

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MECANICA APLICADA



**Caracterización de la soldadura
cuproaluminotérmica en cañerías de
conducción para la protección catódica.**

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

Autor: Florencia Stefania Cossio

Director Académico: Mónica Zalazar

CARRERA: INGENIERÍA QUÍMICA

Neuquén, 2020

RESUMEN

La soldadura cuproaluminotérmica es un proceso de termofusión en el cual el calor necesario para la unión es obtenido por medio de una reacción de oxidación-reducción entre el óxido de cobre y el aluminio metálico, que permite obtener altas temperaturas. Como resultado de dicha reacción se obtiene cobre metálico fundido como material de aporte. Este método de soldadura es ampliamente utilizado en la industria ferroviaria, para puestas a tierra y para la protección catódica en cañerías de conducción.

En este trabajo, se caracterizó la soldadura cuproaluminotérmica para la protección catódica en cañerías de conducción de acero API 5L X52, para cables conductores de dos diámetros distintos, variando el tamaño del crisol utilizado y la marca del proveedor de fundente, además de la relación fundente/pólvora. Con el objetivo de obtener las condiciones óptimas de unión que garanticen la protección de la cañería sin afectar su integridad, se realizaron ensayos macroscópicos, microscópicos, medidas de microdureza y análisis SEM en la zona de la interfase. Además, se realizaron varias probetas combinando las variables mencionadas anteriormente, teniendo en consideración que la falta de unión puede producir falta de protección en la cañería, y una excesiva área de contacto provocará exceso de difusión de cobre y posibles microfisuras en la superficie del metal base.

PALABRAS CLAVE

Cuproaluminotérmica, soldadura, protección catódica, unión.

ABSTRACT

Copper-aluminothermic Weld is a thermofusion process in which the necessary heat for the weld is obtained by an oxide-reduction reaction between copper oxide and metallic aluminum, that leads to high temperatures. As a result of this reaction, metallic-liquid copper is obtained as filler material. This welding method is widely used in the railway industry, grounding welds and for cathodic protection of pipelines.

In this study, copper-aluminothermic weld was characterized for the cathodic protection of API 5L X52 steel line pipes, using two copper conductor wires diameters, changing the mold size, the gunpowder brand, and the flux amount. With the objective of obtaining the optimum welding conditions that guarantee the line pipe protection without compromising its integrity, macroscopy and microscopy tests were performed, as well as microhardness sweeping and SEM characterization. Several test tubes were prepared to be tested, varying the conditions previously mentioned. It should be considered that an insufficient contact area could cause a lack of protection, whereas an excessive contact area could lead to an excessive copper diffusion and possible microcracks on the base material's surface.

KEY WORDS

Copper-aluminothermic, thermite Weld, cathodic protection.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia: José, Edith, Mariano y Fabrizio, por apoyarme incondicionalmente en este proceso. Sin su paciencia y aliento para superar los momentos en los que las dificultades me abrumaban todo hubiese sido diferente. Por permitirme tomar decisiones inesperadas, con aciertos y desaciertos, pero siempre al lado mío para celebrar los triunfos y levantarme en los tropiezos. También agradezco a mi abuela, tíos y primos, no solo a los de sangre si no a los de corazón que me acompañaron durante tanto tiempo.

A mis amigos de muchos años, con los que la vida nos llevó por caminos distintos y a pesar de todo seguimos unidos. A Cami, por no entender nada de mis materias, pero escucharme y aconsejarme siempre.

A los amigos que me dio la carrera, por compartir cursadas, horas de estudio y finales, y hacer que todo parezca más sencillo. Especialmente a Gime, por estar a mi lado desde el primer día en el curso de ingreso hasta el último día en la Universidad. También agradezco a los amigos que conocí por viajes de estudio, con los que tengo un millón de recuerdos y son un apoyo constante a la distancia, particularmente a Jose, Nacho, Agus, Lucio y Barbi.

A Mónica Zalazar, por darme la oportunidad de realizar este trabajo con ella y enseñarme con paciencia lo mucho que no sabía.

A los integrantes del Laboratorio de Metalurgia y Soldadura, especialmente a Fede, Gera, Guille y Miguel, por enseñarme y ayudarme durante los meses que estuve en el laboratorio. También por los mates y la charlas que hicieron el trabajo más llevadero.

A mis jefes y compañeros de trabajo, por darme el espacio y el tiempo para estudiar y realizar los proyectos que proponía.

Finalmente, quiero agradecer a la Universidad Nacional del Comahue por ser mi segundo hogar todos estos años, a los docentes y no docentes que son ejemplo de la clase de profesional que aspiro a ser.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	ii
Abstract	iii
Agradecimientos.....	iv
Índice general	v
1 Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	1
2 Capítulo 2.....	3
2.1 Corrosión	3
2.2 Efectos de la corrosión en la industria petroquímica.....	5
2.3 Objeto de protección.....	6
2.4 Tecnologías para el control de la corrosión en cañerías de conducción.....	6
2.5 Descripción de la protección catódica	7
3 Capítulo 3.....	10
3.1 Soldadura aluminotérmica.....	10
3.2 Descripción y uso de los componentes.....	10
3.3 Ventajas de la soldadura cuproaluminotérmica.....	13
3.4 Usos de la soldadura aluminotérmica.....	13
3.5 Descripción visual de la soldadura cuproaluminotérmica.....	13
3.6 Mejoras en el proceso de soldadura.....	14
4 Capítulo 4.....	15
4.1 Conocimientos previos	15
4.2 Material analizado	15
4.3 Proceso de soldadura	16
4.4 Caracterización de las probetas obtenidas	19
4.4.1 Inspección visual	19

PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

4.4.2	Caracterización macro y microscópica	19
4.4.3	Caracterización por microscopía óptica	20
4.4.4	Medición de microdureza	21
4.4.5	Medición del porcentaje de unión	22
4.4.6	Caracterización mediante microscopía electrónica de barrido.....	22
5	Capítulo 5.....	25
	Resultados y discusiones	25
5.1	Realización de las soldaduras	25
5.2	Resultados de la inspección visual	26
5.3	Resultados de la caracterización macroscópica.....	31
5.4	Resultados de la caracterización microscópica	37
5.5	Resultados del barrido de microdureza	44
5.6	Resultados de las observaciones de la microestructura en base a las mediciones de microdureza.....	48
5.7	Resultados de la medición de porcentaje de unión.....	52
5.8	Resultado de la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	53
6	Capítulo 6.....	65
6.1	Conclusiones.....	65
6.2	Acerca de la efectividad del proceso	65
6.3	Acerca de la relación ideal de carga/pólvora:.....	68
6.4	Acerca de las fisuras por temperatura.....	70
6.5	Acerca del frente de solidificación de la interfase.....	71
6.6	Respecto a la composición química.....	71
6.7	Tareas futuras	72
7	Bibliografía	73

1 CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

El siguiente Proyecto Integrador Profesional se realiza en el marco de la Beca de Estimulo a las Vocaciones Científicas otorgado por el Consejo Interuniversitario Nacional (EVC-CIN), y como continuación del PIP realizado por la Ingeniera Ana Julieta Nehme, presentado en 2016 [1].

Las estructuras metálicas, sumergidas o enterradas son propensas a sufrir corrosión. Se deben adoptar procedimientos adecuados para el control de esta para asegurar la integridad del metal, tanto por motivos de seguridad como económicos.

Para garantizar la protección contra la corrosión, puede considerarse a la protección catódica como un método que funciona efectivamente en la mayoría de las estructuras de acero que estén constantemente en contacto con un electrolito corrosivo, como son cañerías enterradas o sumergidas y tanques de almacenamiento (tanto enterrados como sobre tierra) [2]. Esta forma de prevención de la corrosión consiste en hacer que toda la superficie del metal a proteger actúe como el cátodo de una celda electroquímica.

Una de las formas más conocidas para llevar a cabo la protección catódica es la utilización de la soldadura cuproaluminotérmica como método de unión entre el cable conductor de cobre y la cañería de acero. Por este motivo es necesario conocer la forma correcta de realizarla y poder medir su efectividad. La soldadura cuproaluminotérmica es un proceso de soldadura por termofusión, en el que el calor necesario se obtiene por el efecto reductor del aluminio sobre el óxido de cobre, generando una reacción exotérmica de alta temperatura donde el material de aporte será el cobre fundido y recalentado, resultante de dicha reacción química [2].

Este tipo de soldadura presenta grandes ventajas frente a otros métodos, como, por ejemplo, la sencillez del equipo requerido para realizarla y una mayor área efectiva de soldadura.

En este trabajo se informarán los estudios realizados y los resultados obtenidos, en los cuales se busca caracterizar la soldadura cuproaluminotérmica realizada con dos diámetros de cable conductor de cobre (3,5mm y 8mm) y dos marcas de fundente distintas, donde además cada una lleva un proceso de soldadura diferente. Las tareas consisten en la realización de soldaduras en el laboratorio y su posterior inspección visual, preparación metalográfica, caracterización macroscópica, caracterización microscópica, realización de medida de microdureza y cálculo

PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

de la superficie efectiva de soldadura. Además, se observan algunas muestras seleccionadas en un microscopio de barrido electrónico (SEM: Scanning Electron Microscope)

A partir de dichas tareas se verifica si las mejoras introducidas para el procedimiento de soldadura el PIP anterior efectivamente muestran mejoría, y se compara los resultados desfavorables obtenidos para los conductores de 50mm² en dicha investigación con los obtenidos en este informe, para establecer similitudes y diferencias.

2 CAPÍTULO 2

2.1 Corrosión

La corrosión de metales es causada por un proceso electroquímico, es decir, un circuito eléctrico donde el intercambio de electrones se produce por medio de reacciones químicas que tienen lugar en la superficie de un metal en contacto con un electrolito [3]. Es un proceso destructivo que ocurre por la exposición del metal a condiciones medioambientales por un determinado período de tiempo [4], produciendo que el metal se reduzca dado que el óxido de metal tiene menor energía que el metal en sí, por lo que es más estable químicamente [5].

Para que la corrosión tenga lugar deben darse las condiciones para que se forme una *celda de corrosión*. Dicha celda está compuesta por 4 partes características: *ánodo*, *cátodo*, *electrolito* y *conductor metálico* [3].

Ánodo: Es el lugar de la celda electroquímica donde ocurre la reacción de oxidación [5], también conocida como reacción de corrosión. La ecuación 2.1 ilustra de manera genérica la reacción de oxidación.



Dónde M^0 es un átomo de la estructura metálica, M^{n+} es un ión metálico y e^{-} los electrones que fueron liberados durante la reacción de oxidación. Dichos electrones no se acumulan, sino que son transferidos al electrolito [3, 6], que debe estar en contacto tanto con el ánodo como con el cátodo.

Cátodo: Es el lugar de la celda electroquímica donde ocurre la reacción de reducción. Esta reacción puede involucrar distintos compuestos químicos, siendo los más frecuentes la reducción de átomos de hidrógeno para formar hidrógeno gaseoso, la reacción de oxígeno y agua para formar iones hidroxilo y la reducción de iones metálicos [3]. En este último caso, el metal presente en el cátodo no se corroe, sino que esta es una característica del metal del ánodo.

Se debe notar el hecho de que un electrodo sea ánodo o cátodo de una celda electroquímica depende exclusivamente de su potencial eléctrico relativo al otro electrodo de dicha celda. El electrodo con potencial más negativo será oxidado, y será por lo tanto el lugar donde ocurra la reacción anódica (ánodo). Por el contrario, el electrodo con potencial menos negativo será el

lugar donde ocurra la reacción de reducción, es decir el cátodo. La diferencia de potencial entre ambos será la fuerza impulsora o voltaje de la celda [3, 7].

Electrolito: Permite que los iones producidos en la reacción anódica fluyan a través de él en dirección al cátodo, para lo cual es necesario que esté en contacto con ambos electrodos. Es el electrolito el que permite que se lleven a cabo las reacciones de oxido-reducción de la celda, proveyendo a ambos electrodos de los átomos o iones necesarios en cada caso [3].

Conductor metálico: cierra el circuito permitiendo el flujo de electrones. Este conductor puede ser el mismo metal cuya superficie está funcionando como ánodo, o puede tratarse de un conductor externo.

La Figura 2.1 ilustra el caso típico de una celda electroquímica, donde se oxida un metal divalente en el ánodo, se reduce oxígeno en el cátodo, el electrolito es una solución acuosa y el conductor metálico que cierra el circuito es la misma estructura metálica que el ánodo [6]

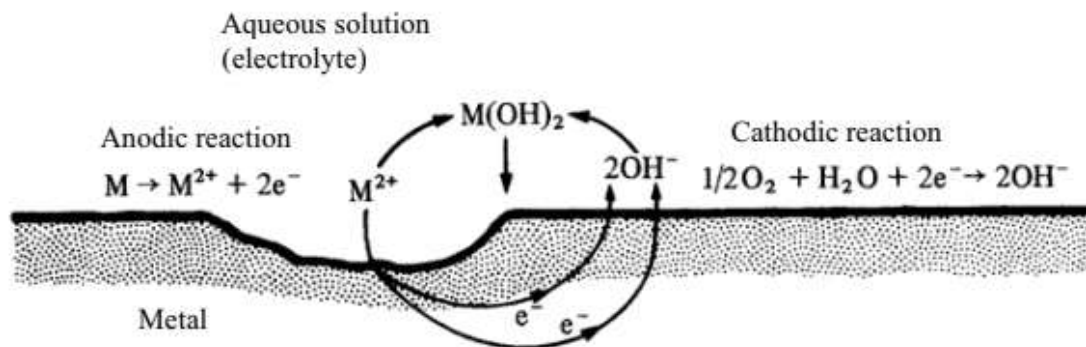


Figura 2.1: Ejemplo de una celda de corrosión. [6]

De acuerdo con cuál sea el fenómeno que produce la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo, se pueden encontrar distintos tipos de corrosión [4, 5] que se pueden clasificar en dos grandes grupos: las celdas producidas por el contacto de metales con distintos potenciales, también conocido como galvánica, y las producidas por una fuente externa de energía, llamada corriente parásita [4].

Dentro del primer grupo se encuentran aquellas celdas producidas por el contacto de dos metales disimiles, uno con menor energía potencial que el otro, y también aquellas celdas formadas por un mismo metal en condiciones diferentes que afecten su potencial. Entre estos

casos se destacan el contacto con electrolitos distintos (por ejemplo, una misma cañería enterrada en suelos con características diferentes de composición o humedad), la presencia de microorganismos que modifiquen superficialmente a parte del metal (presencia de ‘biofilms’) y el contacto de un mismo metal en distintos estados de conservación (por ejemplo, el reemplazo de una sola pieza en una estructura por otra nueva) [3].

El segundo caso ocurre principalmente cuando el metal ofrece menor resistencia al flujo de corriente que el electrolito en el cual se encuentra, causando que una corriente que circula por este último prefiera circular por el metal. De esta manera induce la formación de un ánodo y un cátodo de manera forzada, provocando la corrosión del metal.

2.2 Efectos de la corrosión en la industria petroquímica.

Desde la extracción de gas y petróleo hasta su procesamiento en refinerías, almacenamiento y transportes, las estructuras metálicas que intervienen en el proceso están expuestas a los efectos adversos de la corrosión [8]. Esto se debe a que todos los equipos están en estrecho contacto no sólo con petróleo, gas natural y sus derivados, sino también con solventes necesarios en el proceso. Además, se encuentran expuestos a condiciones ambientales desfavorables, como puede ser el contacto con agua y suelo.

Un elemento de gran importancia en la industria petroquímica son las cañerías de conducción de gas natural y petróleo, ya que son consideradas el medio de transporte más seguro y efectivo para transportar grandes volúmenes a través de largas distancias [4]. La combinación de numerosos factores hace que el equipamiento utilizado en la industria petroquímica sea vulnerable frente a los fenómenos producidos por la corrosión que pueden conducir a accidentes serios [8]. En las últimas dos décadas se han reportado numerosos casos de filtraciones y explosiones, que conllevan a pérdidas materiales y de vidas, sumado al impacto ambiental que afecta principalmente al suelo y al agua [4].

Por otro lado, deben tenerse en cuenta las consideraciones económicas, ya que la construcción e instalación de cañerías representan una gran inversión de capital, y cuando las mismas se ven afectadas por corrosión, deben ser reemplazadas aumentando aún más su costo. Se calcula que el impacto de la corrosión es responsable del 20-30% de los Tiempos No Productivos (del inglés *NPT: non-productive times*) desde la extracción de la materia prima al producto final [9].

Por estos motivos, se debe planificar y controlar las tecnologías y métodos necesarios para prevenir y disminuir la corrosión y sus efectos adversos.

2.3 Objeto de protección

La corrosión es el principal factor que afecta la durabilidad y la confiabilidad de los sistemas de transporte de energía, gas natural y de petróleo y sus derivados, que en Argentina implican decenas de miles de kilómetros de cañerías de variados diámetros. El acero API 5L, particularmente el de especificación de grado X52 [10] ha sido especialmente seleccionado para este trabajo como objeto de protección debido a que es uno de los aceros más ampliamente usados para la fabricación de cañerías en las refinerías de petróleo, plantas de gas natural, de generación de energía incluyendo plantas nucleares y térmicas como así también en diversas plantas de la industria de procesos químicos. Asimismo, es muy empleado para la fabricación de tanques y recipientes en la industria química y petroquímica.

La tensión de ruptura del acero API 5L X52 es de 66700 psi, es decir 460 MPa, mientras que las especificaciones completas pueden hallarse en la última versión de la norma ISO 3183 [11], que se enfoca en la normalización de caños de acero para sistemas de transporte por ductos tanto en instalaciones offshore como superficiales para petróleo y gas natural.

2.4 Tecnologías para el control de la corrosión en cañerías de conducción

Para decidir la metodología para prevenir y mitigar los efectos de la corrosión en las cañerías de conducción, no existe una norma nacional o internacional. Sin embargo, la Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión formuló estándares para buenas prácticas a la hora de decidir cómo proteger las cañerías [12].

Para cañerías sumergidas o enterradas, los principales factores que producen la corrosión externa son el tipo de material utilizado, las condiciones superficiales de la cañería y el ambiente en el que se encuentra [8]. Para esto, se ofrecen distintas soluciones dependiendo de la etapa de diseño en la que se encuentre el proceso: selección adecuada del material al inicio de la construcción, el tratamiento del ambiente en el cual se va a emplazar y la protección adecuada de la superficie de la cañería de conducción [8]. En el último caso, el estándar destaca la necesidad de proveerlas de un sistema de protección contra la corrosión externa [12], siendo los métodos más comunes los recubrimientos y la protección catódica. Los recubrimientos aplicados sobre las estructuras metálicas son el principal método de control de corrosión, y la

protección catódica es un complemento para proteger la cañería en los casos en que aparezcan defectos en los recubrimientos producidos durante la construcción y el servicio [8].

2.5 Descripción de la protección catódica

La protección catódica es una técnica de protección ante la corrosión de las superficies metálicas, la cual consiste en convertir al elemento a proteger en el cátodo de la celda electroquímica [7]. La efectividad de este método de protección se ve disminuida en los casos en que se presente alta temperatura, ataques por microorganismos, o que el electrolito sea suelo con baja humedad [3]

Existen dos principales métodos para realizar la protección catódica: ánodos galvánicos o de sacrificio, y corriente impresa. En todos los métodos de protección catódica se conecta un ánodo externo a la estructura a proteger, generando una corriente eléctrica que fluye a través del circuito, convirtiendo a la estructura en el cátodo de la celda e impidiendo que se corra [4].

En el primero de los métodos (y el más sencillo) la fuerza impulsora es la diferencia de potencial entre los ánodos y cátodos, y consiste en conectar el metal a proteger con otro metal que tenga potencial electroquímico más negativo, llamado *metal de sacrificio*. De esta forma, el metal a proteger se convierte en el cátodo de la celda, y el metal añadido se convierte en el *ánodo de sacrificio*, el cual se corroe hasta que eventualmente debe ser reemplazado [3, 4, 5, 6, 7]. Un esquema de este tipo de protección se puede observar en la Figura 2.2.

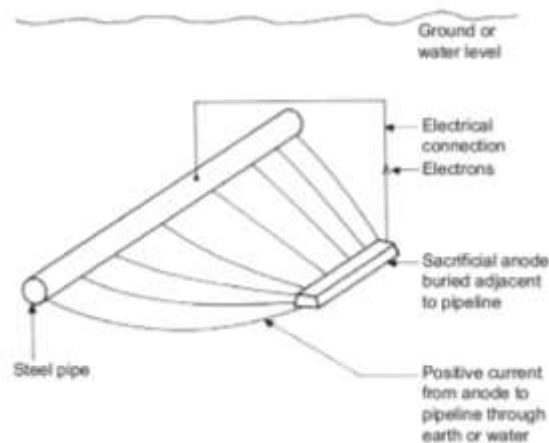


Figura 2.2: Aplicación de protección catódica por ánodo de sacrificio en una cañería [7].

En el segundo de los métodos, denominado ICCP por el inglés *Impressed Current Cathodic Protection*, se utiliza una inyección de corriente proveniente de una fuente de corriente continua que, sumado a un ánodo, convierte a la estructura a proteger en el cátodo de la reacción. La

PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

fuentes de corriente externa pueden ser un rectificador, una batería o incluso paneles solares. Un esquema del funcionamiento de un sistema de ICCP se observa en la Figura 2.3.

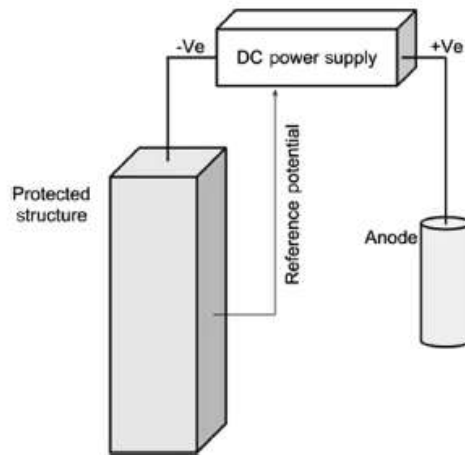


Figura 2.3: esquema de funcionamiento de ICCP [7].

Para grandes estructuras, la protección galvánica no es suficiente para proteger la estructura completa, por lo que deberían emplearse demasiados ánodos haciendo que no sea económicamente rentable. Para estos casos se sugiere el empleo de ICCP, y un ejemplo de ello son las líneas de conducción de hidrocarburos mediante gasoductos u oleoductos. Los ánodos son distribuidos en intervalos regulares a lo largo de la cañería, normalmente a varios kilómetros de distancia unos de otros y cientos de metros de la cañería [5].

En contacto con la tierra las cañerías funcionan como ánodo, perdiendo electrones debido a que se presenta una diferencia de potencial de éstas con el suelo. Para evitarlo, se inyecta corriente desde una fuente de poder externa, que provea al material de electrones para evitar la corrosión. Desde los ánodos la corriente se dirige a las cañerías a través del suelo, penetrando en posibles fallas en el revestimiento, y fluyendo por el tubo hacia un cable conductor de cobre soldado cuproaluminotérmicamente. El circuito se completa con dicho cable que regresa al rectificador [13] (Figura 2.4.).

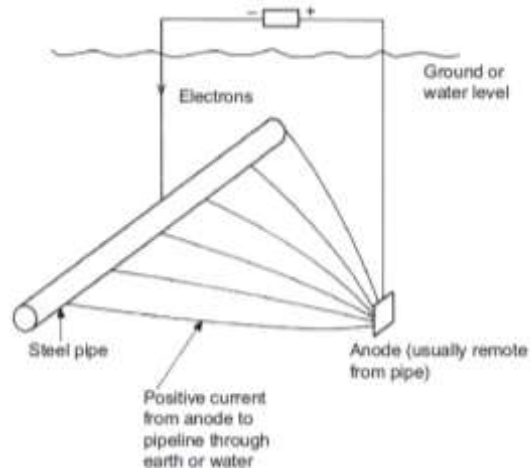


Figura 2.4: Aplicación de ICCP sobre una cañería [7].

