

**PROYECTO INTEGRADOR- “Soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica”**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE**

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**“Soldadura cuproaluminotérmica en  
cañerías de conducción para la protección  
catódica”**

**PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL**

**Autor: Ana Julieta Nehme**

**Director Académico: Mónica Zalazar**

**CARRERA: INGENIERIA QUIMICA**

**Neuquén, 2016**

---

## **RESUMEN**

La soldadura cuproaluminotérmica es un proceso de termofusión, en el que el calor necesario se obtiene por el efecto reductor del aluminio sobre el óxido de cobre que genera una reacción exotérmica de alta temperatura, donde el material de aporte será el cobre fundido y recalentado, resultante de dicha reacción química. Esta técnica de unión es empleada en la industria ferroviaria para la unión de los rieles, en las soldaduras de puesta a tierra y durante la protección catódica de cañerías de conducción.

En este trabajo se caracteriza la soldadura cuproaluminotérmica para la protección catódica de cañerías de acero API 5L X46 y X52 en dos espesores, modificando la sección del conducto de cobre y la carga aplicada. El objetivo es obtener las condiciones óptimas de unión sin afectar la integridad de la cañería para ello se realizarán ensayos macroscópicos, microscópicos y barridos de microdureza en la zona afectada por calor de la soldadura. Se realizaron varias probetas considerando además distintas marcas de fundentes y tamaños de crisol. Un área de contacto inadecuada puede producir falta de protección de la cañería mientras que una unión con excesiva difusión de cobre en borde de grano puede producir corrosión acelerada y microfisuras en el metal base es por ello que se busca la condición óptima de unión en función del grado de acero y espesor de cañería.

## **PALABRAS CLAVE**

Cuproaluminotérmica, soldadura, protección catódica, unión.

## **ABSTRACT**

Copper-Aluminothermic weld is a process in which welder is generated by thermofusion. The necessary heat is obtained by the aluminum reducing effect above copper oxide, creating a high temperature exothermic reaction, in which melt and overheated copper is the filler material. This technique is used to joint rails in railway industry, in grounding welds and also in linepipes for cathodic protection. In this study copper-aluminothermic weld is characterized for API 5L X46 and X52 steel linepipes for cathodic protection, considering two different thickness, changing the copper wire section and the flux amount. The purpose is to obtain the optimum welding conditions, therefore macroscopic and microscopic tests, and microhardness sweep are going to be performed on the heat affected zone. Several test tubes were realized, taking also into account different flux and gunpowder brands and melting pot sizes. An inadequate contact area can cause lack of linepipes protection as well as an excessive copper diffusion into the grain boundaries can produce accelerated corrosion and microcracks in the filler metal, for that reason is necessary to obtain optimum welding conditions according to the steel grade and pipe thickness.

## **KEY WORDS**

Copper-aluminothermic, Thermite weld, cathodic protection.

**PROYECTO INTEGRADOR- “Soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica”**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE**

---

*Dedicatorias*

*A mi familia por acompañarme siempre,*

*A mi pareja por ayudarme y recorrer este trayecto conmigo,*

*A cada uno de los que me ayudaron y acompañaron este camino.*

## INDICE GENERAL

<b>CAPITULO 1.....</b>	<b>1</b>
<i>Introducción .....</i>	<i>1</i>
<b>CAPITULO 2.....</b>	<b>3</b>
<i>Revisión de la literatura .....</i>	<i>3</i>
2.1 Descripción y uso de los componentes .....	4
2.2 Algunas aplicaciones del proceso de unión.....	5
2.2 Descripción de la protección catódica .....	7
2.3 Ventajas soldadura cuproaluminotérmica.....	9
2.4 Aspecto visual de la soldadura cuproaluminotérmica.....	10
2.5 Resistencia de la soldadura cuproaluminotérmica .....	10
<b>CAPITULO 3.....</b>	<b>12</b>
<i>Desarrollo Experimental .....</i>	<i>12</i>
3.1 Material Analizado .....	12
3.2 Realización de la soldadura .....	12
3.2 Caracterización de las probetas obtenidas.....	13
3.2.1 Inspección visual .....	13
3.2.2 Mediciones eléctricas .....	14
3.2.2.1 Errores sistemáticos .....	16
3.2.2.2 Errores fortuitos .....	16
3.2.3 Caracterización macroscópica .....	18
3.2.4 Medición de la microdureza.....	18
3.2.5 Caracterización de la microestructura mediante Microscopía Óptica .....	19
3.2.6 Medición del porcentaje de unión.....	20

<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>21</b>
<i>Resultados y discusiones .....</i>	<i>21</i>
4.1 Realización de las primeras soldaduras: .....	21
4.1.1 Resultado de las mediciones eléctricas .....	22
4.1.2 Resultado de la inspección visual y de las macrografías .....	23
4.1.3 Resultados de la medición de microdureza .....	37
4.1.4 Resultados de la medición del porcentaje de unión .....	43
4.1.5 Resultados micrografía .....	45
4.2 Realización de nuevas soldaduras .....	48
4.2.1 Resultado mediciones eléctricas.....	49
4.2.2 Resultado de la inspección visual y de la macrografía .....	50
4.2.3 Resultados de la medición de microdureza .....	55
4.2.4 Resultados medición de porcentaje de unión .....	59
4.2.5 Resultados micrografía .....	61
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>64</b>
<i>Conclusiones.....</i>	<i>64</i>
<i>Tareas futuras:.....</i>	<i>68</i>
<b>Referencias.....</b>	<b>69</b>
ANEXO 1: Procedimiento de soldadura - Preliminar .....	70
ANEXO II: Protocolo propuesto para la soldadura cuproaluminotérmica. ....	71

## CAPITULO 1

### Introducción

La soldadura cuproaluminotermica es un proceso de unión generado por la reacción exotérmica que se produce entre el oxido de cobre y el aluminio. Debido al efecto reductor del aluminio, la reacción da como resultado cobre mas oxido de aluminio, que es eliminado en forma de escoria debido a que, por su menor peso especifico, se sobrepone al cobre no interfiriendo en el cuerpo de la soldadura. Esta soldadura tiene propiedades técnico-económicas que hacen a una solución segura y eficiente para los diversos casos que se presentan dentro del campo ingenieril. El proceso se lleva a cabo dentro de un molde de grafito, llamado crisol, fabricado de acuerdo al tipo de conexión a realizar [1].

Actualmente, la corrosión es la principal causa de falla en tuberías alrededor del mundo. Este proceso de unión se utiliza en las instalaciones industriales, soldando a la cañería un cable de cobre, conectado a una red eléctrica para contrarrestar la corrosión del metal, realizando así una protección catódica [2].

La soldadura cuproaluminotérmica presenta varias ventajas a la hora de la realización de trabajos de protección catódica. Al ser una soldadura, la conexión eléctrica se realiza por fusión de los materiales a unir eliminando los intersticios de aire y, por consecuencia, la posibilidad de corrosión galvánica, contaminación interna, aumento de la resistencia eléctrica de contacto. Además, posee mayor o igual capacidad de transferencia de corriente debido a que la sección transversal de la conexión es mayor a la de los conductores a unir, sumado esto a que no tiene factor de cableado [1, 2].

Como el material de aporte empleado es cobre, no existe riesgo de corrosión galvánica por potenciales naturales o por corrientes erráticas. No requiere mano de obra especializada y los tiempos de implementación son bajos. Solo requiere de un molde de grafito y las cargas necesarias para las conexiones. Este equipo es de fácil transporte en la valija de herramientas del electricista. Como el proceso de soldadura es autónomo por el principio de la autofusión [1, 2]. Otro factor importante es el hecho de que este procedimiento no requiere de fuentes externas de energía.

La búsqueda bibliografía no arrojó demasiados resultados vinculados con las etapas o procedimientos necesarios para lograr una buena calidad de unión, es por ello se realizó el presente trabajo en colaboración con la empresa Oldelval - Oleoductos del valle S.A..

En este trabajo se informaran los estudios realizados y los resultados obtenidos de la caracterización de soldaduras realizadas, la secuencia de estudio fue: la inspección visual, mediciones de resistencias eléctricas, macrografías, micrografías y barridos de microdureza, el objetivo de los ensayos fue generar un protocolo que garantice la calidad de la soldadura para su puesta en servicio.

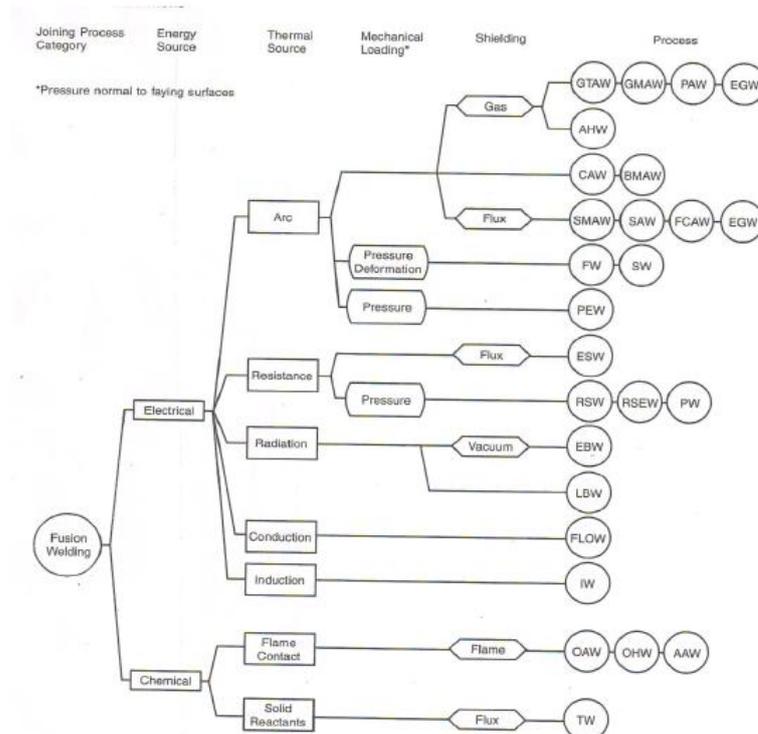
El escrito se divide en dos partes: en primer lugar se llevó a cabo la soldadura de 25 probetas, las cuales fueron estudiadas detalladamente en forma individual. Para las mismas se empleo un método de soldadura cuproaluminotérmica específico, detallado más adelante. Conforme a los resultados obtenidos, en la segunda parte, se propuso un nuevo protocolo y se compararon los nuevos resultados con los anteriores.

## CAPITULO 2

### Revisión de la literatura

La Asociación Americana de Soldadura (AWS - American Welding Society) considera que en toda soldadura por fusión se requiere una fuente de una energía; una fuente térmica que lleva al material a la temperatura a la cuál puede ser soldado; una fuente de protección del cordón o punto de soldadura para prevenir su contaminación que puede provenir de diferente origen. Se denomina la soldadura cuproalumnio-térmica como Thermit - Weld (TW). La misma es un proceso por fusión en el cual la fuente de energía se obtiene de una reacción química; la fuente térmica son los reactivos sólidos que reaccionan liberando calor, no existe aplicación de carga mecánica y la protección de la pileta líquida es por medio de flux generado por la reacción química [3]. La figura 2.1 muestra es esquema de clasificación de los procesos de soldadura que utiliza la AWS en el mismo se ubica la soldadura analizada en este proyecto.

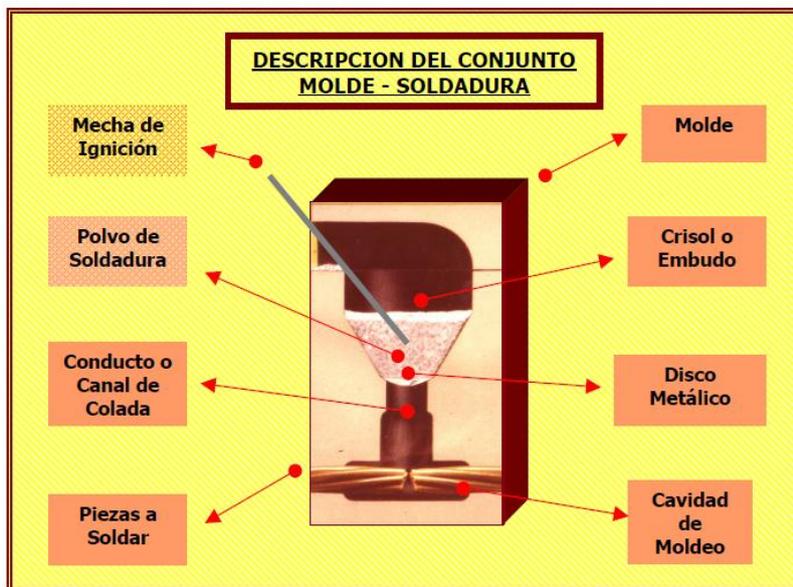
**Figura 2. 1** Esquema de clasificación de los procesos de soldadura que utiliza AWS.



## 2.1 Descripción y uso de los componentes

En la figura 2.2 se detallan los elementos necesarios para la realización de la soldadura cuproaluminotérmica, estos son: moldes de grafito y el fundente.

**Figura 2. 2** Elementos necesarios para llevar a cabo la soldadura cuproaluminotérmica.



Los moldes de grafito constituyen el recipiente en donde se lleva a cabo la reacción de oxido reducción.

La duración de los mismos está directamente relacionada con el buen trato que se le brinde. Uno de los factores determinantes es la forma de limpiarlos entre soldadura y soldadura. Nunca deben usarse herramientas metálicas tales como destornilladores, cepillo de alambre, puntas o cualquier otro elemento punzante o abrasivo que pueda dañar o erosionar la superficie. Lo más aconsejable para esta tarea es utilizar un pincel, papel de diario o trapos. En caso que la escoria remanente en el crisol se adhiriera de forma tal que se torne dificultosa de sacar, es conveniente quitarla con el mango de madera del pincel efectuando movimientos circulares hasta separarla.

Otro punto importante está dado por las piezas a soldar, se recomienda que las mismas no ejerzan ninguna acción mecánica sobre el molde para evitar desgastes prematuros. Para ello debe verificarse que tanto las barras como los cables estén derechos y bien formados por eso se recomienda que antes de cortar los cables a soldar se encinten con cinta aisladora a media capa sobrepuesta por un largo aproximado a los 50 mm y luego cortar con una tijera para cables o una sierra en la mitad del encintado, luego debe quitarse la cinta con cuidado de

no deformar el cable y proceder a posicionarlo en el molde, cuya selección depende de la sección del conducto a soldar.

Usualmente se estima que los moldes para soldaduras de secciones hasta 50/70 mm<sup>2</sup> tienen una vida útil de 100/120 soldaduras aproximadamente para secciones mayores dependerá de la rigidez de las piezas a soldar [2].

Las *cargas de fundente* son entregadas por los proveedores en tubos individuales, donde se encuentra detallado el peso. Según la unión que se desee realizar existen distintos tipos de mezclas en el mercado: cobre con cobre, cobre con acero, para servicios ferroviarios, o para protección catódica [12]. Este elemento, al igual que la pólvora, debe mantenerse en un lugar seco, puesto que la humedad podría llegar a afectar la calidad de la soldadura.

Junto con el fundente también se entregan la mecha de ignición y un disco metálico que sirve como retención.

## 2.2 Algunas aplicaciones del proceso de unión

Algunas aplicaciones típicas de este proceso de unión son:

- Conexiones de puesta a tierra: Las conexiones realizadas con soldadura cuproaluminotérmica son capaces de conducir la misma corriente que los conductores [4] la figura 2.3 muestra diseños de unión típicos.

**Figura 2. 3** Soldadura cuproaluminotérmica para conexiones a puesta a tierra.



- Industria ferroviaria: Este tipo de unión se emplea para soldar los conductores del circuito de retorno de energía de los rieles y también en las señales ferroviarias [4]. Esquemas de estos tipos de unión se muestran en la figura 2.4.

**Figura 2. 4** Soldadura cuproaluminotérmica realizada en la industria ferroviaria



Otro uso más común, y muy estudiado en la industria ferroviaria es en la unión de rieles, tanto por su flexibilidad como por su bajo costo [5]. Además, la soldadura es capaz de resistir altas cargas sin que exista el riesgo de rotura por fatiga o fractura. En la figura 2.5 se muestra una foto de una soldadura cuproaluminotérmica realizada para unir rieles.

**Figura 2. 5** Soldadura cuproaluminotérmica para unión de rieles.



- Aplicación industria: La soldadura cuproaluminotérmica es empleada para la unión de barras de cobre en varias configuraciones, como se muestra en la figura 2.6 [4].

**Figura 2.6** Soldadura cuproaluminotérmica realizada en la industria para la unión de barras de cobre en varias configuraciones.



- Protección catódica: Se utiliza para la conexión de cables para la protección catódica a cañerías de conducción. Este método es ampliamente empleado en

cañerías de transporte de gas de alta presión y de petróleo [4]. Algunas de las configuraciones empleadas se muestran en la figura 2.7.

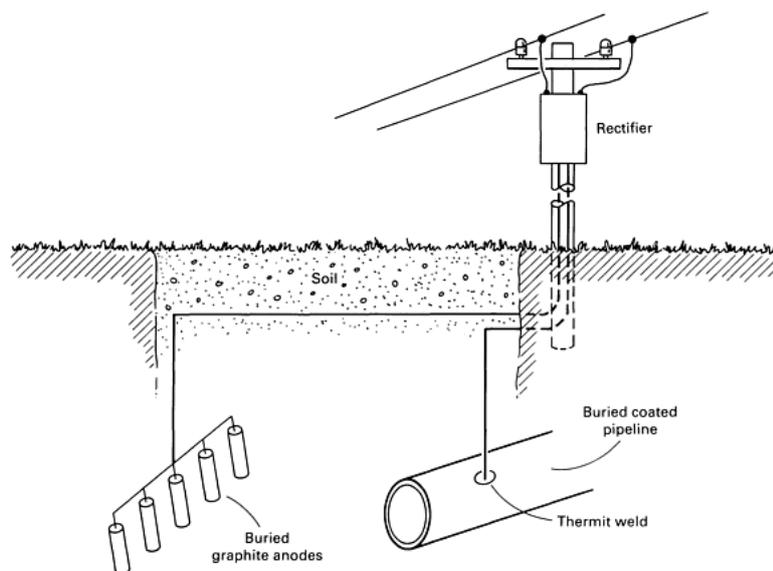
**Figura 2. 7** Soldadura cuproaluminotérmica para protección catódica.



## 2.2 Descripción de la protección catódica

Existen dos métodos de protección catódica: el uso de ánodos de sacrificio y los sistemas de corriente impresa. Para este último es en el que se emplea la soldadura cuproaluminotérmica. En la figura 2.8 se muestra un esquema de un sistema de corriente impresa.

**Figura 2. 8** Sistema de protección catódica de corriente impresa.



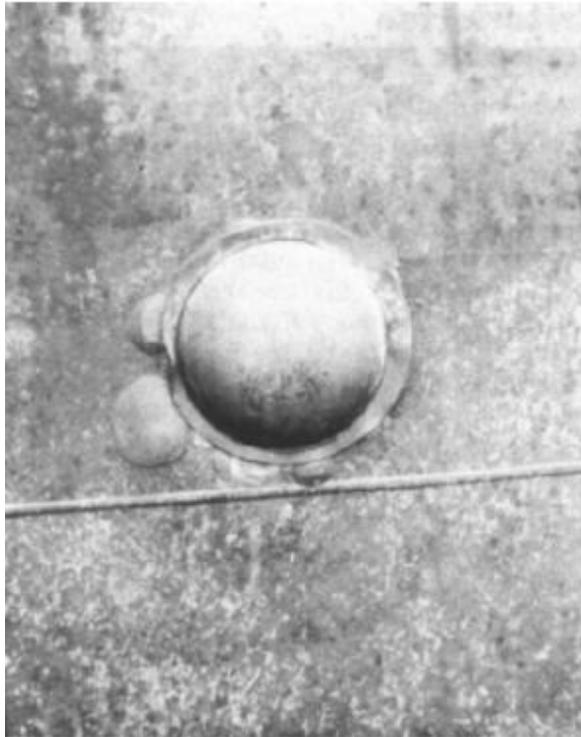
En el sistema de protección catódica con corriente impresa, tanto los ánodos enterrados como la cañería, son conectados a una fuente de energía eléctrica que suministra corriente continua a ambos [6]. A diferencia de los ánodos de sacrificio, los ánodos empleados en este método no necesariamente tienen que actuar como tales naturalmente frente al acero, y en realidad, casi nunca lo hacen. La mayoría de los ánodos de corriente impresa están hechos de materiales que no se consumen y actúan naturalmente como cátodos frente al acero, es decir que si se conectaran directamente con la cañería, provocarían la corrosión acelerada de la misma. Sin embargo, la

corriente continua revierte este efecto y permite al material actuar como ánodo. En estos se lleva a cabo una reacción de oxidación en lugar de corrosión, luego no se consumen.

