bronce más comunes es el que posee “peores” propiedades mecánicas.

- Bronces al silicio: Suelen tener menos de 5% de Si; es la aleación de cobre que alcanza mayor resistencia a la tracción por deformación en frío siendo comparable con los aceros de medio carbono, además mantiene una resistencia a la corrosión similar al cobre puro.
- Bronces al aluminio: Contienen entre 4 y 11% de aluminio. Pueden ser unifásicos (menos de 7,5 de Al) o bifásicos (entre 7,5 y 11% Al). Los bifásicos al tratarse térmicamente pueden presentar estructuras similares a la de los aceros al carbono.
- Bronces al berilio: Pueden contener entre 0,6 y 2% de Be. Tiene la característica de tener buena resistencia mecánica, la que se consigue mediante tratamiento térmico, y no producir chispa. Este bronce es más caro que los mencionados anteriormente.

Todas las aleaciones del cobre han sido codificadas mediante el sistema de UNS (Unified Numbering System), usado el código C1XXXX al C7XXXX para aleaciones forjadas y C8XXXX al C9XXXX para aleaciones fundidas.

### **1.2.2. Propiedades del cobre puro**

Debido a que el cobre presenta diversas aleaciones, para poder dar un mejor contexto de las propiedades mecánicas del cobre puro a continuación se presenta la tabla 1.7 con las propiedades mecánicas principales del cobre puro y otras aleaciones.

Las propiedades mecánicas no son las únicas propiedades que son significativas en un material. A continuación se hará un listado de otras características del cobre puro.



**Tabla 1.7.** Propiedades mecánicas de aleaciones de cobre comunes [4]

Material	Resistencia a la tracción (ksi) [MPa]	Resistencia a la fluencia (ksi) [MPa]	% de elongación	Mecanismo de endurecimiento
Cu puro, recocido	30.3[209]	4.8 [33]	60	Ninguno
Cu comercialmente puro, recocido a un tamaño de grano grueso	32 [220]	10 [69]	55	Solución sólida
Cu comercialmente puro, recocido a un tamaño de grano fino	34 [235]	11 [76]	55	Tamaño de grano
Cu comercialmente puro, trabajado en frío 70%	57 [393]	53 [365]	4	Endurecimiento por deformación
Cu-35%Zn recocido	47 [324]	15 [103]	62	Solución sólida
Cu-10%Sn recocido	66 [455]	28 [193]	68	Solución sólida
Cu-35%Zn trabajado en frío	98 [676]	63 [434]	3	Solución sólida + endurecimiento por deformación
Cu-2% Be envejecido	190 [1310]	175 [1200]	4	Endurecimiento por envejecimiento
Cu- Al templado y revenido	110 [758]	60 [413]	5	Reacción martensítica
Bronce al manganeso fundido	71 [490]	28 [193]	30	Reacción eutectoide

a) Densidad

La densidad del cobre es de  $8,94 \text{ g/cm}^3$ , aproximadamente tres veces la del aluminio (razón principal por la que se usa aluminio en los cables de alta tensión).

b) Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del cobre es de  $58,108 \times 10^6 \text{ S/m}$ , la cual es ligeramente menor al de la plata (metal con mejor conductividad eléctrica), pero debido a costos se usa el cobre. Se emplea al cobre de alta pureza con recocido como estándar en conductividad eléctrica siendo catalogado con 100% IACS (International Annealed Copper Standard), con este estándar se compara las conductividades eléctricas de los demás materiales.

c) Resistencia a la corrosión

El cobre es resistente a la oxidación de agua dulce y salada, soluciones alcalinas y otras sustancias químicas orgánicas. Sin embargo, el cobre se corroe fácilmente ante soluciones de amonio y sulfuros.

d) Conductividad térmica

El cobre posee una conductividad térmica de  $400 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ , lo cual es significativamente elevada y entra en el grupo de conductores térmicos junto a casi todos los metales. Posee un valor de conductividad térmica de casi el doble que el aluminio y es ligeramente inferior que la plata, pero por motivos de encarecimiento de la plata, el cobre es más utilizado que la plata en tubos de intercambiadores de calor y otros elementos de similar aplicación.

Durante el soldeo y debido a su elevada conductividad térmica será necesario precalentar y garantizar una buena fusión

e) Otras propiedades

- Punto de fusión =  $1084 \text{ }^\circ\text{C}$
- Punto de ebullición =  $2927 \text{ }^\circ\text{C}$
- Calor específico =  $385 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{kg})$
- Bactericida

### **1.2.3. Aplicaciones del cobre**

Las diversas propiedades que presenta el cobre lo hacen muy versátil a la hora de usar, especialmente debido a su conductividad térmica, eléctrica y resistencia a la corrosión; las cuales difieren en gran medida de los aceros al carbono.

Usos del cobre:

- En la industria automovilística se usa para construir el radiador debido a su conductividad térmica.
- Al alearlo con níquel da un material con mejor resistencia a la corrosión a ambientes marinos por lo cual se emplea en el campo naval.

- Se usa cobre en tuberías y recipientes de agua de transporte y consumo humano debido a su propiedad bactericida que neutraliza y elimina las bacterias a diferencia del acero inoxidable que no posee esa propiedad
- Para fabricar cables y conectores eléctricos
- En ciertas estructuras y estatuas que se encuentren al intemperie
- En instrumentos musicales
- En tubos de intercambiadores del calor

#### **1.2.4. Soldabilidad del cobre**

##### **1.2.4.1. Generalidades**

La mayoría del cobre y aleaciones pueden ser unidos mediante soldadura por arco eléctrico, se prefiere los que emplean gas protector (GTAW, GMAW); sin embargo, se puede emplear el proceso por arco eléctrico manual con electrodo revestido (SMAW) para aplicaciones no críticas.

Se usa gases de protección inertes como helio, argón o mezclas de ambos en procesos de soldadura como GTAW y GMAW. Por lo general se usa el argón para espesores menores a 3,3 mm y/o la aleación sea de baja conductividad térmica. El helio o mezclas de 75%helio-25%argón es recomendado para aleaciones con alta conductividad térmica. Como se menciona se puede usar otros procesos como SMAW usando electrodos revestidos de un diámetro de entre 2,4 mm a 4,8 mm. Se recomienda el uso del proceso SMAW en posición plana, para otras posiciones se deberá emplear el proceso GTAW o GMAW. El proceso GMAW usando fuente pulsante y electrodos de diámetro pequeño es adecuado para posiciones verticales y sobrecabeza en ciertas aleaciones de cobre.

Debido a la alta conductividad térmica del cobre se recomienda usar precalentamiento, y una secuencia de soldeo adecuada, entre otros para evitar distorsiones en la soldadura. En la tabla 1.8 se muestra diferentes aleaciones de cobre y una valorización cualitativa de su soldabilidad en ciertos procesos.

**Tabla 1.8.** Muestra los distintos tipos de aleación del cobre y una valorización de la unión soldada según el proceso de soldadura a usar [5]

Aleación	No UNS	SMAW	GMAW	GTAW	Soldadura por resistencia	Soldadura con estaño
ETP Cobre	C1100- C11900	NR	A	A	NR	B
Cobre libre de oxígeno	C102000	NR	B	B	NR	E
Cobre desoxigenado	C12000 C123000	NR	E	E	NR	E
Berilio-Cobre	C17000- C17500	A	B	B	A	B
Cadmio/Cromo-Cobre	C16200 C18200	NR	B	B	NR	B
Latón rojo-85%	C23000	NR	B	B	A	E
Latón bajo-80%	C24000	NR	B	B	B	E
Latón de cartucho	C26000	NR	A	A	B	E
Latón plomado	C31400- C38590	NR	NR	NR	NR	B
Bronces fosforosos	C50100- C52400	A	B	B	B	E
Cobre-Níquel 30%	C71500	A	B	B	B	E
Cobre-Níquel 10%	C70600	B	E	E	B	E
Níquel-Plata	C75200	NR	B	B	A	E
Bronce aluminio	C61300 C61400	B	E	E	B	NR
Bronce al silicio	C65100 C65500	A	E	E	B	B

E = Excelente      B = Bueno      A = Adecuado      NR = No Recomendado



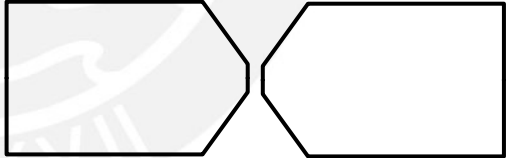
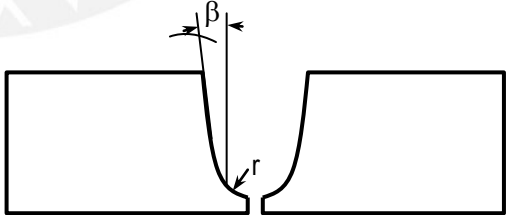
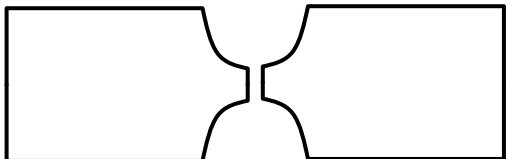
#### 1.2.4.2. Cobre soldado bajo proceso GTAW

El proceso GTAW es recomendado para soldar espesores de cobre que no superen los 3.2 mm, se sugiere que este proceso de soldadura se ejecute en posición plana; aunque si se eligiera otra posición de soldadura, el uso de corriente pulsada favorecería la unión. Para espesores inferiores a 1.5 mm se usa argón como gas protector y helio para espesores superiores a 1.5 mm. El helio permite una mayor penetración o mayor

velocidad de soldadura o ambos que el argón. El precio del helio es superior al del argón. El argón da mejor estabilidad de arco y mayor facilidad de inicio del arco. Se suele usar mezclas de 75% helio – 25% argón para obtener un balance adecuado entre las características beneficiosas de ambos gases de protección. Las amplias oscilaciones del arco eléctrico deben ser evitadas, pues deja expuesta a la atmosfera las orillas de cada cordón. Se recomienda precalentamientos con el proceso GTAW debido a la gran conductividad térmica del cobre.

En el mercado nacional se cuenta con el material de aporte ERCu según AWS A5.7. Se recomienda el uso de este material de aporte en cobre libre de oxígeno y en posición 1G, 2G, 3G y 4G. El diseño de la unión a usar depende de las necesidades, en la tabla 1.9 se muestran los más recomendados variando la configuración según el espesor.