Una de las principales ventajas de la aplicación de ICCP es la posibilidad de proteger con una sola instalación a grandes estructuras, a diferencia de los ánodos galvánicos. Además, es efectiva en estructuras con revestimientos escasos o sin revestimientos. Para el caso de que estén recubiertas, el consumo de corriente necesaria para protegerlas será mucho menor que el caso de que no lo estén, economizando por lo tanto el proceso [3].

Sin embargo, se debe mencionar que esta protección depende fuertemente de la disponibilidad de energía eléctrica. Si la provisión de energía falla, el sistema de protección se verá afectado y dará lugar a corrosión. Además, si hay otras estructuras enterradas en zonas adyacentes que utilicen este tipo de protección pueden ocasionarse problemas de interferencia, provocando corrosión por corrientes parásitas.

3 CAPÍTULO 3

3.1 Soldadura aluminotérmica

La soldadura aluminotérmica o Thermite Welding (TW) es un proceso que produce coalescencia de metales, mediante su calentamiento con un metal líquido supercalentado proveniente de una reacción aluminotérmica entre un óxido de metal y aluminio [14]. Esta reacción es altamente exotérmica por lo que, una vez iniciada la misma con una fuente de calor externa, se sustenta a sí misma.

La reacción termoquímica se da según la siguiente reacción química genérica:



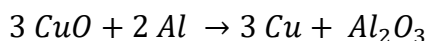
Para que la reacción de óxido-reducción tenga lugar deben cumplirse ciertas condiciones:

- La afinidad del oxígeno con el agente reductor (aluminio) debe ser mayor que su afinidad con el metal a oxidar, permitiendo así que ocurra la reacción esperada.
- Se debe proveer a la mezcla con una temperatura de ignición inicial (aproximadamente 1200°C), dada por una fuente de calor externa. Además, se puede adicionar a la mezcla otros elementos que contribuyan a alcanzar dicha temperatura.

De acuerdo con lo dispuesto en la Norma IRAM 2315 (2018), la soldadura se realiza únicamente a través del material de aporte sobre las piezas [2]. Es decir, que con las temperaturas alcanzadas por la reacción el único material que funde es el cobre, pudiendo así difundir en el hierro y, posteriormente, solidificándose. Por su parte, el calentamiento que sufre el hierro en estado sólido seguido de un rápido enfriamiento al terminar la reacción puede producir cambios en la microestructura del hierro, principalmente la aparición de martensita [15].

3.2 Descripción y uso de los componentes

Las reacciones químicas asociadas a las soldaduras Thermite Weld son altamente exotérmicas, por lo que liberan enormes cantidades de calor, que pueden ser utilizados para soldaduras [16]. Las reacciones más comunes utilizadas hoy en día son entre óxidos de aluminio y hierro para soldadura de rieles de ferrocarriles, y entre óxidos de aluminio y cobre para soldaduras de puesta a tierra o protección catódica. Esta última es el objeto de estudio en este PIP, y está representada por la Ecuación 3.1, en la cual el óxido cúprico se reduce a cobre metálico, y el aluminio se oxida a óxido de aluminio.



Ecuación 3.1.

El proceso de soldadura está ligado a los materiales a soldar, el óxido metálico utilizado y el procedimiento que se sigue en cada caso. Los materiales necesarios para llevar a cabo la misma se muestran de manera genérica en la Figura 3.1.:

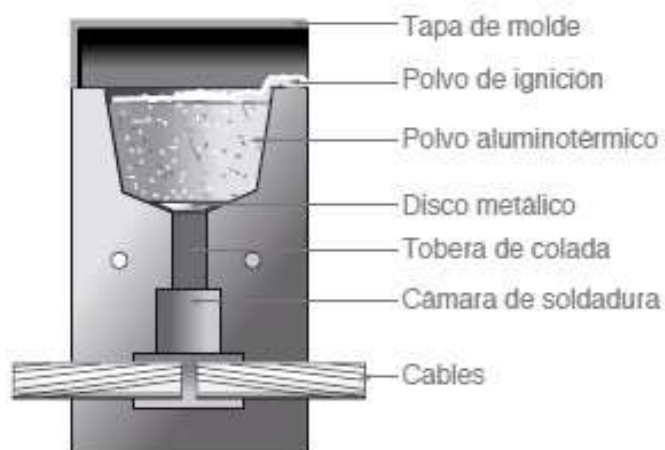


Figura 3.1.: Elementos necesarios para la realización de la soldadura cuproaluminotérmica [17]

El proceso requiere de un molde para unir los conectores, polvo de soldadura, polvo de ignición, mecha y disco de retención. Además, se debe contar con una manija para sostener el molde, y fósforo o encendedor para encender la mecha.

La soldadura se lleva a cabo en un *molde de grafito*, el cual puede tener diversas formas de acuerdo con los conductores utilizados, las dimensiones del cable utilizado y la forma de unión. Algunas de estas disposiciones se observan en la siguiente figura, siendo la Figura 3.2.d) la utilizada en este trabajo:

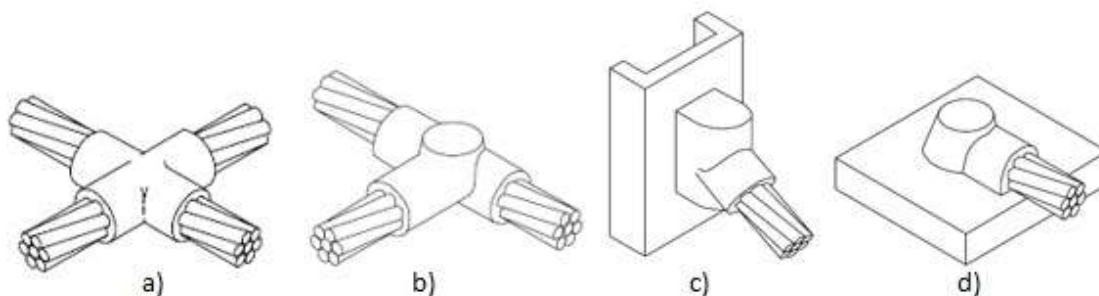


Figura 3.2: Configuración de las distintas soldaduras cuproaluminotérmicas.

Cada molde puede realizar entre 50 y 100 soldaduras, dependiendo del cuidado que se le dé al mismo. Una vez concluida cada soldadura se debe proceder al limpiado del molde. Para esto se debe retirar la escoria del molde con una paleta rasca moldes o, en el caso que la escoria este

muy adherida, con un martillo. En todos los casos se debe proceder con cuidado de no dañar el molde. Luego, se debe cepillar el recinto superior con un cepillo adecuado. Por último, con un pincel más blando se debe limpiar la cámara de soldadura, el canal de bajada y el canal para el cable [18].

Algunos de los defectos más comunes en el molde se pueden apreciar en la Figura 3.3. Estos defectos deben ser evitados, ya que pueden afectar el correcto funcionamiento del molde y la calidad de la unión.



Figura 3.3: Posibles defectos en el molde de grafito para la soldadura cuproaluminotérmica [18].

Otro de los elementos fundamentales es el *polvo de soldadura*. Este polvo, consistente de metales y óxidos acordes a los materiales a unir, deberá ser provisto en recipientes plásticos resistentes a la humedad. Estos recipientes deberán estar debidamente rotulados, indicando fabricante y masa en gramos aproximada del material de aporte [2]. Se lo denomina también *carga o fundente*.

Cada carga no solo deberá contar con el *polvo de soldadura*, sino también con el *polvo de ignición*, el cual, junto con la mecha, tienen el objetivo de proporcionar la temperatura necesaria para que comience la reacción.

Por último, se deberá contar con un *disco metálico*, el cual se colocará en el fondo de la tolva, y cumple la función de retener la mezcla de polvos hasta que comience la reacción. Una vez que esta inicia, los materiales se separan por densidad, y el cobre líquido supercalentado funde el disco, permitiendo el paso hacia la cámara de soldadura [19].

Los principales parámetros a tener en cuenta para los distintos diámetros de conductores de cable disponibles son: a) Tamaño de crisol adecuado b) Marca y cantidad de polvo de soldadura c) relación polvo de soldadura/polvo de ignición.

3.3 Ventajas de la soldadura cuproaluminotérmica

Algunas de las ventajas de este método son:

- Provee unión molecular: la conexión eléctrica se realiza por fusión de los materiales, disminuyendo la posibilidad de corrosión galvánica por la existencia de intersticios de aire [20].
- El proceso es aplicable a diversos materiales: cobre, bronce, acero fundido, hierro común, galvanizado, forjado, aleaciones especiales, entre otros [21].
- Mayor capacidad de transferencia de corriente: al poseer mayor sección transversal que el propio cable conductor [20].
- El equipo para realizar las conexiones descrito en la Sección 3.1. es portátil y fácil de operar, compuesto por elementos livianos y cómodamente transportable en una caja de herramientas [21].
- No se deteriora con el tiempo: Como el material de aporte es cobre, es resistente a la corrosión galvánica por potenciales naturales o por corrientes erráticas [20].

3.4 Usos de la soldadura aluminotérmica

Las aplicaciones de la soldadura aluminotérmica incluyen:

- a. Puesta a tierra: proporciona las conexiones necesarias para las puestas a tierra requeridas por norma, para protección de personas, animales y bienes, para prevenir efectos dañinos que pueda generar la corriente eléctrica [22].
- b. Industria Ferroviaria: La soldadura aluminotérmica se usa ampliamente en la industria ferroviaria. Una de las principales aplicaciones es para reparar defectos en los rieles. Otra aplicación muy difundida es para la unión de rieles
- c. Protección catódica: La protección catódica como método de protección frente a la corrosión puede aplicarse efectivamente a las estructuras de acero que estén en contacto con el suelo o agua, incluyendo tanques (enterrados y sobre el suelo), cañerías (enterradas o subacuáticas) y otros elementos offshore (plataformas, muelles) [7].

3.5 Descripción visual de la soldadura cuproaluminotérmica

La Norma IRAM 2315 (2018) describe el aspecto general que debe cumplir la soldadura cuproaluminotérmica para ser aceptable. El cuerpo de la soldadura no debe presentar defectos tales como socavaciones, nidos de avispa, poros u otros defectos superficiales [2]. Las fisuras sólo se tolerarán cuando se suelden materiales diferentes (por ende, con distinto coeficiente de

dilatación, como es el caso del cobre y del acero), siempre que estas sean superficiales y no afecten a la unión. La presencia de escoria será tolerada siempre que sea superficial y pueda ser removida con herramientas manuales y no afecten a la unión.

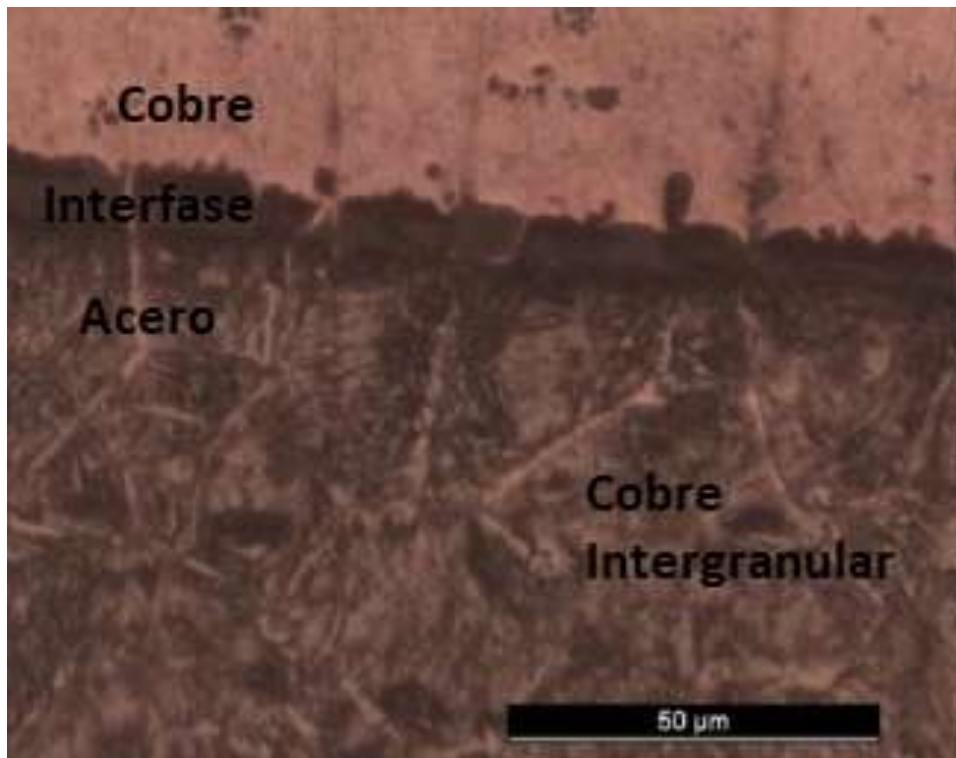


Figura 3.4: Aspecto visual de la soldadura cuproaluminotérmica vista en microscopio óptico [1].

3.6 Mejoras en el proceso de soldadura

El proceso descrito en la sección 3.1. es el más sencillo y comúnmente usado. En el presente PIP no se realizó la soldadura siguiendo ninguna norma en particular, sino que se utilizaron los procedimientos disponibles, resultado de las capacitaciones de la empresa a sus operarios y del procedimiento sugerido en el PIP realizado en 2016 [1]. Es por este procedimiento sugerido, teniendo en cuenta la influencia negativa de la humedad presente en el molde, las piezas a soldar y la carga utilizada, que se realizaron cambios en la elección de proveedor de fundente. Éstos decidieron cambiar los clásicos contenedores plásticos en los cuales se entregaban las cargas por cápsulas selladas o pastillas.

Otra mejora que se introdujo al proceso es la incorporación de *iniciadores electrónicos*. Estos dispositivos sustituyen a la mecha que se debía prender en el método clásico, permitiendo que se inicie la reacción desde una distancia mayor aumentando la seguridad del proceso y de los operarios que lo llevan a cabo.

4 CAPÍTULO 4

4.1 Conocimientos previos

Además de la revisión de la respectiva bibliografía, para el desarrollo de este PIP se consideró como punto de partida el Proyecto Integrador Profesional en la carrera de Ingeniería Química realizado por la Ingeniera Ana Julieta Nehme [1]. En esa oportunidad se realizó el análisis en dos etapas. Inicialmente se obtuvieron 25 probetas, modificando las variables tales como tipo y peso del fundente (marca FACBSA y GENROD), tamaño del crisol y sección del conductor de cobre (10mm^2 y 50mm^2). Una vez obtenidas las muestras, se llevó a cabo una inspección visual y se desarrolló un procedimiento de medición de la resistencia eléctrica que ofrece la soldadura, para así obtener una primera caracterización de esta. Luego, se prepararon las muestras para realizar un análisis macroscópico, y posteriormente una microscopía, utilizando un microscopio óptico. Por último, se midió la microdureza Vickers.

18 de estas muestras fueron consideradas fallidas, por desprenderse completamente la soldadura y no pasar la inspección visual. Por esto se evaluó que condiciones mejorarían las condiciones de soldadura y se elaboró un protocolo en el que se mejoraba la limpieza de la superficie y la eliminación de la humedad en el fundente y el crisol, a partir del cual se realizó una segunda etapa de soldadura en la que se realizaron 15 muestras. De estas, solo 3 superaron la inspección visual. Las soldaduras que no se desprendieron fueron caracterizadas de la misma forma que las de la primera etapa.

De las probetas mencionadas anteriormente, sólo pudieron analizarse las probetas realizadas con cable conductor de cobre de 10mm^2 , ya que las de diámetro mayor todas las soldaduras se desprendieron.

Como conclusión del PIP en base a los resultados analizados, se obtuvo que una carga de 20gr y un tamaño de crisol de 35 son apropiados para soldar el cable conductor de 10mm^2 , obteniendo un porcentaje de unión mayor al 30% y una resistencia menor a $75\mu\Omega$. Respecto a las medidas de microdureza, se considera que hay buena unión metalúrgica en las regiones donde los valores, medidos en Vickers, se mantienen aproximadamente constantes.

4.2 Material analizado

Las muestras sobre las que se realizó la soldadura fueron cañerías de acero que responden a la norma API 5L grado X52 [10] de 5,8 mm de espesor. Dicho acero es un micro aleado utilizado en sistemas de transporte en industrias de gas y petróleo.

PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

Se utilizaron dos diámetros del cable conductor de cobre: 3,5mm y 8mm, es decir 10mm² y 50mm² de sección transversal, respectivamente. Se modificaron la cantidad y la marca de pólvora y fundente utilizados en el proceso de soldadura, siendo FACBSA y CADWELD las empleadas. También se modificó el crisol utilizado, siendo el mismo seleccionado de acuerdo con el diámetro del cable de cobre a soldar. Por último, se utilizaron dos presentaciones de envase de carga: la clásica en envase de plástico, marca FACBSA, y en cartucho sellado, conocido como CADWELD PLUS. Estos se observan en la Figura 4.1. a) y 3.1. c)



Figura 4.1.: a) Recipiente plástico utilizado en la soldadura clásica [23]. b) Compuesto de soldadura con formato en tabletas [18] c) Cápsulas CADWELD PLUS.

En función de estas variables, se realizaron un total de 12 probetas, modificando los parámetros para obtener resultados que permitan observar la influencia de éstos en la efectividad de la soldadura.

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

4.3 Proceso de soldadura

Para la realización del proceso de soldadura cuproaluminotérmica, primero se debió preparar la cañería sobre la cual se soldarían los cables conductores. Para esto, se recortó en porciones una cañería. Dichos recortes fueron lijados con una mola para retirarle los recubrimientos superficiales que poseían. Luego, se midió con ultrasonido el espesor de estas, considerando adecuado un espesor mayor a 5,5mm (Figura 4.2.a), y se limpió la superficie con acetona para garantizar que no existieran suciedad o impurezas que afectara al proceso.

PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

Posteriormente, se comprobó la correcta higiene de los moldes, cepillándolos para retirar la suciedad que podría haber quedado de soldaduras anteriores. Luego, se colocó el crisol limpio sobre la cañería y se colocó el cable conductor, al cual se le retiró su recubrimiento, en la posición indicada dentro del crisol.

A partir de este punto, se debe diferenciar dos procedimientos: uno para la soldadura llevada a cabo con la carga contenida en recipiente plástico y otro para la carga contenida en cartuchos sellados.

En el primer caso, ilustrado en la Figura 4.2 se colocó el disco metálico dentro del molde (Figura 4.2.b). A parte, se pesó la cantidad elegida de polvo de soldadura y se mezcló con la pólvora, reservando una porción de la misma. Se agitaron los polvos para que se homogenicen y se colocaron sobre el disco metálico. Se colocó la mecha dejando sobresalir una pequeña porción hacia afuera del crisol (Figura 4.2.c), y se espolvoreó el restante de pólvora sobre la carga y la mecha, para facilitar así su ignición (Figura 4.2.d). Se cerró el crisol y se sostuvo firmemente con las pinzas adecuadas. A continuación, se encendió la mecha, dando inicio así al proceso de soldadura (Figura 4.2.e). Cuando se extingue la llamarada producida por la reacción, se espera unos segundos antes de retirar el molde (Figura 4.2.f). Este tiempo debe ser suficiente para que el cobre se solidifique, pero no demasiado extenso para que no se adhiera al crisol.

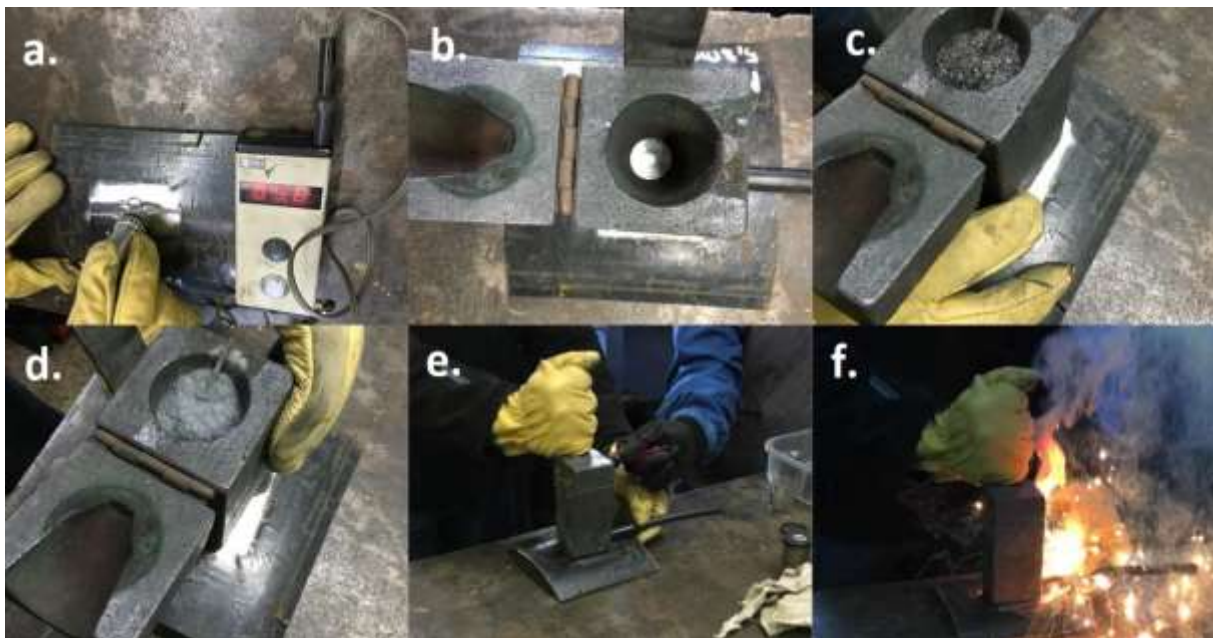


Figura 4.2: Proceso de soldadura cuproaluminotérmica. a) medición de espesor mediante ultrasonido. b) colocación de crisol sobre la cañería, y cable y disco metálico dentro del crisol. c) colocación de carga, pólvora y mecha. d) colocación del resto de la pólvora. e) encendido de la mecha. f) reacción oxido-reducción exotérmica dentro del molde.

PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

Para el caso de los cartuchos sellados (Figura 4.3) el procedimiento es más sencillo y se ilustra en la Figura 4.4. Se colocó el envase dentro del molde apropiado, dejando la lengüeta hacia afuera (Figura 4.4.a) y se cerró el molde de grafito (Figura 4.4.b). Se conectó el iniciador electrónico (Figura 4.4.c) y se lo acciona, iniciando la reacción (Figura 4.4.d). Al igual que en el caso anterior, cuando se extingue la llamarada producida, se espera unos segundos antes de retirar el molde.

Todos los procesos fueron realizados por personal capacitado y con los elementos de protección personal adecuada.