En los sistemas que emplean ánodos de sacrificio, el máximo voltaje entre el ánodo y el cátodo puede ser de aproximadamente 1 V, dependiendo del material del ánodo y del ambiente. Los sistemas de corriente impresa pueden utilizar voltajes mayores, lo que permite que los ánodos se pueden ubicar más lejos, produciendo un patrón de distribución de corriente más eficiente en el cátodo a proteger [6]. Además, los altos voltajes también son útiles a la hora de trabajar en ambientes con baja conductividad, tales como agua y concreto, donde los ánodos de sacrificio resultan débiles. Otra ventaja de los sistemas de corriente impresa es que, para grandes instalaciones a proteger, el capital de inversión es bajo con respecto a los sistemas de ánodos de sacrificio.

La desventaja que presenta este método, además de su mayor complejidad y de que requiere un mayor mantenimiento que aquellos sistemas en donde se emplea un ánodo de sacrificio, es que pueden sobre proteger aceros de alta resistencia y fragilizarlos. También puede causar que se desprenda el revestimiento de la cañería, como se muestra en la figura 2.9. Esto último ocurre cuando la humedad penetra el recubrimiento del a cañería y se genera hidrogeno sobre la superficie del metal, debajo del recubrimiento. El gas se puede acumular hasta que el revestimiento protector se rompe por la presión generada. Una vez que ocurre esto, aumenta el requerimiento de corriente para proteger al sistema y esta puede exceder la capacidad del mismo [6].

**Figura 2. 9** Desprendimiento del revestimiento de una cañería en la que se emplea corriente impresa.



### **2.3 Ventajas soldadura cuproaluminotérmica**

Algunas de las ventajas de este método de unión son:

**Transferencia de corriente:** Posee mayor o igual capacidad de transferencia de corriente debido a que la sección transversal de la conexión es mayor a la de los conductores a unir, sumado esto a que no tiene factor de cableado [2, 4, 7, 8]

**La reacción de oxido reducción** se lleva a cabo en unos pocos segundos, haciendo que la carga total de calor aplicada a la superficie sea menor que en otros métodos. Esto es importante cuando se trabaja con cañerías de poco espesor [8].

**No se deteriora con el tiempo:** Como el material de aporte es cobre, no es posible de corrosión galvánica por potenciales naturales o por corrientes erráticas [2, 4, 8].

**Bajo costo de instalación:** No requiere mano de obra especializada y los tiempos de implementación son bajos [2, 4, 8]

Equipo de trabajo liviano y económico: Solo requiere de un molde de grafito y las cargas necesarias para las conexiones. Este equipo es de fácil transporte en la valija de herramientas del electricista [2, 4, 8].

No requiere de fuentes externas de energía.

#### **2.4 Aspecto visual de la soldadura cuproaluminotérmica**

La norma IRAM 2315 99 [9] detalla las características que debe cumplir una soldadura de este tipo. La soldadura no debe presentar defectos tales como socavaciones, nidos de avispa, poros u otras imperfecciones superficiales que puedan llegar a comprometer la unión soldada. Cuando se suelden materiales con distinto coeficiente de dilatación (por ejemplo cables de cobre con acero) se tolerarán fisuras en el extremo del cuerpo de la soldadura, fuera del núcleo, debidas a los diferentes reajustes moleculares. No obstante, deberá verificarse que las fisuras sean superficiales y no comprometan la unión soldada.

La presencia de escoria o incrustaciones será tolerada siempre que sean superficiales y que puedan quitarse fácilmente con herramientas manuales y no afecten de forma significativa la geometría del volumen de la soldadura. En ningún caso se deberá aceptar la presencia de incrustaciones o escorias internas.

La sección transversal de la soldadura deberá ser mayor o igual que la sección transversal del conducto de cobre a soldar.

#### **2.5 Resistencia de la soldadura cuproaluminotérmica**

Un control visual de la soldadura no es suficiente para garantizar la correcta unión y la buena conductividad. Una soldadura mal realizada puede aumentar la resistencia en la zona de unión, dejando de cumplir su propósito.

La calidad de la soldadura cuproaluminotérmica es muy afectada por la humedad. En la figura 2.10 se observa la realización de una soldadura afectada por la humedad. Si esta no se elimina correctamente, puede suceder que existan zonas en la soldadura donde la unión no se da efectivamente, generando una gran porosidad. La porosidad hace que la resistencia de la soldadura aumente, ya que al disminuir el área de contacto entre el cobre y el acero, el paso del flujo de electrones se ve dificultado [10]. Mientras mayor es el diámetro de los poros, mayor será el aumento de la resistencia.

**Figura 2.10** Impacto de la humedad en la soldadura cuproaluminotérmica: formación nido de avispa en la soldadura.



Para medir la resistencia de la soldadura, en primer lugar se posicionan los electrodos a una distancia determinada “ $l$ ” de la soldadura, quedando esta posicionada en el centro, siendo  $l$  la distancia entre los electrodos. Luego, se mide la resistencia  $R$  y, adoptando una resistividad ( $\rho$ ) de  $0,017 \mu\Omega\text{m}$ . Se calcula la sección transversal  $A$  como

Ecuación 2. 1

$$A = \frac{\rho l}{R}$$

Un valor de  $A$  menor a  $48,5 \text{ mm}^2$  es suficiente para rechazar la soldadura. Los valores de resistencias reportados en bibliografía para estos valores de  $A$  son de alrededor de  $90 \mu\Omega$  para una distancia entre electrodos de 13 cm.

## CAPITULO 3

### Desarrollo Experimental

#### 3.1 Material Analizado

Las soldaduras fueron realizadas sobre cañerías de acero API 5L X46 y X52 en espesores 6,35 mm y 5,56 mm. Se emplearon cables de cobre de 35 mm<sup>2</sup> y 4 mm<sup>2</sup> de sección. Se trabajó con distintas cargas de fundentes de marcas FACBSA y GENROD, variando también la cantidad de pólvora de marcas FACBSA y POWER. Se utilizaron crisoles de 35 mm y 45 mm. En función de todas estas variables se realizaron un total de 25 probetas en una primera etapa. Luego del análisis de las mismas se prosiguió con la realización de 15 probetas más sobre cañerías de las mismas características y con los parámetros que se reconocieron como los más adecuados, empleando un protocolo de soldadura generado a partir del análisis de las muestras anteriores.

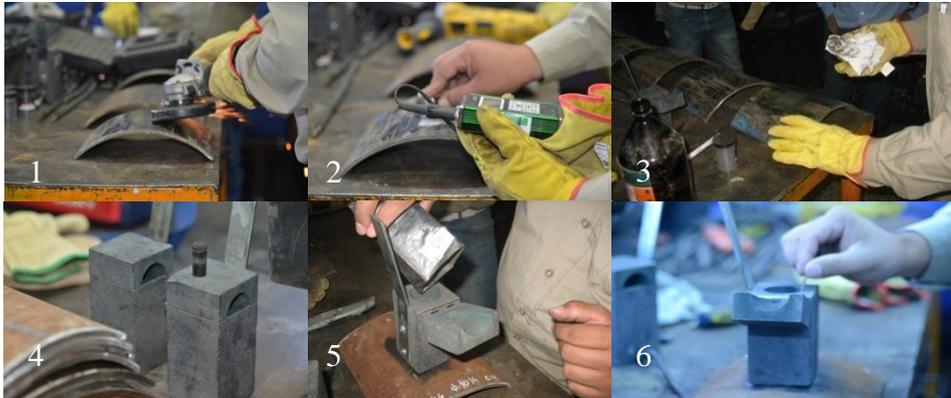
Estas tareas fueron realizadas en el Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue por cinco colaboradores de la empresa Oldelval – Oleoductos del Valle S.A..

#### 3.2 Realización de la soldadura

El protocolo de realización de la soldadura cuproaluminotérmica en primera instancia constó de los siguientes pasos:

Primero, se preparó la superficie mediante una lija de grado 80 hasta lograr que la misma quedara brillante. Mediante ultrasonido se verificó el espesor de la zona donde se realizó la soldadura (espesor adecuado mayor a 5,5 mm) luego se limpió la superficie con acetona para evitar la presencia de impurezas. Posteriormente, se seleccionó el crisol a utilizar, se mezcló el fundente en su envase (agitación), se colocó la retención en el crisol, seguido del fundente, la pólvora y por último la mecha. Se procedió con el cerrado del crisol y el encendido de la mecha. Todo el trabajo fue realizado con el equipo de protección personal correspondiente. En la figura 3.1 se detallan los pasos a seguir para la realización de la soldadura.

**Figura 3. 1** Procedimiento para la realización de la soldadura cuproaluminotérmica.



A partir de los resultados obtenidos del análisis de las muestras anteriores, se propuso un nuevo método de soldadura estableciendo como motivo principal de falla la humedad absorbida por los elementos necesarios para efectuar la soldadura. Para la segunda etapa del estudio, se adicionó al proceso de soldadura un paso previo que consistió en el secado del crisol con un soplete, como se muestra en la figura 3.2, y el calentamiento del fundente en un horno eléctrico.

**Figura 3. 2** Secado del crisol con una pistola de calor.



## 3.2 Caracterización de las probetas obtenidas

### 3.2.1 Inspección visual

Se realizó un examen visual de todas las muestras obtenidas. En esta etapa se evaluó si la soldadura presentaba adherencia a la superficie metálica en forma total, parcial (parte de la

soldadura continua adherida a la superficie de la cañería, pero se desprende el cable de cobre) o total (toda la soldadura se desprende de la superficie de acero). Los análisis se realizaron a grandes rasgos, evidenciando también la porosidad y la presencia de teñido térmico en la parte inferior de la cañería.

### 3.2.2 Mediciones eléctricas

Se efectuaron mediciones eléctricas con el fin de obtener una relación entre la conductividad eléctrica de la soldadura y la calidad de la misma. Se realizó la medición de la resistencia generada teniendo en cuenta que, mientras mejor sea la calidad de la soldadura, la resistencia deberá ser más baja [10]. Como no se cuentan con valores específicos para la resistencia de estas soldaduras, el ensayo se realizó a modo cualitativo, es decir, no esperando algún valor específico de resistencia para cada soldadura, sino comparando los valores obtenidos entre las mismas. El trabajo fue realizado en el Laboratorio de Mediciones Eléctricas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue. Se contó con la ayuda y colaboración de los encargados del mismo.

Las resistencias de las soldaduras son de muy bajo valor y no se contó con el equipamiento para efectuar las mediciones de forma directa. Para efectuar los ensayos se armó un circuito de medición que se describe en el apartado siguiente. El método se basó en hacer circular una corriente conocida y constante a través de la resistencia y medir la caída de voltaje que se producía en ella, utilizando un multímetro. Aplicando la Ley de Ohm se obtiene fácilmente el valor de la resistencia deseada. Se introdujo en el circuito una resistencia de 5 Ohm (resistencia limitante) para que la corriente en el circuito no dañe la fuente u otros elementos del mismo [11, 12]. Para evitar lecturas erróneas debido a la resistencia propia de los cables de conexión, la medición del voltaje se realizó directamente sobre la soldadura.

Para la medición, en primer lugar, se tuvieron que preparar las muestras. Para esto, se soldó al extremo del cable de cobre otro cable de 1,5 mm de diámetro de aproximadamente 1 metro de longitud. Tal tarea se realizó para efectuar la conexión entre la pieza a examinar y una fuente de alimentación. También se perforó un extremo inferior de la sección de cañería, lejos de la soldadura, para conectar al circuito eléctrico una resistencia de 5  $\Omega$  (resistencia limitante). Esto fue necesario para que la corriente en el circuito no dañe la fuente o los otros elementos del mismo. En la figura 3.3 se muestra el equipamiento utilizado. Las figuras 3.4 a y b muestran con mayor detalle algunos de los equipos empleados.

**Figura 3. 3** Circuito eléctrico armado para la medición de las resistencias de las soldaduras.



**Figura 3. 4** Equipamiento utilizado A) Pinza amperométrica; B) Multímetro HP Hewlett Packard.



Una vez preparadas las muestras, se conectó la soldadura con la resistencia limitante a la fuente de voltaje. Se hizo circular una corriente de aproximadamente 9 A por el circuito y se midió el valor exacto de la misma con una pinza amperométrica. Se midió la caída de

tensión entre el cable de cobre y la soldadura. Se midió también el valor de tensión offset, definida como el valor de tensión que aparece en medición cuando no hay corriente circulando por la soldadura. Sumando el valor de tensión medida con el valor de offset y a partir de la Ley de Ohm se logró obtener el valor de la resistencia medida.

Ecuación 3. 1

$$V = R.I$$

Para obtener el valor de la resistencia propia de la soldadura fue necesario el cálculo de los errores sistemáticos y de los errores aleatorios.

### 3.2.2.1 Errores sistemáticos

Se define como error sistemático como aquel que, en las mismas condiciones del ensayo, afectan el valor de las mediciones con el mismo valor y signo, es decir, son errores reproducibles. Por esta razón deben ser corregidos.

Para el cálculo de este error se empleó la siguiente ecuación 3.1.

Ecuación 3. 2

$$\Delta R_{sistemático} = - \frac{R_{soldadura} * R_{medida}}{R_{interna\ voltímetro}}$$

Donde la resistencia interna del voltímetro se obtuvo del manual del mismo.

La resistencia de la soldadura se calcula según la ecuación 3.3.

Ecuación 3. 3

$$R_{soldadura} = \frac{V_{medido}}{I_{soldadura}} = \frac{V_{medido}}{I_{medida} - I_v} = \frac{V_{medido}}{I_{medida} - R_{interna\ voltímetro}}$$

Siendo  $I_{soldadura}$  la corriente que circula por la soldadura e  $I_v$  la corriente que circula por el voltímetro.

$$R_{interna\ voltímetro} = 10\ M\Omega$$

Finalmente, la resistencia de la soldadura corregida se calcula según la ecuación 3.4.

Ecuación 3. 4

$$R_c = R_{soldadura} - \Delta R_{sistemático}$$

### 3.2.2.2 Errores fortuitos

Una vez corregidos los errores sistemáticos, que son debidos al método de medición empleado, los valores de tensión y corriente medidos y utilizados en el cálculo están afectados por los errores fortuitos de los instrumentos involucrados  $\pm\Delta U$  y  $\pm\Delta I$ , respectivamente; de manera que el valor así calculado de R resultará afectado por un error  $\pm\Delta R$  relacionado con

los errores parciales mencionados, propios de cada instrumento. Esto constituye lo que se denomina propagación de errores en las mediciones indirectas.

Los errores del voltímetro y del amperímetro vienen especificados por el fabricante en función de su clase de precisión, y vienen expresados según las ecuaciones 3.5 y 3.6.

Ecuación 3. 5

$$\Delta V = 0.005 * V_{medido} + 0.0035 * 100mV$$

Ecuación 3. 6

$$\Delta I = 0.01 * I_{medido}$$

Los valores a fondo de escala se obtuvieron del manual de cada equipo.

$$V_f = 100mV$$

$$I_f = 39,99A$$

De las expresiones anteriores, se calcula el máximo error que puede cometer cada equipo en cada una de las mediciones efectuadas.

A partir de la Ley de Ohm se define

$$R = \frac{V}{I}$$

Luego, con ayuda de la ecuación 3.7.

Ecuación 3. 7

$$dR = \frac{\partial R}{\partial V} * \frac{1}{I} * dV + V * \frac{\partial R}{\partial I} dI$$

Derivando, finalmente se obtiene la ecuación 3.8.

Ecuación 3. 8

$$\Delta R = \frac{\Delta V}{I} + \frac{V}{I^2} * \Delta I$$

Por último, el valor final de la resistencia de la soldadura cuproaluminotérmica se obtiene según la ecuación 3.9.

Ecuación 3. 9

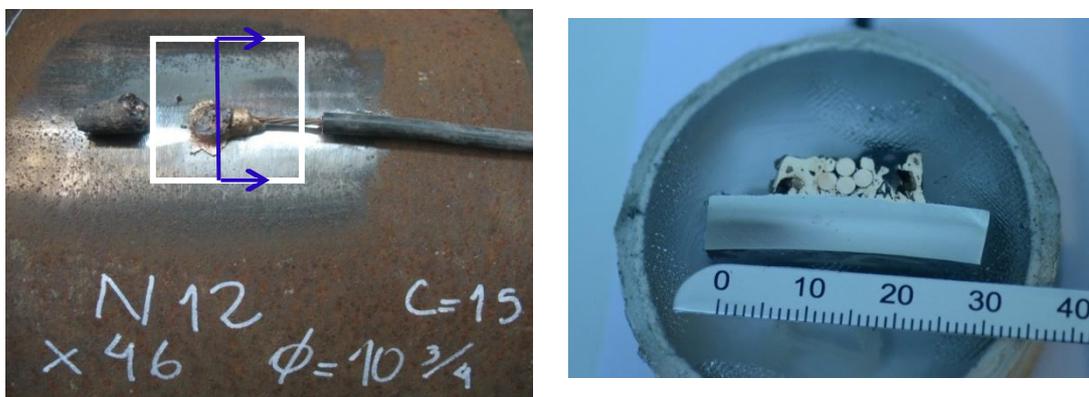
$$R_f = R_c \pm \Delta R$$

### 3.2.3 Caracterización macroscópica

Para la caracterización macroscópica se prepararon cortes transversales de cada una de las probetas utilizando la cortadora metalográfica y las probetas obtenidas se incluyen en una resina acrílica para su preparación, la figura 3.5 muestra una probeta preparada.

La preparación metalográfica se realizó mediante el pulido con lijas al agua, variándose el tamaño de granulometría en el siguiente orden: 120, 240, 360, 400, 600, 1200 y 1500, empleando por ultimo un paño con pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$ .

**Figura 3. 5** Cortes realizados en las soldaduras para la preparación de las probetas.



Para la evaluación se consideró el desprendimiento de la soldadura del metal base, el desprendimiento del cable de cobre de la soldadura, la existencia o no de fundición del mismo, la porosidad y el teñido de origen térmico en el lado opuesto a la soldadura.

### 3.2.4 Medición de la microdureza

Una vez pulidas las probetas se las atacó químicamente y se realizaron las mediciones de microdureza Vickers con una carga de 1000 gr y un tiempo de 10 s de acuerdo a la norma ASTM E384-10. Las mediciones se realizaron sobre el metal base, bordeando al cobre, como se muestra en la figura 3.6. Se mantuvo una distancia de 0,5 mm entre cada impronta, excepto en algunos casos en donde se evidenciaba algún defecto sobre el acero que podría llegar a afectar la medición.

**Figura 3. 6** Medición de microdureza.



El equipo utilizado fue un microdurómetro digital marca FUTURE TECH FM700, figura 3.7.