**Tabla 1.9.** Muestra tipos de uniones que se pueden realizar en el proceso GTAW en el cobre [5]

Junta a tope	Medidas	Esquema de la junta
De bordes rectos (A)	$s_{\max} = 3,5 \text{ mm}$	
En V (B)	$s = 3,2 \text{ mm}$ $t = 2,4 \text{ mm}$ $\alpha = 70^\circ - 80^\circ$	
En X ó doble V (C)	$s = 3,2 - 4 \text{ mm}$ $t = 2,4 - 3,2 \text{ mm}$ $\alpha = 80^\circ - 90^\circ$	
En U (D)	$s = 1,6 - 2,4 \text{ mm}$ $t = 1,6 - 2,4 \text{ mm}$ $\beta = 15^\circ$ $r = 3,2 \text{ mm}$	
En doble U (E)	$s = 1,6 - 2,4 \text{ mm}$ $t = 1,6 - 2,4 \text{ mm}$ $\beta = 15^\circ$ $r = 3,2 \text{ mm}$	

e: espesor, s: separación, t: talón,  $\alpha$ : ángulo del canal,  $\beta$ : ángulo del chaflán, r: radio

Dependiendo el espesor a soldar del cobre se puede generar ciertas recomendaciones (usando las uniones en la tabla 1.9), en la tabla 1.10 se muestra estas recomendaciones relacionadas con los parámetros de soldeo.

**Tabla 1.10.** Muestra datos adicionales según el espesor de cobre a soldar [5]

Espesor (mm)	Tipo de junta	Gas protector	Diámetro de electrodo de tungsteno (mm)	Diámetro de varilla (mm)	Temperatura Pre calentamiento (°C)	Corriente (A)	# pases
0.3–0.8	A	Ar	0.5-1	----	----	15-60	1
1-1.8	A	Ar	1-1.6	1.6	----	40-170	1
2.3-4.8	B	He	2.4	2.4-3.2	38	100-300	1-2
6.4	B	He	3.2	3.2	93	250-375	2-3
9.6	D	He	3.2	3.2	232	300-375	2-3
12.7	C	He	3.2-4	3.2	343	350– 420	4-6
16 a más	E	He	4.8	3.2	399	400-475	Los necesarios

#### 1.2.4.3. Cobre soldado con GMAW

Se recomienda el uso de una mezcla para los gases protectores de 75% helio – 25% argón para uniones soldadas de cobre, debido a que el pre calentamiento necesario a emplear será menor, la penetración de la unión es mejor y las tasas de deposición son más altas. El argón es usado para espesores menores a 6.4 mm.



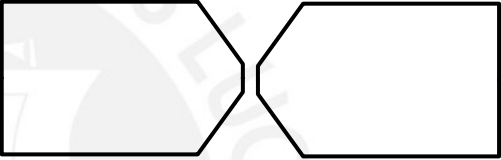
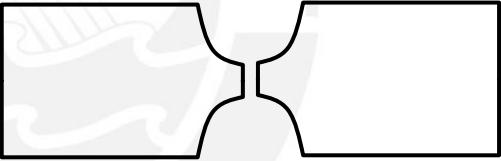
El electrodo ERcu es muy recomendado en el proceso GMAW para cobre. Este electrodo posee la mejor conductividad que otro electrodo de cobre debido a que posee pocos elementos aleantes. La unión resultante posee menor conductividad que el material base.

Se debería usar estrechas oscilaciones con transferencia tipo spray para depositar el metal de aporte. Amplias oscilaciones puede ocasionar oxidación en los bordes del cordón. Usar corriente pulsante mejora la forma del cordón y operatividad para soldaduras de cobre en otras posiciones que la posición plana. La configuración de la



unión para este proceso son diversas y se muestran en la tabla 1.11, así mismo según el espesor se muestran ciertas recomendaciones en la tabla 1.12. usando los tipos de uniones mostrados en tabla 1.11.

**Tabla 1.11.** Muestra las posibles uniones cuando se usa el proceso GMAW en el cobre [5]

Junta a tope	Medidas	Esquema de la junta
De bordes rectos (A)	$s = 2,4 \text{ mm}$	
En V (B)	$s = 0 \text{ mm}$ $t = 1,6 - 2,4 \text{ mm}$ $\alpha = 70^\circ - 80^\circ$	
En X ó doble V (C)	$s = 2,4 - 3,2 \text{ mm}$ $t = 2,4 \text{ mm}$ $\alpha = 80^\circ - 90^\circ$	
En doble U (D)	$s = 0 \text{ mm}$ $t = 3,2 \text{ mm}$ $\beta = 30^\circ$ $r = 6,4 \text{ mm}$	

e: espesor, s: separación, t: talón,  $\alpha$ : ángulo del canal,  $\beta$ : ángulo del chaflán, r: radio

En el mercado nacional se encuentra como material de aporte ERcCuMnNiAl según AWS A5.7; este material de aporte puede ser soldado en la posición 1G y 2G.

#### 1.2.4.4. Cobre soldado con SMAW

El cobre puede ser soldado con electrodos revestidos ECu. La calidad de la unión soldada con el proceso SMAW no es tan alta como en GTAW o GMAW. Para obtener los mejores resultados con SMAW se debe tener como metal base un cobre desoxidado.

**Tabla 1.12.** Muestra datos en el proceso GMAW según el espesor a soldar [5]

Espesor (mm)	Tipo de junta	Gas protector	Diámetro de electrodo (mm)	Velocidad de pase (mm/s)	Temp. Prealent. (°C)	Corriente (A)	# pases
Hasta 4.8	A	Ar	1.1	6-8	38-93	180-250	1-2
6.4	B	75% He-25%Ar	1.6	4-8	93	250-325	1-2
9.6	B	75% He-25%Ar	1.6	2-5	218	330-400	1-3
12.7	C	75% He-25%Ar	1.6	3-6	316	330-400	2-4
16 a más	D	75% He-25%Ar	1.6	2-5	427	330-400	Los necesarios
16 a más	D	75% He-25%Ar	2.4	3-6	427	500-600	Los necesarios

Se puede usar electrodos revestidos con algún elemento aleante como ECuSi o ECuSn. Se usa estos electrodos debido a que se puede soldar el cobre a otro metal como por ejemplo el acero. La corriente que debe usarse es corriente directa con polo positivo en el electrodo. En posición plana se debe precalentar el material base a 260°C o más para espesores mayores a 3,3 mm.

Los tipos de unión para este proceso son similares al del proceso GTAW. Los metales de aporte para este proceso se muestran en la tabla 1.13.

**Tabla 1.13.** Muestra los metales de aporte en el proceso de SMAW

Clasificación	Norma	Composición química* (%)
Ecu	AWS A5.6	0.009 Mn/ 0.2 Fe
ECuSn-A	AWS A5.6	0,1 Si/ 0,3P/ 6 Sn
ECuSn-C	AWS A5.6	0,3 Mn/ 0,09P/ 2,5 Ni/ 8.5 Sn
ECuAl-A2	AWS A5.6	7.5 Al/ 1.5 Fe

\*. Lo restante en porcentaje es Cu



### 1.3. UNIONES DISIMILARES

#### 1.3.1. Introducción

Se les conoce como uniones disimilares a las uniones de soldadura de metales disimilares, estos metales son los que son químicamente y/o metalúrgicamente diferentes. Una combinación de metales disimilares comprende dos o tres metales bases y uno o más metales de aporte.

Una combinación de metales disimilares con diferentes propiedades mecánicas, químicas y físicas pueden dar dificultades a la hora de soldarlos y al poner la unión en servicio. La unión resultante será diferente de cualquiera de sus componentes, por lo que seleccionar el proceso de soldadura, parámetros y material de aporte debe hacerse de manera cuidadosa y realizar las correspondientes pruebas antes de usarse en servicio. El número, tipo, cantidad y arreglo metalúrgico de las fases que se producen por el soldeo marcarán las propiedades mecánicas que tendrá la unión. Las fases pueden ser una solución sólida como níquel y cobre, un componente intermetálico como  $\text{CuAl}_2$  u otros componentes como carburos.

El material de aporte es muy importante en las uniones disimilares, éste debe poder alearse fácilmente con los metales bases sin producir una microestructura sensible a las fisuras. La resistencia de la unión soldada debería ser igual o superior a la del metal base más débil, para evitar que falle en la soldadura.

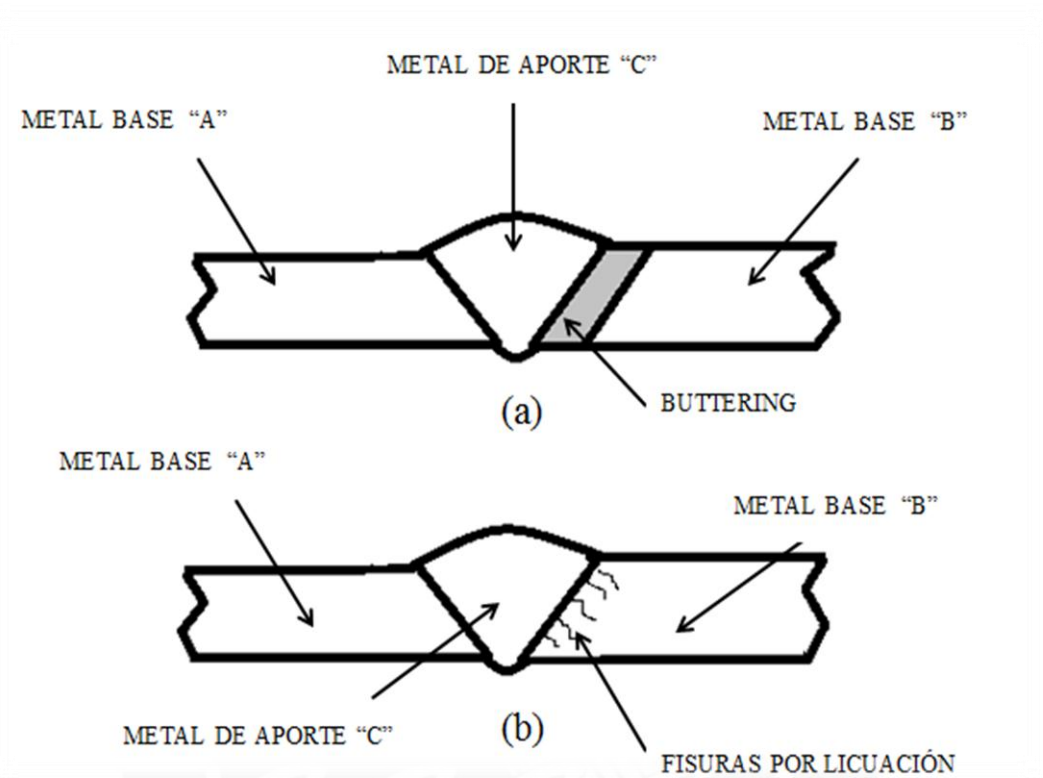
#### 1.3.2. Aspectos a Considerar al Desarrollar una Unión Disimilar

##### 1.3.2.1. Rangos de Temperatura de fusión

Cuando se suelda, los metales bases se funden; por lo que será recomendable que ambos metales bases a soldar tengan un punto de fusión similar para poder emplear procesos de soldadura convencionales. Si las diferencias de puntos de fusión son grandes, el proceso de soldadura se vuelve complicado y quizás no pueda ser soldado por arco eléctrico.