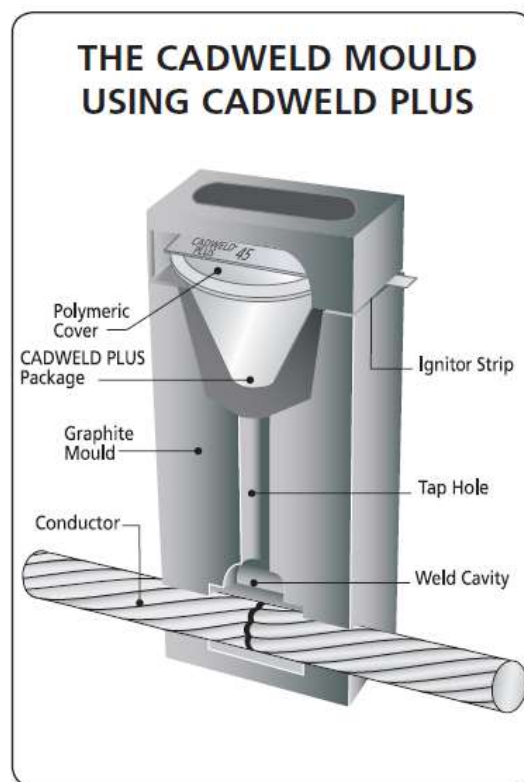


Figura 4.3: Esquema del molde utilizado para la tecnología CADWELD PLUS [g].

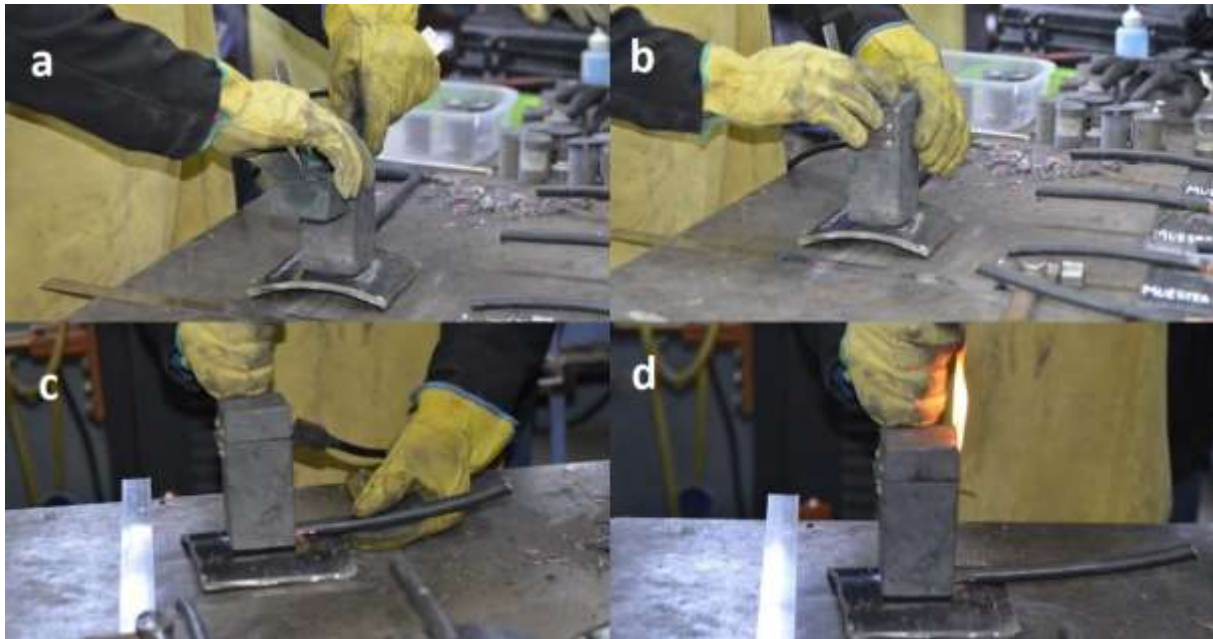


Figura 4.4: Proceso de soldadura cuproaluminotérmica. a) colocación del molde sobre la cañería, y del cable y el cartucho dentro del crisol. b) cerrado del molde. c) conexión del iniciador electrónico. d) reacción óxido reducción exotérmica dentro del molde.

4.4 Caracterización de las probetas obtenidas

4.4.1 Inspección visual

Se realiza un examen visual de todas las muestras generadas con el fin de hacer una primera clasificación de éstas. Se evalúa si la unión del cable a la superficie de la cañería presenta adherencia total, parcial (parte de la soldadura continúa adherida a la superficie de la cañería, pero se desprende el cable de cobre) o total (la soldadura se desprende de la superficie de acero). Además de observar la unión, se evaluó si se apreciaba porosidad superficial y el teñido térmico en la parte interior de la cañería de acero.

4.4.2 Caracterización macro y microscópica

Para las macrografías obtienen probetas realizando un corte con orientación transversal a las soldaduras. Para esto se utiliza una cortadora metalográfica, que utiliza líquido refrigerante para evitar que las muestras se calienten y vean modificada su estructura por el corte. Luego, se incluyen en una resina acrílica para su preparación. La Figura 4.5. muestra el corte realizado en cada probeta preparada.

Se pulieron todas las piezas utilizando lijas al agua de las siguientes granulometrías: 80, 200, 400, 800, 1200, 1500 y por último pasta de diamante de 1 μm .

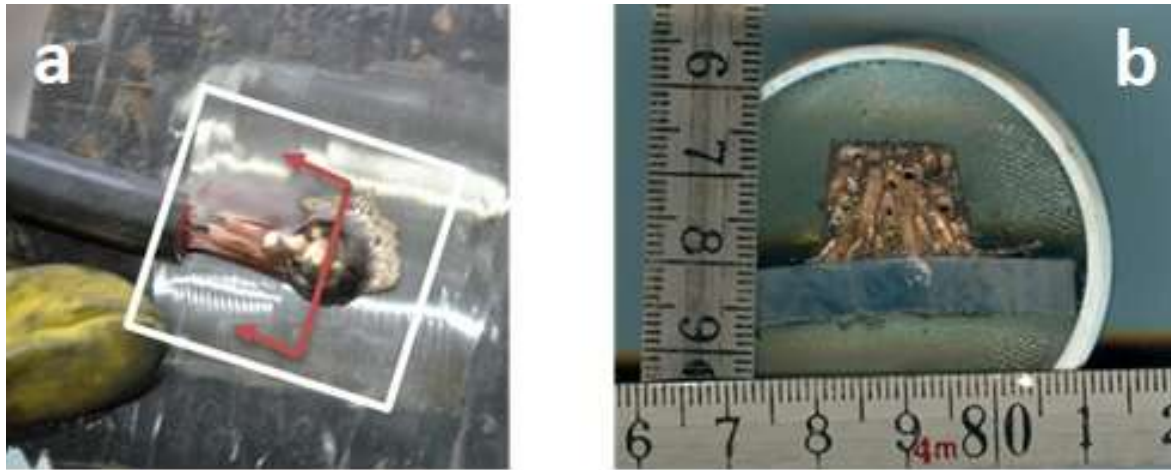


Figura 4.5: a) detalle de la extracción de probetas. b) Probeta preparada.

En cada caso se evaluó la existencia de unión entre cobre y acero, y principalmente si el cable conductor había sido fundido por completo, o por el contrario si podía observarse que no era así.

4.4.3 Caracterización por microscopía óptica

La caracterización por microscopía óptica se desarrolló en dos etapas, utilizando un microscopio óptico LEICA DMI 3000 M, que se muestra en la Figura 4.6.

En la primera etapa se observaron las probetas luego de ser pulidas, sin ataque químico. En esta instancia no se buscaba observar la microestructura del acero, si no que era de interés apreciar la existencia de unión metalúrgica y la presencia de microporosidades, impurezas o fisuras en la muestra.

En la segunda etapa se realizó un ataque químico sobre el acero. Para esto se utilizó Nital 4%, una solución compuesta por 4 ml de ácido nítrico al 96% y 96 ml de alcohol etílico, y sumergiendo la muestra a atacar por 4 segundos. Pasado ese tiempo, se enjuagó con agua, luego con alcohol, se secó rápidamente con aire caliente y se observó al microscopio. El principal objetivo de esta etapa era observar la microestructura del acero, el tamaño de sus granos, el crecimiento de estos en la zona afectada por el calor (ZAC) y la presencia de fisuras o grietas rellenas de cobre.

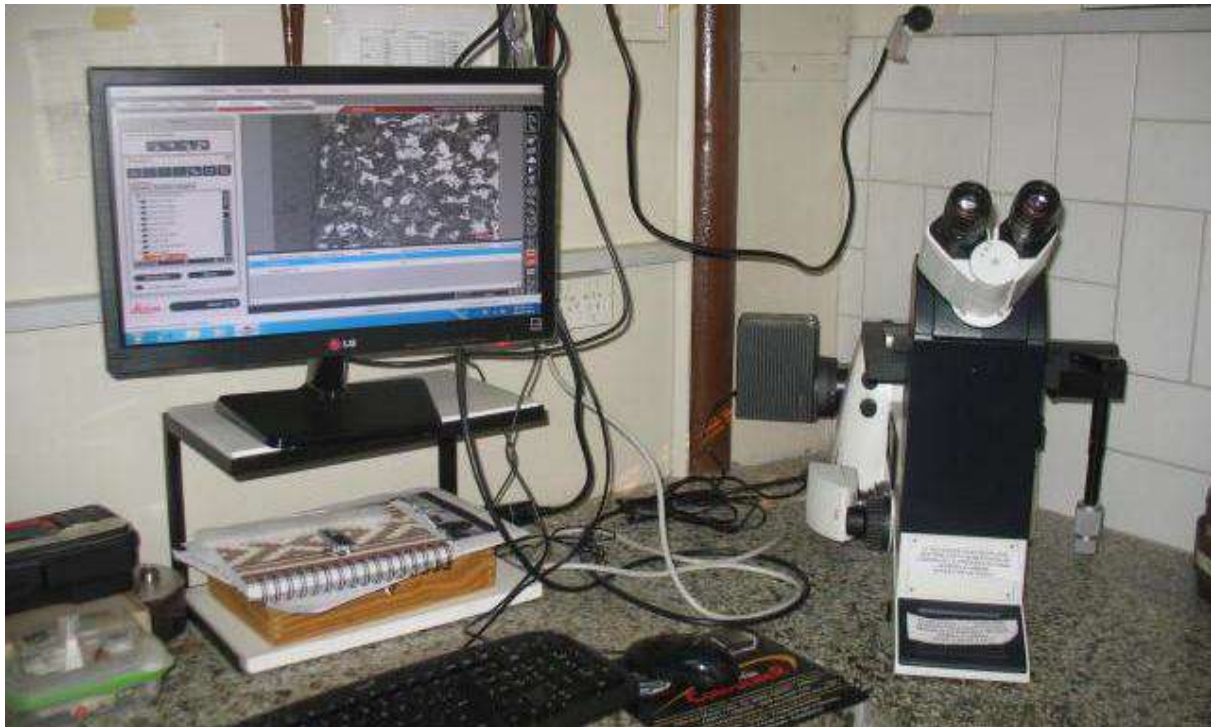


Figura 4.6: microscopio óptico LEICA DMI 3000 M

4.4.4 Medición de microdureza

Luego de las observaciones microscópicas, se realizó un barrido de microdureza Vickers en cada una de las probetas, utilizando un microdurómetro FUTURTECH FM-700 que se muestra en la Figura 4.7. Las pruebas fueron realizadas con una carga de 1Kg por 10 segundos, con una distancia de 0,5mm entre cada impronta, de acuerdo con la norma ASTM E384-17 [24]. Las mediciones fueron realizadas sobre el acero, en la zona afectada por el calor.



Figura 4.7: Microdurómetro FUTURTECH FM-700

4.4.5 Medición del porcentaje de unión

El principal criterio utilizado para determinar la región donde había unión metalográfica fue la existencia de un valor aproximadamente constante en los valores de las mediciones de microdureza y determinando el porcentaje longitudinal de esta región.

4.4.6 Caracterización mediante microscopía electrónica de barrido

Con el objetivo de caracterizar la interface de unión entre el cobre y el acero se utilizó la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por su nombre en inglés *Scanning Electron Microscope*). Esta técnica utiliza un haz de electrones para incidir sobre la muestra en lugar de un haz de luz como se utiliza en los microscopios ópticos [25]. Este tipo de análisis resulta relevante para observar la unión de cobre-acero de las muestras, además de analizar la composición química de la interfase formada y de las impurezas que puedan aparecer en las probetas.

De todos los tipos de señal que se generan a partir de este haz de electrones que pueden observarse en la Figura 4.8, en el análisis para el presente PIP se consideraron dos tipos: Electrones dispersados o *Backscattered Electrons* (BSE) y Electrones Secundarios o *Secondary Electrons* (SE).

Los electrones BSE se originan por la colisión de los electrones el haz con los átomos de la muestra a observar, lo que causa una desviación en la trayectoria de dichos electrones. El número de electrones dispersados que llegan al detector son proporcionales al Z del átomo al cuál impactó, lo que permite estimar que elemento químico está presente en la muestra. Además, las imágenes BSE brindan otra información relevante, como topografía y cristalografía de la muestra.

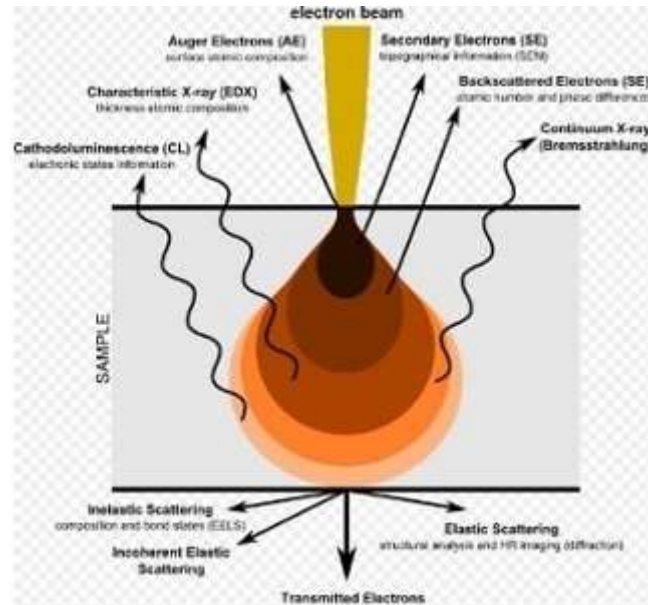


Figura 4.8: Diferentes tipos de señales producidas por la incidencia de un haz de electrones sobre una muestra

Por su parte, los electrones secundarios se originan en la superficie de la muestra o en las cercanías a ella, y surgen de la interacción de los electrones del haz con la muestra. Los electrones de la superficie son excitados por los electrones incidentes y son eyectados de la misma. Poseen menos energía que los BSE y permiten ver la topografía de la muestra [25].

Para la caracterización por SEM se utilizó un microscopio marca Zeiss, modelo EVO-MA 15 equipado con espectrómetro para microanálisis químico semicuantitativo por energía dispersiva (EDS –*Energy Dispersive Spectrometry*) marca Oxford, modelo X-MaxN, perteneciente al Laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido y Difracción de Rayos X del IIPG (Instituto de Investigación de Paleobiología y Geología) de la Universidad Nacional de Rio Negro (UNRN). El mismo puede observarse en la Figura 4.9

**PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE**



Figura 4.9: SEM ZEISS EVO-MA 15 utilizado.

5 CAPÍTULO 5

Resultados y discusiones

5.1 Realización de las soldaduras

Para la realización de este proyecto fueron realizadas 12 soldaduras, cuyo detalle se encuentra en la Tabla 5.1. Se utilizaron dos marcas de polvo de soldadura y polvo de ignición: FACBSA y CADWELD, dos diámetros de cable conductor de cobre: 3,5mm (10mm² de sección transversal) y 8mm (50mm² de sección) y dos tamaños de crisol adecuados: 45 y 15. Las soldaduras se realizaron sobre una sección de acero de cañerías API 5L X52 de 5,8mm de espesor.

Para las muestras M10 y M14b no se pudo pesar por separado la carga de la pólvora, ya que se utilizaron cartuchos CADWELD PLUS sellados, con relación pólvora/fundente desconocida.

Tabla 5.1: Datos de las soldaduras realizadas

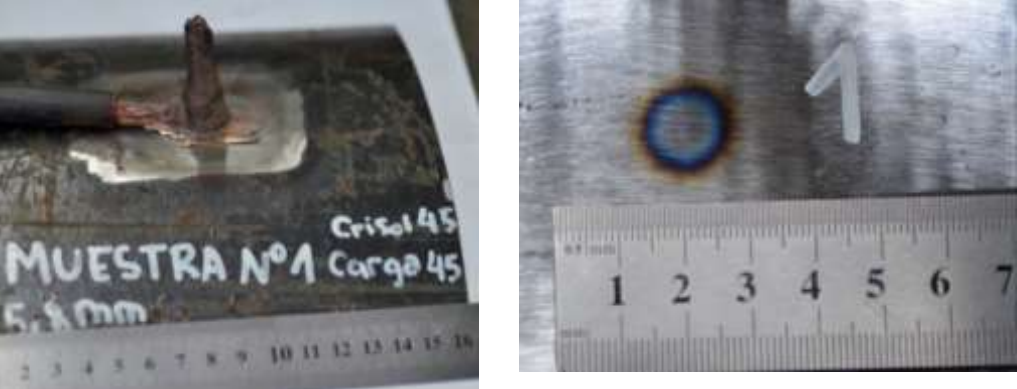
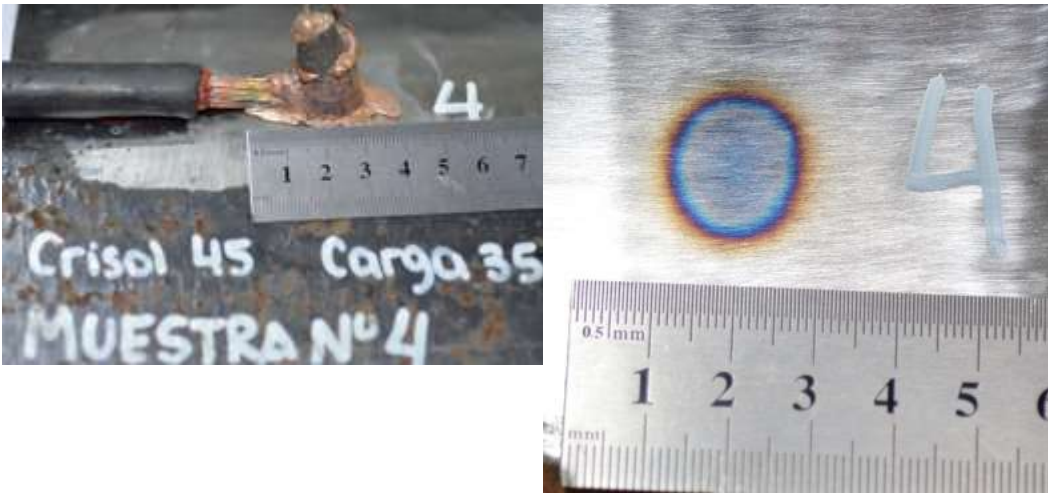
N° Muestra	Diámetro cable [mm]	Sección cable [mm ²]	Tamaño crisol	Peso fundente [g]	Peso pólvora [g]	Relación fundente/pólvora	Marca Carga y pólvora
1	8	50	45	48,3	2,3	21	FACBSA
4	8	50	45	35	2,3	15,22	FACBSA
5	8	50	45	44,9	2,3	19,52	FACBSA
6	8	50	45	44,9	2,3	19,52	FACBSA
7	8	50	45	35	2,3	15,22	FACBSA
8	8	50	45	35	2,3	15,22	FACBSA
10	8	50	45	-	-	-	CADWELD
11	8	50	45	14,9	2,3	6,47	FACBSA
12	8	50	45	24,9	2,3	10,82	FACBSA
13	8	50	45	34,6	2,3	15,04	FACBSA
14 a	3,5	10	15	14,9	2,3	6,47	FACBSA
14 b	3,5	10	15	-	-	-	CADWELD

Por cuestiones organizativas las muestras 2, 3 y 9 no fueron soldadas


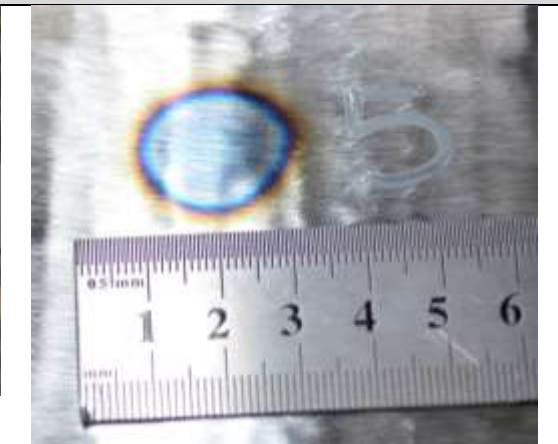

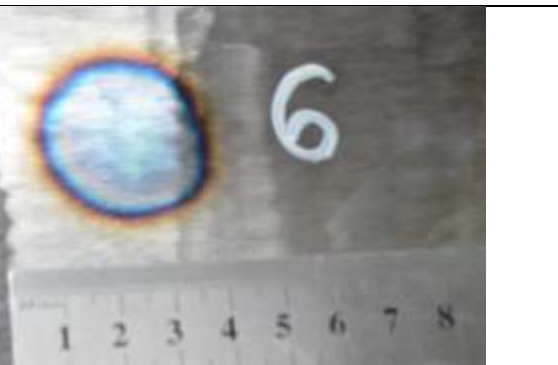

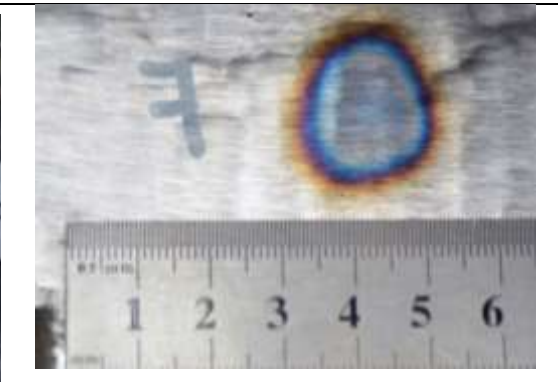
5.2 Resultados de la inspección visual

En la Tabla 5.2. se muestran los resultados de la inspección visual, en la cual se analizó la adherencia del cable conductor de cobre a la superficie de la cañería de acero, prestando especial atención al cobre fundido que se desplaza hacia el lado del cable. Esto produce que haya una mayor adherencia del cable a la superficie de acero y que la soldadura sea total, y no parcial (que no haya desprendimiento del cable conductor).