**Figura 3. 7** Microdurómetro utilizado.



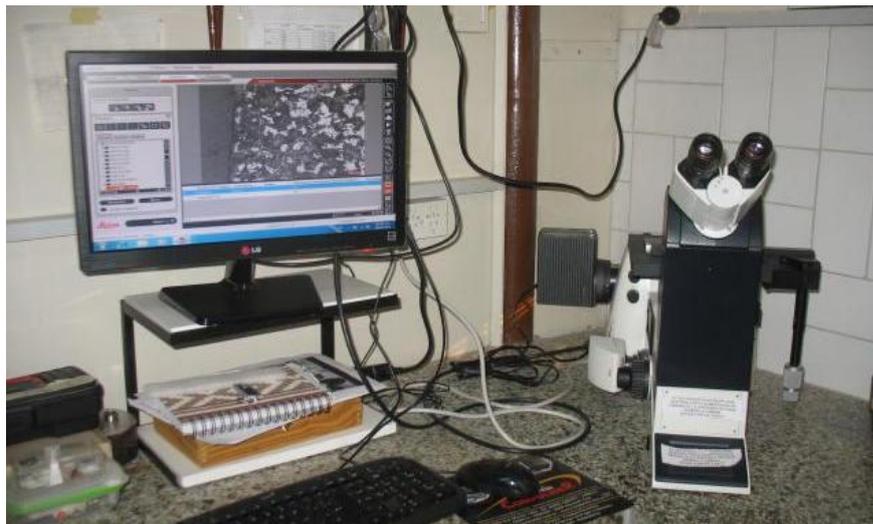
### **3.2.5 Caracterización de la microestructura mediante Microscopía Óptica**

Para revelar la microestructura presente en el metal base se utilizó como reactivo de ataque una solución llamada, Nital 4%, compuesta por 96 ml de alcohol etílico y 4 ml de ácido nítrico al 96%.

Para el ataque se sumergió la probeta en el mismo durante 10 s, se la extrajo, se la enjuagó con agua, luego con alcohol y finalmente se seco con aire caliente.

En esta etapa se buscó identificar la presencia de fisuras, el crecimiento de grano en la Zona afectada por calor (ZAC) y la presencia de microestructuras frágiles en el metal base (tipo martensita). Para la observación se empleó un microscopio óptico LEICA DMI 3000 M, del que se muestra en la figura 3.8.

**Figura 3. 8** Microscopio utilizado LEICA DMI 3000 M.



### **3.2.6 Medición del porcentaje de unión**

Para lograr establecer una relación entre la resistencia de la soldadura medida y la calidad de la misma se midió el porcentaje de unión existente. Para esto se empleó el mismo equipo que para el análisis micrográfico. Se obtuvo un porcentaje de unión entre el cobre y el acero a partir de la medición de la longitud total de contacto entre ambos metales y de la zona con unión metalúrgica, caracterizada por el crecimiento de grano del metal base.

## Capítulo 4

### Resultados y discusiones

Las soldaduras se realizaron en dos etapas primero se soldaron 25 probetas, y luego a partir de los resultados obtenidos se propusieron modificaciones y se soldaron 15 probetas con un nuevo método de soldadura, estableciendo como motivo principal de falla del anterior la humedad absorbida por los elementos necesarios para efectuar la soldadura. Para la segunda etapa del estudio, se adicionó al proceso de soldadura un paso previo que consistió en el secado del crisol con un soplete y el calentamiento del fundente en un horno eléctrico para eliminar la humedad, posible causante de la porosidad en las muestras.

#### 4.1 Realización de las primeras soldaduras:

La tabla 4.1 muestra las características de las mismas.

**Tabla 4.1** Características de las soldaduras realizadas.

N° Muestra	API	Espesor cañería (mm)	Sección del cable (mm <sup>2</sup> )	Carga	Tamaño crisol	Peso pólvora (gr)	Marca pólvora	Marca fundente
1	X52	6.35	35	15	35	1.89	FACBSA	FACBSA
2	X52	6.35	35	15	35	1.87	FACBSA	FACBSA
3	X52	6.35	35	15	35	2.25	FACBSA	FACBSA
4	X52	6.35	35	45	35	2.22	FACBSA	FACBSA
5	X52	6.35	35	45	35	2.04	FACBSA	FACBSA
6	X52	6.35	35	45	35	2.04	FACBSA	FACBSA
7*	X52	6.35	35	30	35	3.66	FACBSA	FACBSA
8	X52	6.35	35	30	35	2.11	FACBSA	FACBSA
9*	X52	6.35	35	30	35	3.47	FACBSA	FACBSA
24	X52	6.35	4	25	35	1.74	FACBSA	FACBSA
25	X52	6.35	4	20	35	2.05	FACBSA	FACBSA
10**	X46	5.56	4	15	45	2.30	FACBSA	FACBSA
11	X46	5.56	4	15	45	1.98	FACBSA	FACBSA
12	X46	5.56	4	15	45	1.95	FACBSA	FACBSA
15***	X46	5.56	4	15	45	2.15	FACBSA	GENROD
19	X46	5.56	4	15	45	2.05	FACBSA	FACBSA
13***	X46	5.56	4	45	35	1.88	FACBSA	GENROD

<b>14***</b>	X46	5.56	35	30	35	2.34	FACBSA	GENROD
<b>20**</b>	X46	5.56	35	30	35	2.14	FACBSA	FACBSA
<b>21**</b>	X46	5.56	35	30	35	1.92	FACBSA	FACBSA
<b>16**</b>	X46	5.56	4	30	35	2.30	FACBSA	FACBSA
<b>22**</b>	X46	5.56	4	30	35	1.88	FACBSA	FACBSA
<b>23**</b>	X46	5.56	4	30	35	2.29	FACBSA	FACBSA
<b>17****</b>	X46	5.56	4	20	35	1.68	FACBSA	POWER
<b>18****</b>	X46	5.56	4	25	35	1.78	FACBSA	POWER

\*= Se utilizaron dos envases de pólvora.

\*\*=La soldadura se realizo sobre una costura preexistente.

\*\*\*=Se utilizo una marca de fundente GENROD.

\*\*\*\*= Se utilizo pólvora marca POWER

#### 4.1.1 Resultado de las mediciones eléctricas

La tabla 4.2 muestra los valores de la tensión medida, la corriente que se hizo circular y la resistencia medida para cada muestra.

**Tabla 4.2** Valores de tensión, corriente y resistencia medidos para cada muestra.

Numero muestra	I(A)	V <sub>medido</sub> (mV)	V <sub>offset</sub> (mV)	R <sub>medida</sub> (mΩ)
<b>2</b>	9,03	5,08	0,020	0,564
<b>3</b>	9,04	5,16	0,026	0,573
<b>4</b>	9,00	2,00	0,045	0,227
<b>5</b>	9,40	2,20	0,023	0,236
<b>6</b>	9,00	2,85	0,032	0,320
<b>8</b>	9,03	3,86	0,030	0,430
<b>9</b>	9,03	3,63	0,034	0,405
<b>10</b>	9,00	1,85	0,022	0,208
<b>11</b>	9,05	1,13	0,034	0,128
<b>12</b>	9,00	1,61	0,040	0,183
<b>14</b>	9,05	7,00	0,032	0,777
<b>15</b>	9,01	0,85	0,035	0,098
<b>16</b>	9,06	0,90	0,039	0,103
<b>17</b>	9,00	0,45	0,010	0,051
<b>18</b>	9,01	2,60	0,034	0,292

<b>20</b>	9,00	0,47	0,030	0,055
<b>21</b>	9,02	0,49	0,029	0,057
<b>24</b>	9,10	0,77	0,027	0,087

En las probetas 1, 13 y 25 la soldadura se desprendió antes de la medición

A partir de las ecuaciones mostradas en el apartado 3.2.2, se obtuvieron los valores de las resistencias de las soldaduras mostrados en la tabla 4.3:

**Tabla 4.3:1** Resistencia final de la soldadura.

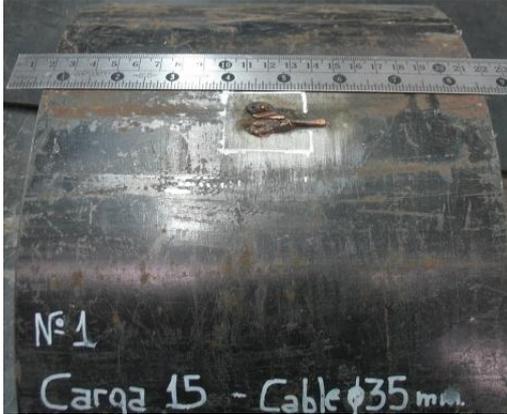
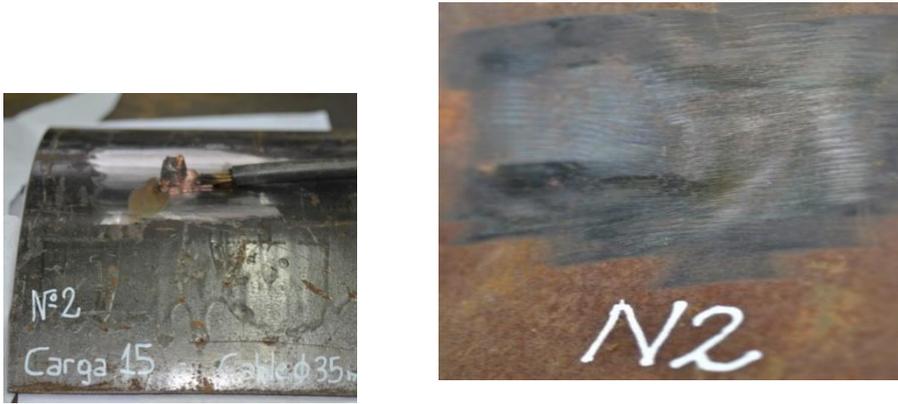
<b>Numero de muestra</b>	<b>Rsoldadura (mΩ)</b>	<b>ΔR (mΩ)</b>
<b>2</b>	0,564	0,043
<b>3</b>	0,573	0,043
<b>4</b>	0,227	0,040
<b>5</b>	0,236	0,039
<b>6</b>	0,320	0,041
<b>8</b>	0,430	0,042
<b>9</b>	0,405	0,042
<b>10</b>	0,208	0,040
<b>11</b>	0,128	0,039
<b>12</b>	0,183	0,040
<b>14</b>	0,777	0,045
<b>15</b>	0,098	0,039
<b>16</b>	0,103	0,039
<b>17</b>	0,051	0,039
<b>18</b>	0,292	0,041
<b>20</b>	0,055	0,039
<b>21</b>	0,057	0,039
<b>24</b>	0,087	0,039

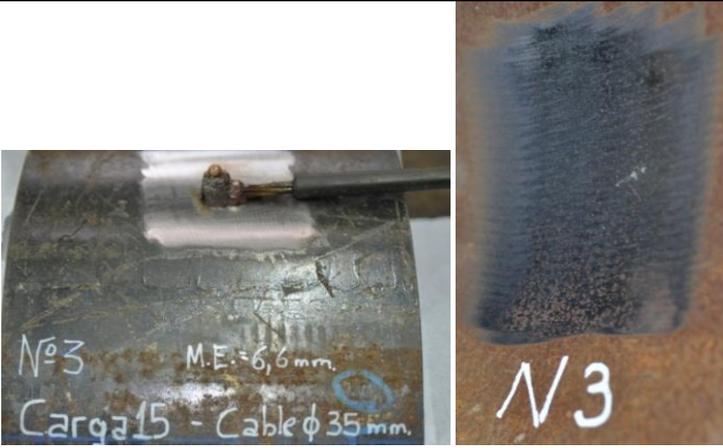
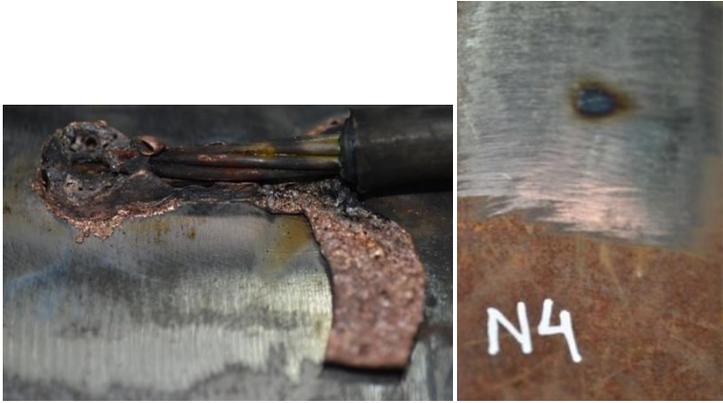
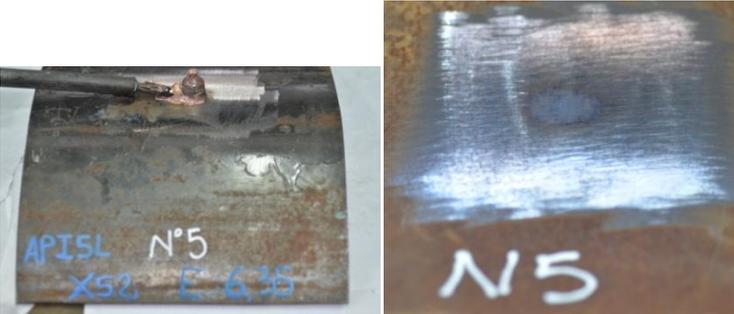
#### 4.1.2 Resultado de la inspección visual y de las macrografías

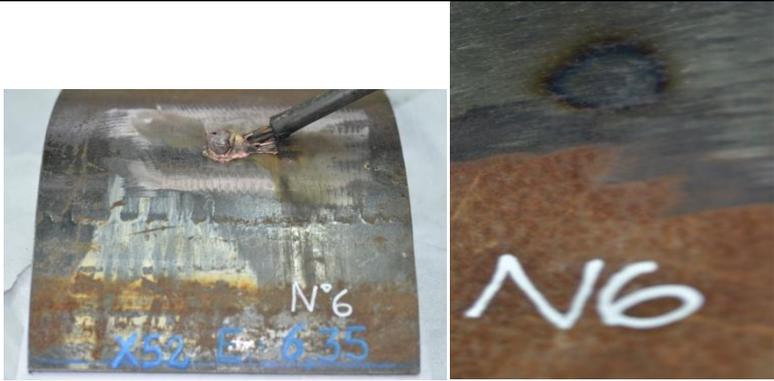
La tabla 4.4 muestra los resultados de la inspección visual, se encontraron las siguientes condiciones, se desprende el cable de cobre durante la manipulación de la muestra,

el cobre no queda adherido a la superficie o su adherencia es parcial, se observa porosidad y desprendimiento de la soldadura.

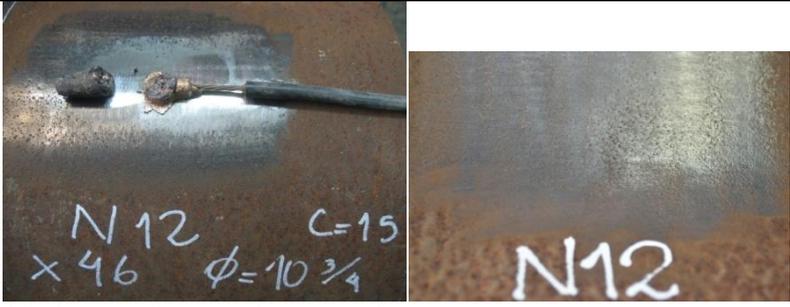
**Tabla 2.4:** Resultados de la inspección visual.

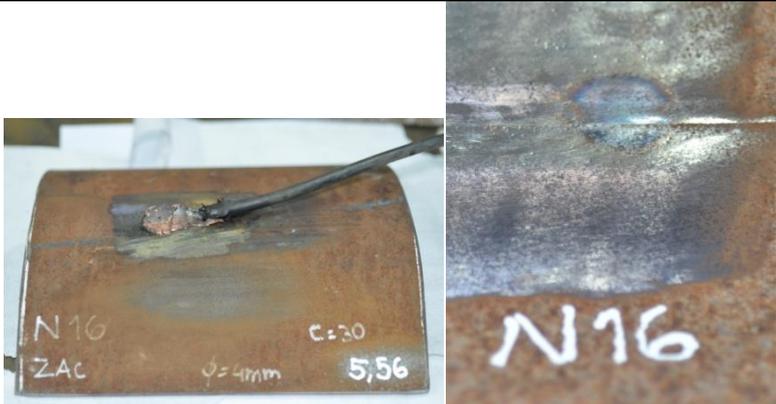
Número de muestra	Observaciones
1	 <p>La soldadura se desprendió parcialmente.</p>
2	 <p>El cable de cobre no se fundió sobre la superficie metálica. La soldadura no se desprendió. El lado interno de la cañería presentó un leve teñido de origen térmico.</p>

3	 <p>La soldadura se desprendió.</p>
4	 <p>El cable de cobre no se fundió sobre la superficie metálica. La soldadura no se desprendió. El lado interno de la cañería presentó un fuerte teñido de origen térmico.</p>
5	 <p>El cable de cobre no se fundió sobre la superficie metálica. La soldadura no se desprendió. El lado interno de la cañería presentó teñido térmico.</p>

6	
	<p>El cable de cobre no se fundió sobre la superficie metálica. La soldadura no se desprendió. El lado interno de la cañería presentó un fuerte teñido térmico.</p>
7	
	<p>La soldadura se desprendió.</p>
8	
	<p>El cable de cobre no se fundió sobre la superficie metálica. La soldadura no se desprendió. El lado interno de la cañería presentó un fuerte teñido de origen térmico.</p>

9	 <p>El cable de cobre no se fundió sobre la superficie metálica. La soldadura no se desprendió. El lado interno de la cañería presentó un fuerte teñido de origen térmico.</p>
10	 <p>El cobre se fundió sobre la superficie metálica. La superficie interna de la cañería no presentó teñido de origen térmico.</p>
11	 <p>El cable de cobre se fundió sobre la superficie metálica. La superficie interna de la cañería no presentó teñido de origen térmico.</p>

12	
<p>La soldadura se desprendió parcialmente. La superficie interna de la cañería no presentó teñido de origen térmico.</p>	
13	
<p>La soldadura se desprendió.</p>	
14	
<p>La soldadura presenta unión parcial con la superficie. La superficie interna de la cañería presentó un leve teñido de origen térmico.</p>	
15	
<p>El cable de cobre se fundió sobre la superficie metálica. La superficie interna de la cañería no presentó teñido de origen térmico.</p>	

<p><b>16</b></p>	 <p>El cable de cobre se fundió sobre la superficie metálica. La superficie interna de la cañería presentó un fuerte teñido de origen térmico.</p>
<p><b>17</b></p>	 <p>El cable de cobre se fundió sobre la superficie metálica. La superficie interna de la cañería presentó un leve teñido de origen térmico.</p>
<p><b>18</b></p>	<p>La soldadura se observa con unión a la cañería.</p>
<p><b>19</b></p>	 <p>La soldadura resulto porosa con poca unión a la superficie. El cable de cobre se desprendió.</p>

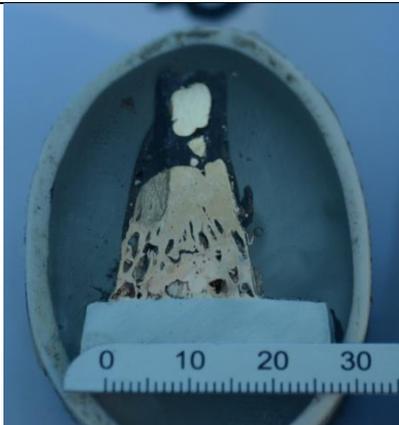
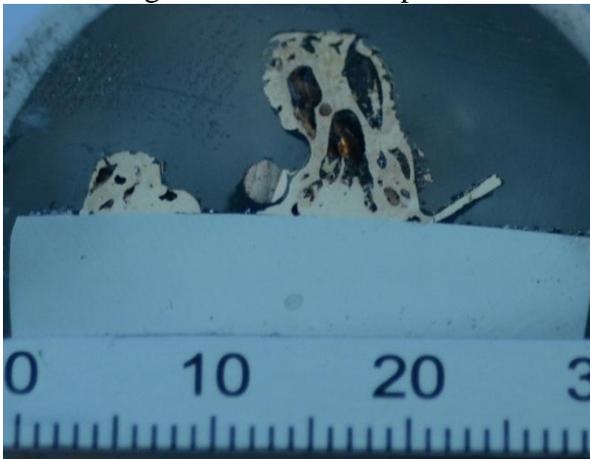
<p>20</p>	 <p>Nº 20 X46. Carga 30 Cable <math>\phi</math> 35mm.</p> <p>La soldadura se observa con unión a la cañería. La superficie interna de la cañería presento teñido de origen térmico.</p>
<p>21</p>	 <p>Nº 21 X46 Carga 30 cable <math>\phi</math> 35mm.</p> <p>La soldadura se observa con unión a la cañería. La superficie interna de la cañería presento un fuerte teñido de origen térmico.</p>
<p>22</p>	 <p>Nº 22 ZAC. Carga 30 X46 cable <math>\phi</math> 4mm</p> <p>Se desprendió el cable que conecta la soldadura.</p>
<p>23</p>	 <p>Nº 23 ZAC crisol 3S Carga 30 X46 cable <math>\phi</math> 4mm</p> <p>Se desprendió el cable que conecta la soldadura.</p>
<p>24</p>	 <p>Nº 24 Crisol 3S Carga 25 X52 cable <math>\phi</math> 4mm.</p> <p>La soldadura se observa con unión a la cañería. La superficie interna de la cañería presento teñido de origen térmico.</p>

25	 <p>Se desprendió el cable que conecta la soldadura.          La superficie interna de la cañería presento un fuerte teñido de origen térmico.</p>
----	--

En función de estos resultados las muestras N° 1, 7, 13, 19, 22, 23 y 25 no se preparan para la caracterización por macrografía.