La diferencia de puntos de fusión puede traer fisuras en la zona afectada por el calor en el metal base con menor punto de fusión. Este puede solucionarse depositando una o más capas de metal de aporte con un punto de fusión intermedio sobre el borde a soldar del metal base con menor punto de fusión. Este proceso se conoce como “buttering”. En

la figura 1.7 se muestra un esquema gráfico de una unión con “buttering” y sin “buttering”. Esto evitará la gran diferencia de puntos de fusión de los metales bases.



**Figura 1.7.** Muestra dos uniones. (a) Con “buttering”, (b) sin “buttering” [5]

### 1.3.2.2. Conductividad Térmica

Es importante conocer esta propiedad de los metales bases a soldar, pues esta propiedad está relacionada con la fusión del metal base. Si la diferencia es muy grande el metal base con menor conductividad térmica no transmitirá el calor que se le da y por lo tanto se fundirá; sin embargo, el metal con mayor conductividad térmica transmitirá la mayor parte del calor proveniente del arco eléctrico, por lo que no alcanzará la fusión y esto conllevaría a problemas de falta de fusión en la soldadura.

Para tratar de solucionar esto se debe tener ciertas consideraciones en el proceso de soldadura, como por ejemplo que la fuente de calor sea directamente direccionada hacia el metal con mayor conductividad térmica o que dicho metal sea precalentado antes de empezar el proceso de soldadura. Ambos aspectos tratan de aumentar el calor proporcionado al metal de alta conductividad térmica sin afectar al de baja conductividad térmica y permitiendo una dilución balanceada.

### 1.3.2.3. Expansión Térmica

Significativas diferencias entre coeficientes de expansión térmica produce tensiones en la junta durante los cambios de temperatura, lo cual es muy importante a la hora de poner la unión en servicio.

Es deseable que el metal de aporte posea un coeficiente de expansión térmico promedio entre los valores de dicha propiedad de los metales bases.

En la tabla 1.13 se muestra las propiedades a considerar al momento de diseñar una unión disimilar de algunos materiales usados en la industria, empleando al acero al carbono de referencia para comparar el resto de materiales.

**Tabla 1.13.** Muestra ciertas propiedades de algunos materiales y las compara usando de referencia al acero al carbono [5]

Propiedades	Material					
	Acero al carbono	Cobre	Aluminio	Acero inoxidable austenítico	70Ni-30Cu	76Ni-16Cr-8Fe
Coefficiente medio de expansión térmica	1	1.4	1.9	1.3	1.2	1.1
Conductividad térmica	1	7.8	3.1	0.3	0.5	0.3
Capacidad calorífica	1	0.8	1.9	1	1.1	0.9
Densidad	1	1.1	0.3	1	1.1	1.1
Temperatura de fusión	1	0.7	0.4	0.9	0.9	0.9

### 1.3.3. Unión Acero con Cobre

El hierro es el componente en mayor porcentaje que posee el acero, por lo que será importante el comportamiento que tenga el cobre con este. El cobre y el hierro se mezclan completamente en estado líquido; sin embargo, tienen una solubilidad limitada en estado sólido. Esto produce dos fases de soluciones sólidas, lo cual es favorable pues muestra una ausencia de algún componente intermetálico que pueda ocasionar fragilidad en la microestructura. Tener dos fases de solución sólida puede llegar a causar problemas de corrosión en ciertas aplicaciones.

La dilución del hierro puede disminuir según el proceso de soldadura que se use o usando el proceso de “buttering” depositando una capa de níquel sobre la superficie a soldar del acero o cobre. La actividad superficial del cobre sobre el acero es alta, por lo tanto el cobre atacará al acero por sus límites de granos y producirá fisuras en la zona afectada por el calor. Esto se le conoce como “infiltración”. Por lo que se recomienda evitar la dilución de cobre con acero. Una manera muy efectiva de lograrlo es usando el proceso de “buttering” mencionado anteriormente depositando níquel sobre la superficie de cobre, el cobre tiene una excelente aleación con el níquel en toda proporción produciendo una sola fase de aleación. Las aleaciones de níquel son sencillas de soldar a los aceros al carbono usando material de aporte de aleaciones de níquel.

La conductividad térmica del cobre en relación al del acero es algo importante a considerar, pues el cobre es casi 8 veces mejor conductor térmico que el acero. Esto requiere que el cobre sea precalentado en un rango entre 204 °C a 538°C para minimizar defectos de falta de fusión.

El coeficiente de expansión térmica del cobre es superior al del acero, por lo que durante la soldadura el cobre se dilatará más y puede cerrar la apertura inicial de la unión. Esto también puede generar esfuerzos residuales al terminar de enfriar la unión.

### **1.3.3.1. Recomendaciones**

Puede hacerse un “buttering” sobre el cobre con electrodos ENi-1 o ERNi-1, lo cual deja innecesario un precalentamiento a la hora de soldar, pero necesario para realizar el “buttering”.

Otra opción es realizar el “buttering” sobre el acero con electrodos ECuNi-7 o ERNi-1 y luego soldar al cobre con ECuNi o ERCuNi. Para poder soldar directamente el cobre con el acero se necesitara precalentar el cobre y usar un material de aporte de bronce al silicio (CuSi-A) o níquel (Ni-1) usando procesos de arco eléctrico comunes. Debe tratarse de que la dilución del hierro sea mínima para poder garantizar una buena soldadura.

### 1.3.3.2. Aplicaciones

Debido a que el cobre presenta las propiedades de bactericida y de resistencia a la corrosión de ambientes salinos y húmedos se emplea en la industria alimentaria para evitar que el agua que este en contacto con los alimentos tenga bacterias o residuos de óxido. Por lo que es común encontrar tanques o recipientes de cobre, los cuales pueden ser fijados a estructuras de acero ASTM A36 mediante soldadura para garantizar la estabilidad y hermeticidad del recipiente o tanque.

Por otro lado, unir el cobre con el acero inoxidable mediante soldadura es de utilidad, pues ambos materiales son resistentes a la corrosión, por lo que se puede reparar tanques de cobre antiguo usando acero inoxidable, por lo que la información sobre una junta entre acero ASTM A36 con el cobre es de utilidad para una investigación futura entre cobre y acero inoxidable

Estéticamente el cobre es usado por su color por lo que poder unirse con el acero mediante soldadura puede dar una gama amplia de diseños.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se muestra el procedimiento empleado para la fabricación de los cupones y probetas (segmento del cupón de soldadura extraído para realizar ensayos) de ensayo, así como los procedimientos que se siguieron para la caracterización y determinación de las propiedades de las uniones soldadas y a los materiales base ( acero ASTM A36 y Cu-5Zn).

Los ensayos empleados fueron los de tracción, microdureza Vickers, doblado y análisis metalográfico.

### 2.1. ELABORACIÓN DE CUPONES DE SOLDADURA

#### 2.1.1. Características del material base

Para el presente trabajo, se utilizaron planchas de acero ASTM A36 y de cobre (Cu-5%Zn) desoxidado, ambos de 3 milímetros de espesor.

Se tomaron pequeñas muestras de los materiales base para realizar un análisis químico y conocer los elementos que los constituyen; se realizó el análisis mediante el método de espectrometría de emisión, dicho análisis se encargó a un especialista. Además, se fabricaron probetas de ensayo para determinar la resistencia mecánica, ductilidad y dureza.

#### 2.1.2. Equipamiento de soldadura

##### 2.1.2.1. Máquina de soldadura SMAW

Se eligió el proceso SMAW para soldar los cupones, debido a su gran difusión en el mercado peruano por su versatilidad de posiciones de soldeo y por ser un proceso que requiere equipo y electrodos de menor costo. Otra razón por la que se escogió el proceso SMAW fue debido a que en la literatura revisada y plasmada en el capítulo 1, se aprecia que hay mayor información en los procesos en los que se emplean gases inertes (como Helio y Argón) como protección para el soldeo de metales no ferrosos, por tal motivo al



escoger el proceso SMAW la presente tesis puede contribuir con información poco desarrollado en metales no ferrosos.

El equipo empleado fue una máquina para soldadora portátil marca Miller y modelo XMT 350 CC/CV, se muestra dicho equipo en la figura 2.1. Los datos técnicos de la máquina se muestran en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1.** Datos técnicos

<b>Miller XMT 350 CC/CV</b>	
Voltaje de suministro	3 ~ 230V $\pm$ 15%, 50 / 60 Hz
Fusible	40 A
Cable de conexión (AWG)	3x6 mm <sup>2</sup> (10)
Peso (con cables de suministro)	7.8 kg ( 8,4 kg)
Rango de soldadura	5A / 10,2V – 180A / 17,2V
Eficiencia a máxima corriente	0,75
Corriente nominal 60%	350A / 34 VCD
Clase de protección	IP 23
Dimensiones externas (L x W x H)	400 x 180 x 340 mm



**Figura 2.1.** Máquina soldadora portátil Miller XMT 350 CC/CV [7]

### **2.1.3. Consumibles**

Para la realización de los cupones de soldadura se empleó tres metales de aporte: ECuSn-A, ECuSn-C y ENiFe-CI. Dichos materiales de aporte se escogieron tomando como referencia que no se produzcan compuestos frágiles y/o fases indeseables en los materiales base. Además, que los electrodos presenten estabilidad en el arco y buen

acabado. Los materiales de aporte mencionados son para el proceso SMAW y tienen un diámetro de 3 mm.

En las tablas 2.2, 2.3. y 2.4 se muestran las composiciones químicas de los correspondientes metales de aporte según especificaciones del fabricante.

**Tabla 2.2.** Composición química del ECuSn-A[6]

ECuSn-A (Cu-6Sn)	
Elemento aleante	Porcentaje
Silicio	0,10
Fósforo	0,30
Estaño	6
Cobre	Resto

El material de aporte ECuSn-A se emplea para reparación de cojinetes, chumaceras, bocinas y pines. Se aplica para unir o recubrir piezas de cobre o bronce y en uniones disímiles con aceros y hierro fundido. Aplicar un precalentamiento ayuda a mejorar su desempeño.

**Tabla 2.3.** Composición química del ECuSn-C[6]

ECuSn-C (Cu-9Sn-3Ni)	
Elemento Aleante	Porcentaje
Manganeso	0,30
Fósforo	0,09
Níquel	2 – 3
Estaño	8 – 9
Cobre	Resto

El electrodo ECuSn-C es aplicado en latón y bronce al níquel y también al igual que el ECuSn-A es recomendado para uniones de cobre y aceros. Concede a la unión un notable rendimiento anti desgaste por fricción debido al manganeso que posee.



El material de aporte ENiFe-CI es aplicado en uniones de fundiciones de hierro con aceros, en la cual no es necesario precalentar el hierro fundido.

**Tabla 2.4.** Composición Química del ENiFe-CI[6]

ENiFe-CI	
Elemento Aleante	Porcentaje
Carbono	1,25
Manganeso	0,25
Silicio	0,60
Hierro	42
Níquel	Resto

En la tabla 2.5 se muestran algunas propiedades mecánicas de estos materiales de aporte.