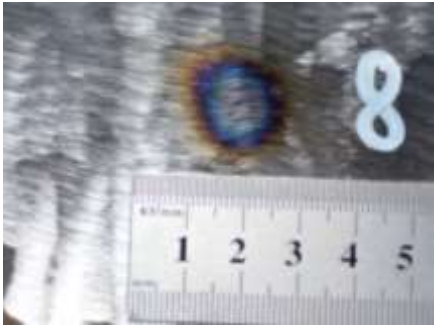

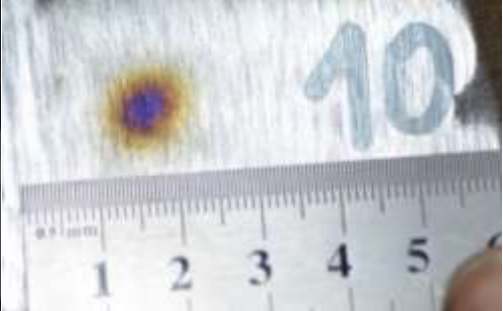

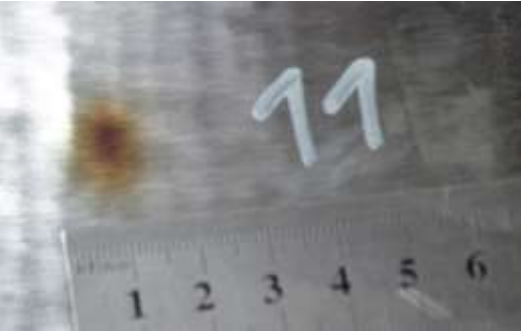
Tabla 5.2: Resultados de la inspección visual

N° Muestra	Resultado
1	 <p>La soldadura resultó de gran altura, se desplazó poco cobre fundido hacia el lado del cable. Se ve escoria homogénea con el cobre. Presento teñido térmico moderado</p>
4	 <p>Soldadura alta, se ve separación entre la escoria y el cobre. Se desplazó poco cobre fundido hacia el lado del cable. Teñido térmico moderado-fuerte</p>

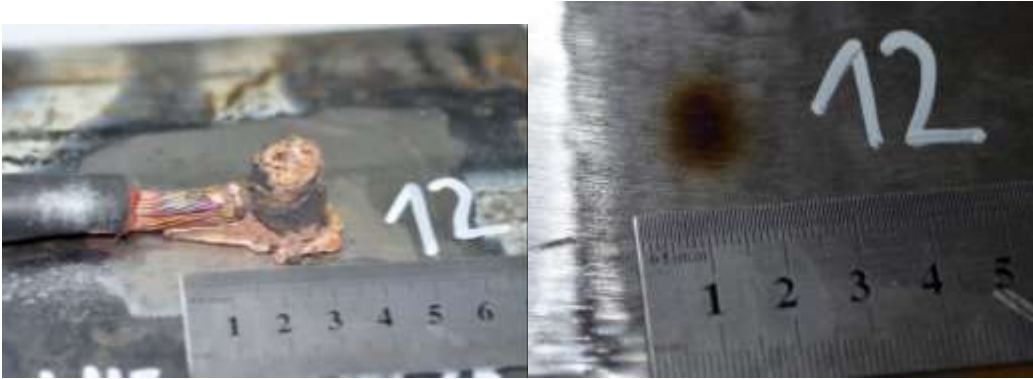
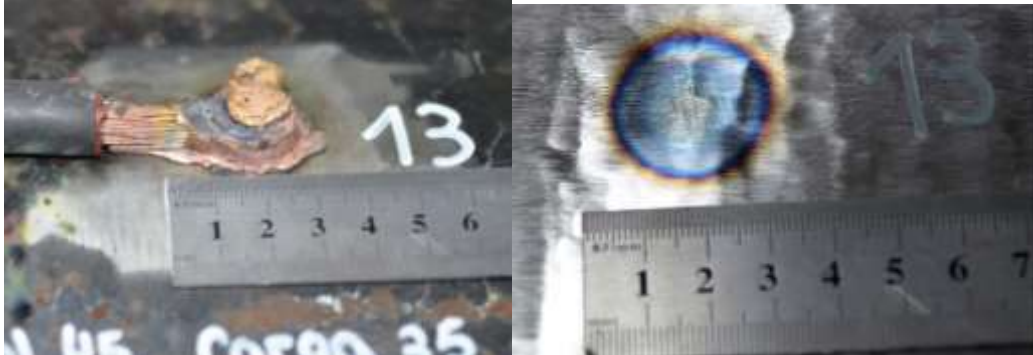
PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

N° Muestra	Resultado	
5		 <p data-bbox="347 795 1385 891">Soldadura baja (un poco más alta que el cable). No presenta escoria. Se desplazó poco cobre fundido hacia el lado del cable. Teñido térmico fuerte.</p>
6		 <p data-bbox="400 1344 1334 1440">El cable no fundió. No quedó soldadura homogénea, el material fundido desbordó por completo fuera del molde. Teñido térmico muy fuerte.</p>
7		



PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

N° Muestra	Resultado
	<p>Soldadura baja (a la altura del cable). Se ve mucha escoria y pérdida de cobre. El cobre fundido se desplazó hacia el cable, pero sólo por un lado. Teñido térmico fuerte.</p>
8	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>Soldadura de altura media, presenta una cantidad considerable de escoria, pero homogénea con el cobre. Hubo pérdida de cobre. El cobre fundido se desplazó hacia el lado del cable. Teñido térmico moderado (de color más oscuro).</p>
10	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>Soldadura baja con mucha escoria. Se funde bien hacia los lados, pero no hacia el lado del cable. Coloración más dorada que las demás. Tenido térmico leve.</p>
11	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>

PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

N° Muestra	Resultado
	Soldadura alta, pero con mucha escoria (separada del cobre). No se desplazó cobre fundido hacía el cable. Teñido térmico muy leve.
12	 <p>Soldadura de altura media. Presenta soldadura con mucha escoria heterogénea. Se desplazó poco hacia el lado del cable (solo de un lado). Teñido térmico leve.</p>
13	 <p>Soldadura baja (a la altura del cable). Sin escoria. Se desplazó poco cobre fundido hacia el lado del cable (sólo por un lado). Teñido térmico fuerte.</p>

PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

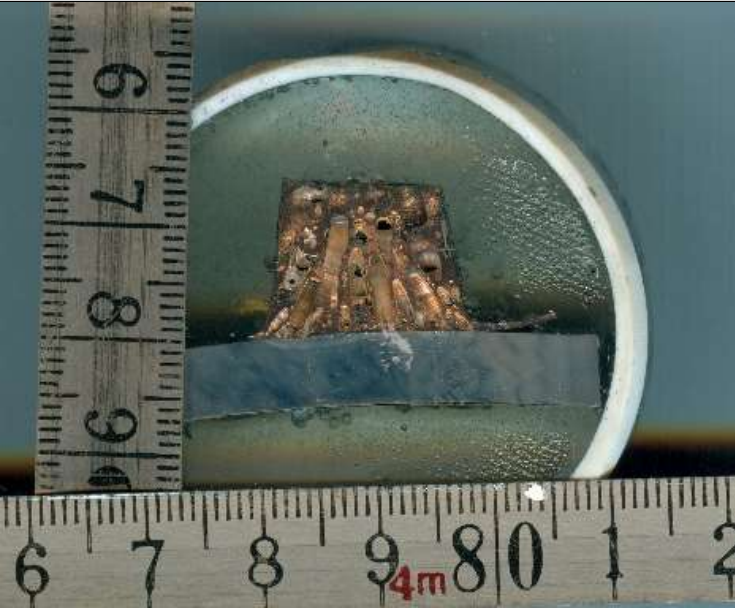
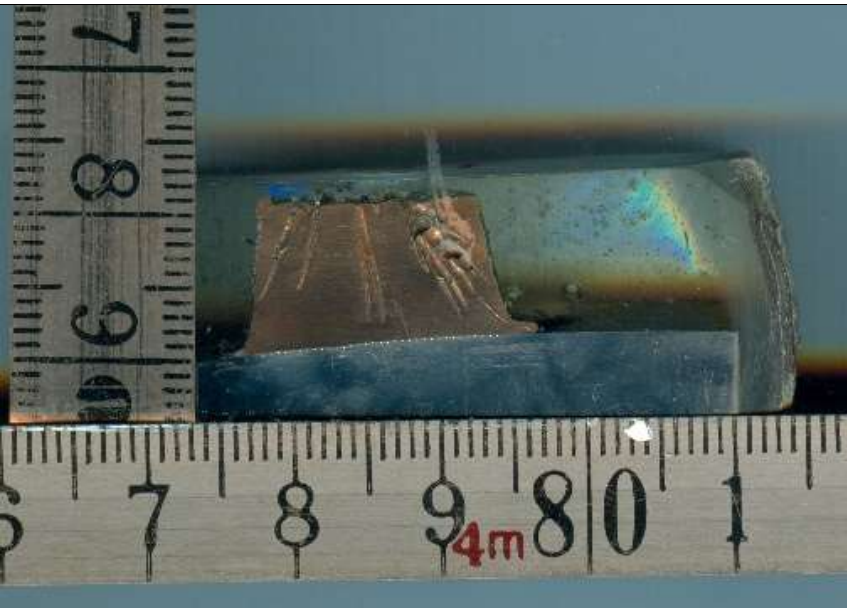
N° Muestra	Resultado
14 a	 <p data-bbox="352 987 1385 1070">Soldadura de altura media. Mucha escoria no homogénea. Hubo desplazamiento de cobre fundido hacia el cable. Teñido térmico leve.</p>
14 b	 <p data-bbox="360 1704 1377 1850">Soldadura de altura media con forma característica debida al crisol, con desplazamiento de cobre fundido hacia el cable. Se ve escoria no homogénea y el metal fundido presenta coloración dorada. Teñido térmico muy leve.</p>

Debido a los resultados obtenidos la muestra M6 no se prepara para la caracterización macroscópica.


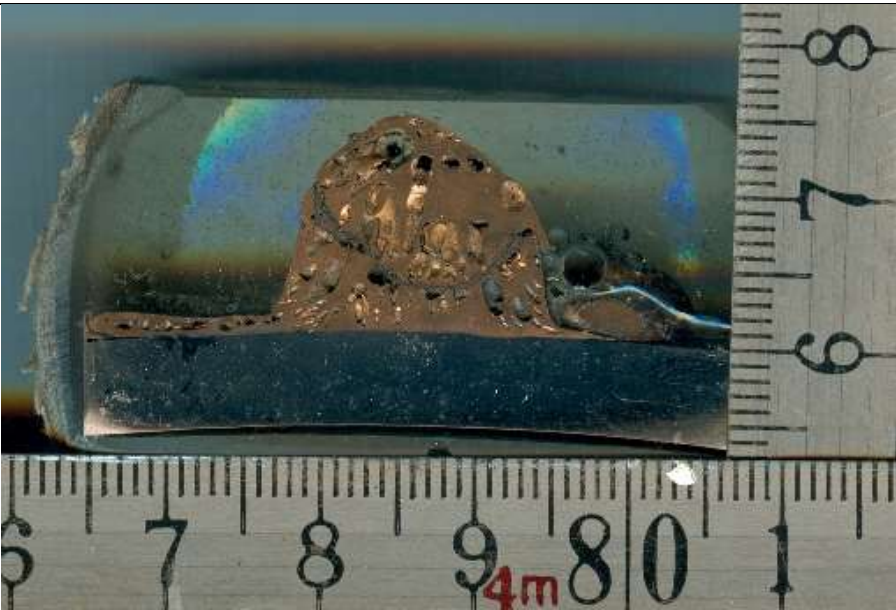
5.3 Resultados de la caracterización macroscópica

Las muestras fueron cortadas y preparadas metalográficamente, como se indicó en la sección 4.3.2. Los resultados de las caracterizaciones macroscópicas obtenidas se muestran en la Tabla 5.3.



Tabla 5.3: Resultados de la caracterización macroscópica

N° de muestra	Observación
1	 <p data-bbox="347 1305 1409 1391">Se observa unión metálica, aunque se dificulta apreciarlo porque hay presencia de suciedad.</p>
4	

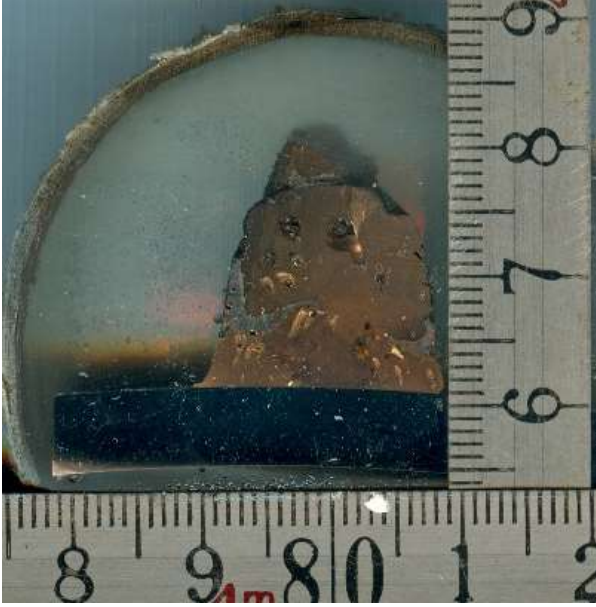
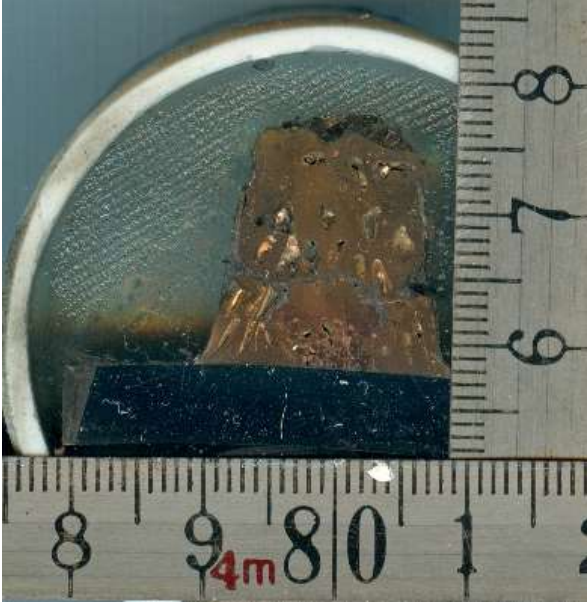
PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

N° de muestra	Observación
	Se observa penetración del cobre en el acero en gran parte de la superficie de la muestra
5	 <p data-bbox="347 1070 1406 1160">Se observa que hay penetración del cobre en el acero hacia el lado izquierdo de la muestra. Se observa gran porosidad hacia la parte superior de la soldadura.</p>
7	 <p data-bbox="365 1803 1386 1892">No se observa unión, se observa suciedad a lo largo de toda la superficie. Gran porosidad hacia la parte superior.</p>

PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

N° de muestra	Observación
8	 <p>Se ve buena penetración en mitad de la muestra. Luego se observa suciedad y contacto entre metales sin penetración del cobre. Gran porosidad en toda la soldadura.</p>
10	 <p>No se fundió el cable. No se observa penetración en ningún sector.</p>
11	

PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

N° de muestra	Observación
	 <p data-bbox="341 1014 1410 1104">No funde el cable. Parece no haber penetración del cobre en el acero. Gran sección con suciedad.</p>
12	 <p data-bbox="443 1805 1308 1839">No se fundió el cable. No se observa penetración en ningún sector.</p>

PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

N° de muestra	Observación
13	 <p data-bbox="542 940 1212 981">Se observa buena penetración del cobre en el acero.</p>
14a	 <p data-bbox="582 1675 1165 1713">Se observa penetración del cobre en el acero.</p>

PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

N° de muestra	Observación
14b	 <p data-bbox="467 1014 1283 1048">Se observa penetración del cobre en el acero en la zona central.</p>

Debido a los resultados obtenidos, las muestras 7, 10, 11 y 12 no cumplen los requisitos necesarios por lo que no se continúa con su análisis. Las probetas que continuarán siendo analizadas se resumen en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Resumen de las muestras que continúan siendo analizadas.

N° Muestra	Diámetro cable [mm]	Sección cable [mm ²]	Tamaño crisol	Peso fundente [g]	Peso pólvora [g]	Relación fundente/pólvora	Marca Carga y pólvora
1	8	50	45	48,3	2,3	21	FACBSA
4	8	50	45	35	2,3	15,22	FACBSA
5	8	50	45	44,9	2,3	19,52	FACBSA
8	8	50	45	35	2,3	15,22	FACBSA
13	8	50	45	34,6	2,3	15,04	FACBSA
14 a	3,5	10	15	14,9	2,3	6,48	FACBSA
14 b	3,5	10	15	-	-	-	CADWELD

5.4 Resultados de la caracterización microscópica

Las probetas de la Tabla 5.4 fueron observadas en el microscopio óptico. Luego, fueron atacadas químicamente y observadas nuevamente en dicho microscopio.

En la Figura 5.1 puede observarse la muestra M1 sin ser atacada. Se pudo observar que había grandes zonas que presentaban unión metalúrgica (Figura 5.1.a), y penetraciones de cobre de gran longitud (Figura 5.1.b).

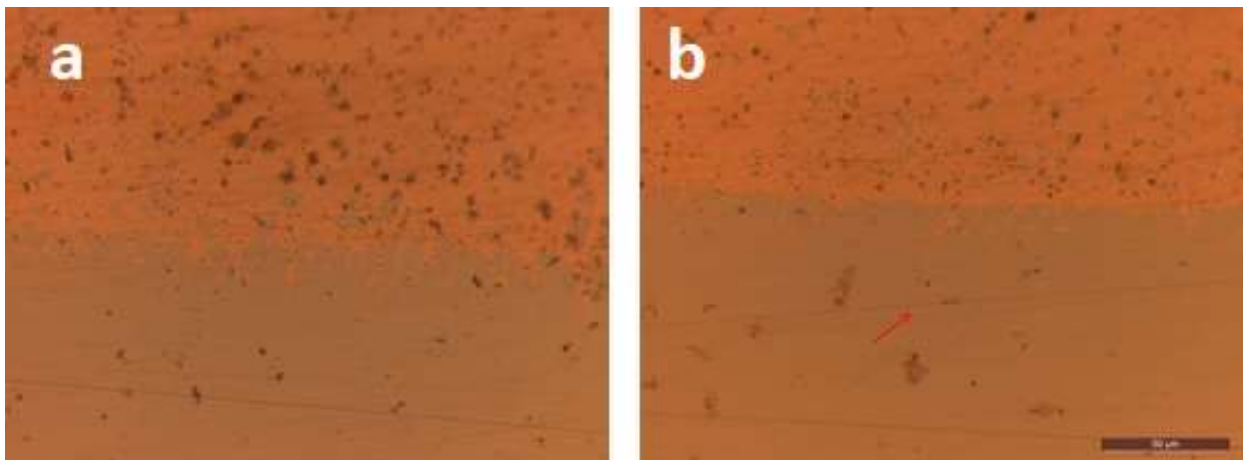


Figura 5.1: Microscopía de la muestra M1 sin ataque químico

Luego de ser atacada, se puede observar con mayor claridad la formación de la interfase que evidencia la unión metalúrgica (Figura 5.2). Además, se puede observar la estructura del metal base, y en él difusión de cobre en borde de grano. Se ve una gran penetración de cobre en uno de los extremos de la pieza.



Figura 5.2: Microscopía óptica de la muestra M1 con ataque químico

La muestra M4 sin ataque químico presenta grandes zonas donde se aprecia que existe unión metalúrgica, sin embargo, esta interfase presenta menor espesor (Figura 5.3). Además, se observa gran difusión de cobre en borde de grano.

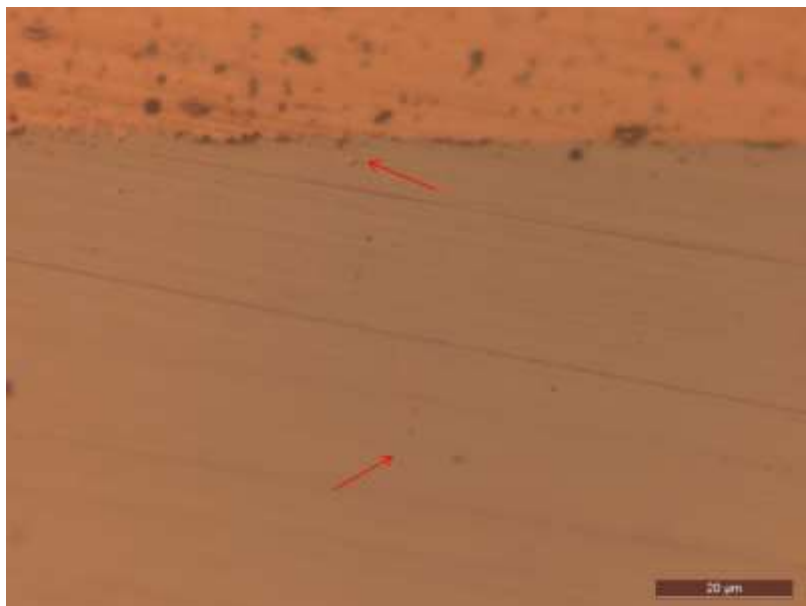


Figura 5.3: Microscopía de la muestra M4 sin ataque químico.

Luego del ataque químico se pudo observar la microestructura del acero, además de poderse apreciar con mayor claridad la presencia de cobre intergranular en éste. La estructura de la muestra M4 se muestra en la Figura 5.4

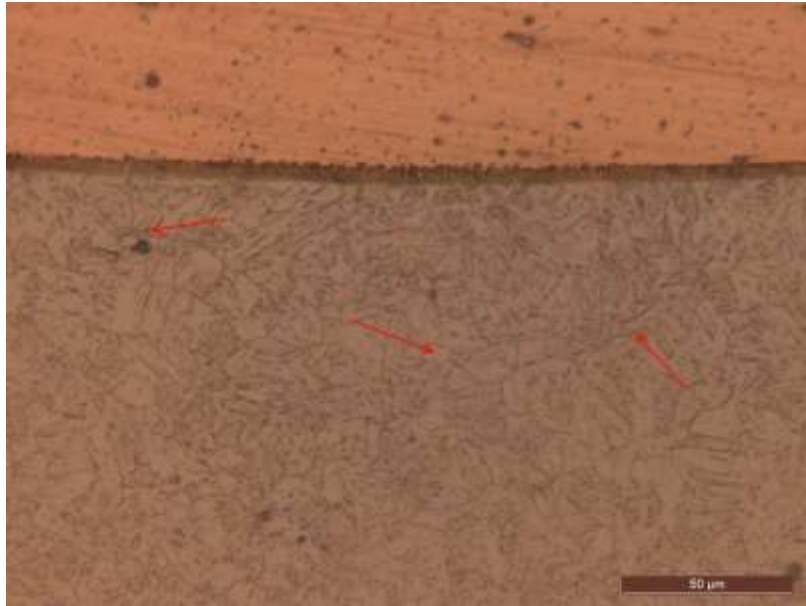


Figura 5.4: Microscopía de la muestra M4 con ataque químico.

En la Figura 5.5. y 5.6 se observan las micrografías para la muestra M5. Antes de ser atacada se observaba poca unión, pudiéndose ver una interfase de unión cobre-acero muy delgada. De todas formas, se podían observar largas penetraciones de cobre en el hierro.

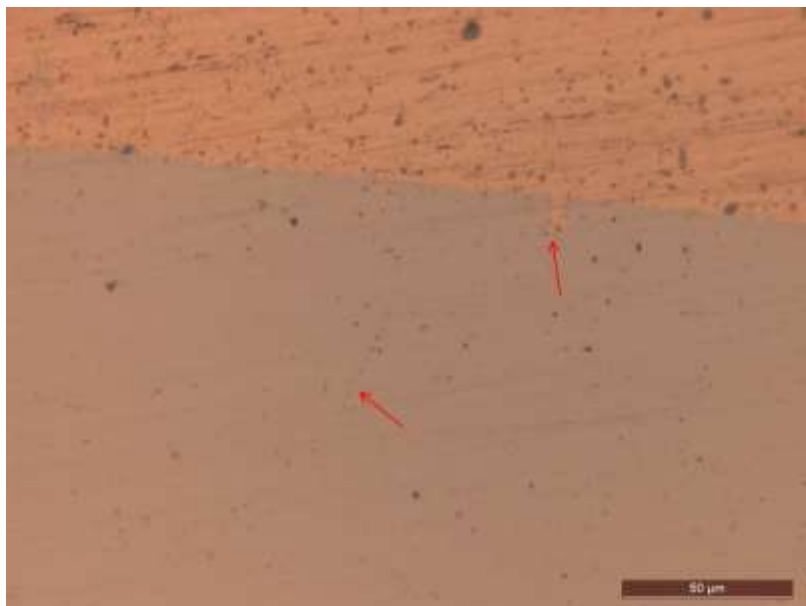


Figura 5.5: Micrografía de la muestra M5 antes de ser atacada químicamente.