Posteriormente las muestras se prepararon metalográficamente, en la tabla 4.5 se muestran los resultados obtenidos de las macrografías y las figuras asociadas a cada probeta.

**Tabla 4.53** Resultados de la caracterización macroscópica.

Número Muestra	Observaciones
2	 <p>Se observa unión metalúrgica con abundante porosidad.</p>
3	 <p>La soldadura se desprendió.</p>

4



El cable de cobre no se fundió completamente sobre la superficie metálica.

5

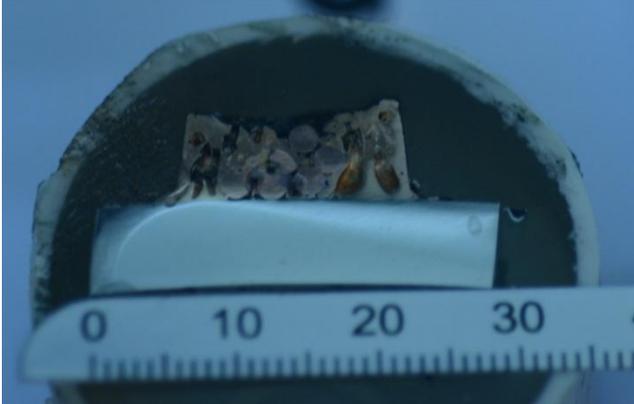
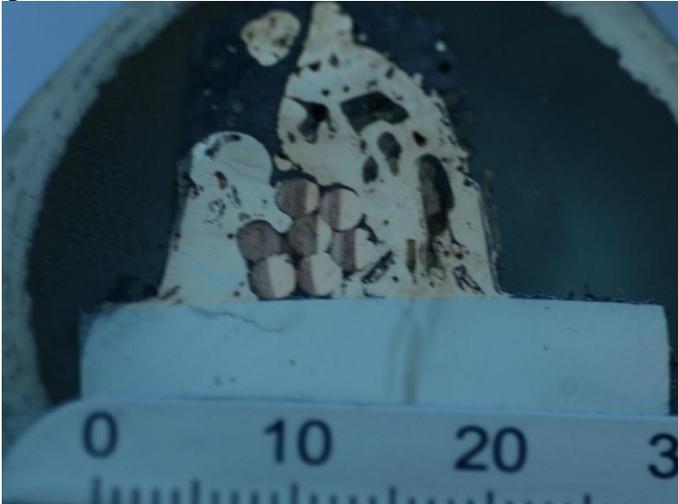


El cable de cobre no se fundió completamente sobre la superficie metálica.

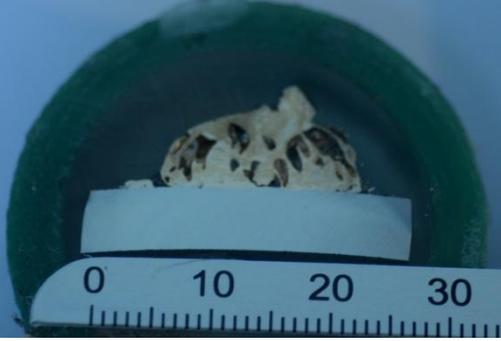
6



El cable de cobre no se fundió sobre la superficie metálica. La soldadura no se desprendió.

8	
9	<p>El cable de cobre no se fundió sobre la superficie metálica. La soldadura no se desprendió. Hay unión metalúrgica parcial.</p> 
10	<p>El cable de cobre no se fundió sobre la superficie metálica. El cable se desprendió parcialmente.</p> 

11	 A close-up photograph of a metal joint, possibly a weld or a brazed connection. The metal surface is light-colored and shows some porosity. A ruler is placed below the joint for scale, showing markings from 0 to 30.
12	<p>Se observa unión metalúrgica y porosidad superficial.</p>  A close-up photograph of a metal joint, similar to the one in row 11. The metal surface is light-colored and shows some porosity. A ruler is placed below the joint for scale, showing markings from 0 to 30.
14	<p>El cable de cobre se desprendió de la soldadura.</p>  A close-up photograph of a metal joint, similar to the ones in rows 11 and 12. The metal surface is light-colored and shows some porosity. A ruler is placed below the joint for scale, showing markings from 0 to 30. <p>El cable de cobre no se fundió sobre la superficie metálica y se desprendió parcialmente. La soldadura no se desprendió pero es muy porosa.</p>

15	
16	<p>Se observa abundante porosidad y poca unión metalúrgica.</p> 
17	<p>Se observa buena unión metalúrgica y porosidad hacia la superficie.</p> 
18	<p>El cable de cobre se fundió sobre la superficie metálica. Se observa porosidad hacia la superficie.</p>  <p>El cable de cobre se fundió sobre la superficie metálica. La soldadura es muy porosa.</p>

20	 <p data-bbox="400 674 1364 734">El cable de cobre no se fundió sobre la superficie metálica. La soldadura no se desprendió, pero se observa mucha porosidad.</p>
21	 <p data-bbox="400 1111 1364 1171">El cable de cobre no se fundió sobre la superficie metálica. La soldadura no se desprendió.</p>
24	 <p data-bbox="400 1693 1364 1753">El cable de cobre se fundió sobre la superficie metálica. Se observa unión metalúrgica y porosidad hacia la superficie.</p>

Luego de los estudios realizados, se determinó que las únicas muestras que podían seguir siendo analizadas eran las probetas 11, 16, 17, 18 y 24. Las características de las mismas se muestran nuevamente en la tabla 4.6.

**Tabla 4.6:** Muestras obtenidas que después de la inspección visual y el estudio macroscópico seguirán siendo analizadas.

N° Muestra	API	Espesor cañería (mm)	Diámetro cable (mm)	Carga	Tamaño crisol	Peso pólvora (g)	Marca pólvora	Marca fundente
<b>11</b>	X46	5.56	4	15	45	1.98	FACBSA	FACBSA
<b>16**</b>	X46	5.56	4	30	35	2.30	FACBSA	FACBSA
<b>17****</b>	X46	5.56	4	20	35	FACBSA	POWER	<b>17****</b>
<b>18*****</b>	X46	5.56	4	25	35	1.78	FACBSA	POWER
<b>24</b>	X52	6.35	4	25	35	1.74	FACBSA	FACBSA

\*\*=La soldadura se realizo sobre una costura preexistente.

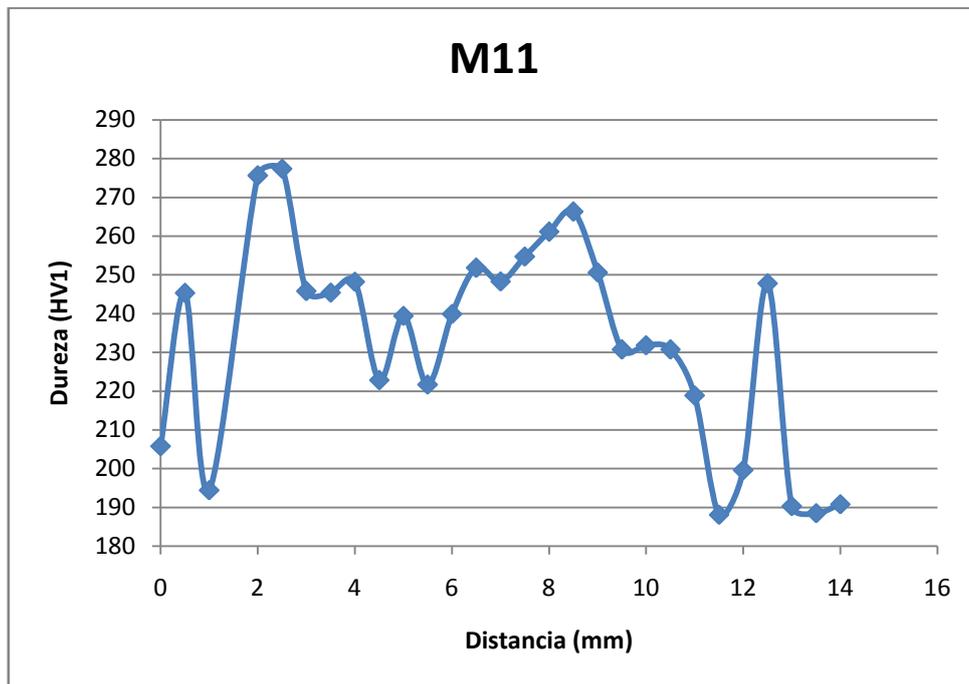
\*\*\*=Se utilizo una marca de fundente GENROD.

\*\*\*\*= Se utilizo pólvora marca POWER

#### 4.1.3 Resultados de la medición de microdureza

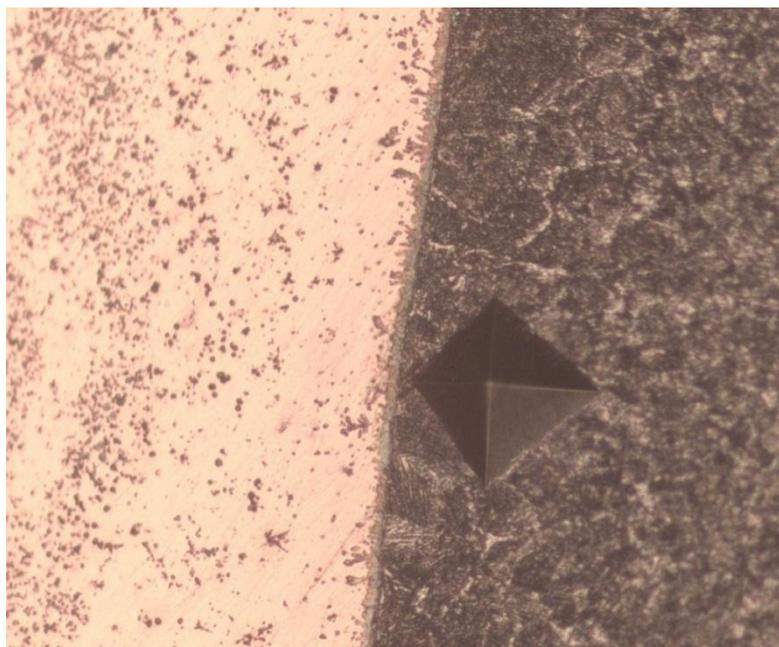
El perfil de microdureza, determinado en el corte transversal de la probeta M11, se presenta en la figura 4.1. Los valores obtenidos resultaron ser muy fluctuantes, siendo los valores mínimo y máximo de HV1 188,1 y 277,4 respectivamente.

Figura 4. 1 Perfil microdureza probeta M11.



En la Figura 4.2 se puede observar una imagen tomada con el microscopio de la impronta que mostró menor dureza. Aquí se puede observar claramente el crecimiento del grano en el metal base, así también como la penetración del cobre en los bordes del mismo.

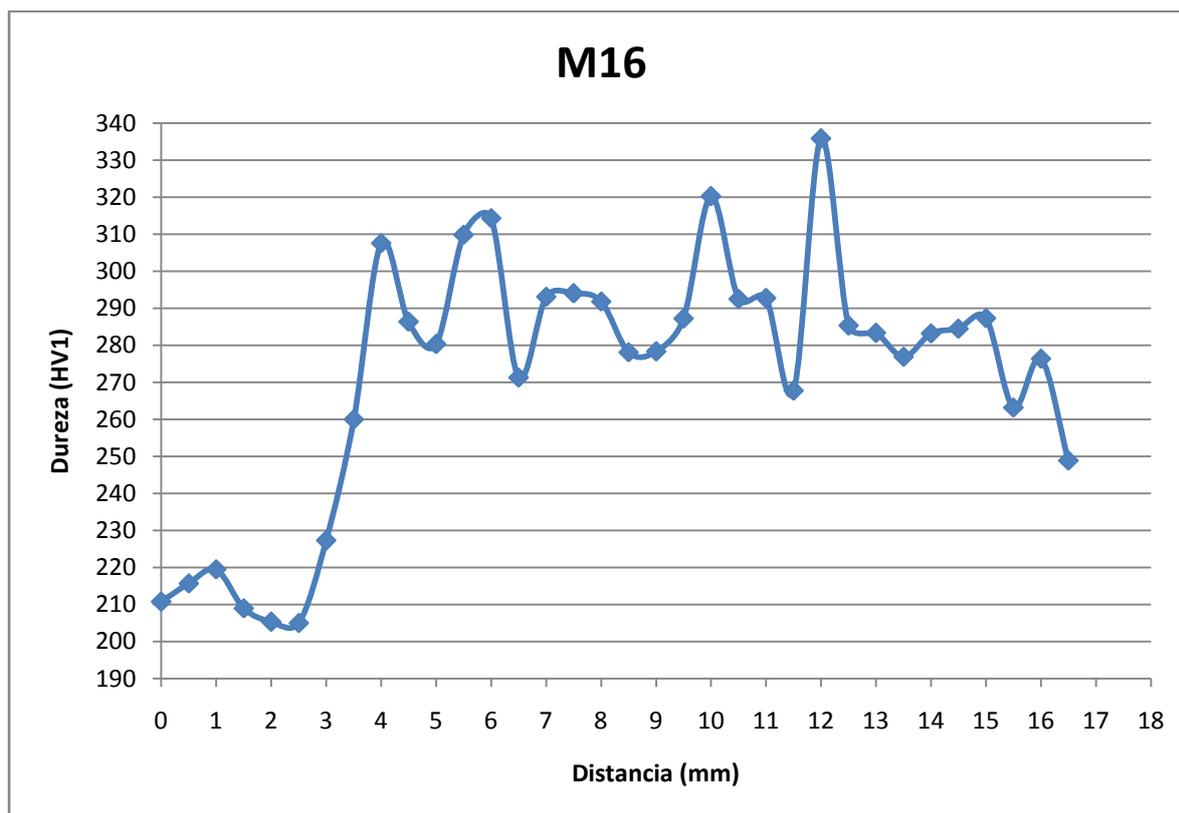
Figura 4. 2 Impronta en la zona que mostró menor dureza HV1: 188,1 (M11)



Aquellas zonas donde los valores de microdureza resultaron más altos no presentaron crecimiento de grano.

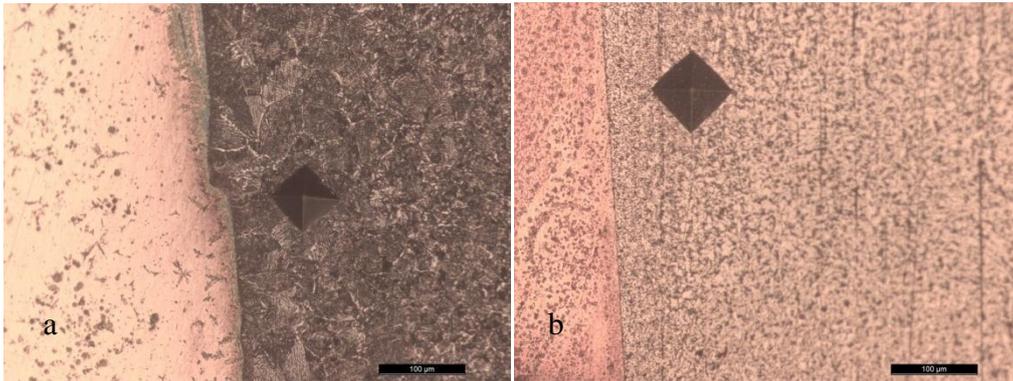
El perfil de microdureza para la probeta M16 se presenta en la Figura 4.3. Los valores mínimos y máximos obtenidos fueron 205 HV y 335,8 HV respectivamente.

**Figura 4. 3** Perfil microdureza probeta M16.



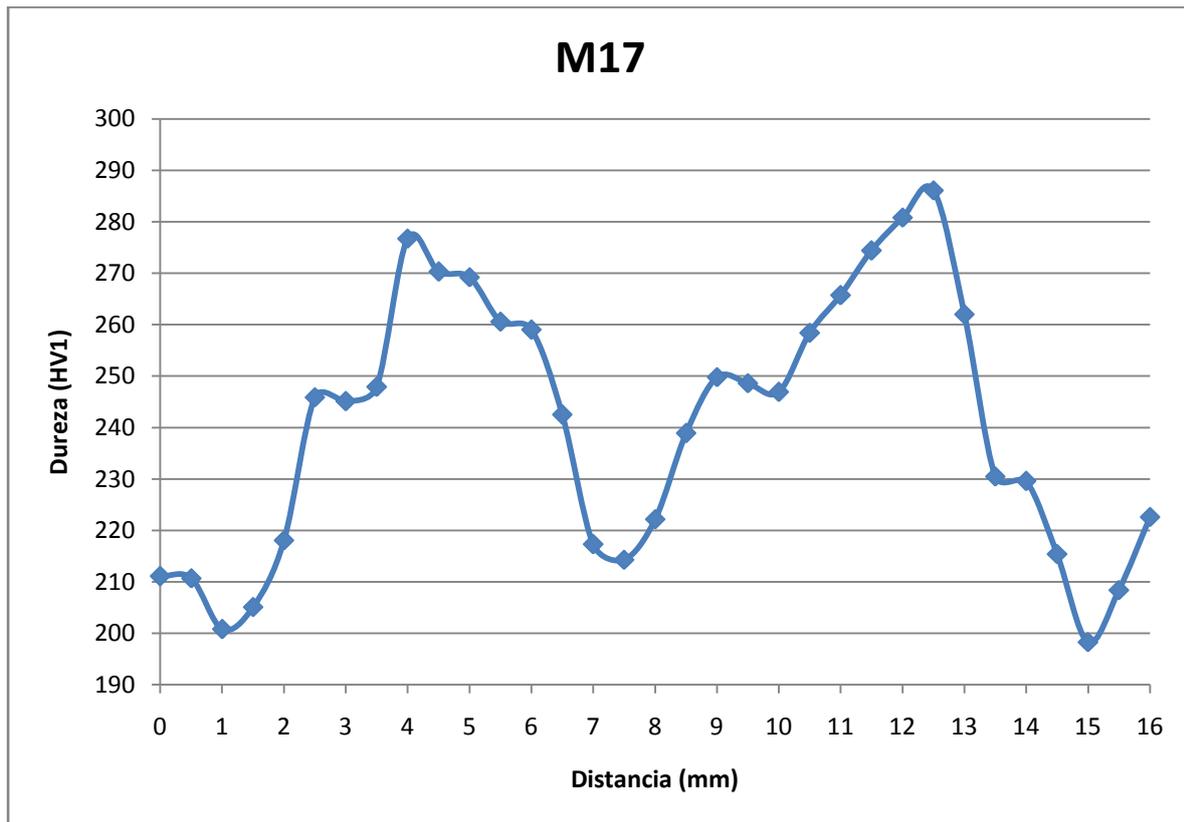
Al igual que en el caso anterior, la zona que presento el menor valor de microdureza fue aquella en la que el crecimiento de grano del acero fue mayor, y los valores más altos se dieron donde no creció el grano. Ambas improntas se muestran en la figura 4.4.