**Tabla 2.5.** Valores de propiedades mecánicas de los materiales de aporte seleccionados

Material de aporte	Resistencia a la tracción (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 2" (%)
ECuSn-A	300 – 350	190 - 245	30 -35
ECuSn-C	300 – 350	145 - 225	28 - 30
ENiFe-CI	500	300 - 500	30

#### **2.1.4. Cupones de soldadura fabricados**

Se fabricaron cuatro cupones de soldadura y en la tabla 2.6 se muestra la disposición de los materiales de aporte en los cupones. La diferencia entre el cupón 1y 3 radica en el amperaje empleado el cual se aprecia en la tabla 2.8.

**Tabla 2.6.** Disposición de materiales de aporte

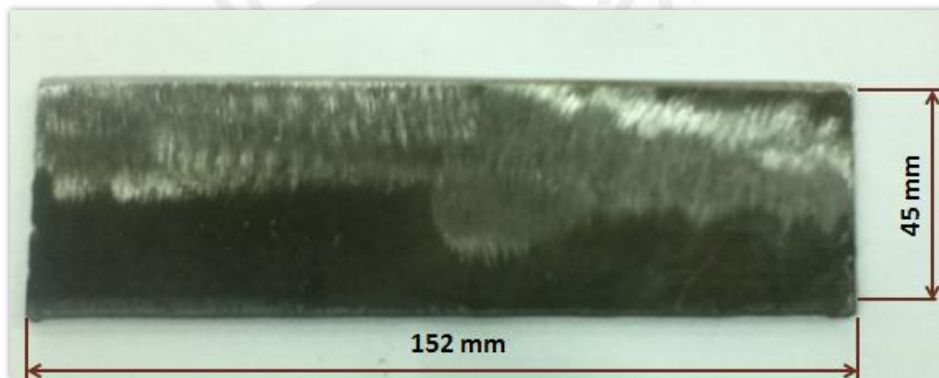
Cupón	Material de aporte
1	ECuSn-A
2	ECuSn-C
3	ECuSn-A
4	ENiFe-CI

En todos los cupones se realizó un proceso de limpieza previo a la soldadura y las uniones soldadas se realizaron en posición plana (1G).

## 2.1.5. Ejecución de uniones

### 2.1.5.1. Elaboración de juntas

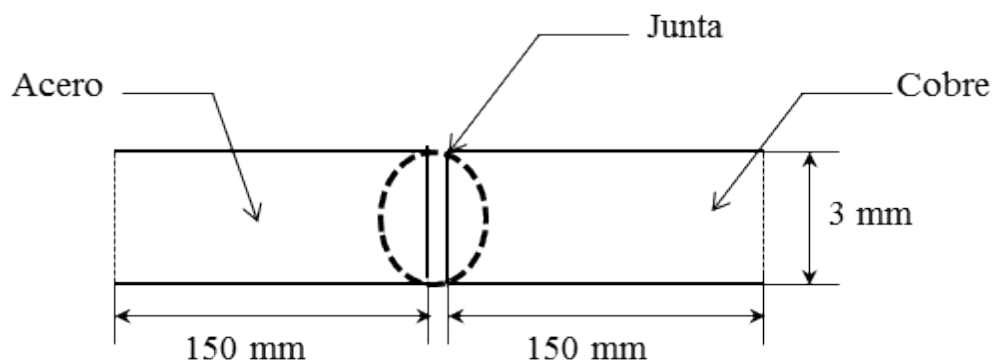
Los cupones de soldadura fueron elaborados a partir de planchas de acero ASTM A36 y de Cu-5Zn desoxidado de 3 mm de espesor. Los cupones estuvieron formados por dos planchas (una de acero y otra de cobre) de 45 mm ancho x 152 mm de largo cada una. En la figura 2.2 se muestra la plancha de acero a ser soldado para formar el cupón 1.



**Figura 2.2.** Plancha de acero a ser soldado del cupón 1

### 2.1.5.2. Tipo de junta

Según lo expuesto en el capítulo 1, el tipo de junta dependerá del espesor, debido al poco espesor que se tiene se eligió una junta a tope, en la figura 2.3 se muestra el esquema de unión a tope con bordes rectos.



**Figura 2.3** Tipo de junta a tope sin previo proceso de buttering

### 2.1.5.3. Limpieza de bordes

Para tener una adecuada fusión entre los metales bases y el metal de aporte se debe tener las superficies a soldar libre de impurezas como óxidos, grasas, etc. Para lograr dicho propósito se empleó una amoladora para el acero y lija para el cobre, con las cuales se removió las impurezas mencionadas. La limpieza se realizó en ambos metales bases y la distancia limpiada fue de 15 milímetros desde el borde de la unión. En la figura 2.4 se muestra la limpieza de borde realizada en el cobre con la lija.



**Figura 2.4.** Plancha de cobre a ser soldada donde se aprecia la limpieza de borde realizada

### 2.1.5.4. Procedimiento de soldadura

Para la experimentación de este tema de tesis se elaboró cuatro cupones de soldadura, todos soldados bajo el proceso SMAW. Como se aprecia en la tabla 2.2 para obtener el cupón 4 se consideró usar el material de aporte ENiFe-CI; sin embargo, este material de aporte no logra una adecuada fusión con el cobre (lo cual se pudo apreciar a la hora de hacer el apuntalamiento), por lo que fue descartado para el resto del estudio.

Debido a que es una unión disímil, prácticamente no existen recomendaciones, por lo que se realizó ensayos previos para ir encontrando que parámetros se adecuaban mejor a la unión.

Un factor importante a considerar para la unión de cobre (Cu-5Zn) con acero ASTM A36 es precalentar el cobre debido a su gran conductividad térmica. El precalentamiento se realizó con un soplete de acetileno, empleando una llama carburada de 70% acetileno y 30% oxígeno, al tener mayor cantidad de acetileno se evita la

oxidación de la unión soldada. Por medios prácticos y simulando condiciones de operación en la industria se precalentó el cobre justo antes de soldar, es decir cuando ambas planchas ya están posicionadas; puesto que en la industria no siempre es fácil calentar una sola parte de la unión y luego moverla en condiciones tales de que no se enfríe rápidamente, lo cual es muy difícil de lograr con el cobre.

Para hacer una medición de la temperatura de precalentamiento alcanzada por el cobre y del acero se usó un pirómetro laser marca Fluke modelo 62; la medición se realizó a 1 cm del borde del canal de soldadura. En la tabla 2.7 se muestran los valores de precalentamiento del cobre y la temperatura que también alcanzó el acero por estar cerca al cobre mientras se precalentó. Esta temperatura alcanzada por el acero es poco significativa pues no producirá ningún cambio de microestructura, la temperatura de austenización para un acero de este porcentaje de carbono es de 723 °C muy lejano a las temperaturas alcanzadas por precalentar el cobre.

**Tabla 2.7.** Temperaturas de precalentamiento

Cupón	Temperatura del cobre (C°)	Temperatura del acero (C°)
1	220	150
2	200	115
3	210	140

La tabla 2.8 muestra los parámetros con los cuales se llevó a cabo los cupones de soldadura.

**Tabla 2.8.** Parámetros de soldadura de los cupones

Cupón	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Velocidad (mm/s)	Material de aporte para la unión	Apertura (mm)	Buttering
1	79-81	19-21	4.1	ECuSn-A	2.5	No
2	81-83	21-23	4.5	ECuSn-C	2.8	No
3	82-84	20-21.5	4.3	ECuSn-A	2.8	No

## 2.2. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS UNIONES

Posterior a la soldadura de los cupones se realizó la inspección visual para ubicar discontinuidades. Como los cupones superaron la inspección visual se procede al corte de los mismos para obtener las probetas para los diferentes ensayos.

### 2.2.1. Caracterización mecánica

#### 2.2.1.1. Ensayo de tracción

##### a) Equipos y materiales usados

- Máquina a tracción: Dicho ensayo se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Materiales, Sección Ingeniería Mecánica, de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Para realizar este ensayo se empleó la máquina de tracción universal marca Zwick Roell modelo Special Metal Testing Machina SP cuya capacidad es de hasta 60 kN en tracción. La máquina de ensayo se muestra en la figura 2.5



**Figura 2.5** Máquina de tracción Zwick Roell Special Metal Testing Machina SP

-Material base: Se fabricaron probetas de los materiales base a soldar para poder conocer el valor de su resistencia a la tracción, para tener como referencia para las probetas de soldadura. Se realizó tres probetas de cada material base, tomando como referencia norma ASTM E8. Las medidas de la sección reducida de la zona calibrada de



estas probetas que luego fueron ensayadas a tracción se muestran en las tablas 2.9 y 2.10, tomando el espesor promedio de tres medidas en todas las probetas.

**Tabla 2.9.** Dimensiones de las probetas de acero ASTM A36  
Acero

Probeta	Acero		
	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
A	6.1	3.09	18.85
B	4.85	3.02	14.65
C	4.97	3.05	15.16

**Tabla 2.10.** Dimensiones de las probetas de Cobre  
Cobre

Probeta	Cobre		
	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
A	4.51	3.03	13.67
B	5.66	3.07	17.38
C	5.92	3.1	18.35

-Probetas de cupones de soldadura: Para poder encontrar el valor de la resistencia de las uniones soldadas se fabricaron tres probetas por cupón de soldadura cuyas medidas se muestran en las tablas 2.11, 2.12 y 2.13. Las probetas fueron confeccionadas según la norma ASTM E8 y se elaboró tres probetas por cupón de soldadura para obtener un resultado más preciso.

**Tabla 2.11.** Dimensiones de las probetas de tracción del cupón 1  
Cobre

Probeta	Cobre		
	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
3 A	4.39	3.42	15.01
3 B	4.65	3.04	14.14
3 C	5.05	3.09	15.60

**Tabla 2.12.** Dimensiones de las probetas de tracción del cupón 2

Probeta	Cobre		
	Ancho	Espesor	Área
	(mm)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )
4 A	4.59	3.12	14.32
4 B	4.96	3.06	15.18
4 C	4.40	3.10	13.64

**Tabla 2.13.** Dimensiones de las probetas de tracción del cupón 3

Probeta	Cobre		
	Ancho	Espesor	Área
	(mm)	(mm)	(mm <sup>2</sup> )
5 A	4.8	3.29	15.79
5 B	5.08	3.12	15.85
5 C	5.00	3.28	16.40

### 2.2.1.2. Ensayo de microdureza Vickers

#### a) Equipos y materiales

- Equipos: Se realizó el ensayo de microdureza Vickers con el equipo Zwick/Roell ZHV, el cual se encuentra en las instalaciones del Laboratorio de Materiales, de la Universidad. En la figura 2.6 se muestra el equipo Zwick/Roell ZHV.

- Probetas: Para poder obtener los valores de microdureza en las uniones soldadas de los cupones de soldadura se cortaron probetas las que luego se pusieron en briquetas para poder ensayarlas correctamente. Con este ensayo se podrá obtener los valores de dureza que presenta la zona afectada por el calor (ZAC) y el baño fundido. En la figura 2.7. se muestra una probeta obtenida del cupón de soldadura “briquetada”.