Luego del ataque, se pudieron observar zonas donde la interfase de unión era mayor que en otras, siendo muy irregular a lo largo de la muestra (Figura 5.6).

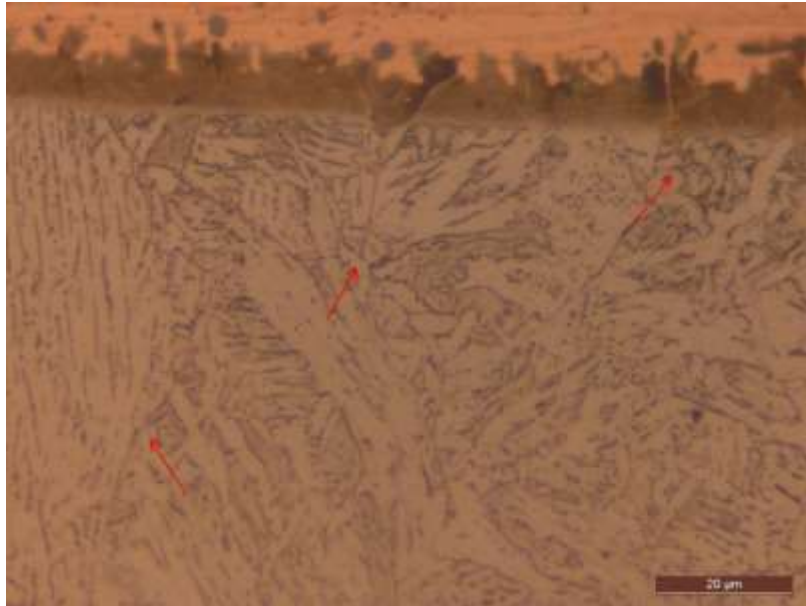


Figura 5.6: Micrografía de la muestra M5 luego del ataque químico.

Al observar al microscopio la muestra M8, se pudo observar que había buena unión metalúrgica del lado derecho de la probeta, mientras que del lado izquierdo no se observaba buena unión. La falta de unión puede apreciarse en la Figura 5.7., dónde la interfase es extremadamente delgada. En el caso de la Figura 5.8, correspondiente a la imagen de la probeta atacada, puede observarse una interfase de unión de espesor considerable. En ambos casos se observan penetraciones de cobre.

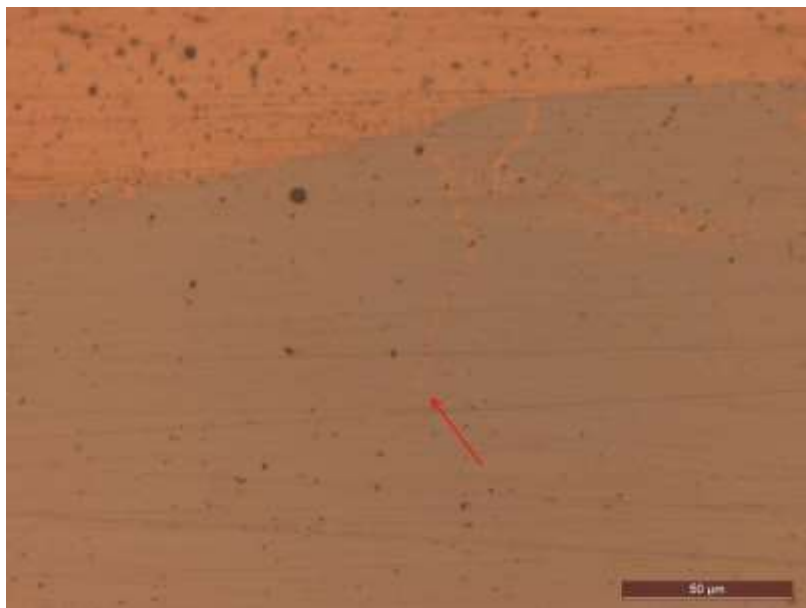


Figura 5.7: Micrografía de la muestra M8 sin ataque químico.

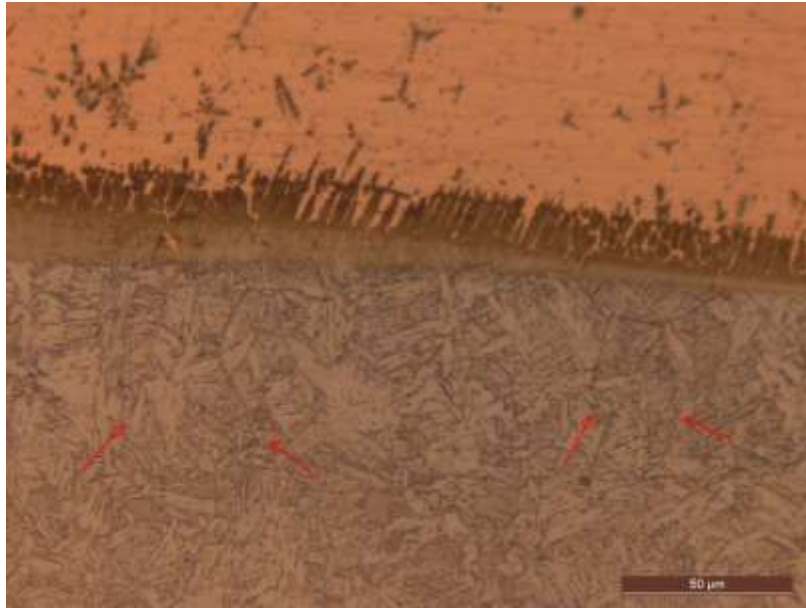


Figura 5.8: Micrografía de la muestra M8 luego del ataque químico.

La figura 5.9. corresponde a la muestra M13 sin ataque químico. Se puede observar que hacia el lado izquierdo parece haber mucha penetración de cobre. Hacia el lado derecho se observan zonas con poca penetración debido a la presencia de escoria.

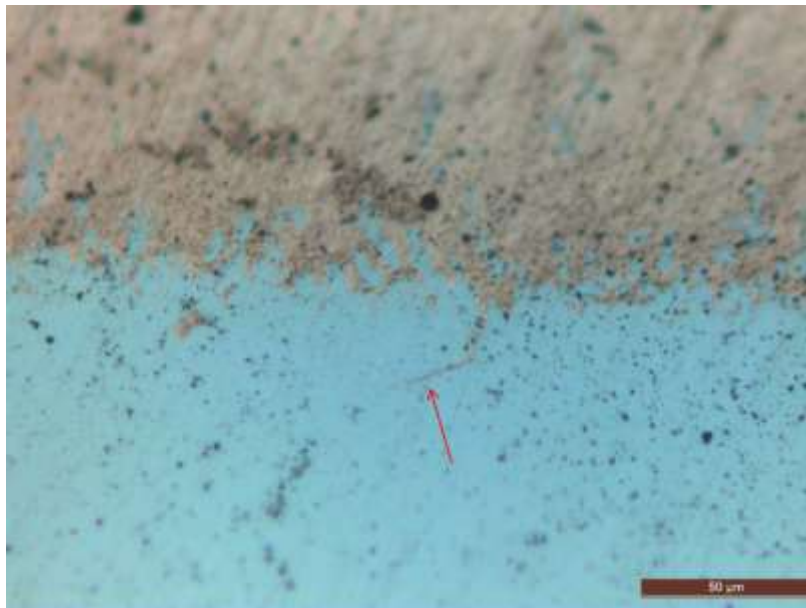


Figura 5.9: Micrografía de la muestra M13 sin ataque químico.¹

Al observarse M13 luego del ataque químico, se pudo comprobar que había buena unión a lo largo de toda la muestra (Figura 5.10).

¹ Se cambió la platina del microscopio óptico por una nueva de material distinto, provocando que se dificultara el enfoque.

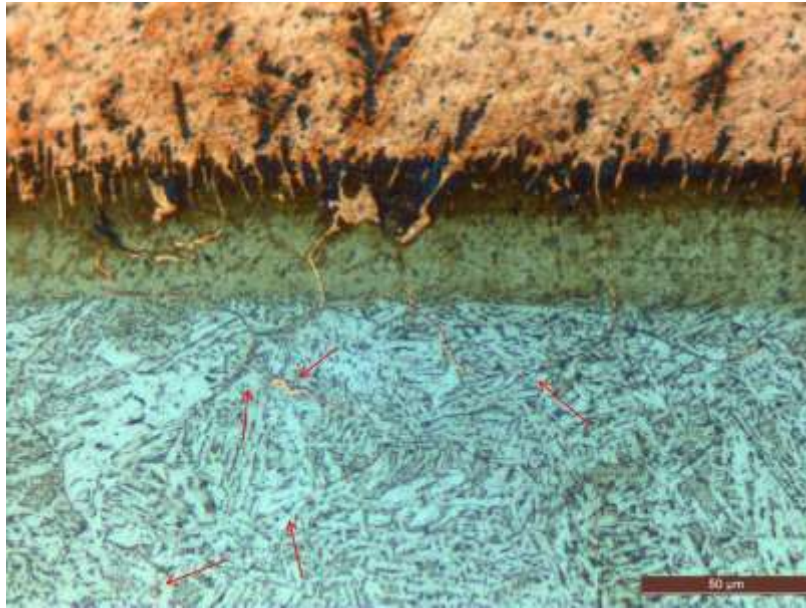


Figura 5.10: Micrografía de la muestra M13 con ataque químico.

La muestra M14a al ser observada al microscopio sin atacar permitió ver que había buena unión metalúrgica hacia la zona central de la pieza (Figura 5.11), mientras que al ser atacada esta unión se vio en toda la superficie de la muestra (Figura 5.12). Se observan penetraciones de cobre a lo largo de toda la muestra.

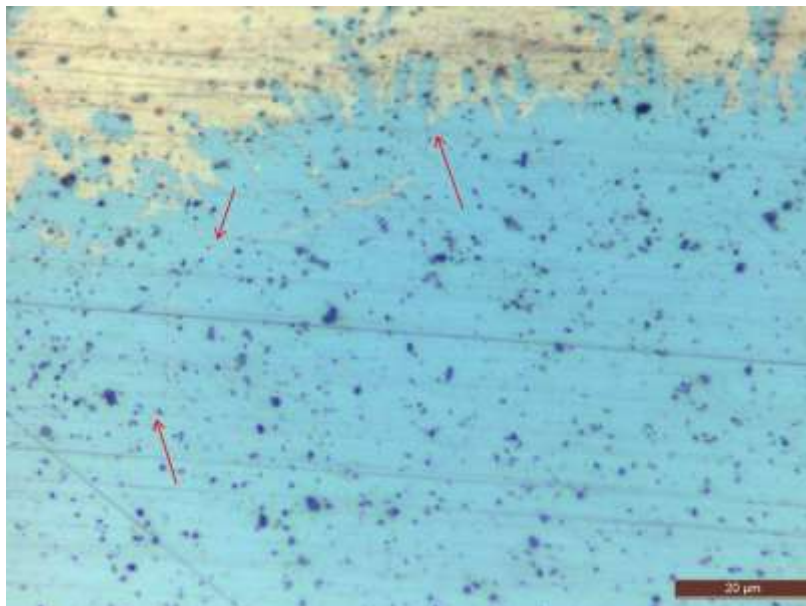


Figura 5.11: Micrografía de la muestra M14a sin atacar químicamente.

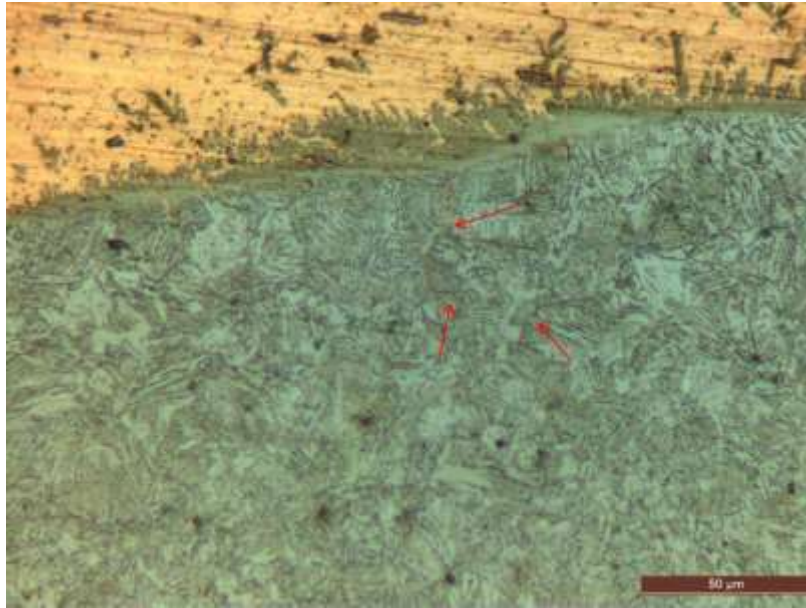


Figura 5.12: Micrografía de la muestra M14a luego del ataque químico.

Al observar la muestra M14b en el microscopio se pudieron apreciar muchas penetraciones de cobre de gran longitud a lo largo de toda la muestra (Figura 5.13 y 5.14). Presenta una interfase con buena unión metalúrgica.

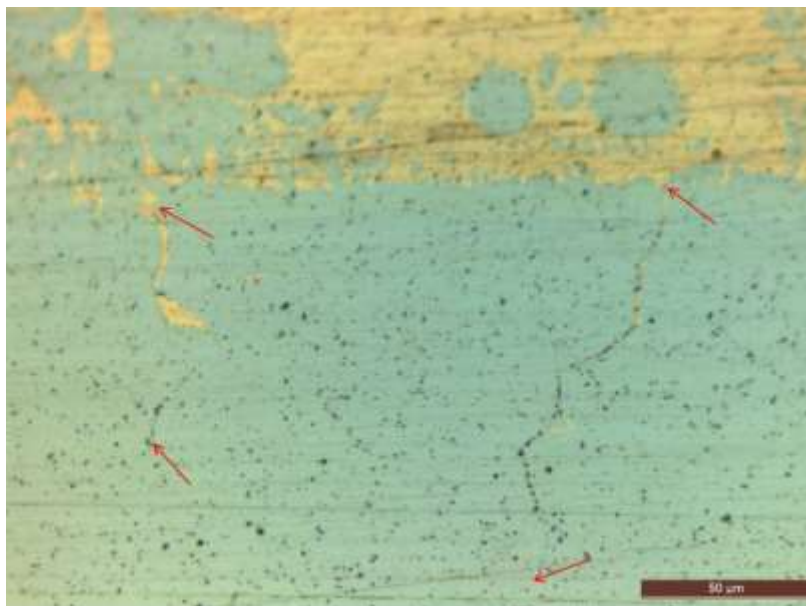


Figura 5.13: Micrografía de la muestra M14b sin ataque químico.

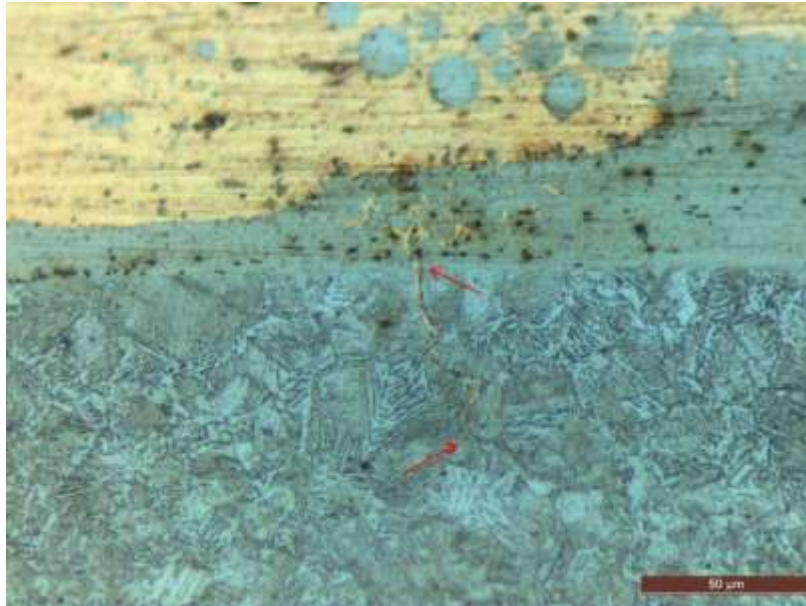


Figura 5.14: Micrografía de la muestra M14b luego del ataque químico.

5.5 Resultados del barrido de microdureza

Se realizó para cada pieza el barrido de microdureza según lo indicado en la sección 4.4.3. En la Figura 5.15 se observa el sentido en el que se realizó el barrido de microdureza en la ZAC (Zona Afectada por el Calor).

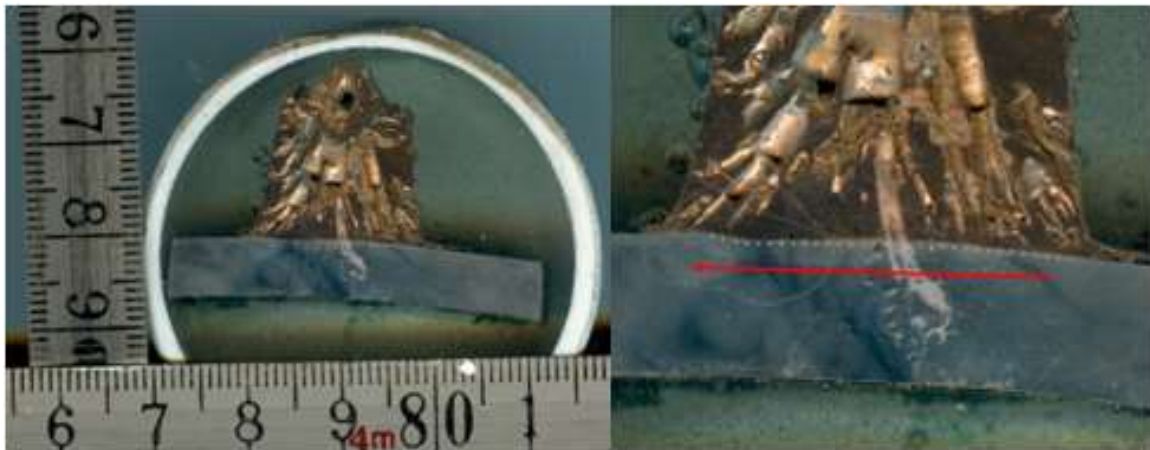


Figura 5.15: Barrido de microdureza observado macroscópicamente en la muestra M5.

Para las distintas muestras se realizaron gráficos de posición vs medida de dureza. Los resultados se presentan a continuación.

Para la muestra M1 se observa en el Gráfico 5.1. que la medida de dureza es constante en una porción de la soldadura, y que luego aumenta hacia el final de la misma. Además, se observa

un pico en la gráfica que corresponde a una medición realizada en la cercanía de una impureza, por la cual no hay unión.

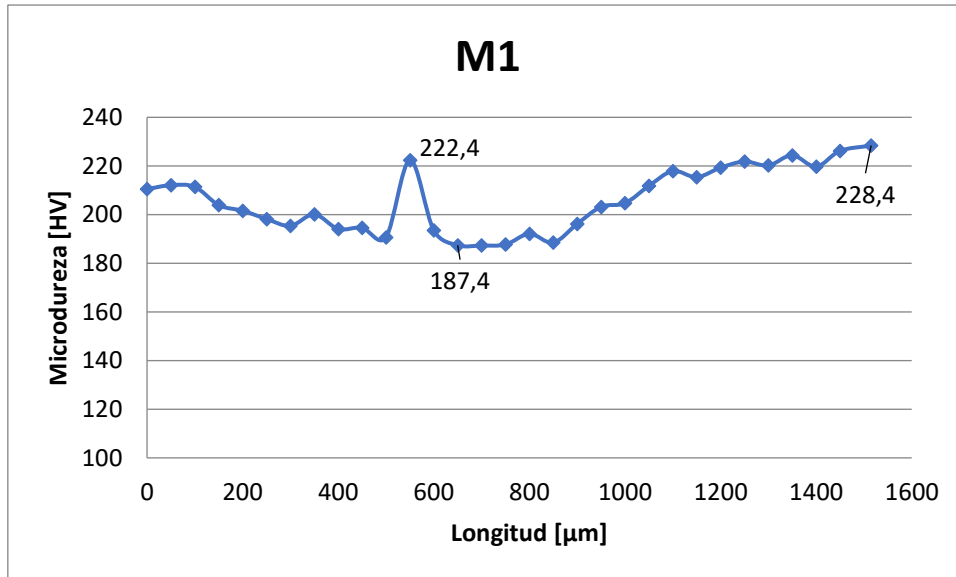


Gráfico 5.1: Resultados de la medición de microdureza de la muestra M1 donde se indican valores máximos y mínimos de dureza.

Para la muestra M4 se observó una menor variación en los valores de microdureza. Los resultados del barrido así como los valores máximos y mínimos se observan en el Gráfico 5.2.

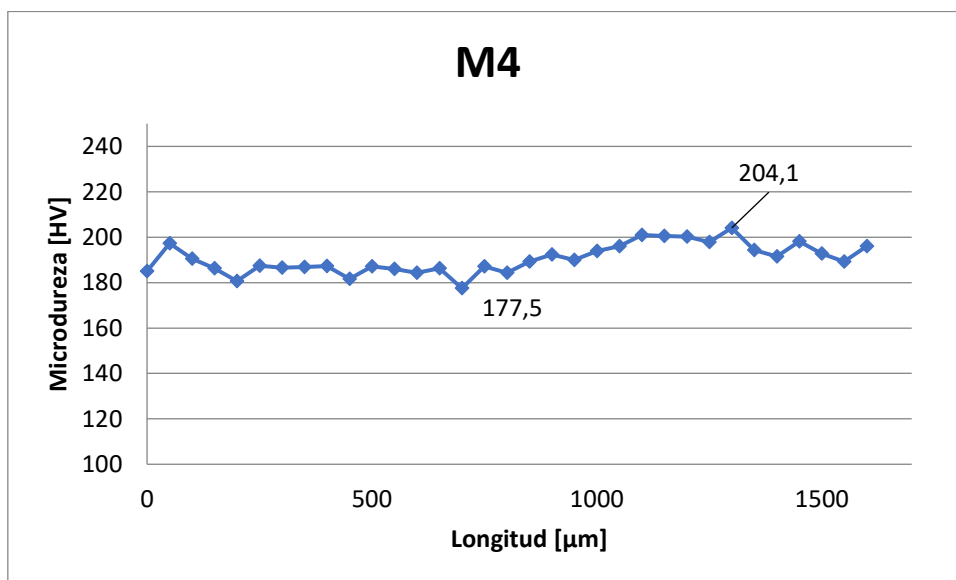


Gráfico 5.2.: Resultados de la medición de microdureza de la muestra M4 donde se indican valores máximos y mínimos de dureza.

El barrido de microdureza de la muestra M5 observada en el Gráfico 5.3, se obtuvieron valores constantes solo en la segunda mitad de la muestra.