Figura 4. 4 Impronta que mostró menor (a) y mayor dureza (b) (M16)



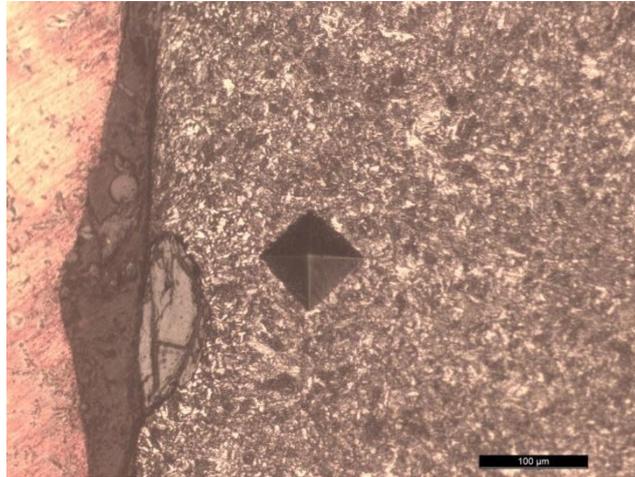
El perfil de microdureza para la probeta M17 se presenta en la figura 4.5. Los valores mínimos y máximos obtenidos fueron 198,3 HV y 286,1 HV respectivamente.

Figura 4.5. Perfil microdureza probeta M17.



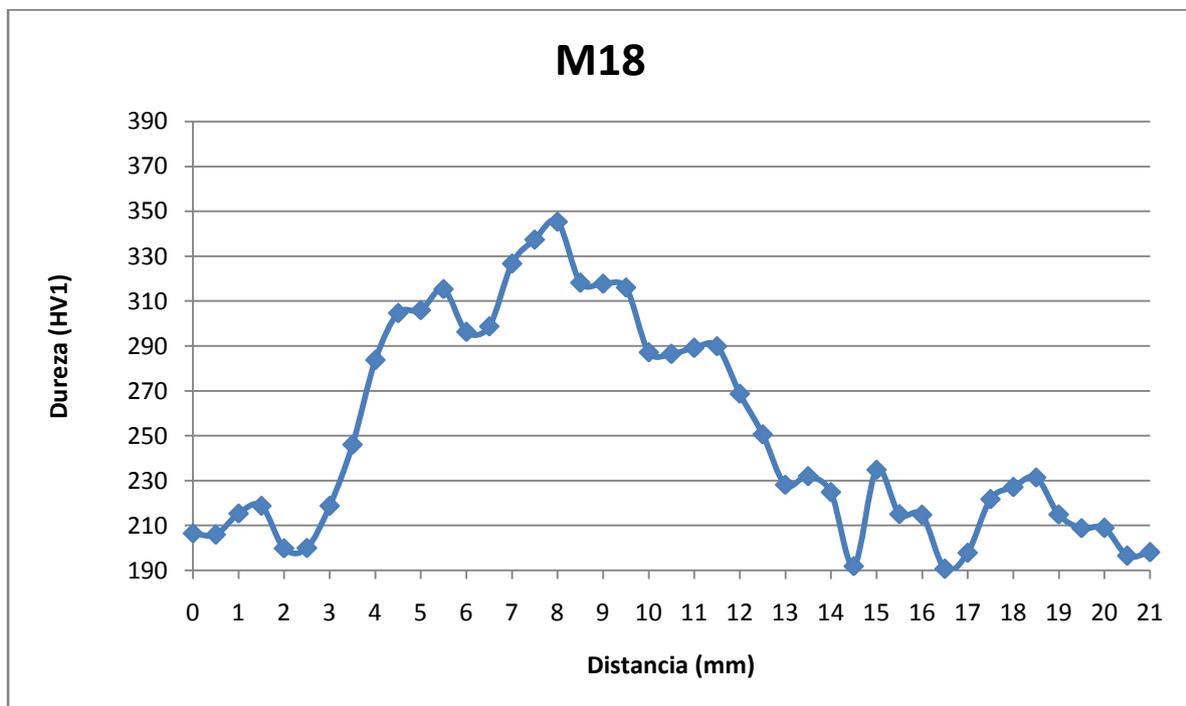
En este caso, el menor valor de microdureza se da en una zona de la muestra donde no se produjo unión metalúrgica debido a la presencia de impurezas. Esta zona igualmente presento crecimiento del grano como se evidencia en la figura 4.6.

Figura 4.6 Impronta en la zona que mostró menor microdureza (M17).



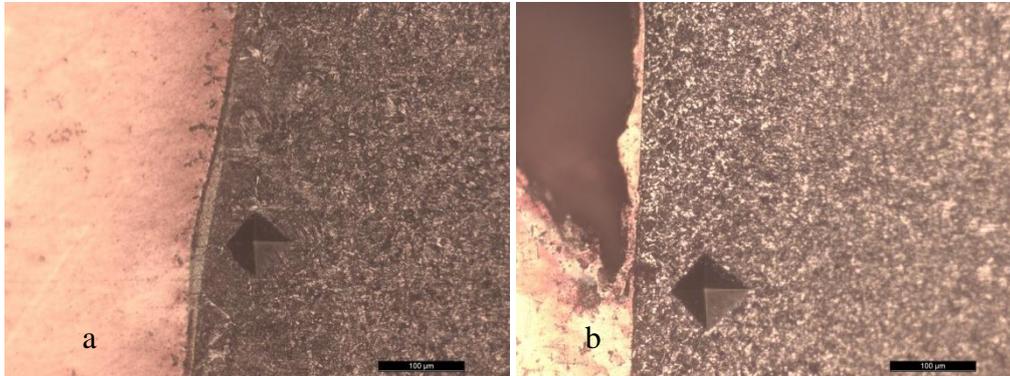
El perfil de microdureza para la probeta M18 se presenta en la figura 4.7. Los valores mínimos y máximos obtenidos fueron 190,7 HV y 345,3 HV respectivamente.

Figura 4.7 Perfil microdureza probeta M18.



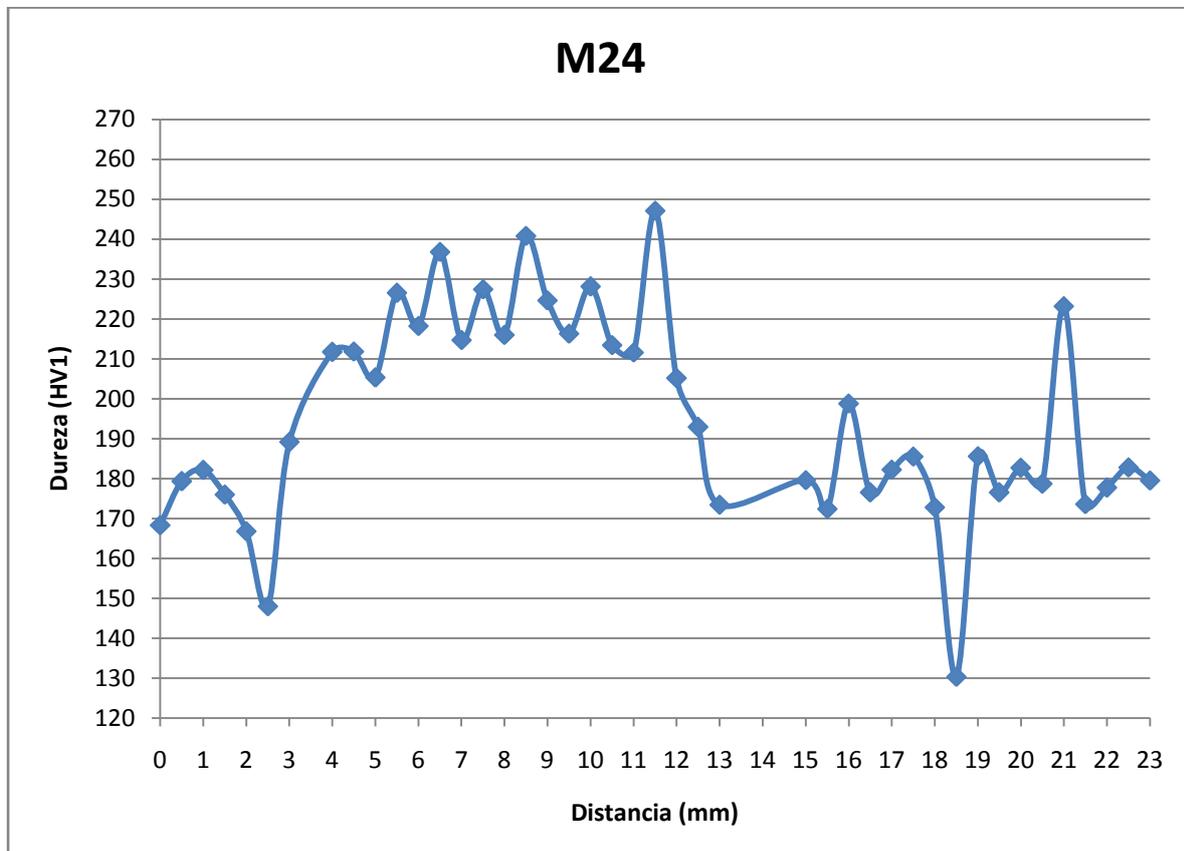
Al igual que en la M11 y M16, la zona que presentó el menor valor de microdureza fue aquella en la que el crecimiento de grano del acero fue mayor, y los valores más altos se dieron donde no creció el grano. Las improntas realizadas en ambas zonas se observan en la figura 4.8.

Figura 4.8 Impronta en la zona que mostró menor (a) y mayor dureza (b) (M18).



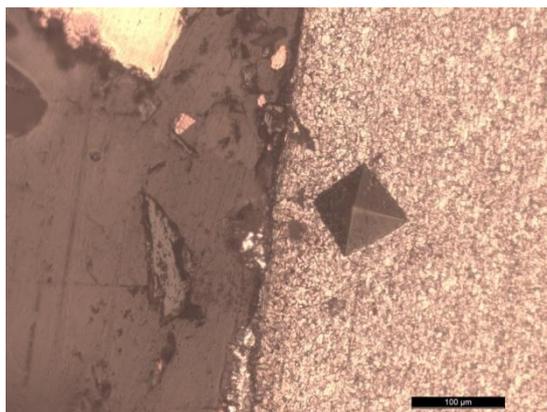
El perfil de microdureza para la probeta M24 se presenta en la figura 4.9. Los valores mínimos y máximos obtenidos fueron 130,3 HV y 247,1 HV respectivamente. La muestra M24 presentó durezas menores a las otras, ya que en este caso se trabajó con un acero X52, mientras que en los anteriores se empleó como metal base un acero X46

Figura 4.9. Perfil microdureza probeta M24.



Para este caso se presentó un perfil de microdureza más uniforme, con pocos valores por debajo de la media. Esto se debe a que la muestra mostró muy poca unión metálica y muchas zonas donde no se evidenció crecimiento de grano. Los valores de microdureza más bajos se obtuvieron para aquellas regiones donde hubo crecimiento de grano de acero, figura 4.10.

**Figura 4.10** Impronta en la zona que mostró mayor dureza (M24).



En todas las probetas el comportamiento fue oscilante.

#### 4.1.4 Resultados de la medición del porcentaje de unión

Con ayuda del microscopio y las improntas generadas con el análisis de microdureza se calculó el porcentaje de de la pieza con unión metálica. Los resultados se muestran en la tabla 4.7.

**Tabla 4.7** Porcentaje de unión metálica en cada pieza.

Número de muestra	Longitud total ( $\mu\text{m}$ )	Longitud con unión metálica ( $\mu\text{m}$ )	Porcentaje que presenta unión metálica
11	14500,89	920,63	6,35
16	17503,37	2027,09	11,58
17	15293,61	1894,70	12,39
18	20800,45	1655,91	5,913
24	17764,30	3533,55	19,891

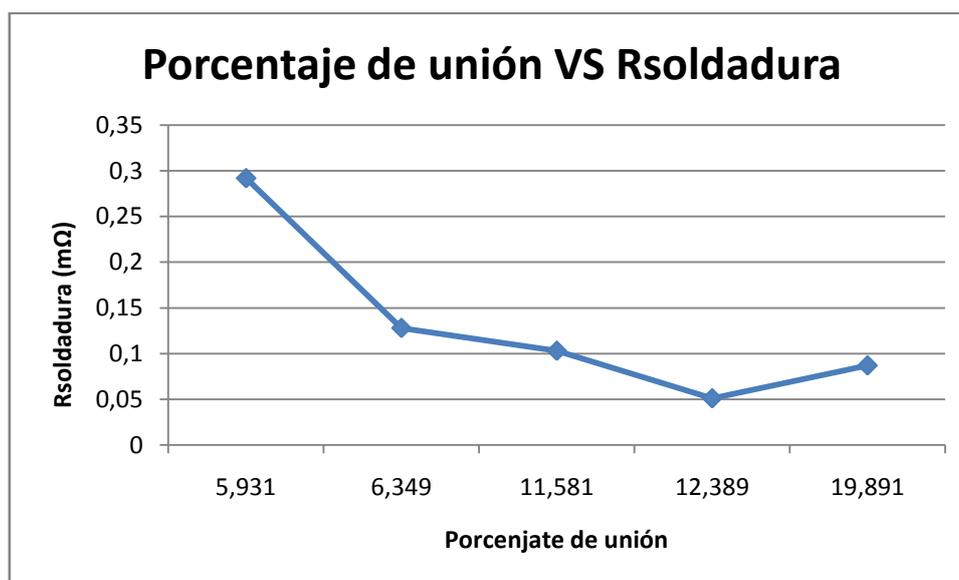
En todos los casos el porcentaje de unión metálica fue bajo, menor al 20%. La muestra que presentó un valor más adecuado fue la número 24. En la tabla 4.8 se detallan los valores de resistencias calculados para estas piezas y el porcentaje de unión metálica obtenido en cada caso con el fin de establecer una relación entre ambos valores.

**Tabla 4.4** Porcentaje de unión metálica y resistencia de la soldadura para cada pieza.

Número de muestra	Porcentaje que presenta unión metálica	Rsoldadura (mΩ)
11	6,35	0,128
16	11,60	0,103
17	12,40	0,051
18	5,930	0,292
24	19,89	0,087

Como se puede observar, aquellas probetas que presentaron un mayor porcentaje de unión metálica fueron aquellas para las cuales el valor de resistencia eléctrica calculado resulto menor. En la figura 4.11 se muestra un gráfico del porcentaje de unión vs la resistencia de la soldadura en mΩ.

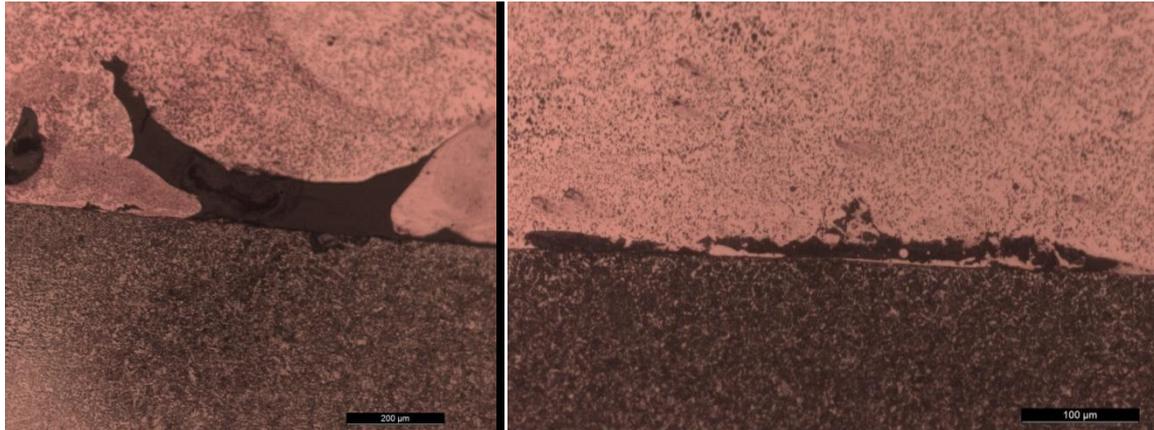
**Figura 4. 11** Porcentaje de unión VS Rsoldadura



#### 4.1.5 Resultados micrografía

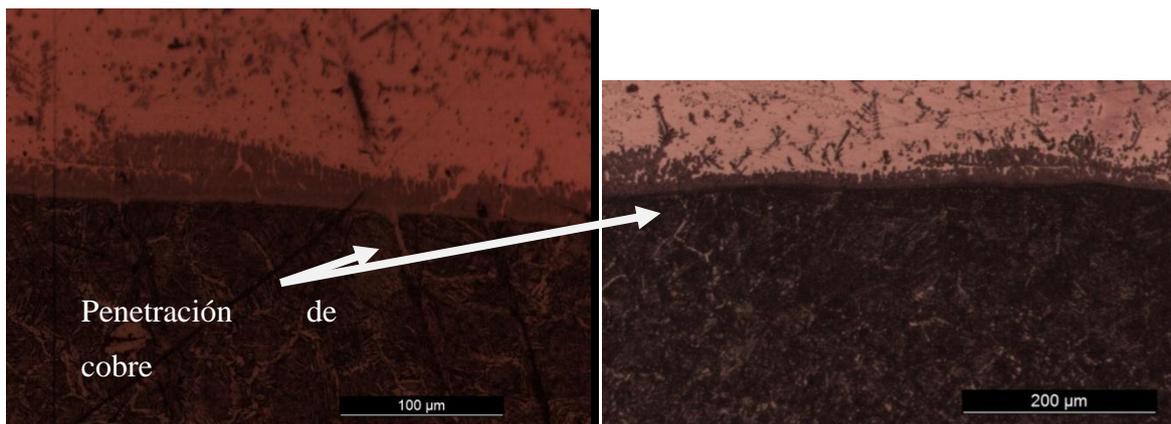
En la Figura 4.12 se pueden observar las micrografías obtenidas para la probeta M11. Se observaron en la pieza varias zonas donde la fundición del cobre no se dio en forma total sobre la superficie del acero y no hubo penetración.

**Figura 4.12** Micrografía M11, zonas de unión metálica deficiente.



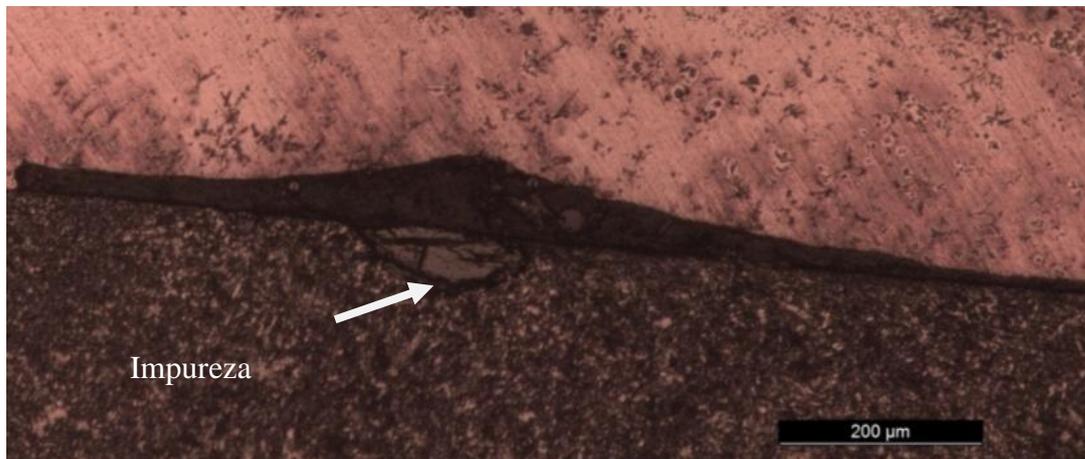
En la figura 4.13 se observan las micrografías obtenidas para la muestra M16. Para este caso la penetración del cobre en los bordes de grano del acero fue mayor y no se observó tantos espacios sin unión entre ambas superficies.