**Figura 2.6.** Equipo para microdureza Vickers Zwick/Roell ZHV



**Figura 2.7.** Probeta para el ensayo de microdureza

b) Metodología de ensayo

Se empleó la norma ASTM E384 – 11E1 denominada “Método de ensayo estándar para dureza Vickers y Knoop en metales”

Debido a que la probeta se encuentra “briqueteada” no se puede aplicar una carga de más de 3 kgf, pues la resina amortiguará parte de la carga, por ello se realizaron pruebas previas para encontrar un valor adecuado de carga de manera que deje una huella de tamaño aceptable en el cobre y en el acero. Se obtuvo que el valor de la carga de 1 kgf es la más adecuada.

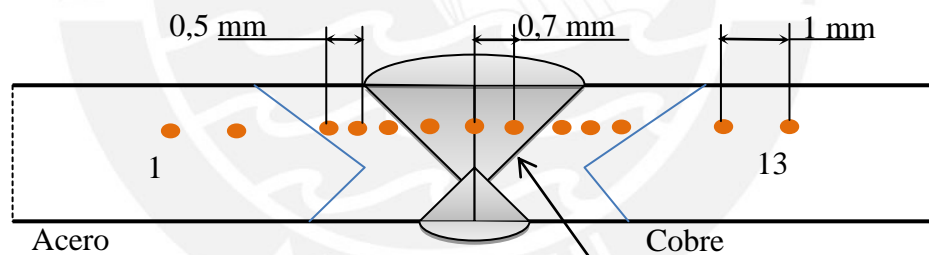
Se realizaron 13 indentaciones en cada probeta distribuidas como se muestra en la tabla 2.14. Se tomó como referencia la norma UNE-EN1043-2, titulada “Ensayos de microdurezas en uniones soldadas”.

Para obtener el resultado de la dureza Vickers, el equipo empleado posee un software que con la ayuda de una computadora permite visualizar la indentación (huella) y poder encerrarla dentro de un rectángulo para que la computadora pueda medir automáticamente las dos diagonales y calcular la dureza.

Para este ensayo se consideró que la distancia entre los centros de dos huellas consecutivas sea mayor a tres veces la diagonal promedio. Las indentaciones dentro de la zona fundida están separadas por 0,7 mm de centro a centro de indentación. Las indentaciones dentro de la zona afectada por el calor en ambos materiales están separadas por 0,5 mm de centro a centro y las indentaciones más cercanas a la línea de fusión se encuentran a menos de 0,5 mm de distancia del centro de la indentación a la línea de fusión. En el material base las indentaciones están separadas por una distancia de 1 mm. En la figura 2.8 se muestra un esquema sobre las indentaciones realizadas.

**Tabla 2.14.** Distribución de indentaciones

Indentación	Lugar de indentación
1	Acero: Material Base
2	Acero: Material Base
3	Acero: Zona Afectada por el Calor
4	Acero: Zona Afectada por el Calor
5	Acero: Zona Afectada por el Calor
6	Baño fundido
7	Baño fundido
8	Baño fundido
9	Cobre: Zona Afectada por el Calor
10	Cobre: Zona Afectada por el Calor
11	Cobre: Zona Afectada por el Calor
12	Cobre: Material Base
13	Cobre: Material Base



Nota:  
La distancia de la línea de fusión a la primera indentación en el material base es de  $< 0,5$  mm

**Figura 2.8.** Esquema de barrido de dureza realizado

### 2.2.1.3. Ensayo de doblado

#### a) Equipo y material utilizado

- Probetas: Se fabricó probetas de los cupones de soldadura con medidas: ancho 5 mm, largo 90 mm y espesor 3 mm; para poder comprobar que el procedimiento y parámetros seleccionados para la soldadura no hayan generado fragilización o faltas de fusión en el

cordón de soldadura con los materiales base. Con este ensayo se evalúa la ductilidad de la unión soldada

- Pin (Punzón): Las planchas soldadas son de un espesor de 3 milímetros, debido a eso se empleó un punzón de diámetro de 13 milímetros, esto en base a la siguiente recomendación:

$$d_p = 4t$$

Donde:

$d_p$  = Diámetro del pin (punzón).

$t$  = Espesor de la plancha.

b) Metodología de ensayo

Con la ayuda del punzón de 13 milímetros se aplicó una deformación plástica a las probetas. Para lograr que una cara de la probeta esté sometida a esfuerzos de tracción el doblado se realiza en un solo sentido. Se preparó probetas para poder ensayar la superficie de la cara y la raíz del cordón de soldadura, dos probetas para ensayar la cara del cordón y dos para la raíz.

## **2.2.2. Caracterización microestructural**

### **2.2.2.1. Metalografía**

a) Equipos y materiales utilizados

- Microscopio con cámara fotográfica: El equipo que posee el Laboratorio de Materiales de la PUCP para realizar metalografía es el microscopio con cámara fotográfica incorporada marca Leiz, en la figura 2.9 se muestra dicho equipo. El microscopio trabaja a 50, 100, 200, 500 y 1000 aumentos.



**Figura 2.9.** Microscopio con cámara Leiz para la caracterización microestructural.

- Probetas: Se tomó una pequeña muestra del cobre con 5% Zn y se colocó en briquetas (similar a las probetas para el ensayo de dureza). El ataque químico usado para el cobre fue cloruro férrico al 10% según ASTM E407 – 70, denominada “Práctica estándar en metalografía de metales y aleaciones”.

El ensayo de metalografía sólo se aplicó al cobre debido a que es el material donde se va a romper la unión y por su composición química era un ensayo complementario para poder caracterizar por completo el material base usado.

No se realizó el ensayo metalográfico a las uniones soldadas debido a que lograr emplear un ataque químico que sea efectivo en el cobre, acero al carbono y al baño fundido requiere de un estudio químico muy amplio y especializado. Además, como las roturas se presentaron en el Cu, este estudio no aportaba mayor información.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. ANÁLISIS QUÍMICOS DE METALES BASE

##### - Materiales base:

En la tabla 3.1 y 3.2 se muestran los resultados de los ensayos químicos realizados a los metales base.

**Tabla 3.1.** Composición química del acero ASTM A36 empleado

Elemento	Porcentaje en peso (%)
C	0.18
Mn	0.40
Si	0.22
P	0.017
S	0.007
Cr	0.02
Cu	0.01

**Tabla 3.2.** Composición química del cobre empleado

Elemento	Porcentaje en peso (%)
Sn	0,02
Pb	0,02
P	0,02
Zn	4.80
Cu	Resto

De estas tablas se puede corroborar que la composición química del acero ASTM A36 se encuentra dentro del rango que exige la norma. Por otro lado, el análisis al cobre empleado muestra que se trata de una aleación de cobre con 5% Zn desoxidado con fósforo (para reducir el porcentaje de óxidos cuprosos en el material y con esto evitar el ingreso de oxígeno a la unión durante el soldeo).

#### 3.2. INSPECCIÓN VISUAL

##### - Cupón de soldadura 1, 2 y 3:

El cupón 2, en el cual se empleó el material de aporte ECuSn-C (Cu-9Sn-3Ni), presenta un mejor acabado superficial tanto en la cara como en la raíz del cordón de soldadura comparado con los cupones 1 y 3 que fueron realizados con el material de aporte ECuSn-A (Cu-6Sn), en la figura 3.1 se muestran dicho cordón de soldadura.





**Figura 3.1.** Raiz del cordón de soldadura del cupón 2

Los cupones 1 y 3 fueron unidos con el material de aporte ECuSn-A (Cu-6Sn) el cual es de fácil aplicación y presenta un arco más estable, la diferencia entre ambos cupones fue el amperaje empleado. Los valores fueron 80 A y 83 A respectivamente, a pesar de ser una variación reducida; la penetración y fluidez aumentaron en el cupón 3.

Debido a que el cobre se dilata más que el acero, la apertura de las uniones casi al final de los cordones se reducía, por lo que la penetración no era igual que al inicio del cordón, por lo que se recomienda realizar un punteado cuidadoso previo y/o embridar fuertemente.

### 3.3. ENSAYO DE TRACCIÓN

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de tracción en probetas de los metales base y en probetas de los tres cupones de soldada. La longitud calibrada en todas las probetas fue de 25 milímetros.

Debido a que son uniones soldadas el parámetro fundamental que proporciona este tipo de ensayo es la resistencia máxima; además, se calculó a manera referencial el valor de elongación.

#### 3.3.1. Materiales base

Se realizaron ensayos a los metales bases tanto al cobre (Cu-5Zn) como al acero ASTM A36. En las tablas 3.3 y 3.4 se muestran los resultados de cada material base. El acero



usado posee un valor de resistencia a la fluencia promedio de 356.6 MPa y una resistencia máxima de 467.8 MPa, en cuanto a su elongación presenta un valor de 25.2%. El cobre presenta una resistencia a la fluencia de 207 MPa, una resistencia máxima de 291 MPa y tiene una elongación de 36%.

**Tabla 3.3.** Resultados del ensayo de tracción del acero ASTM A36 empleado

Probeta	Área inicial	Longitud Final (mm)	Alargamiento (%)	Cargas (kN)		Esfuerzos (Mpa)		Zona de rotura (distancia al centro de la probeta mm)
				Fluencia	Máxima	Fluencia	Máxima	
A 1	18.85	31.3	25.2	6.25	8.32	331.58	441.40	Acero
A 2*	14.65	N.A.	N.A.	5.73	7.23	391.21	493.62	Fuera de marcas
A 3*	15.16	N.A.	N.A.	5.26	7.1	347.00	468.38	Fuera de marcas
Promedio			25.2			356.6	467.8	

\*. Probetas que rompieron fuera de marcas no se consideraron para el promedio de elongación pero si para promedio de esfuerzos

**Tabla 3.4.** Resultados del ensayo de tracción del cobre

Probeta	Área inicial	Longitud Final (mm)	Alargamiento (%)	Cargas (kN)		Esfuerzos (MPa)		Zona de rotura (distancia al centro de la probeta mm)
				Fluencia	Máxima	Fluencia	Máxima	
C 1*	17.15	N.A.	N.A.	3.44	4.97	200.59	289.80	Fuera de marcas
C 2	13.85	33.08	32.32	2.95	4	213.06	288.90	Cobre
C 3	18.35	34.84	39.36	3.8	5.4	207.06	294.25	Cobre
Promedio			35.8			206.9	290.9	

\*. Probetas que rompieron fuera de marcas no se consideraron para el promedio de elongación pero si para promedio de esfuerzos

### 3.3.2. Cupón de soldadura 1

En la tabla 3.5 se muestra los resultados del ensayo de tracción a las probetas del cupón de soldadura 1. Se aprecia que todas rompieron en el cobre alejado de la ZAC. La resistencia máxima promedio es de 234.9 MPa. La elongación promedio que presenta

este cupón de soldadura es de 24.0%. En la figura 3.2 se muestra una probeta de este cupón luego de ser ensayada.