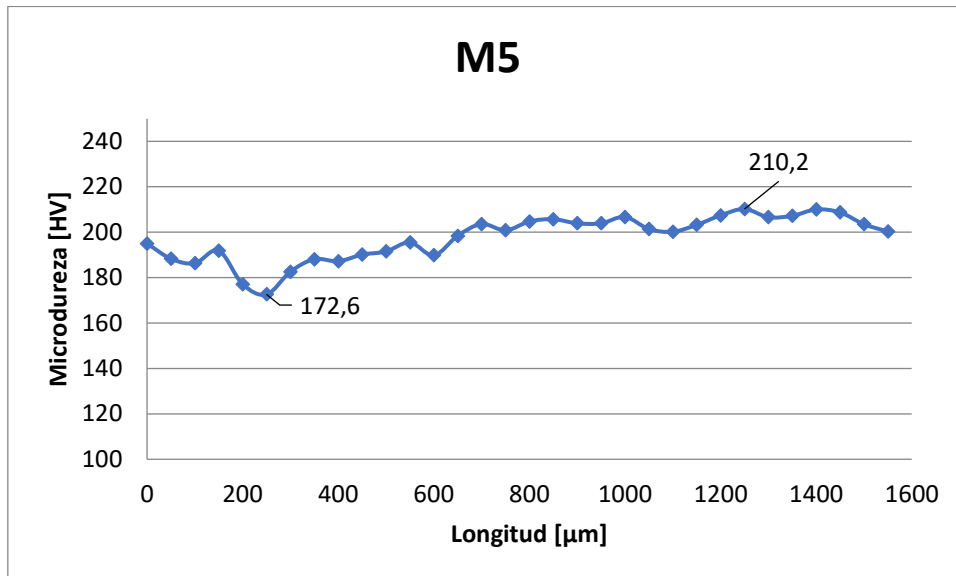


Gráfico 5.3.: Resultados de la medición de microdureza de la muestra M5 donde se indican valores máximos y mínimos de dureza.

El Grafico 5.4 que muestra los resultados del barrido de microdureza para la probeta M8. Se puede observar que la misma presenta mayor irregularidad en las medidas, aunque los valores máximos y mínimos son similares a los obtenidos para la muestra anterior, siendo la máxima medida 212 Vickers y la mínima 170,9 Vickers

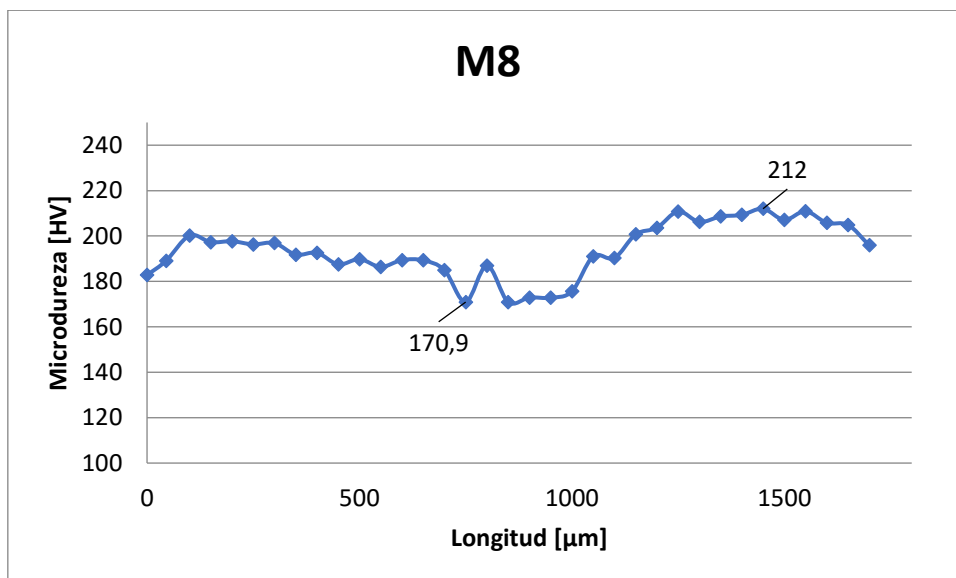


Gráfico 5.4.: Resultados de la medición de microdureza de la muestra M8 donde se indican valores máximos y mínimos de dureza.

Para la muestra M13 se observa en el barrido de microdureza (Gráfico 5.5) una gran sección en la cual la microdureza permanece en valores constantes. Los valores máximos y mínimos registrados son de 211,1 y 172,2 Vickers respectivamente.

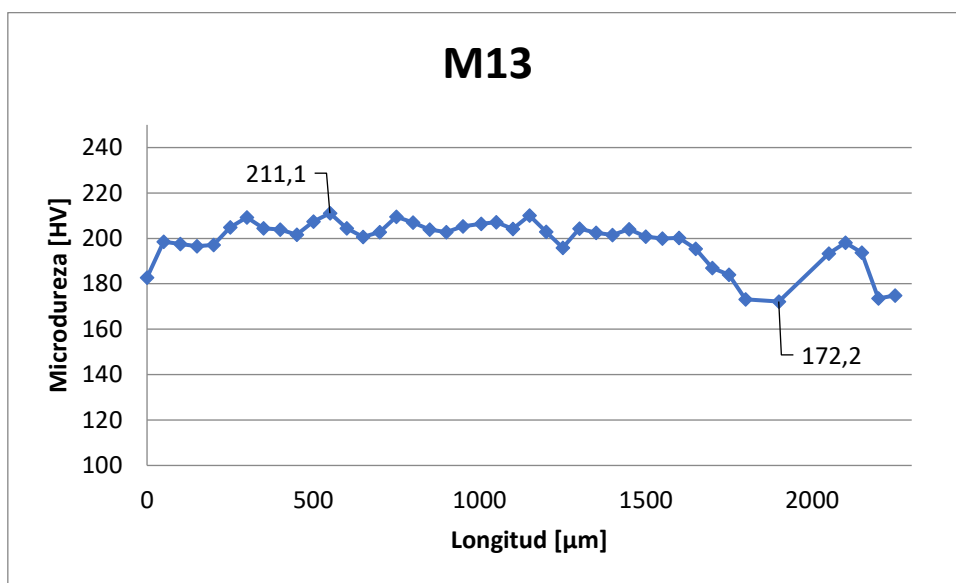


Gráfico 5.5.: Resultados de la medición de microdureza de la muestra M8 donde se indican valores máximos y mínimos de dureza.

Para la muestra M14a se observa en el Gráfico 5.6. que la microdureza mantiene un valor constante en una gran región de contacto. Sin embargo, se observó mayor variabilidad entre el valor máximo y mínimo obtenido, siendo los mismos 228,3 y 163,2 Vickers. Además, se obtuvo menor cantidad de mediciones en el barrido de microdureza. Esto es porque la probeta es más pequeña, ya que se utilizó un crisol de 15 y un cable conductor de cobre de sección 10mm², a diferencia de las anteriores que correspondían a conductor de 50mm².

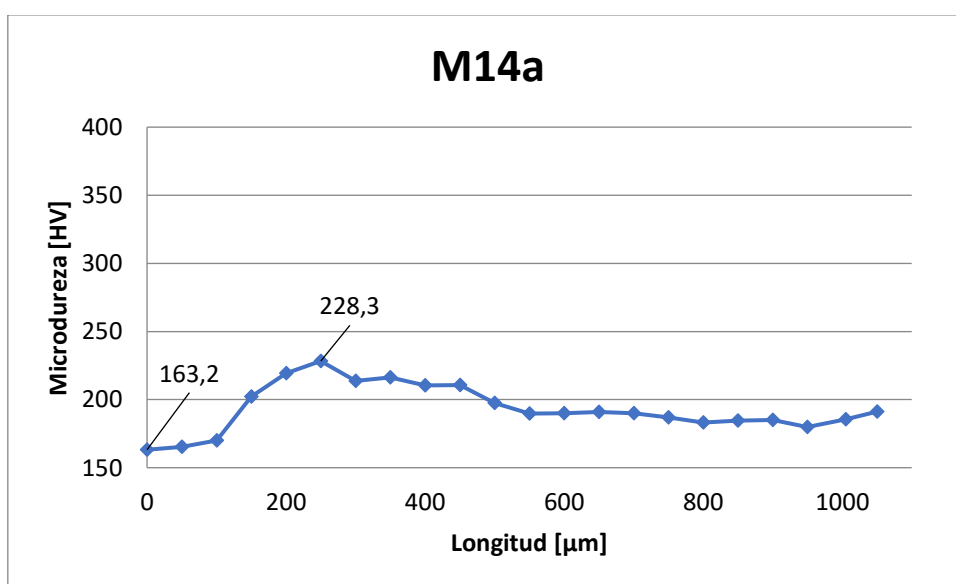


Gráfico 5.6.: Resultados de la medición de microdureza de la muestra M14a donde se indican valores máximos y mínimos de dureza.

El Grafico 5.7. permite observar que la muestra M14b obtuvo valores relativamente constantes de dureza en la región central de la misma. Además, se observa que esta muestra registró una gran variación en las medidas de dureza máxima (290,8 Vickers) y mínima (192 Vickers). Por otra parte, las medidas de microdureza fueron más elevadas que todas las muestras anteriores. Al igual que en la muestra M14b, se obtuvo menor cantidad de mediciones por tratarse de una probeta de menor tamaño.

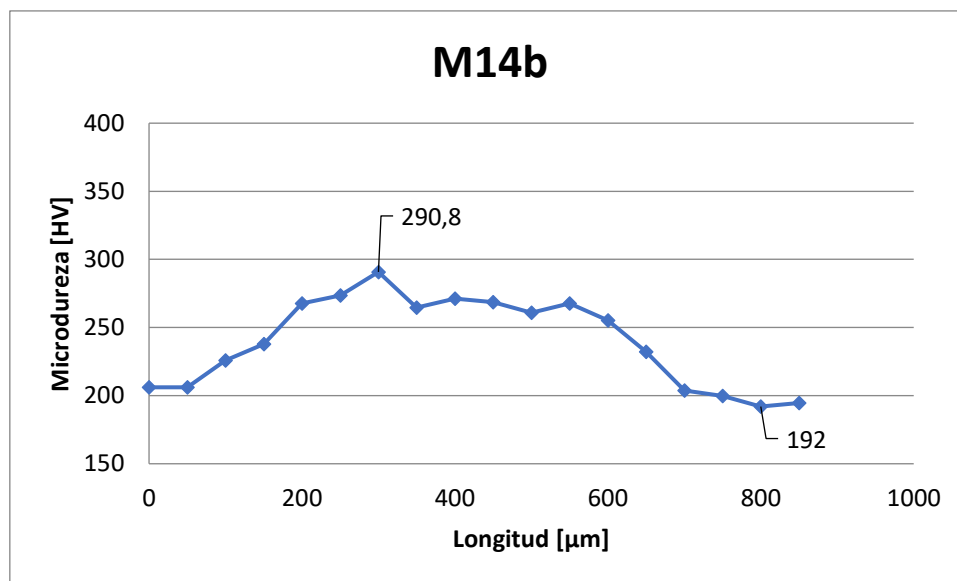


Gráfico 5.7.: Resultados de la medición de microdureza de la muestra M14b donde se indican valores máximos y mínimos de dureza.

5.6 Resultados de las observaciones de la microestructura en base a las mediciones de microdureza

Para cada probeta, luego de realizar el barrido de microdureza se volvió a observar al microscopio la estructura del metal base en los puntos de mayor y menor dureza medidos.

Para la probeta M1 los resultados obtenidos se muestran en las Figura 5.16. Se observa que la zona de mayor dureza (Figura 5.16 a) muestra un grano más pequeño que la zona en la cual la dureza es menor (Figura 5.16 b). Además, se puede ver que en esta zona se observa una capa de impureza entre el cobre y el acero, lo cual puede producir falta de unión.

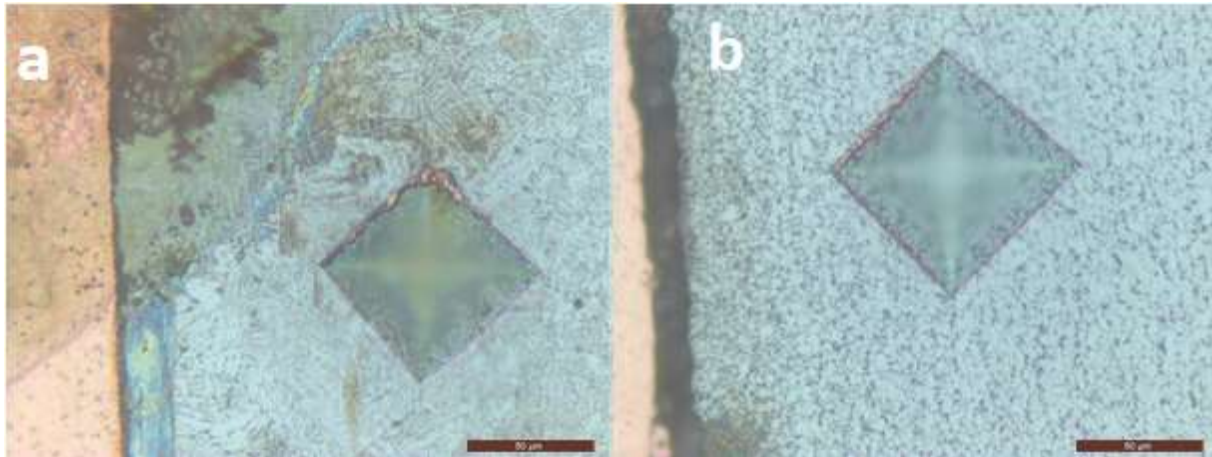


Figura 5.16: Muestra M1 a) Micrografía en la medida de dureza máxima (228,4 Vickers) b) Micrografía en la medida de dureza mínima (187,3 Vickers)

Para la muestra M4 se observó una menor variación en los valores de microdureza, siendo el valor mínimo 177,4 Vickers y el máximo 204,1 Vickers. Esto sugiere que la unión metalúrgica en esta muestra es uniforme a lo largo de toda la pieza. En las micrografías de la Figura 5.17 a y b se observa que en la región con mayor dureza el tamaño de grano es menor que en la de menor dureza.

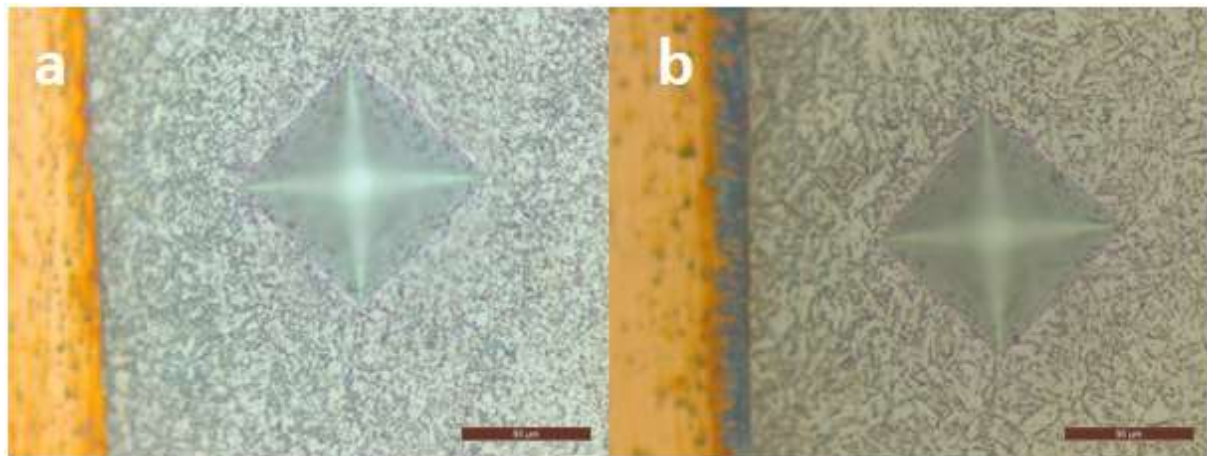


Figura 5.17: Muestra M4 a) Micrografía en la medida de dureza máxima (204,1 Vickers) b) Micrografía en la medida de dureza mínima (177,4 Vickers)

Las micrografías de la Figura 5.18 correspondientes a la muestra M5 permiten apreciar que en la imagen a) correspondiente al máximo valor de microdureza (210,2 Vickers) el tamaño de grano es mayor que en la de menor dureza (172,6 Vickers), contrario a lo esperado

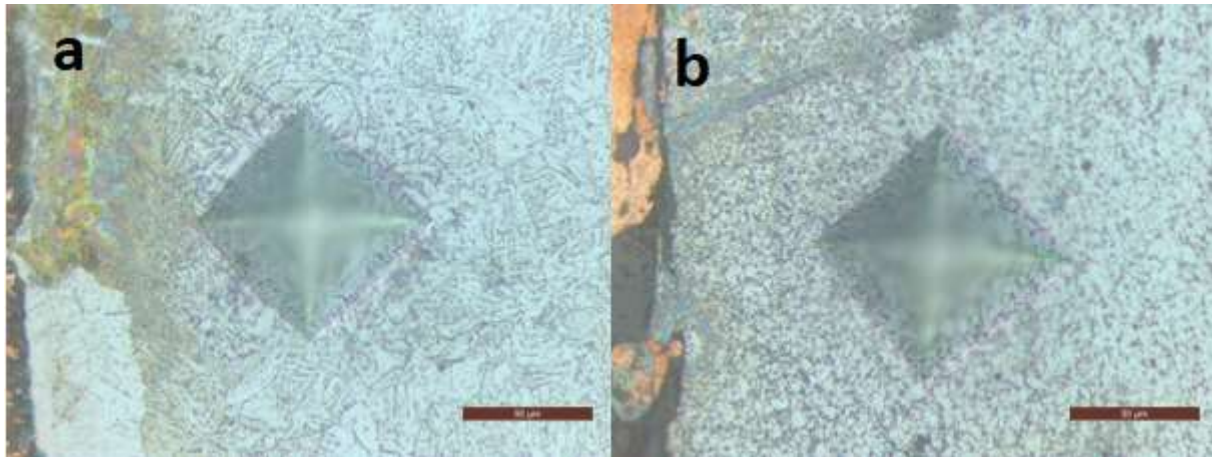


Figura 5.18: Muestra M5 a) Micrografía en la medida de dureza máxima (210,2 Vickers) b) Micrografía en la medida de dureza mínima (172,6 Vickers).

Respecto a la muestra M8, en la Figura 5.19 se pueden observar las microestructuras para las zonas de mayor y menor valor de microdureza, siendo estas 212 y 170,9 Vickers respectivamente. En la Figura 5.20 se puede observar con menor aumento la misma marca de penetración de la Figura 5.19 b), y se ve que la medida de menor microdureza corresponde a una zona en la cual se encuentran impurezas en la interfase cobre-acero.

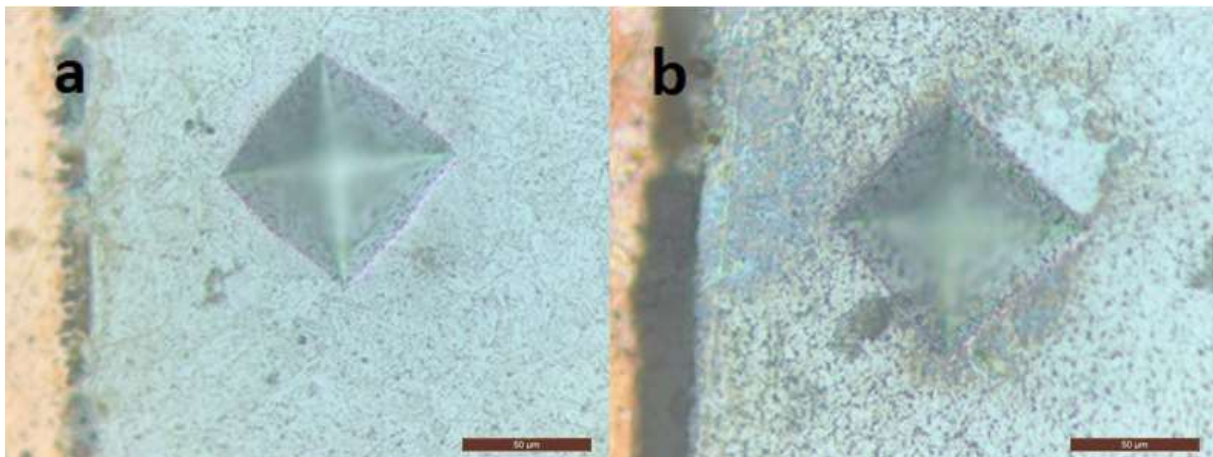


Figura 5.19: muestra M8 a) Micrografía en la medida de dureza máxima (212 Vickers) b) Micrografía en la medida de dureza mínima (170,9 Vickers).



Figura 5.20: Micrografía de a muestra M8 en la zona de menor microdureza medida

La Figura 5.21 correspondiente a la muestra M13 muestra las micrografías obtenidas para las medidas de mayor y menor dureza.

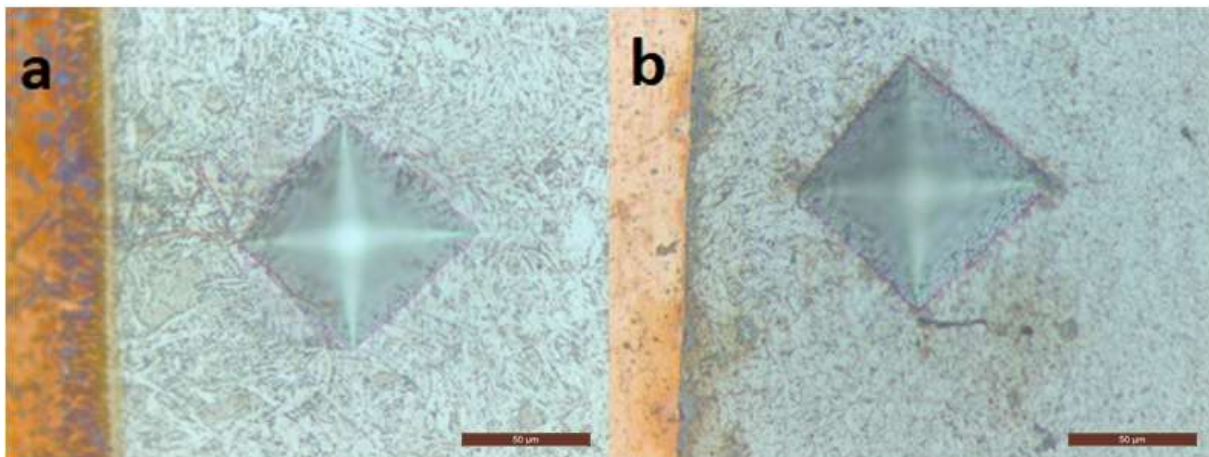


Figura 5.21: muestra M13 a) Micrografía en la medida de dureza máxima (211,1 Vickers) b) Micrografía en la medida de dureza mínima (172,2 Vickers)

En el caso de la muestra M14a, en las micrografías de la Figura 5.22 a) y b) se observa mayor tamaño de grano en la de mayor microdureza que en la de menor. Por otra parte, puede observarse una interfase cobre- acero de mayor espesor en la imagen a) que en la b), así como también penetraciones de cobre en el acero.