**Figura 4.13** Micrografía M16, penetración de cobre en metal base.

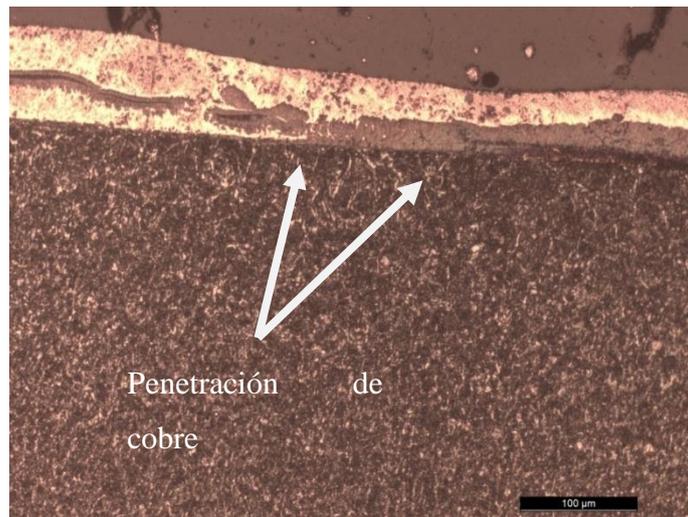


Para la muestra M17, figura 4.14 y figura 4.15, se presentaron varias zonas sin unión metálica. En una de estas zonas se evidenció la presencia de impurezas, por lo cual se presumió que la falta de unión fue debida al a falta de limpieza de la superficie metálica. Se observó penetración del cobre.

**Figura 4.14** Micrografía M17, presencia de impureza sobre el acero.

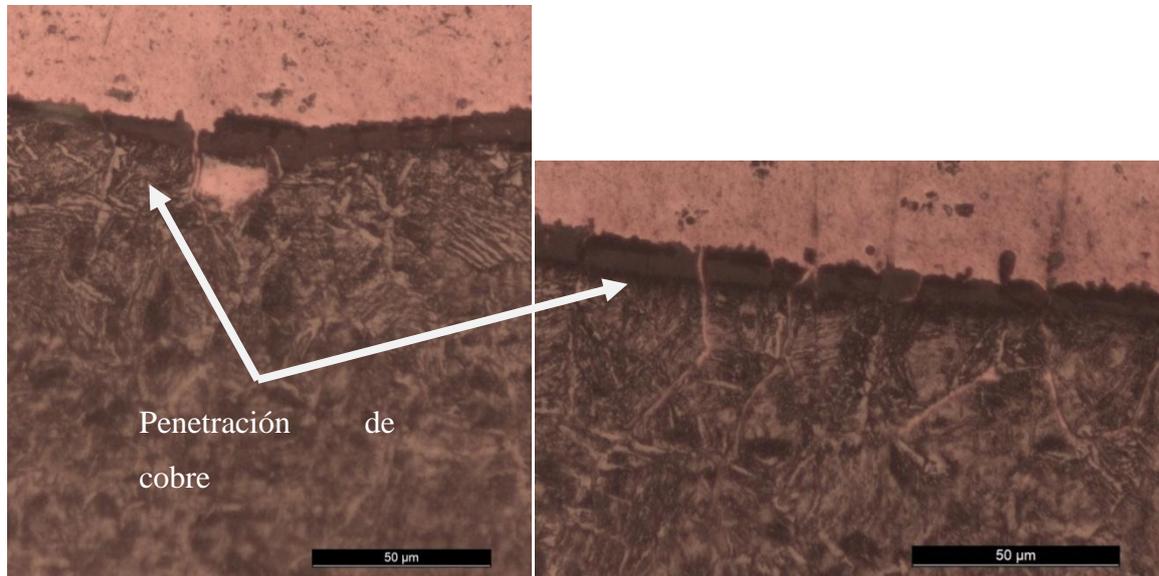


**Figura 4.15** Micrografía M17, penetración del cobre en el metal base.

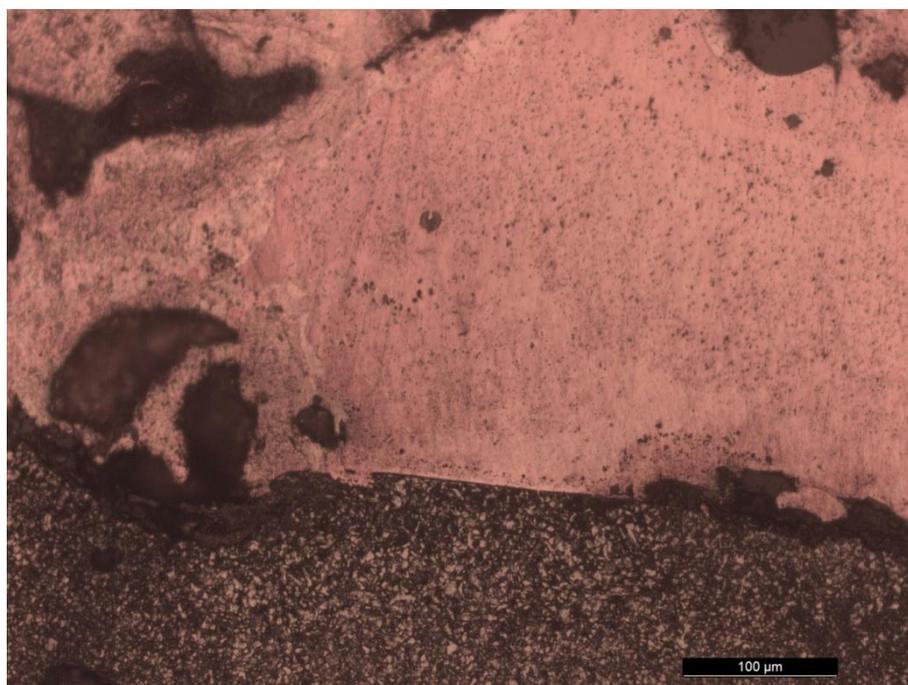


La figura 4.16 y la figura 4.17 muestran la microscopía realizada en la probeta M18. En este caso se observó una elevada penetración del cobre en los bordes de grano del metal base, mayor que en los casos anteriores, pero también se detectó la presencia de zonas donde la unión metálica no fue buena.

**Figura 4.16** Micrografía M18, penetración del cobre en el metal base.

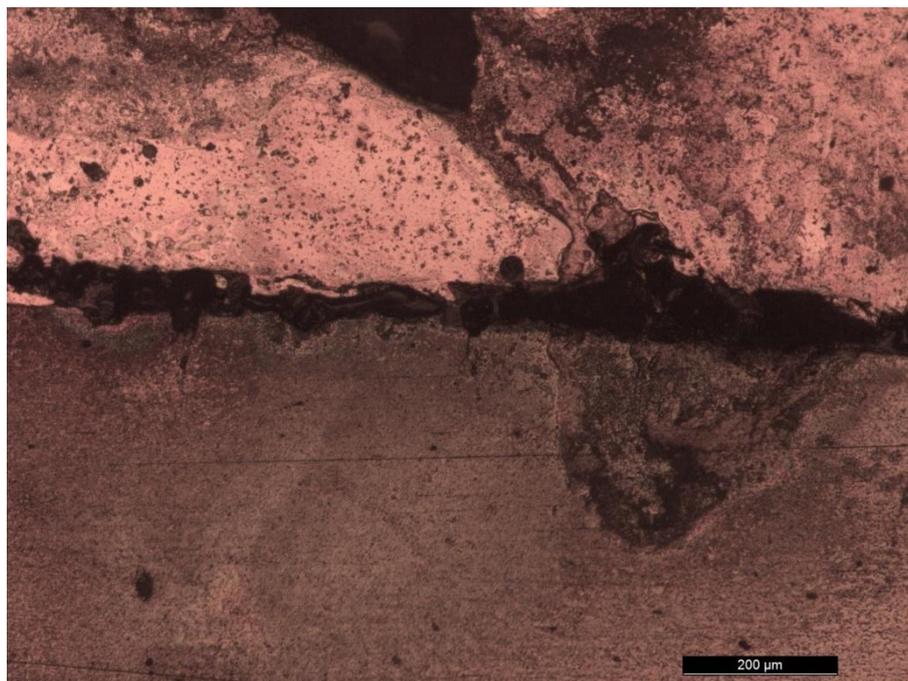


**Figura 4.17** Micrografía M18, unión metálica deficiente.



Para la M24 la unión metálica presenciada fue baja. En la figura 4.18 se muestra un ejemplo de eso.

Figura 4.18 Micrografía M24, unión metálica deficiente.



#### 4.2 Realización de nuevas soldaduras

En la tabla 4.9 se indican las características de las soldaduras realizadas en la segunda etapa del proceso

Tabla 4.9 Característica de las nuevas soldaduras realizadas.

N° Muestra	API	Espesor cañería (mm)	Sección del cable (mm <sup>2</sup> )	Carga	Tamaño crisol	Marca pólvora	Marca fundente
26	X52	6,35	4	15	35	FACBSA	FACBSA
27	X52	6,35	4	15	35	FACBSA	FACBSA
28	X52	6,35	4	15	35	FACBSA	FACBSA
29	X52	6,35	4	15	35	FACBSA	FACBSA
30	X52	6,35	4	15	35	FACBSA	FACBSA
31	X52	6,35	4	15	35	FACBSA	FACBSA
32	X52	6,35	4	20	35	FACBSA	FACBSA
34*****	X52	6,35	4	20	35	FACBSA	FACBSA
35*****	X52	6,35	4	20	35	FACBSA	FACBSA
36*****	X52	6,35	4	20	35	FACBSA	FACBSA

37*****	X52	6,35	4	20	35	FACBSA	FACBSA
33	X52	6,35	4	30	35	FACBSA	FACBSA
39*****	X46	6,35	4	15	35	FACBSA	FACBSA
38*****	X46	6,35	4	20	35	FACBSA	FACBSA
40*****	X46	6,35	4	20	35	FACBSA	FACBSA

\*\*\*\*\*= Se utilizó masilla para rellenar el espacio vacío existente entre el crisol y la superficie a soldar, figura 4.19.

**Figura 4.19** Soldadura realizada con masilla en los bordes del crisol.



#### 4.2.1 Resultado mediciones eléctricas

La Tabla 4.10 muestra los valores de la tensión medida, la corriente que se hizo circular y la resistencia medida para cada muestra.

**Tabla 4.10** Valores de tensión, corriente y resistencia medidos para cada muestra.

Numero muestra	I(A)	V <sub>medido</sub> (mV)	V <sub>offset</sub> (mV)	R <sub>medida</sub> (mΩ)
28	9,02	0,433	0,006	0,048
31	9,02	0,551	0,035	0,064
33	9,00	1,893	0,011	0,211
35	9,00	1,439	0,016	0,161
37	9,01	0,780	0,015	0,088
38	9,00	0,675	0,005	0,075
39	9,01	0,989	0,006	0,110
40	9,03	0,658	0,007	0,073

En las muestras que no figuran en la tabla las soldaduras se desprendieron por lo que no pudieron ser medidas.

La tabla 4.11 muestra los resultados de las mediciones eléctricas:

**Tabla 4.11** Resistencia final de la soldadura.

Numero de muestra	Rsoldadura (mΩ)	ΔR (mΩ)
28	0,048	0,039
31	0,064	0,039
33	0,211	0,040
35	0,161	0,040
37	0,088	0,039
38	0,075	0,039
39	0,110	0,039
40	0,073	0,039

#### 4.2.2 Resultado de la inspección visual y de la macrografía

La Tabla 4.12 muestra los resultados de la inspección visual para las nuevas soldaduras realizadas.

**Tabla 4,12** Resultados de la inspección visual.

Número de muestra	Observaciones
26	 <p>La soldadura presentó un mal aspecto con mucha porosidad. El cable de cobre no se fundió. La superficie interna de la cañería no presentó teñido de origen térmico.</p>

27	 <p>La soldadura se desprendió parcialmente. El cable de cobre no se fundió. La superficie interna de la cañería no presentó teñido de origen térmico.</p>
28	 <p>La soldadura se desprendió parcialmente. El cable de cobre no se fundió. La superficie interna de la cañería no presentó teñido de origen térmico.</p>
29	 <p>La soldadura se desprendió parcialmente, ya que quedo mucha escoria atrapada entre el cobre y la superficie de la cañería. El cable de cobre no se fundió. La superficie interna de la cañería no presentó teñido de origen térmico.</p>
30	 <p>La soldadura se desprendió parcialmente. El cable de cobre no se fundió. La superficie interna de la cañería no presentó teñido de origen térmico.</p>
31	 <p>La soldadura presentó un mal aspecto con mucha porosidad y escoria entre el cobre. El cable de cobre no se fundió. La superficie interna de la cañería no presentó teñido de origen térmico.</p>

32	 <p>La soldadura presentó un mal aspecto con mucha porosidad. El cable de cobre no se fundió. La superficie interna de la cañería no presentó teñido de origen térmico.</p>
33	 <p>El cable de cobre no se fundió. La superficie interna de la cañería no presentó teñido de origen térmico.</p>
34	 <p>El cable de cobre se desprendió, pero no se observó porosidad en la soldadura. La superficie interna de la cañería presentó teñido de origen térmico.</p>
35	 <p>La soldadura obtenida fue muy porosa. La superficie interna de la cañería presentó teñido de origen térmico.</p>
36	 <p>La soldadura obtenida fue muy porosa y se evidenció la presencia de escoria entre el cobre. La superficie interna de la cañería no presentó teñido de origen térmico.</p>

<p>37</p>	 <p>El aspecto visual de la soldadura fue bueno. La superficie interna de la cañería no presentó teñido de origen térmico.</p>
<p>38</p>	 <p>El aspecto visual de la soldadura fue bueno. La superficie interna de la cañería presentó teñido de origen térmico.</p>
<p>39</p>	 <p>Se evidenció la presencia de escoria entre el cobre. La superficie interna de la cañería presentó teñido de origen térmico.</p>
<p>40</p>	 <p>El aspecto visual de la soldadura fue bueno. La superficie interna de la cañería no presentó teñido de origen térmico.</p>

En función de estos resultados, se determinó que las únicas muestras que podían seguir siendo analizadas eran la 35, 37, 38 y 40. Las características de las mismas se muestran en la Tabla 4.13.

**Tabla 4.13** Muestras obtenidas que después de la inspección visual y el estudio macroscópico seguirán siendo analizadas.

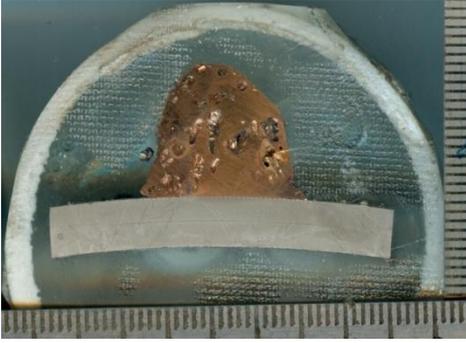
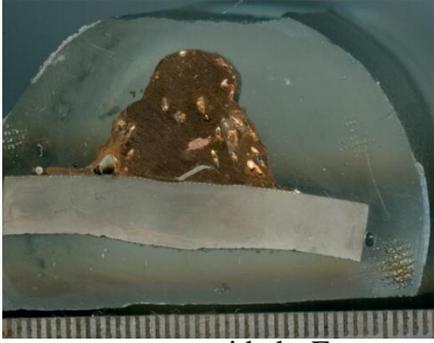
N° Muestra	API	Espesor cañería (mm)	Sección del cable (mm <sup>2</sup> )	Carga	Tamaño crisol	Marca pólvora	Marca fundente
35*****	X52	6,35	4	20	35	FACBSA	FACBSA
37*****	X52	6,35	4	20	35	FACBSA	FACBSA
38*****	X46	6,35	4	20	35	FACBSA	FACBSA
40*****	X46	6,35	4	20	35	FACBSA	FACBSA

Nótese que en todos los casos, según la referencia \*\*\*\*\* , se empleo masilla para evitar la entrada de aire.

En la tabla 4.14 se presentan los resultados de la caracterización macroscópica luego de la realización de las probetas metalográficas.

**Tabla 4.14** Resultados de la caracterización macroscópica.

Número Muestra	Observaciones
35	 <p>La soldadura es muy porosa en la parte inferior, en la línea de unión entre el cobre y el metal base.</p>

37	
38	
40	

La soldadura presenta poca porosidad. Esta se observa en hacia la superficie.

La soldadura presenta poca porosidad. Esta se observa en hacia la superficie.

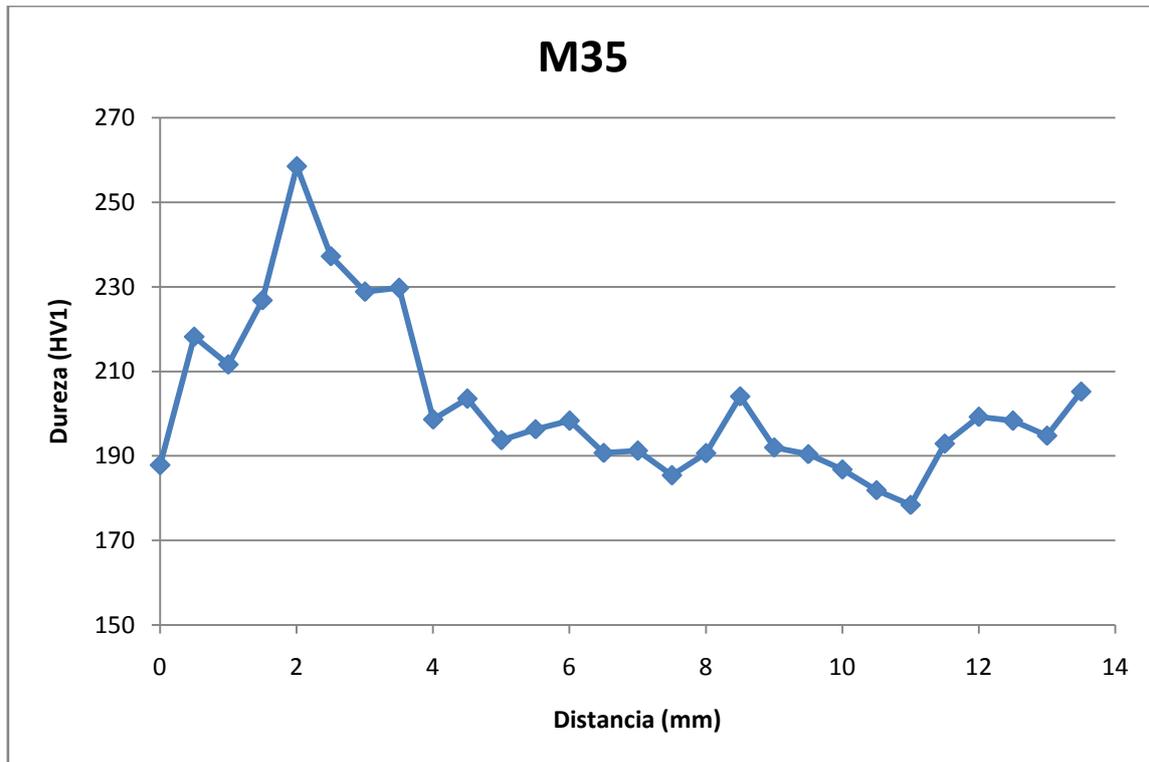
La soldadura presenta poca porosidad. Esta se observa en hacia la superficie.

#### 4.2.3 Resultados de la medición de microdureza

Los resultados de microdureza se obtuvieron de la misma forma que para la primera serie de probetas preparadas.