**Tabla 3.5.** Resultados del ensayo de tracción del cupón 1

Probeta	Área inicial	Longitud Final (mm)	Alargamiento (%)	Cargas (kN)	Esfuerzos (MPa)	Zona de rotura (distancia al centro de la probeta mm)
				Máxima	Máxima	
1 A	15.01	31.1	24.6	3.36	223.79	Cobre (8)
1 B	14.14	30.1	20.64	3.51	248.30	Cobre (6)
1 C	15.60	31.8	27.28	3.63	232.63	Cobre (7)
	Promedio		24.0		234.9	Cobre (7)



**Figura 3.2.** Probeta del cupón 3 sometida a tracción. Aumento de 6.5.

### 3.3.3. Cupón de soldadura 2

En la tabla 3.6 se muestra los resultados del ensayo de tracción a las probetas del cupón de soldadura 2. Se aprecia que todas rompieron en el cobre alejado de la ZAC. La resistencia máxima promedio es de 243.3 MPa. La elongación promedio que presenta este cupón de soldadura es de 22.1%. La rotura de las probetas es similar a la figura 3.2.

**Tabla 3.6.** Resultados del ensayo de tracción del cupón 2

Probeta	Área inicial	Longitud Final (mm)	Alargamiento (%)	Cargas (kN)	Esfuerzos (MPa)	Zona de rotura (distancia al centro de la probeta mm)
				Máxima	Máxima	
2 A	14.32	30.9	23.72	3.5	244.40	Cobre (5)
2 B	15.18	30.8	23.48	3.84	253.00	Cobre (7)
2 C	13.64	29.9	19.92	3.17	232.40	Cobre (9)
Promedio			22.1		243.2	Cobre (7)

### 3.3.4. Cupón de soldadura 3

En la tabla 3.7 se muestra los resultados del ensayo de tracción a las probetas del cupón de soldadura 3. Se aprecia que todas rompieron en el cobre alejado de la ZAC. La resistencia máxima promedio es de 233.2 MPa. La elongación promedio que presenta este cupón de soldadura es de 20.4%. En la figura 3.3 se muestra una probeta del cupón 3 traccionada.

**Tabla 3.7.** Resultados del ensayo de tracción del cupón 3

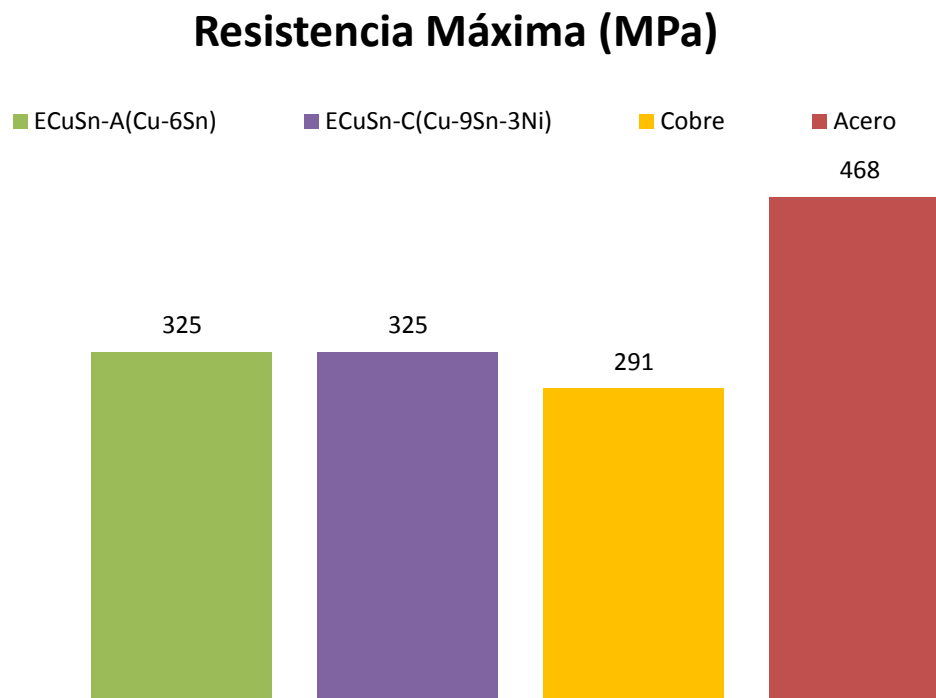
Probeta	Área inicial	Longitud Final (mm)	Alargamiento (%)	Cargas (kN)	Esfuerzos (MPa)	Zona de rotura (distancia al centro de la probeta mm)
				Máxima	Máxima	
3 A	15.79	30	20.32	3.57	226.06	Cobre (8)
3 B	15.85	30.4	21.96	3.9	246.06	Cobre (8)
3 C	16.40	29.9	19.76	3.73	227.44	Cobre (7)
Promedio			20.4		233.2	Cobre (7)

**Figura 3.3.** Probeta del cupón 3 traccionada. Aumento de 6.5.

### 3.3.5. Discusión de los resultados de los ensayos de tracción

En la figura 3.4 se muestra la gráfica donde se compara las resistencias máximas promedio de los materiales base y de aporte usados en los cupones 1, 2 y 3. La resistencia de los materiales de aporte se encuentra entre la resistencia del acero y la del cobre; la unión disimil estudiada debe romper en el cobre para que pueda ser funcional en la industria, por lo que no tiene sentido usar materiales de aporte con resistencias superiores o similares al del acero si se sabe que romperá por el cobre .

Para uniones de soldadura normalmente solo se considera la resistencia máxima y no la elongación, como propiedad a comparar con el material base, de igual manera el concepto de resistencia a la fluencia no es adecuado para criterio de falla en uniones soldadas.



**Figura 3.4.** Gráfico de resistencias máximas promedios de los materiales base y de aporte empleados. Nota: el valor de resistencia mostrado en la gráfica corresponde al indicado por el fabricante en catálogo

Para esta unión en particular la elongación no se puede comparar con los valores de los metales base debido a que tanto como el acero como el cobre se alargarán bajo la misma carga pero en diferentes proporciones, por lo que la elongación final será una

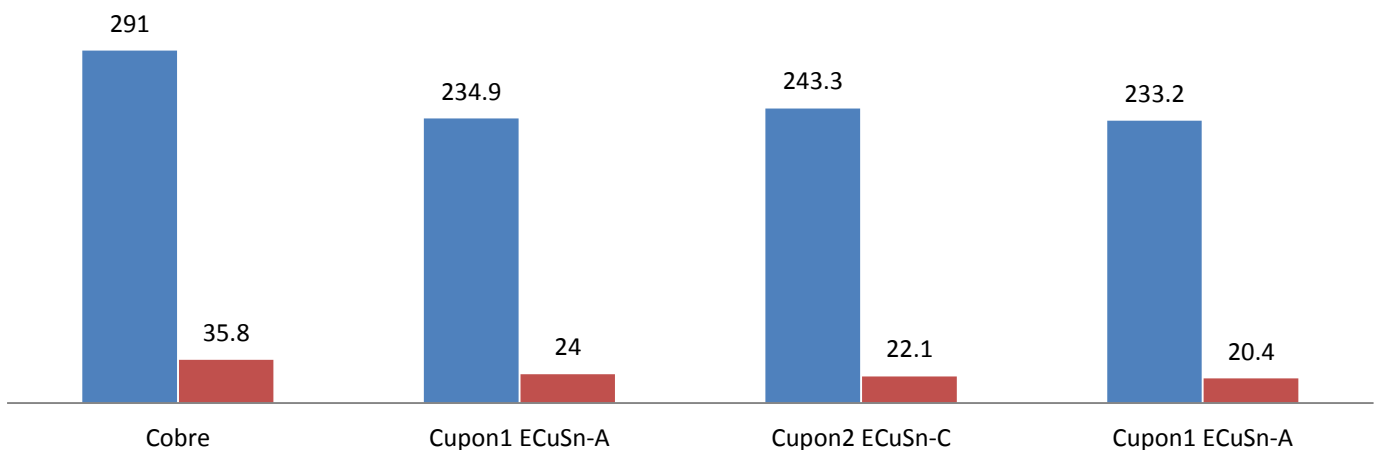
combinación de ambas elongaciones; solo se podrá discutir sobre ella comparando valores entre los cupones de soldadura. En la figura 3.5. se muestra el gráfico donde se compara las elongaciones promedio y resistencias máxima de los cupones soldados y del cobre.

De la gráfica de elongaciones se puede apreciar que los valores son similares pues el promedio de las elongaciones de los cupones 1 y 3 (Cu-6Sn) es de 22,2%; mientras que, la elongación promedio del cupón 2 (Cu-9Sn-3Ni) fue de 22,1%. Los valores de resistencia máxima de los cupones varían entre 80% y 84% con respecto a la resistencia máxima del cobre empleado (291 MPa). Las uniones obtenidas con el aporte ECuSn-C (Cu-9Sn-3Ni) presentan una resistencia a la tracción promedio de 243,3 MPa; mientras que, las uniones obtenidas con el aporte ECuSn-A (Cu-6Sn) presentan una resistencia a la tracción promedio de 234 MPa.

En el cupón de soldadura 1 se empleó una corriente de 80A y una apertura de 2.3 mm y para el cupón 3 se usó una corriente de 83A y una apertura de 2.8 mm, la variación de estos parametros a pesar de ser cambios leves ocasionaron que cambie la elongación 24% para el cupón 1 y 20.4% para el cupón 3.

### Resistencia máxima (MPa) y Elongación (%)

■ Resistencia ■ Elongación



**Figura 3.5.** Gráfico de resistencias máximas



### 3.4. ENSAYO DE MICRODUREZA VICKERS

A continuación, se muestran gráficos y tablas obtenidas a través del ensayo de microdureza Vickers realizado bajo la metodología explicada en el subcapítulo 2.2.1.2 y teniendo en cuenta la tabla 2.14, para los gráficos se consideró línea roja para la parte del acero, línea negra para el baño fundido y línea azul para el cobre.

#### 3.4.1. Cupón de soldadura 1

En la tabla 3.8 se muestra los valores de las 13 indentaciones que se realizaron según el esquema de la figura 2.9.