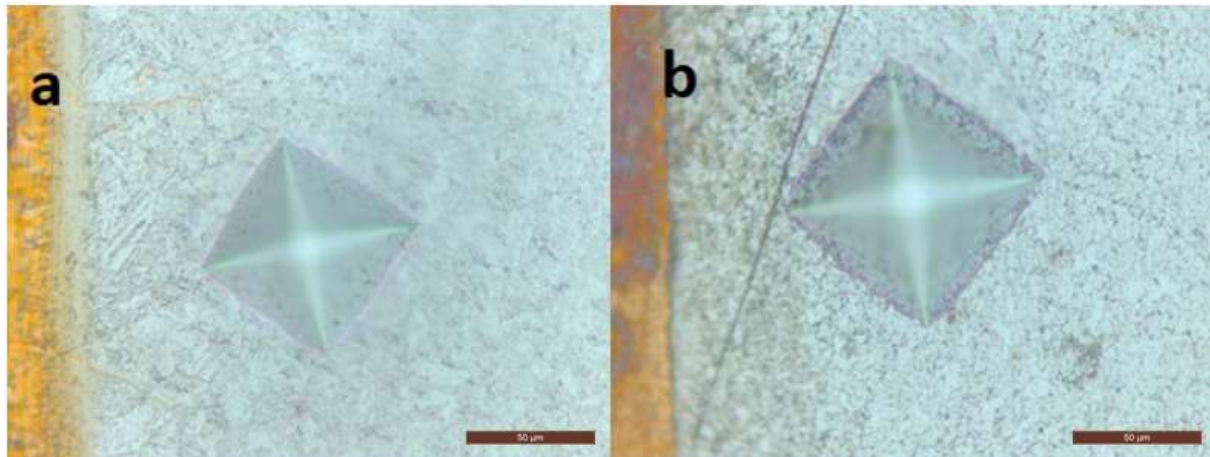


Figura 5.22: Muestra M14a a) Micrografía en la medida de dureza máxima (228,3 Vickers) b) Micrografía en la medida de dureza mínima (163,2 Vickers)

En las micrografías de la Figura 5.23 correspondientes a la muestra M14b se puede observar que en la imagen a) correspondiente a la medida de mayor dureza el grano presenta mayor tamaño que en la imagen b) de menor dureza. Además, en la misma figura puede observarse una interfase cobre-acero de mayor espesor en la imagen a) respecto a la b).

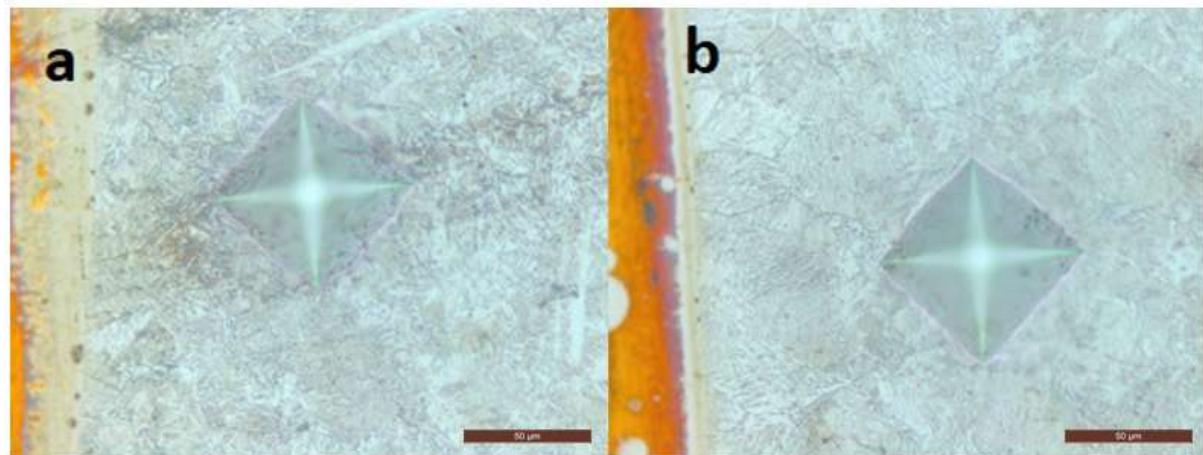


Figura 5.23: Muestra M14b a) Micrografía en la medida de dureza máxima b) Micrografía en la medida de dureza mínima

5.7 Resultados de la medición de porcentaje de unión

El porcentaje de unión se calculó teniendo en cuenta las mediciones de microdureza de las piezas y las micrografías observadas.

Para todas las muestras, se calculó el promedio de las mediciones de dureza, y se consideró como buena soldadura las zonas en las cuales la dureza era $\text{promedio} \pm 10 \text{ HV}$. Los resultados se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Resultados del cálculo de porcentaje de soldadura efectiva

Muestra	Dureza Promedio [HV]	Longitud de soldadura [mm]	Longitud soldadura efectiva [mm]	% soldadura efectiva
1	205,83	16	6	37,50%
4	190,60	16,5	13,5	81,82%
5	197,58	16	12,5	78,13%
8	193,69	17,5	9	51,43%
13	198,53	21,5	16	74,42%
14a	193,34	11	4,5	40,91%
14b	239,93	9	3,5	38,89%

5.8 Resultado de la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Se analizaron 3 muestras en el SEM, por considerar que tenían alguna característica de interés para la observación. En el caso de las muestras M1 y M13 se deseaba ver como influía variación de la cantidad de fundente utilizadas en muestras soldadas con igual tamaño de crisol e igual sección de diámetro de cobre (50mm^2) en ambos casos. Se pretendía observar las características de la interfase (espesor, forma) y la presencia de penetraciones de cobre y la longitud de estas. En el caso de la muestra M14b, era de interés analizarla para poder comparar la composición química de las dos marcas de polvo de soldadura utilizado: FACBSA y CADWELD, siendo la muestra M14b la única muestra que no se descartó de la última marca. La descripción visual de las muestras observadas en SEM se aprecia en la Figura 5.24.

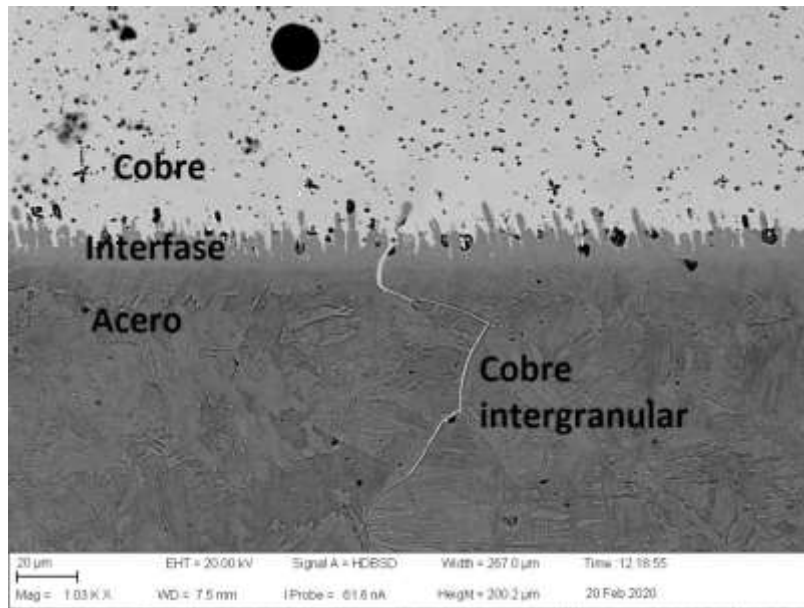


Figura 5.24: Descripción visual de la soldadura cuproaluminotérmica observada en SEM

Las muestras mencionadas y sus principales características se encuentran resumidas en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Resumen de muestras analizadas en el SEM

N° Muestra	Sección cable [mm ²]	Peso fundente [g]	Peso pólvora [g]	Marca Carga y pólvora	Dureza promedio [HV]	Porcentaje de unión (%)
1	50	48,3	2,3	FACBSA	205,83	37,50%
13	50	34,6	2,3	FACBSA	198,53	74,42%
14 b	10	-	-	CADWELD	239,93	38,89%

Al observar la muestra M1 en el SEM se pudo observar de manera detallada la interfase, como se muestra en las Figuras 5.25. y 5.26. En la primera figura se ve una interfase de forma plana, y poco espesor, mientras que en la segunda se puede apreciar una región donde no se ha formado interfase y el cobre está únicamente “apoyado” sobre el acero.

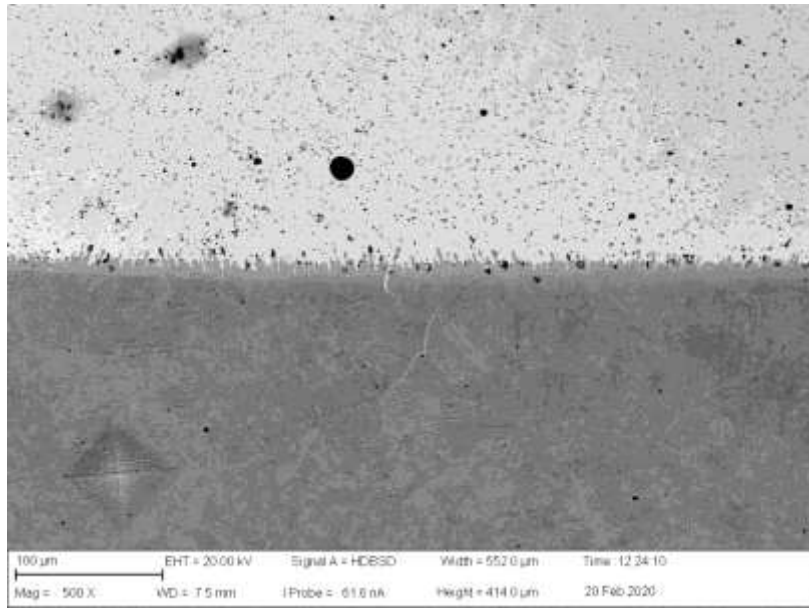


Figura 5.25: Imagen SEM HD BSD de la muestra M1.

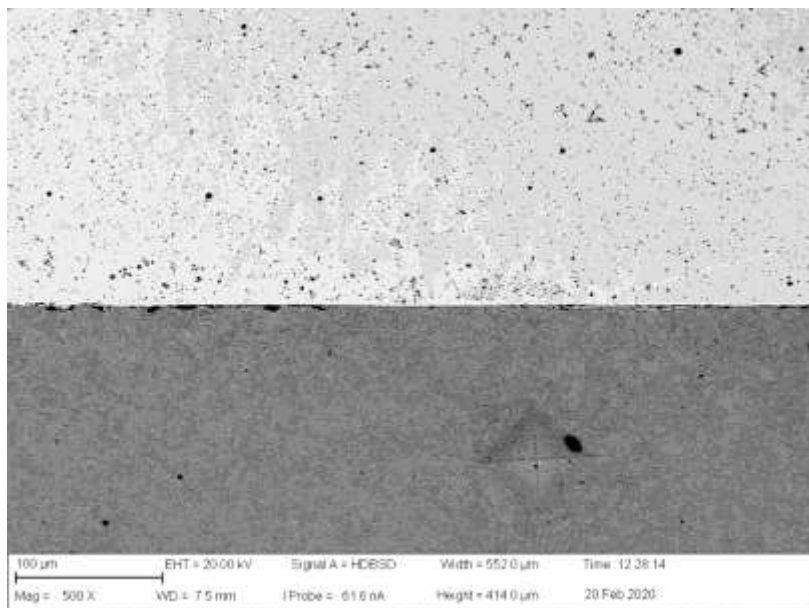


Figura 5.26.: Imagen SEM HD BSD de la muestra M1.

Además, se puede analizar la composición química de la interfase observada a lo largo de la muestra (Figura 5.27). El análisis demostró que la composición de la interfase es principalmente cobre-hierro. El porcentaje en peso puede apreciarse en la Tabla 5.7. y en la Figura 5.28.

PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

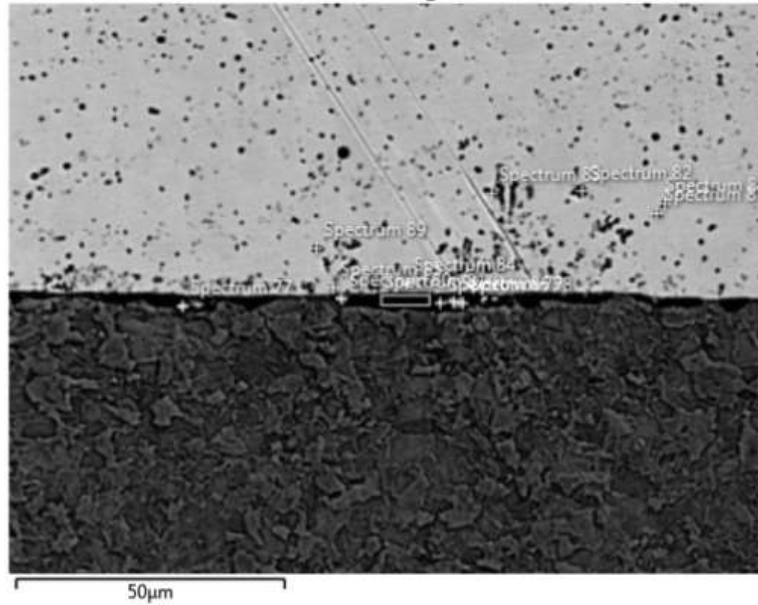


Figura 5.27.: Sitio de la muestra M1 donde se analizó la composición de la interfase

Tabla 5.7: Composición química interfacial de la muestra M1

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
Si	K series	1.19	0.00946	1.55	0.51	SiO2	Yes	
Fe	K series	73.48	0.73478	51.14	2.11	Fe	Yes	
Cu	K series	58.82	0.58817	47.31	2.12	Cu	Yes	
Total:				100.00				

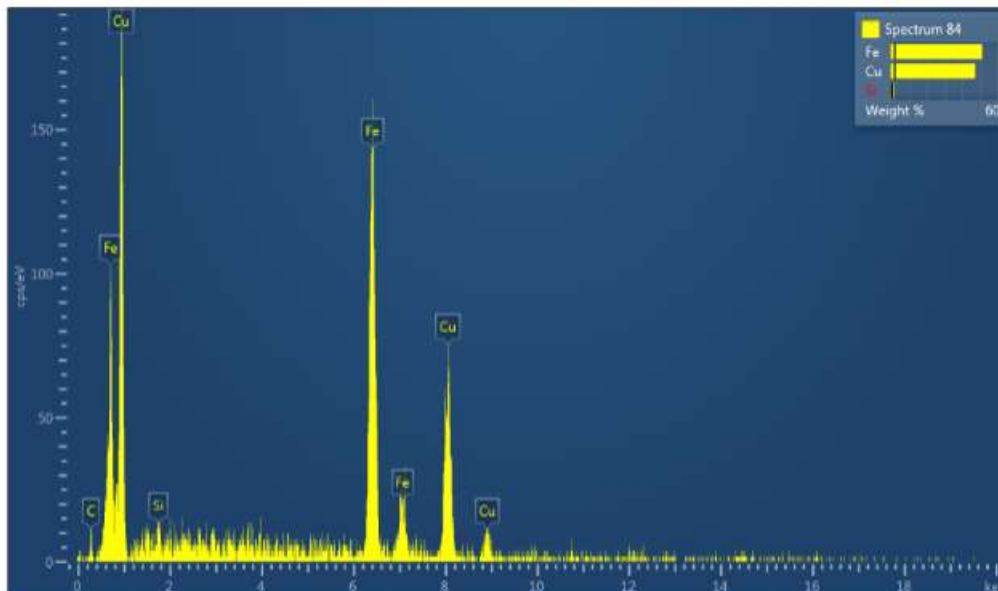


Figura 5.28.: Análisis de la composición química de la interfase en la muestra M1

La muestra M13 resultó de interés para el análisis ya que, además de observar su interfase, se observaron zonas con gran penetración de cobre en el hierro (Figura 5.29).

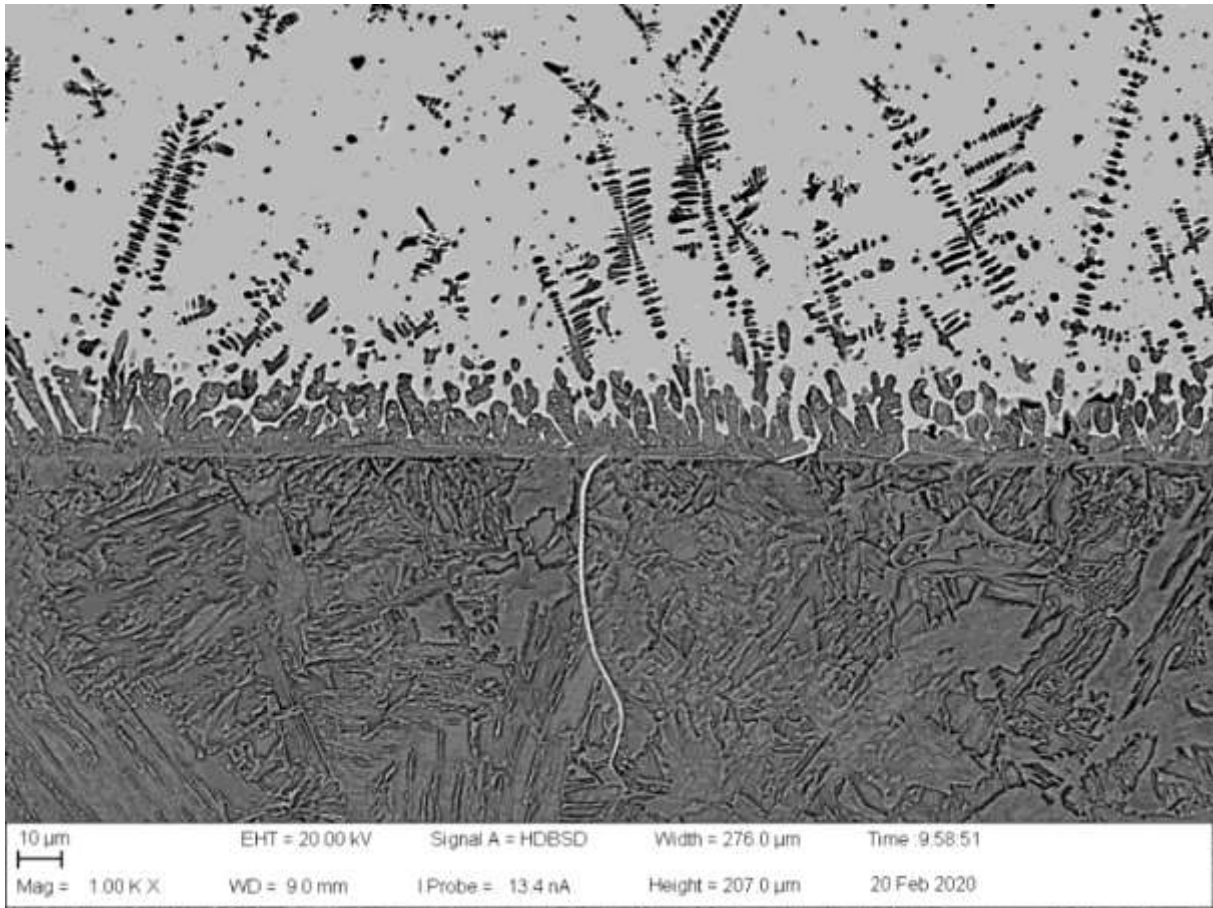


Figura 5.29: Imagen SEM HS BSD de la muestra M13.

Se observa en la imagen una penetración de longitud considerable, a la cual se le realizó un análisis de composición química para verificar que la misma se encontraba compuesta de cobre (Figura 5.30.). Los resultados se observan en la Tabla 5.8 y en la Figura 5.31.

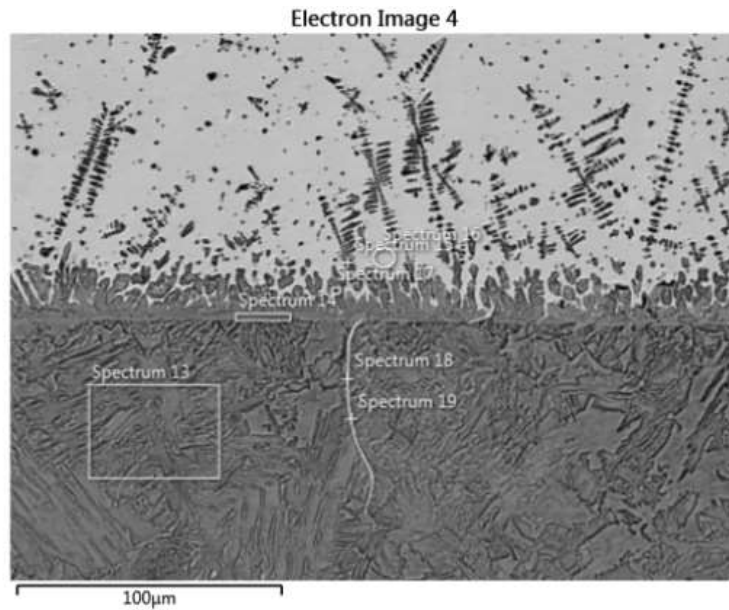


Figura 5.30.: Sitio de la muestra M1 donde se analizó la composición de la fisura.

Tabla 5.8: Composición química de una penetración en la muestra M13.

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
Fe	K series	15.24	0.15240	16.45	1.23	Fe	Yes	
Cu	K series	64.47	0.64470	83.55	1.23	Cu	Yes	
Total:				100.00				

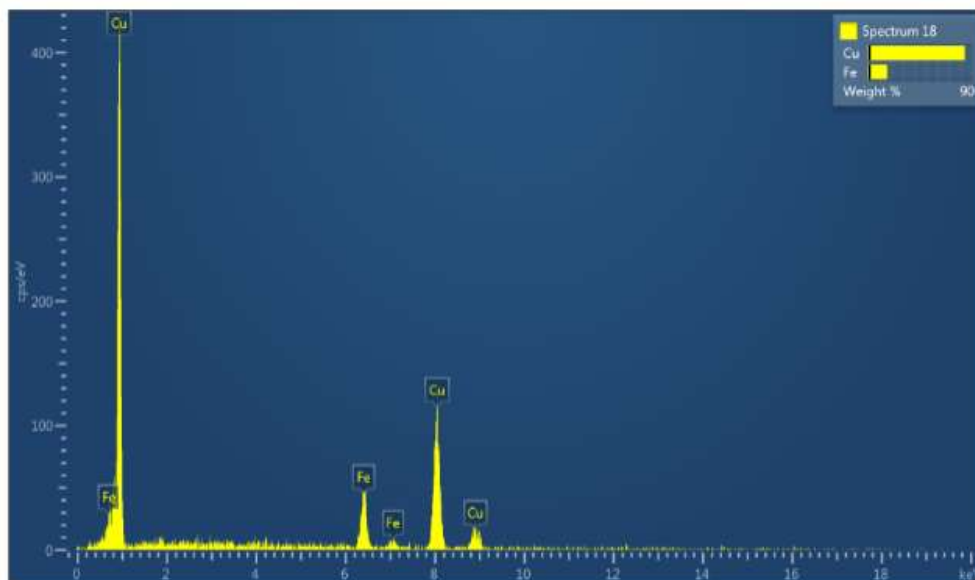


Figura 5.31.: Análisis de la composición química de una penetración en la muestra M13.

Al seguir analizando la muestra se observó un punto oscuro (Figura 5.32), del cual resultó de interés analizar su composición para determinar la procedencia de la impureza (Figura 5.33).

Se puede ver en la Tabla 5.9 y Figura 5.34. que la composición química de la impureza es mayoritariamente aluminio.