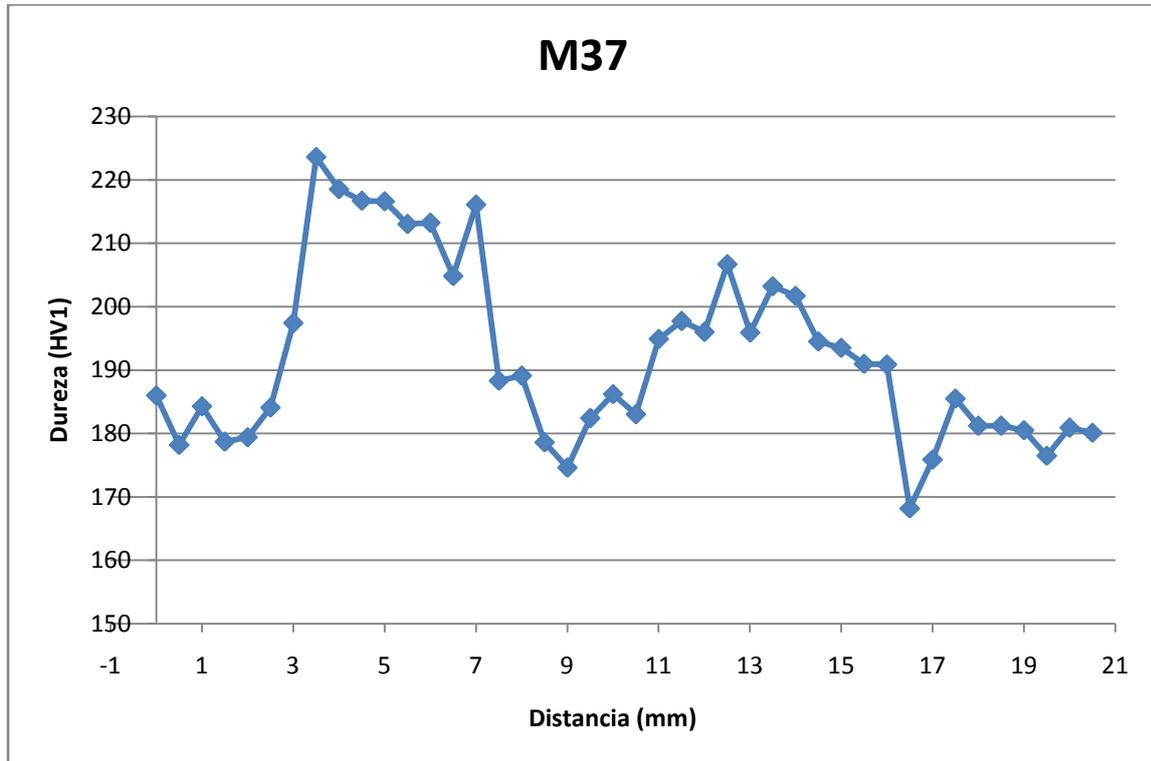
En la figura 4.20 se observa el perfil de microdureza obtenido en la probeta M35. Para este caso los valores obtenidos no variaron mucho, lo cual indica la carencia de unión metálica en el espécimen.

Figura 4.20 Perfil de microdureza en la probeta M35



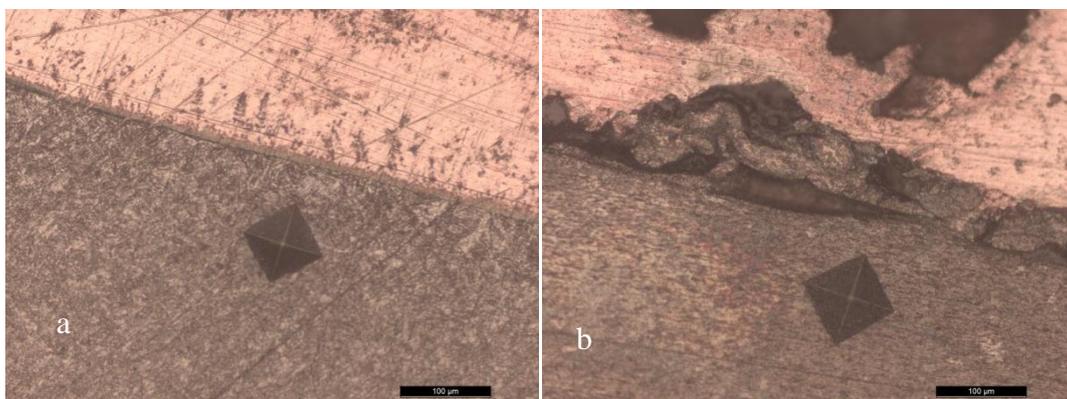
Para la probeta M37, el perfil de microdureza, figura 4.21, mostró valores muy fluctuantes debido a que no en toda la región se observó la presencia de unión metálica.

Figura 4.21 Perfil de microdureza en la probeta M37



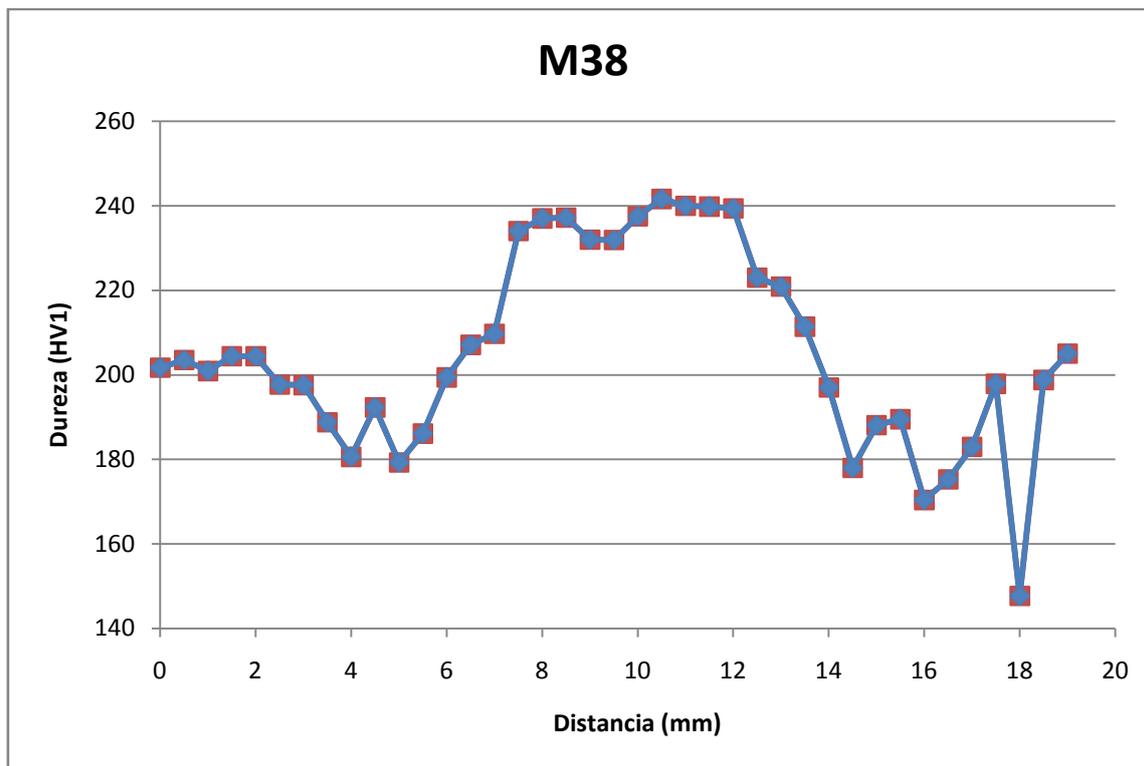
Los valores máximos y mínimos obtenidos fueron de HV1 223,6 y 168,2 respectivamente. En la figura 4.22 a se muestra la impronta obtenida donde el valor de dureza fue máximo. Aquí se puede observar el crecimiento de grano del metal base, dando evidencia de la unión metálica. En la Figura 4.22 b se muestra la impronta donde el valor de dureza fue el más bajo. En este último no se presenta unión metálica.

Figura 4.22 a) Máximo valor de microdureza M37; b) Mínimo valor de microdureza M37.



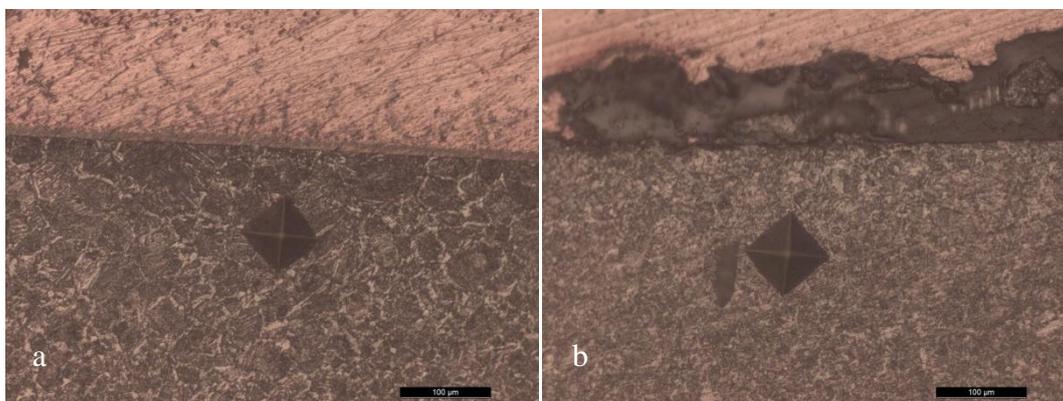
El perfil de microdureza para la probeta M38 se observa en la Figura 4.23.

Figura 4.23 Perfil de microdureza en la probeta M38.



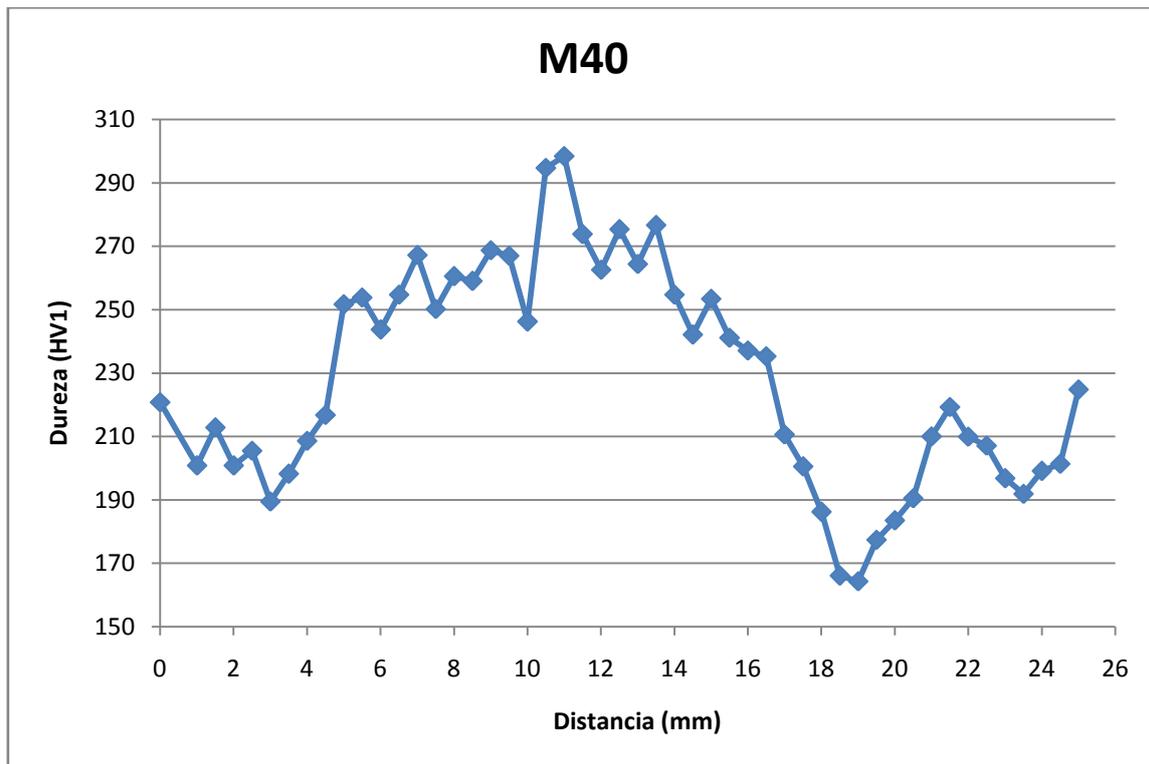
Lo valores de máximo y mínimo medidos fueron de HV1 241,6 y 147,7 respectivamente. Al igual que para el caso anterior, el máximo valor se obtuvo cuando hubo crecimiento de grano, Figura 4.24 a, y el mínimo cuando no hubo unión metálica, Figura 4.24 b.

Figura 4.24 a) Máximo valor de microdureza probeta M37; b) Mínimo valor de microdureza probeta M38.



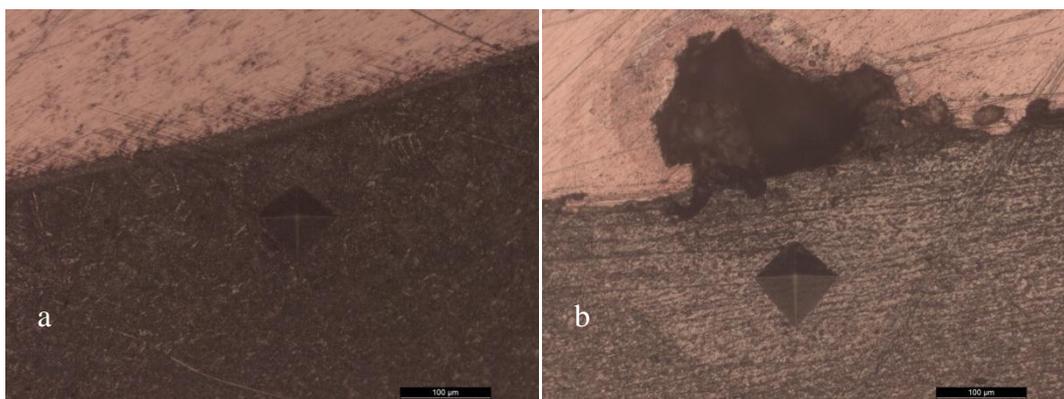
Para la probeta M40 se obtuvo el perfil de microdureza mostrado en la Figura 4.25.

Figura 4.25 Perfil de microdureza en la probeta M40



Los valores máximo y mínimo de microdureza en la probeta M40 fueron de HV1 298,4 y 164,3 respectivamente. En la Figuras 4.26 a y b se observan las condiciones para ambos casos.

Figura 4.26. a) Máximo valor de microdureza probeta M40; b) Mínimo valor de microdureza M40.



#### 4.2.4 Resultados medición de porcentaje de unión

El porcentaje de unión se determina utilizando los resultados de la medición de dureza y la observación microscópica. Los resultados se muestran en la tabla 4.15.

**Tabla 4.15** Porcentaje de unión metálica para cada muestra

<b>Número de muestra</b>	<b>Longitud total (µm)</b>	<b>Longitud con unión metálica (µm)</b>	<b>Porcentaje que presenta unión metálica</b>
<b>37</b>	19305,22	6000	31,08
<b>38</b>	17795,56	7500	42,14
<b>40</b>	17807,30	7500	42,12

La probeta 35 fue excluida en esta etapa, ya que al realizar el análisis se observó que la misma no presentaba unión metálica. En este caso el cobre se encontraba “apoyado” sobre la superficie de la cañería.

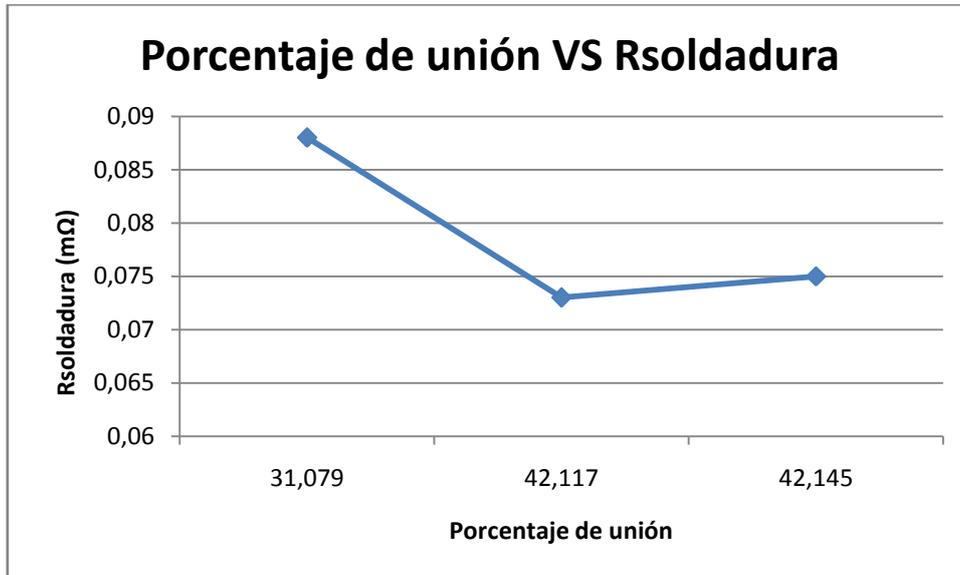
En la tabla 4.16 se detallan los valores de resistencias calculados para estas piezas y el porcentaje de unión metálica obtenido en cada caso con el fin de establecer una relación entre ambos valores.

**Tabla 4.16** Porcentaje de unión metálica y resistencias de la soldadura para cada muestra de la Parte 2.

<b>Número de muestra</b>	<b>Porcentaje que presenta unión metálica</b>	<b>Rsoldadura (mΩ)</b>
<b>37</b>	31,08	0,088
<b>38</b>	42,14	0,075
<b>40</b>	42,12	0,073

En la figura 4.27 se muestra un gráfico del porcentaje de unión de cada muestra en función de la resistencia de la soldadura en mΩ. Al igual que para el caso anterior las muestras que presentaron menor porcentaje de unión fueron aquellas con la resistencia más alta.

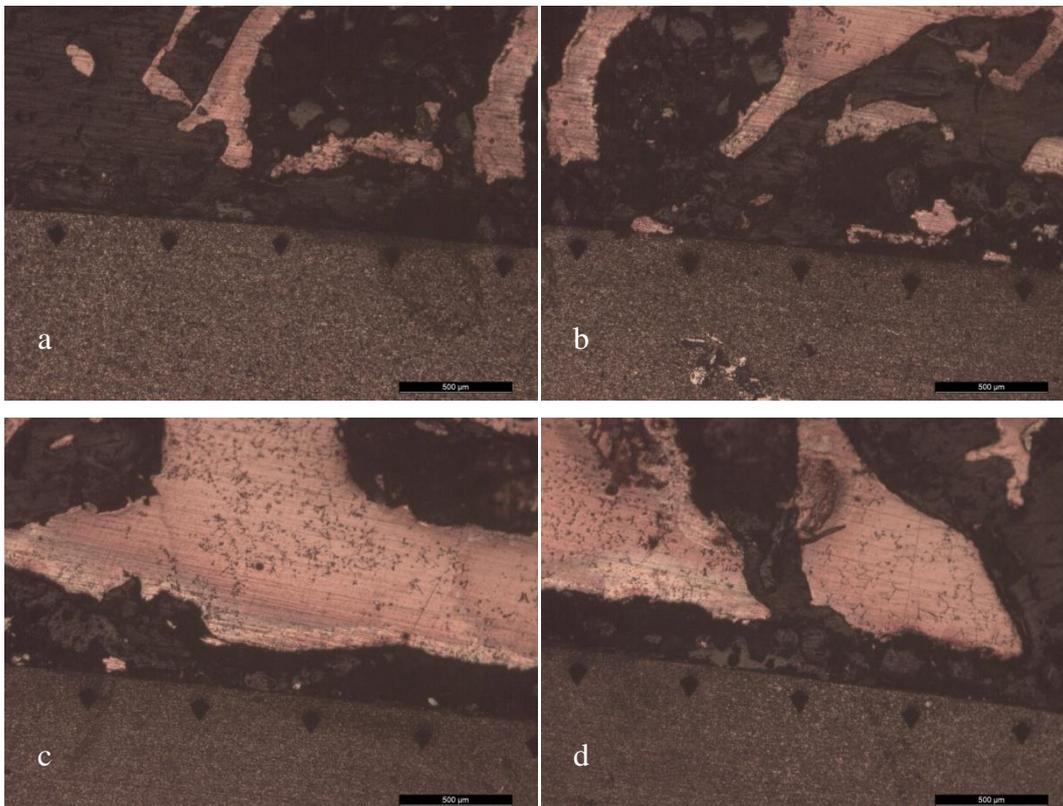
Figura 4.27 Porcentaje de unión Vs Rsoldadura.