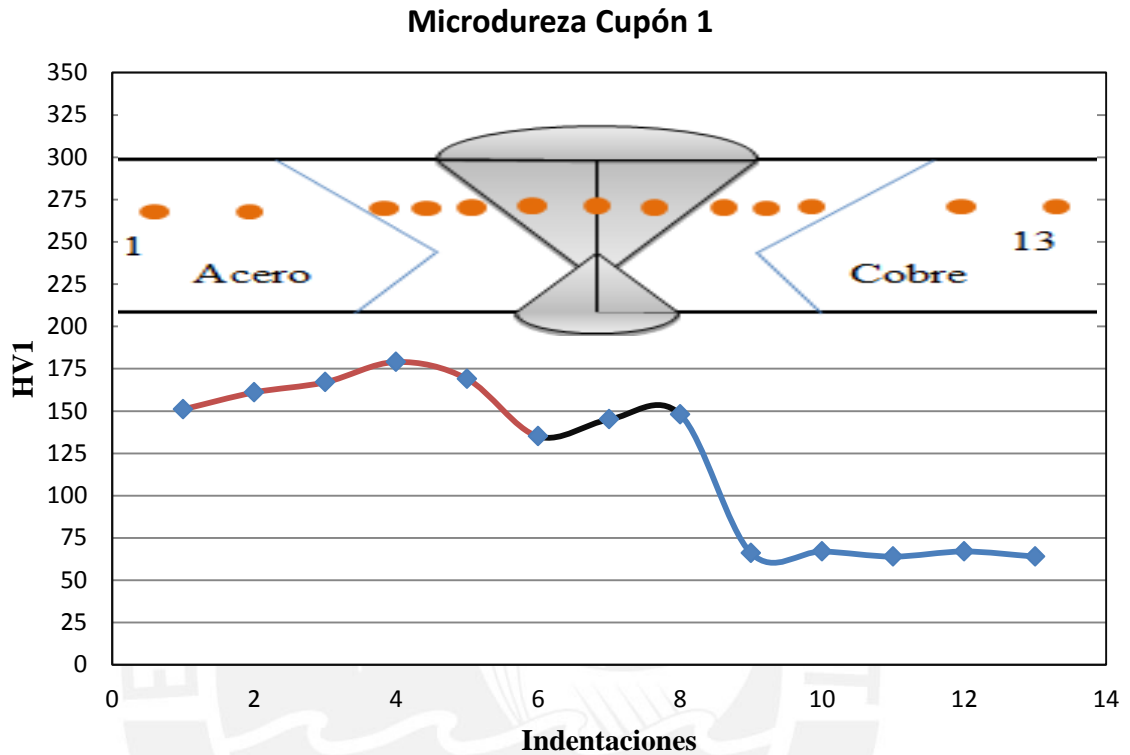
**Tabla 3.8.** Resultados del ensayo de microdureza del cupón 1  
Cupón 1 ECuSn-A (Cu-6Sn)

Puntos	D1 ( $\mu\text{m}$ )	D2 ( $\mu\text{m}$ )	D promedio ( $\mu\text{m}$ )	HV1
1	110.9	110.9	110.9	151
2	106.3	108.1	107.2	161
3	104.4	106.3	105.35	167
4	100.7	102.6	101.65	179
5	105.3	104.4	104.85	169
6	119.1	115.5	117.3	135
7	114.5	111.8	113.15	145
8	111.8	111.8	111.8	148
9	170.7	164.2	167.45	66
10	167.0	167.0	167.0	67
11	166.1	173.4	169.75	64
12	166.1	167.0	166.55	67
13	170.7	168.8	169.75	64

D1 = diagonal 1; D2 = diagonal 2; D promedio = diagonal promedio

En figura 3.7 se muestra la curva obtenida con los resultados del ensayo de microdureza del cupón 1. Se aprecia que entre el punto 8 y 9 hay un cambio abrupto debido a que entre ambos puntos se encuentra la línea de fusión del cobre con el material de aporte. Para el acero se tiene en la zona afectada por el calor (ZAC) una dureza de 179 HV1 que es superior en 18% al del material base, esto debido a que probablemente hay una

disminución del tamaño de grano y en el cobre en la ZAC se ablanda debido a que por el calor sufre un recocido siendo de 64 HV1 la menor dureza y esta es 6% menos que la del material base.



**Figura 3.6.** Grafica de microdureza cupón 1

### **3.4.2. Cupón de soldadura 2**

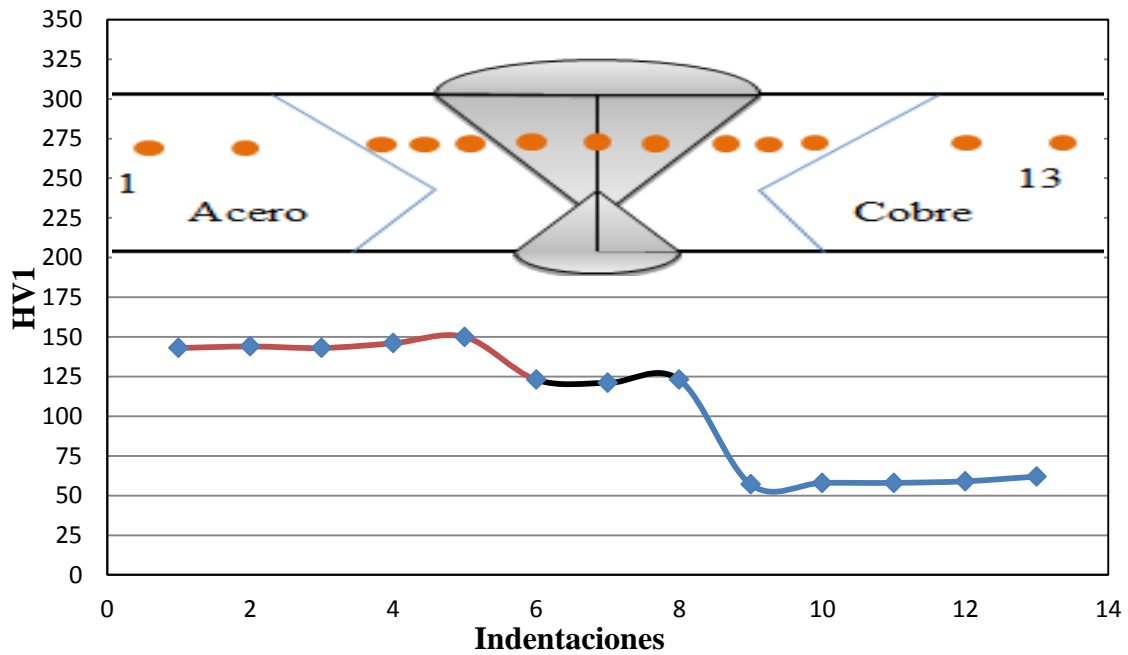
En la tabla 3.9 se muestra los resultados obtenidos a través del ensayo de microdureza Vickers en la probeta del cupón 2 y en la figura 3.8 se muestra estos resultados graficados. Los resultados son similares que en el cupón 1, observando que el ablandamiento en la ZAC del cobre debido al recocido es un poco mayor, teniendo un disminución de la dureza en 19.5%.



**Tabla 3.9.** Resultados del ensayo de microdureza del cupón 2  
Cupón 2 ECuSn-C (Cu-9Sn-3Ni)

Puntos	D1 ( $\mu\text{m}$ )	D2 ( $\mu\text{m}$ )	D promedio ( $\mu\text{m}$ )	HV1
1	115.5	112.7	114.1	143
2	113.6	113.6	113.6	144
3	112.7	115.5	114.1	143
4	114.5	110.9	112.7	146
5	110.9	111.8	111.35	150
6	121.0	124.7	122.85	123
7	124.7	122.8	123.75	121
8	122.8	122.8	122.8	123
9	180.8	172.8	176.8	57
10	179.9	178.9	179.4	58
11	166.1	173.4	169.75	73
12	166.1	167.0	166.55	72
13	170.7	168.8	169.75	70

**Microdureza Cupón 2**



**Figura 3.7.** Gráfica de los resultados de la probeta del cupón 2

### 3.4.3. Cupón de soldadura 3

En la tabla 3.10 se muestra los resultados para el cupón 3 y en la figura 3.9 se muestra la gráfica de dichos resultados. En lo concerniente a la ZAC en ambos materiales base el comportamiento es similar que en los otros ensayos. La indentación 6 arroja un valor relativamente bajo por lo que se realizó una indentación adicional 0,5mm por encima de la indentación 6 y dio un valor de dureza 119 HV1, por lo que se corrobora el valor de dureza de la indentación 6.

Para poder analizar de manera más sencilla en la figura 3.10 se muestra las 3 gráficas en una sola figura, se permite esta comparación debido a que la distancia entre indentaciones y número de indentaciones es la misma.

**Tabla 3.10.** Muestra los resultados del ensayo de microdureza del cupón 3  
Cupón 3 ECuSn-A (Cu-6Sn)

Puntos	D		D promedio ( $\mu\text{m}$ )	HV1
	D1 ( $\mu\text{m}$ )	D2 ( $\mu\text{m}$ )		
1	110.9	111.8	111.35	150
2	112.7	111.8	112.25	147
3	110.9	113.6	112.25	147
4	118.8	107.2	113	155
5	109	105.3	107.15	161
6	125.5	125.6	125.55	118
7	110.9	109.9	110.4	152
8	114.5	110.9	112.7	146
9	171.6	168.8	170.2	64
10	170.7	167	168.85	65
11	157.8	160.5	159.15	73
12	161.5	160.5	161	72
13	163.3	163.5	163.4	70

### Microdureza Cupón 3

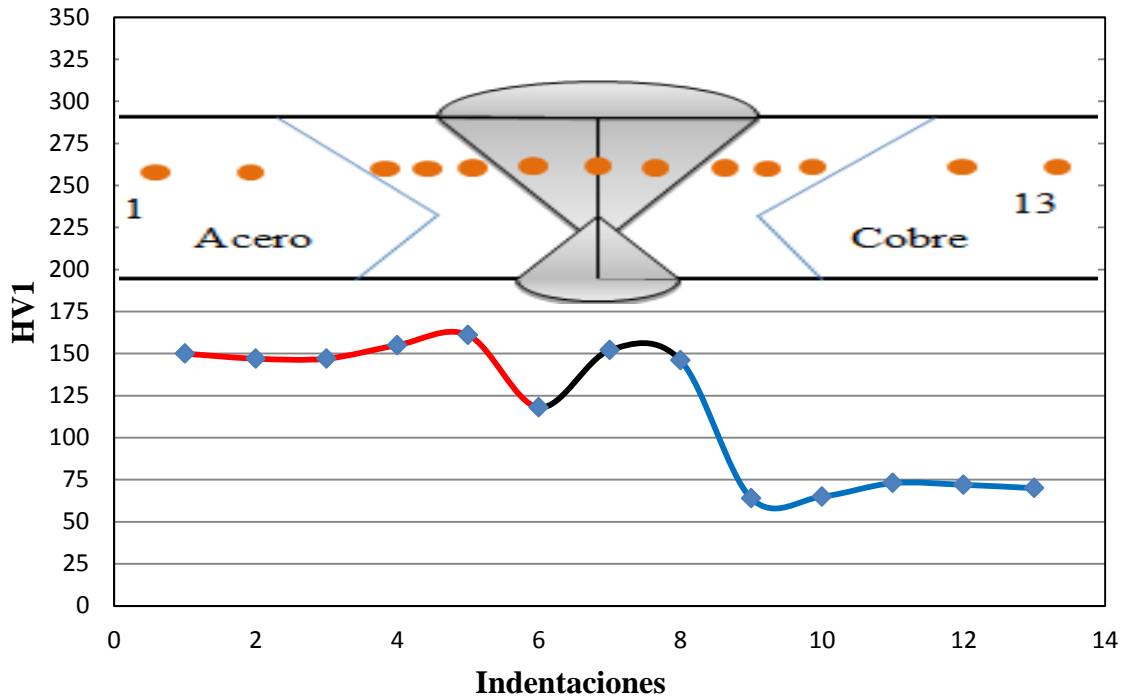


Figura 3.8. Gráfica de resultados para la probeta del cupón 3

### Resultado de ensayo de microdureza Vickers

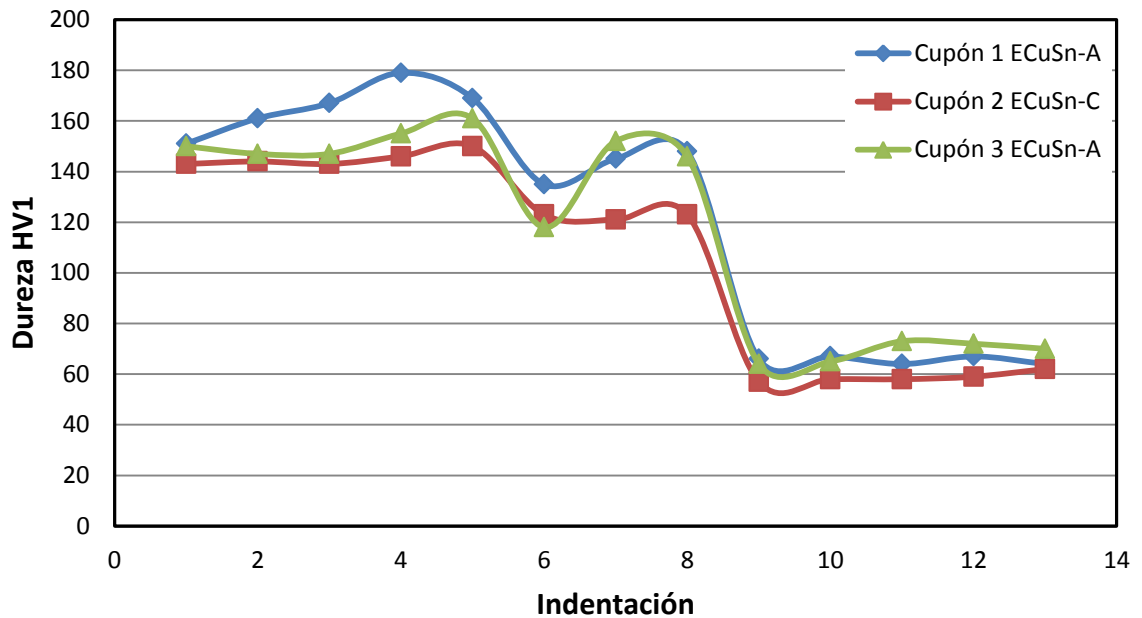


Figura 3.9. Muestra las 3 curvas del ensayo de microdureza Vickers

Se puede apreciar que prácticamente no hay una gran diferencia entre los valores de dureza obtenidos en la soldadura formada por la ZAC del Cu-5Zn, metal de aporte y la ZAC del acero.

### 3.5. ENSAYO DE DOBLADO

Una vez elaboradas las probetas para el ensayo de doblado con el pin de 13 milímetros de diámetro; se procedió a realizar el ensayo de doblado. Al ensayar las probetas no se obtenían resultados que ayuden a la investigación, debido a que como la resistencia del cobre es muy inferior a la del acero ASTM A36 al aplicar la carga con el punzón el cobre se deformaba más rápido, y con esto el centro de la probeta donde incidía el pin deja de estar en el cordón de soldadura y se ubica en el cobre, por lo que el pin ejerce mayor carga sobre el cobre, es decir se esta doblando solamente el cobre y no la unión. En la figura 3.11 se muestra una de las probetas ensayadas y se aprecia que el cobre se dobló más que el acero a pesar de estar sometidos a la misma carga.



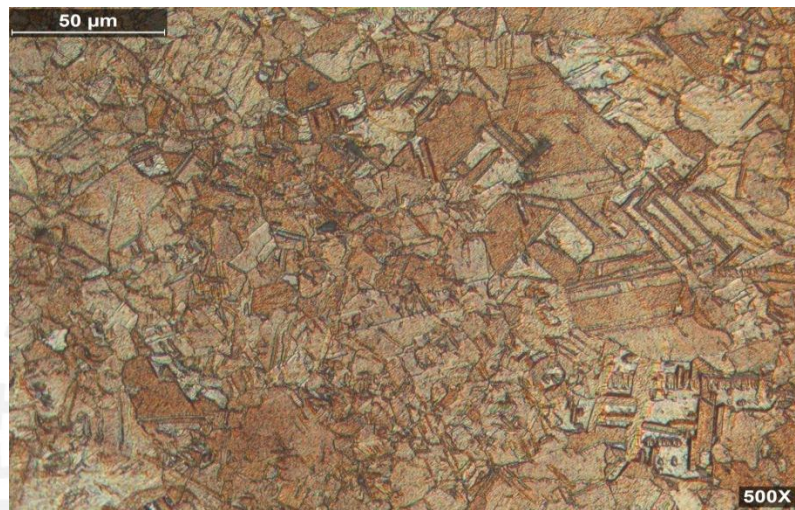
**Figura 3.10.** Resultado una probeta de doblado ensayada

Debido a estos resultados en todas las probetas ensayadas (cuatro del cupón 1) se descartó el ensayo de doblado para el resto de probetas. Se recomienda de ser necesario realizar doblado longitudinal, pues en nuestro caso de los ensayos de tracción y dureza se aprecia que no se han formado zonas frágiles y que se tiene una ductilidad adecuada.

### 3.6. METALOGRAFÍA

En las figuras 3.11 y 3.12 se muestra la microestructura del cobre (Cu-5Zn) a 500 y 1000 aumentos respectivamente

Como se aprecia en las figuras 3.12 y 3.13 la microestructura presenta una sola fase formada entre el cobre y el zinc. Se visualiza granos poligonales formados por una solución sólida FCC donde el solvente es el cobre FCC y el soluto es el zinc HC.



**Figura 3.11.** Microestructura del cobre empleado a 500 aumentos



**Figura 3.12.** Microestructura del cobre empleado a 1000 aumentos



### 3.7. FACTOR ECONÓMICO

Debido a que los resultados de los ensayos realizados en resistencia mecánica, dureza y elongación son similares entre los cupones 1, 2 y 3. Se puede considerar el factor económico como un elemento para poder lograr recomendar un aporte para luego elaborar un procedimiento de soldadura. En la tabla 3.11 se muestra los precios de los electrodos de 1/8 pulgada empleados.

**Tabla 3.11.** Precio de metales de aporte empleados

Material de aporte	Nombre Comercial	Precio (PEN/Kg)
ECuSn-A (Cu-6Sn)	CITOBRONCE	162.81
ECuSn-C (Cu-9Sn-3Ni)	CITOBRONCE II	158.87
ENiFe-C1 (Ni-42Fe)	EXANIQUEL	185.88*

\*. Tasa de cambio de dólar a soles empleado 2.80

Se aprecia que el ECuSn-C (Cu-9Sn-3Ni) conocido comercialmente como CITOBRONCE II es el material de aporte más económico; el CITOBRONCE II se empleó en el cupón 2. El NiFe-CI (Fe-56Ni) es el material de aporte más caro.

El tiempo en cuanto a preparación y ejecución de cada cupón es muy similar para los tres cupones, por lo que el precio de cada cupón será directamente proporcional al costo del material de aporte.

## CONCLUSIONES

1. De acuerdo a los resultados encontrados en la presente tesis, se recomienda el empleo del aporte ECuSn-C (Cu-9Sn-3Ni) para las uniones soldadas mediante el proceso SMAW entre el acero estructural ASTM A36 y la aleación Cu-5Zn, ambos de 3,0 mm de espesor. Este aporte presenta un costo que es un 8% menor que el aporte ECuSn-A (Cu-5Sn); además, que las uniones presentan un mejor acabado superficial.
2. Se han obtenido uniones soldadas con propiedades mecánicas satisfactorias en uniones disimilares formadas por el acero ASTM A36 y la aleación Cu-5Zn ambos de 3,0 mm de espesor, mediante el proceso de soldeo SMAW empleando como aportes ECuSn-A (Cu-6Sn) y ECuSn-C (Cu-9Sn-3Ni).
3. Todas las uniones soldadas obtenidas con ambos aportes, ensayadas a tracción, rompen en el metal Cu-5Zn. Estas uniones presentan una resistencia máxima a tracción promedio que varía entre el 80% y 84 % de la resistencia del metal base Cu-5Zn. Las uniones obtenidas con el aporte ECuSn-C (Cu-9Sn-3Ni) alcanzan en promedio una resistencia a la tracción de 243 MPa de; mientras que, las uniones obtenidas con el aporte ECuSn-A (Cu-6Sn) logran alcanzar 234 MPa en promedio de resistencia a la tracción.
4. Los valores de elongación (ductilidad) obtenidos a través del ensayo de tracción, en las uniones soldadas, muestran que con ambos aportes se alcanzan valores muy similares a 22 %.
5. De los ensayos de barrido de micro dureza Vickers realizados a las uniones soldadas obtenidas con ambos aportes se aprecia que no existe una gran diferencia en los valores de dureza encontrados en ambas ZACs y metales de aporte.



## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Lean, Paul, *Introducción a la Ingeniería de Materiales*.  
Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2008.
- [2] ASTM International, Designation: A36/A36M – 08.  
West Conshohocken, USA, Edición 2008.
- [3] Fosca, Carlos, *Introducción a la Metalurgia de la Soldadura*.  
Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2003.
- [4] Askeland, Donald, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*.  
México Ediciones Color S.A, 2004.
- [5] American Welding Society, *Welding Handbook*, Volume IV.  
Nineth edition, 2011.
- [6] Soldexa, *Manual de Soldadura y Catálogo de Productos*.  
Lima, Perú, Séptima Edición.
- [7] Miller México, Maquinas de soldar serie 350, <http://www.soldadorasmillermexico.com.mx/soldadora-xmt-350.html> (Consulta: Jueves, 11 de octubre de 2012)

## BIBLIOGRAFÍA

- Lazarte, Roberto, Presentación del curso Metalurgia de la Soldadura.  
Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2012.
- Lazarte, Roberto, Presentación del curso Ingeniería de Materiales 2.  
Lima, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2010.
- Avner, Sydney, *Introducción a la Metalurgia Física*.  
México Edición McGRAW-HILL 1979.
- Hernández, Germán, *Manual del soldador*.  
Madrid CESOL, decimoquinta edición, 2006.
- American Welding Society, *Welding Handbook, Volume III*.  
Eight edition, 1996.
- ASTM International, Designation: E384 – 11E1.  
West Conshohocken, USA, Edición 2013.
- DIN/DVS Handbook 8, *Welding Standards dealing with welding consumables and the destructive testing of welded joints*.  
Germany, Media-Print Informationstechnologie 5<sup>th</sup> edition, 2001.