#### 4.2.5 Resultados micrografía

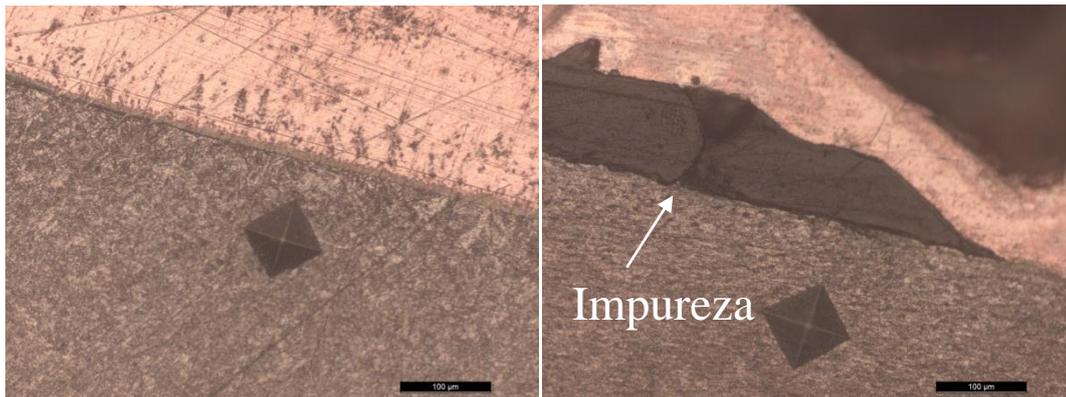
En las Figuras 4.28 a, b, c y d se observa un recorrido a lo largo de la muestra M35. Aquí se puede observar que no hay evidencia de unión metálica por la presencia de óxidos en la superficie.

Figura 4.28 Micrografía M35.



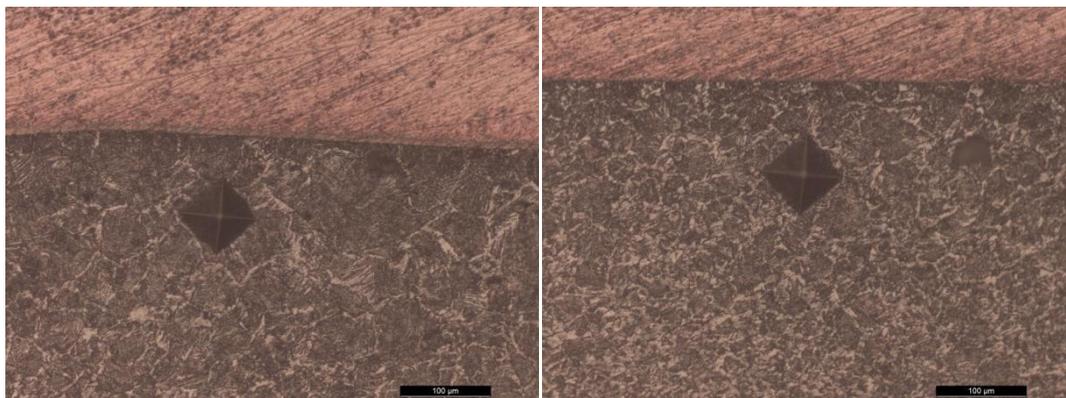
En la figura 4.29 se observan las micrografías obtenidas para la probeta M37. En este caso se observó una amplia zona de unión metálica, evidenciada por el crecimiento de grano del metal base. También se observaron zonas donde el cobre no penetró en la superficie metálica debido a la presencia de escoria sobre la misma.

**Figura 4.29** Micrografías en la probeta M37.



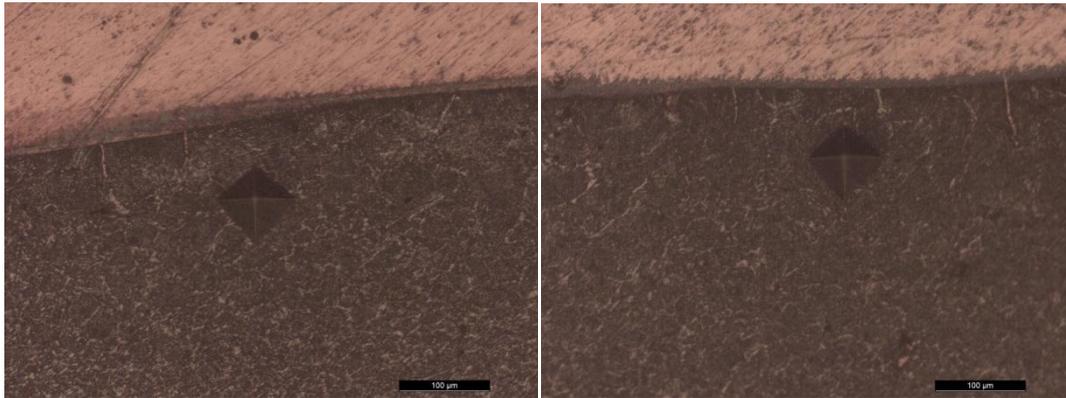
Para la M38 la zona con crecimiento de grano fue aún más extensa. Las micrografías obtenidas se observan en la Figura 4.30.

**Figura 4.30** Micrografías en la probeta M38.



En el caso de la M40, figura 4.31, también se observó una importante zona de la soldadura con presencia de unión metálica, pero aquí la penetración del cobre sobre el metal base fue mayor.

**Figura 4.31** Micrografía M40.



## Capítulo 5

### Conclusiones

En este trabajo se caracterizó la soldadura cuproaluminotérmica para la protección catódica de cañerías en dos aceros de cañería modificando parámetros involucrados en este tipo de unión, se buscó obtener protocolos que garanticen la adecuada protección de la cañería y la integridad de la misma considerando que un área de contacto inadecuada puede producir falta de protección de la cañería mientras que una unión con excesiva difusión de cobre en el borde de grano del metal base puede producir corrosión acelerada y microfisuras. Es por ello que se buscó una condición óptima de unión en función del grado de acero y espesor de cañería

Para ello se soldaron en una primer etapa del trabajo 25 probetas tratando de involucrar todas las variables del proceso (tipo y peso del fundente, tamaño del crisol y la sección del conductor de cobre) se caracterizaron las soldaduras y se desarrolló un método de medición de la resistencia eléctrica de la unión antes del corte de la soldadura. Los resultados obtenidos no fueron los esperados, ya que 18 soldaduras se desprendieron total (toda la soldadura se desprende de la superficie de acero) o parcialmente (parte de la soldadura continua adherida a la superficie de la cañería, pero se desprende el cable de cobre) de la superficie de acero. De las 7 soldaduras restantes, una vez preparadas las macrografías, se observó que existía cobre sin fundir en 2 de ellas. También se observó que la mayoría de las soldaduras presentaron teñido de origen térmico sobre la superficie interior de la cañería lo cual indica que existió una reacción química con temperatura elevada pero no hubo fusión del cobre por lo cual la inspección visual del interior de la cañería no puede ser utilizada como método de control de calidad de la unión.

De las 25 probetas solo 5 (las probetas 11, 16, 17, 18 y 24) pudieron ser caracterizadas metalográficamente, observándose en todos los casos abundante porosidad en el depósito de cobre. La unión metálica se evidenció mediante el crecimiento de grano del metal base y la penetración del cobre en los bordes de los mismos, junto con la medición de micodureza en la ZAC en relación a la dureza del metal base. Si bien el porcentaje del área de unión fue inferior al 20% se encontró que existe relación entre la resistencia eléctrica de la soldadura y este porcentaje.

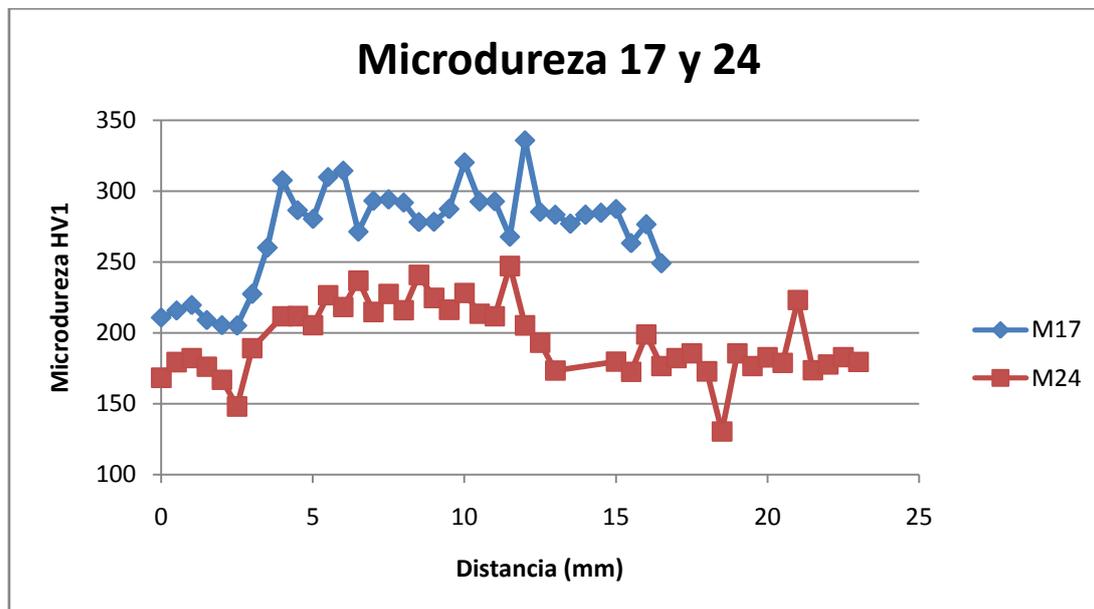
Esta primer etapa del trabajo permitió generar un protocolo para la realización de nuevas soldaduras a fin de mejorar la calidad y el porcentaje de unión de las mismas. La tabla 5.1 muestra los resultados de esta primer etapa. La soldadura N° 17 para el acero API 5L X46 y N° 24 para el acero X52 fueron las más adecuadas, en ambos casos se observa un cable de 4mm<sup>2</sup> de sección y peso de fundente de 25gr.

**Tabla 5 1** Resultados de la primer etapa.

N° Muestra	API	Espesor cañería (mm)	Sección cable (mm <sup>2</sup> )	Tamaño crisol	Peso pólvora (gr)	Relac peso fund/pe so polv	Marca pólvora	Marca fundente	Porcentaje que presenta unión metálica	Rsoldadura (mΩ)
11	X46	5.56	4	45	1,98	8,14	FACBS A	FACBS A	6,35	0,128
16	X46	5.56	4	35	2,3	13,04	FACBS A	FACBS A	11,58	0,103
17	X46	5.56	4	35	1,68	11,90	FACBS A	POWE R	12,39	0,051
18	X46	5.56	4	35	1,78	14,04	FACBS A	POWE R	5,93	0,292
24	X52	6.35	4	35	1,74	14,37	FACBS A	FACBS A	19,89	0,087

El estudio de microdureza mostró valores dispersos para cada muestra en toda el área donde se llevo cabo la soldadura. La variedad de valores fue atribuida a que no toda la zona en donde se realizó la soldadura presento unión metálica, obteniéndose así los valores más altos en donde el cobre simplemente se encontraba “apoyado” sobre el acero y los valores más bajos donde el grano había crecido. En la figura 5.1 se muestra la distribución de valores de microdureza obtenidas para las muestras 17 y 24.

**Figura 5 1** Valores de microdureza (HV1) en función de la distancia (mm) obtenidos para las muestras 17 y 24.



En la segunda etapa del proyecto se repitieron las soldadura utilizando el protocolo entregado (Anexo 1) el cual se elaboró considerando la preparación de la superficie (limpieza principalmente), y la eliminación de humedad del crisol y del fundente para lo cuál se efectuó el secado del crisol con un soplete y el calentamiento del fundente en un horno eléctrico. Se incorporó además el uso de masilla para llenar el espacio vacío entre el crisol y la superficie a soldar, con el fin de evitar la entrada de aire. Se realizaron un total de 15 soldaduras de las cuales solo 3 superaron la inspección visual.

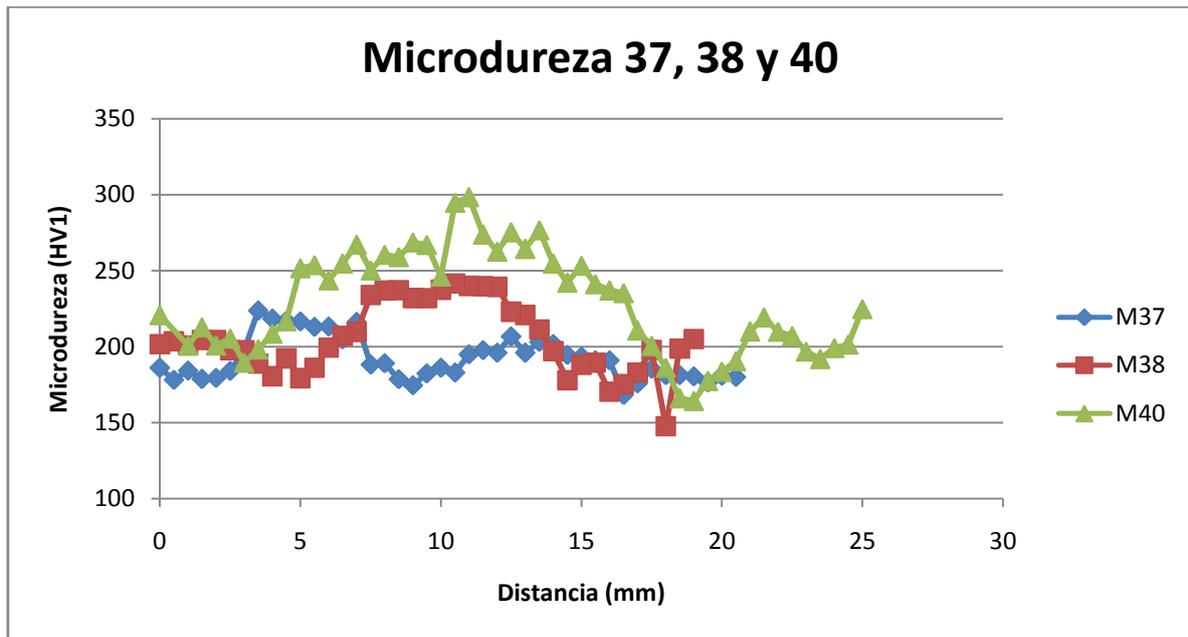
Los ensayos realizados mostraron que la sección del cobre de  $4\text{mm}^2$ , una carga de 20 gr y un tamaño de crisol de 35 junto con el seguimiento del protocolo del Anexo 2 permitiría obtener una buena unión metalúrgica en la cual el porcentaje de unión es superior al 30% y la resistencia menor a  $75\mu\Omega$ . La tabla 5.2 muestra estos resultados.

**Tabla 5 2** Resultados de la segunda etapa.

N° Muestra	API	Espesor cañería (mm)	Sección del cable ( $\text{mm}^2$ )	Carga (gr)	Tamaño crisol	Porcentaje que presenta unión metálica	Rsoldadura ( $\text{m}\Omega$ )
37	X52	6,35	4	20	35	31,08	0,088
38	X46	6,35	4	20	35	42,14	0,075
40	X46	6,35	4	20	35	42,12	0,073

En cuanto a la microdureza, los resultados obtenidos fueron similares a los de la primera experiencia. Para estas muestras el grado de penetración de cobre en los bordes de granos del acero fue menor. En a figura 5.2 se muestran los valores de microdureza (HV1) obtenidos para las muestras 37, 38 y 40 en función de la distancia (mm).

**Figura 5 2** Valores de microdureza (HV1) en función de la distancia (mm) obtenidos para las muestras 37, 38 y 40.



### **Tareas futuras:**

A partir de los resultados obtenidos se sugieren las siguientes tareas futuras:

- Realizar la soldadura mediante el último protocolo establecido con otro fundente que no haya absorbido tanta humedad.
- Evaluar como eliminar la aparición de teñido térmico. Ver como este afecta las propiedades de la soldadura obtenida.
- Realizar un análisis del grado de penetración del cobre en los bordes de grano del acero. ¿Qué porcentaje de penetración es bueno?.

## Referencias

1. CUPROTEC, <http://www.cuprotec.com.ar/>. Accedido en Junio de 2016.
2. FASTEN SA, <http://www.fasten.com.ar/>. Accedido en agosto de 2016.
3. AWS
4. KEMIT, <http://www.emitech.co.kr/>. Accedido en octubre 2016
5. P.J. Mutton and E.F. Alvarez, “Failure modes in aluminothermic rail welds under high axle load conditions”, Engineering Failure Analysis, 2002, p.151-166.
6. ASM Handbook, “Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection”, 2003. ASM International, Vol. 13 A.
7. THERMOWELD, <http://www.thermoweld.com/>. Accedido en agosto de 2016.
8. LPI EXOWELD, <http://www.lpi.com.au/>. Accedido en agosto de 2016.
9. Norma Argentina IRAM 2315\*, “Materiales para puesta a tierra - Soldadura cuproaluminotérmica”, 1999.
10. E. Le Duc, B. Lo Castro and B. Lavinaud, “Method of Aluminothermic Welds Qualification for Down Conductors and Earth-Terminations Systems”, International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), 2013, p. 345-347.
11. F. Wenner, “A method of measuring earth resistivity,” Bur. Stand. U.S. Bull. Vol. 12 (1915), p. 469–478.
12. Zbar, Malvino, Miller, “Prácticas de Electrónica”, 2001, Marcombo, Boixareu Editores.
13. PROTECTION ENGINEERING, <http://www.corrosioncoatings.com/>. Accedido en octubre de 2016.

**ANEXO 1: Procedimiento de soldadura - Preliminar**

1) Preparación de la superficie:

1.1- Preparar la superficie mediante lija grado 80 hasta que la misma quede brillantes.

1.2- Mediante ultrasonido verificar el espesor de la cañería en la zona de trabajo (mayor a 5.5mm).

1.3- Limpiar con acetona la superficie sobre la que se va a soldar.

2) Realización de la soldadura:

2.1- Determinar la relación fundente-pólvora a utilizar. Se utiliza una balanza para pesar los mismos.

2.2- Seleccionar crisol a utilizar.

2.3- Posicionar el cable a soldar. Tener en cuenta que este también debe estar limpio, libre de grasa, y la cobertura plástica debe ser removida lo suficiente de modo de no interferir en los resultados finales.

2.4- Mezclar el fundente en su envase.

2.5- Colocar la retención en el crisol.

2.6- Colocar el fundente en el crisol.

2.7- Esparcir la pólvora sobre el fundente.

2.8- Colocar la mecha.

2.9- Proceder con el encendido.

2.10- Abrir el molde.

Todo el trabajo debe ser realizado con las medidas de protección personal correspondientes.

**ANEXO II: Protocolo propuesto para la soldadura cuproaluminotérmica.**

1) Preparación de la superficie:

- 1.1- Preparar la superficie mediante lija grado 80 hasta que la misma quede brillantes.
- 1.2- Mediante ultrasonido verificar el espesor de la cañería en la zona de trabajo (mayor a 5.5mm).
- 1.3- Limpiar con acetona la superficie sobre la que se va a soldar.

2) Realización de la soldadura:

- 2.1- Determinar la relación fundente-pólvora a utilizar. Se utiliza una balanza para pesar los mismos.
- 2.2- Seleccionar crisol a utilizar, el cual debe estar limpio y sin daño externo ni interno.
- 2.3- Eliminar la humedad del crisol con un soplete. El grafito absorbe la humedad del ambiente, pudiendo generar porosidades en la soldadura.
- 2.4- Posicionar el cable a soldar. Tener en cuenta que este también debe estar limpio, libre de grasa, y la cobertura plástica debe ser removida lo suficiente de modo de no interferir en los resultados finales.
- 2.5- Mezclar el fundente en su envase.
- 2.6- Colocar la retención en el crisol.
- 2.7- Colocar el fundente en el crisol.
- 2.8- Esparcir la pólvora sobre el fundente.
- 2.9- Colocar la mecha.
- 2.10.- Sellar con masilla el contorno del molde
- 2.11- Proceder con el encendido.
- 2.12- Abrir el molde.

Todo el trabajo debe ser realizado con las medidas de protección personal correspondientes.