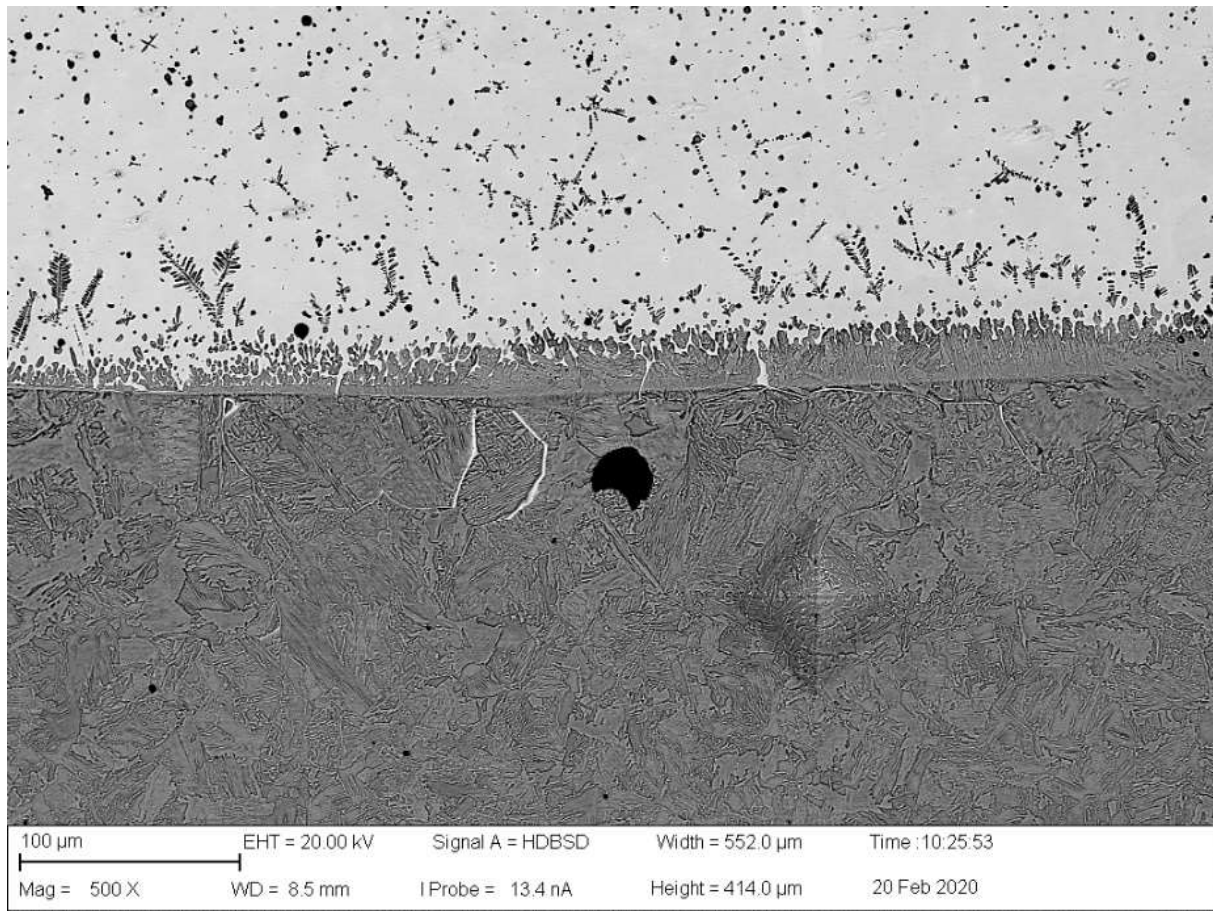


Figura 5.32.: Imagen SEM HD BSD de la muestra M13.

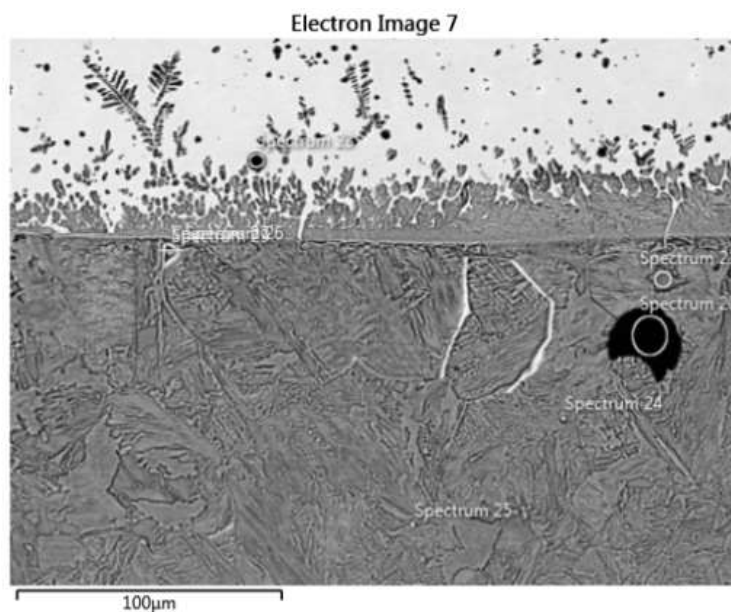


Figura 5.33.: Sitio de la muestra M13 donde se analizó la composición de la impureza.

PROYECTO INTEGRADOR- Caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica.
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

Tabla 5.9: Composición química de una impureza observada en la muestra M13.

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
O	K series	22.24	0.07484	39.58	0.72	SiO2	Yes	
Mg	K series	2.90	0.01921	3.58	0.20	MgO	Yes	
Al	K series	27.04	0.19422	31.49	0.48	Al2O3	Yes	
Si	K series	0.23	0.00186	0.36	0.12	SiO2	Yes	
P	K series	0.43	0.00243	0.40	0.11	GaP	Yes	
Ca	K series	21.98	0.19643	22.14	0.40	Wollastonite	Yes	
Fe	K series	1.08	0.01078	1.30	0.23	Fe	Yes	
Ag	L series	0.90	0.00901	1.14	0.28	Ag	Yes	
Total:				100.00				

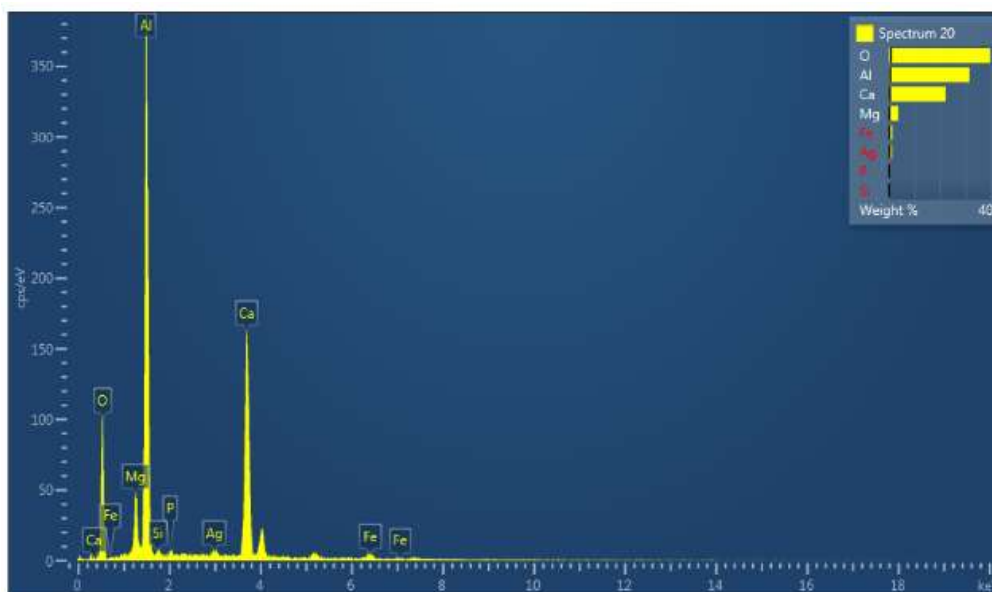


Figura 5.34.: Análisis de composición química de la impureza observada en la muestra M13.

Además, en el mismo punto se analizó la interfase de la muestra M14. Se observa una interfase de mayor espesor y con frente de crecimiento dendrítico. Los resultados se presentan en la Tabla 5.10 y Figura 5.35.

Tabla 5.10: Composición química de la interfase en la muestra M13

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label	Factory Standard	Standard Calibration Date
S	K series	1.44	0.01242	1.85	0.39	FeS2	Yes	
Fe	K series	38.27	0.38267	35.51	1.46	Fe	Yes	
Cu	K series	57.95	0.57950	62.64	1.49	Cu	Yes	
Total:				100.00				

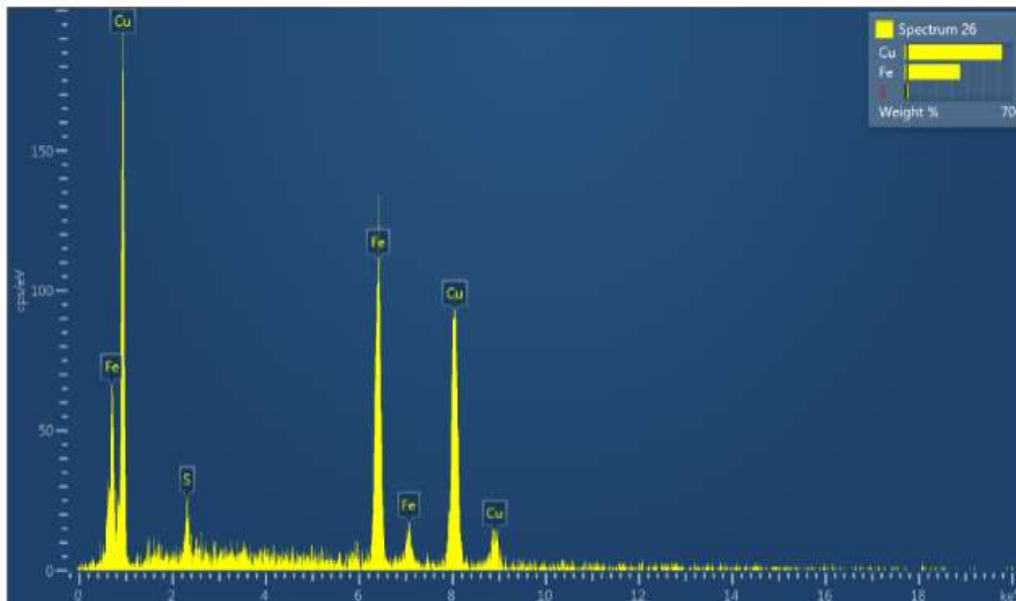


Figura 5.35: Análisis de la composición química de la interfase en la muestra M13

La muestra M14b fue observada en el SEM por ser la única muestra con carga marca CADWELD en superar la inspección macroscópica. Además, en la inspección visual se observó una coloración del cobre distinta a la de las soldaduras realizadas con la marca FACBSA. Por esto resultó de interés observar la composición química de la pieza.

En la Figura 5.36. se observa doble coloración en la interfase de la muestra M14b, por lo que se realizó un análisis lineal de la composición química de dicha interfase, cuyos resultados se observan en la Figura 5.37.

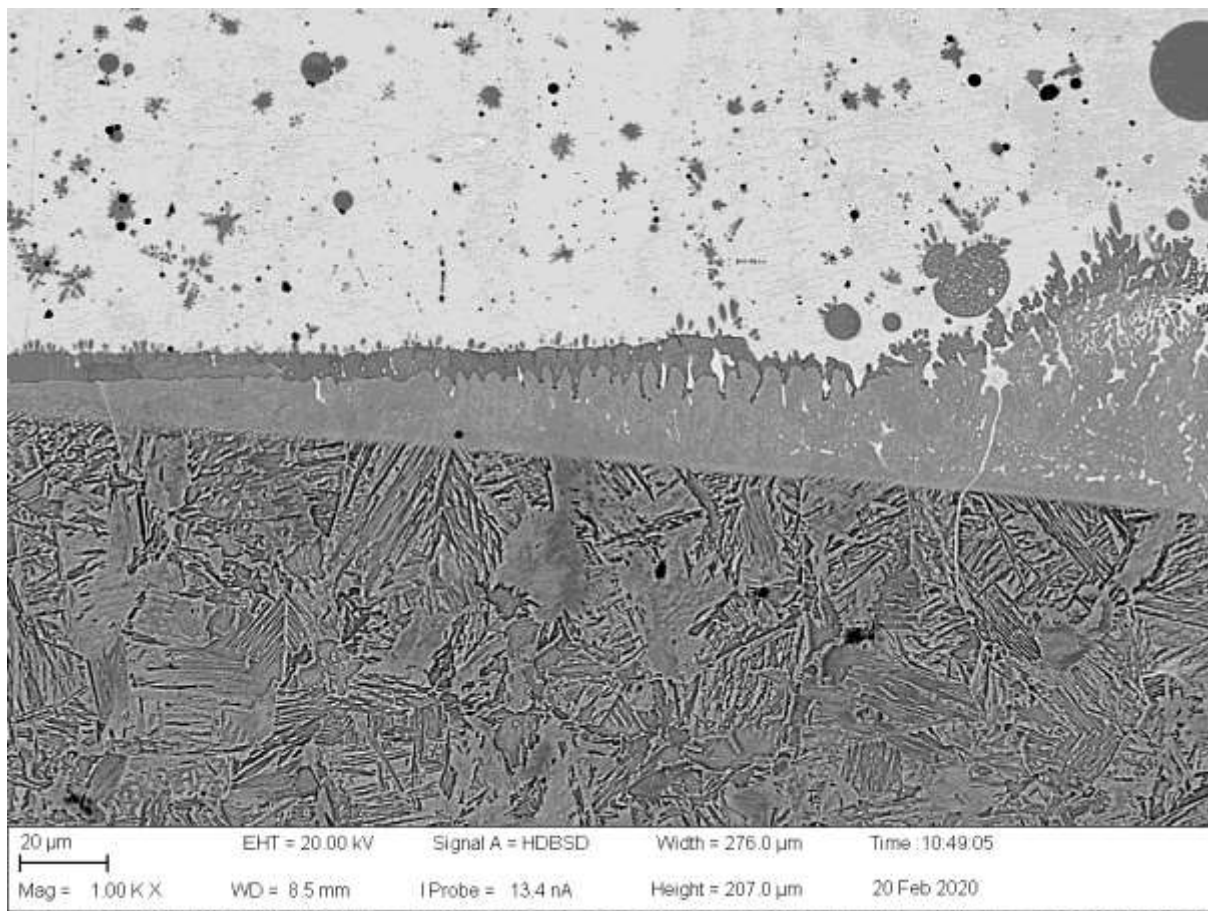


Figura 5.36.: Imagen SEM HD BSD de la muestra M14b.

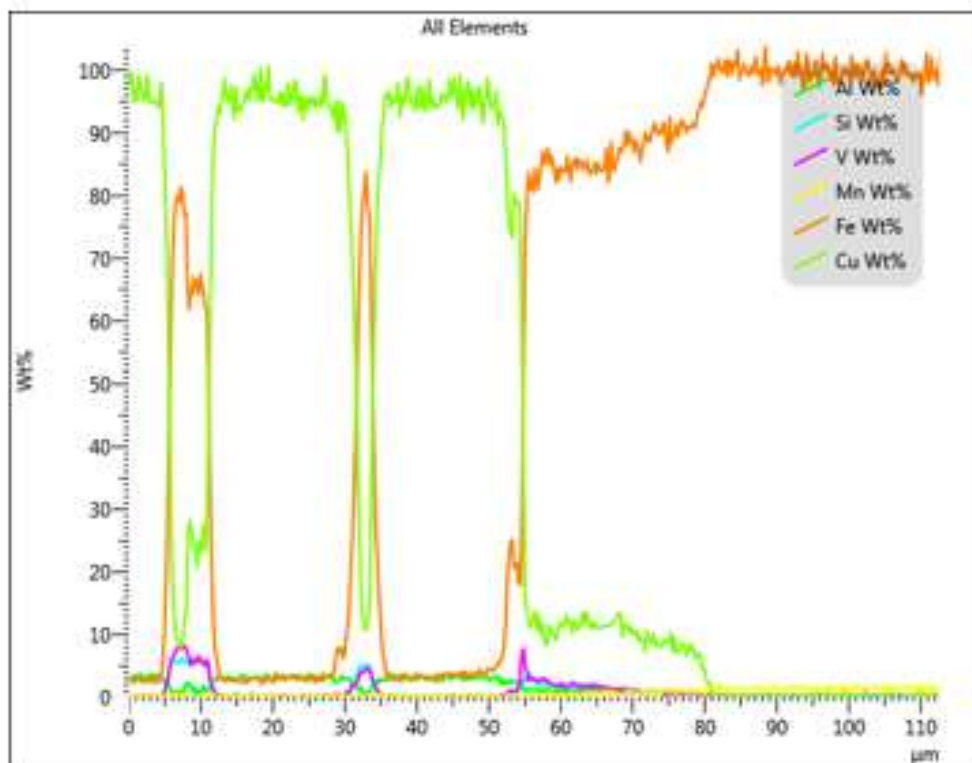
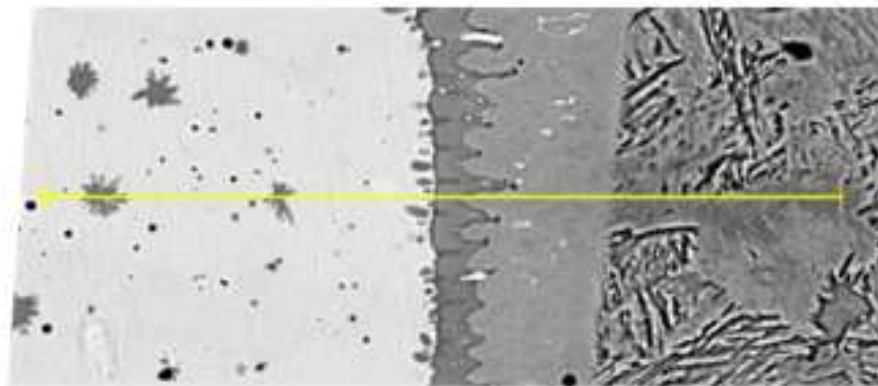


Figura 5.37.: Análisis lineal de la composición química de la interfase de la muestra M14b.

Se observa en la figura 5.37 que entre los elementos encontrados aparece en cantidad apreciable el Vanadio, por lo que se realizó un mapeo para poder inferir de donde provenía. Los resultados del mismo se presentan en la Figura 5.38

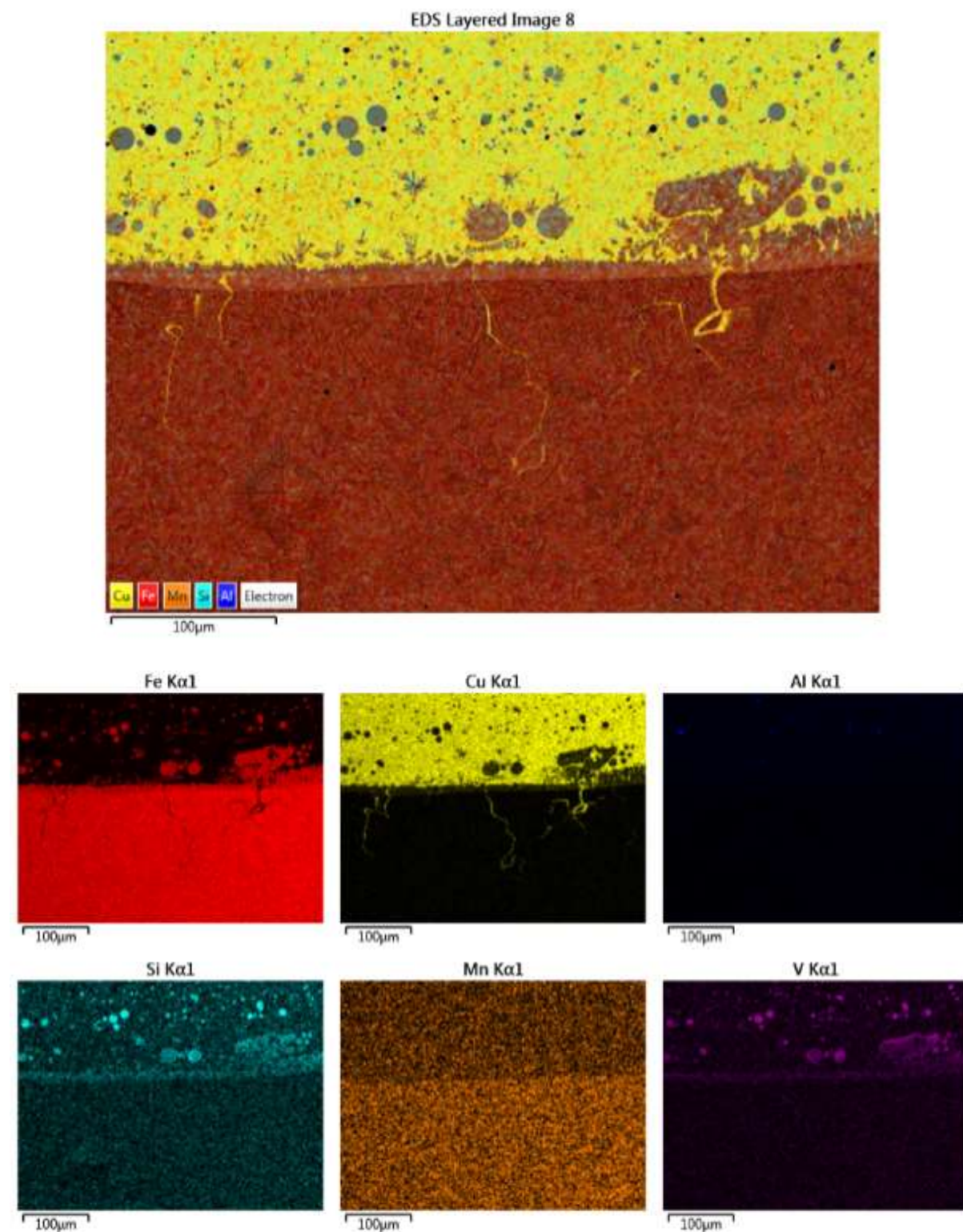


Figura 5.38.: Mapeo SEM de la composición química de la muestra M14b.

6 CAPÍTULO 6

6.1 Conclusiones

En este trabajo se realizó la caracterización de la soldadura cuproaluminotérmica para la protección catódica en cañerías de acero, modificando los parámetros que afectan a la misma. Se buscó obtener las condiciones adecuadas para garantizar que la cañería se encuentra correctamente protegida, ya que un área de contacto insuficiente puede producir falta de protección, y una unión con excesiva difusión de cobre genera la aparición de micro fisuras y la posibilidad de corrosión acelerada.

En la investigación previa realizada [1] se logró determinar la relación adecuada carga/pólvora para cables conductores de 10mm² de sección, soldados a cañerías de 5,7mm de espesor, sin obtener resultados para cables de mayor diámetro. Por esto, en este trabajo se quiso obtener la proporción adecuada de carga y fundente para el cable de cobre de 50mm² de sección y el espesor de cañería dado, dejando este valor fijo y no considerándolo como una variable del proceso.

Para esto, se realizaron 12 probetas en las cuales se tuvo como objetivo alterar las variables involucradas en el proceso (diámetro de cable, tamaño de crisol, relación carga/pólvora, presentación de las mismas), caracterizar las soldaduras y determinar la combinación de parámetros que hacen que la soldadura sea óptima en cada caso.

6.2 Acerca de la efectividad del proceso

La primera observación que se hizo es la mejora en la efectividad del proceso, ya que de 12 probetas preparadas únicamente una se descartó porque el cable se desprendió de la superficie. Es decir, 91,67% de las soldaduras mantuvieron su unión. En el trabajo realizado previamente, en la primera etapa 18 de las 25 probetas preparadas la soldadura se desprendió total o parcialmente (es decir, 28% mantuvieron su unión). En la segunda etapa de soldado, de 15 soldaduras realizadas solo 3 superaron la inspección visual, es decir 20%.

Por otra parte, en el trabajo actual 7 probetas pudieron ser caracterizadas completamente (caracterización macroscópica, microscópica, medición de microdureza) por ser consideradas adecuadas; mientras que en el trabajo anterior solo se completaron los análisis para 5 muestras en la primera etapa y 3 en la segunda (54%, 20% y 20% respectivamente).

Un aspecto llamativo que surge a partir de la comparación de ambos trabajos es que para cable de cobre de 50mm^2 , soldado con el crisol adecuado y la misma carga, en el presente trabajo se obtuvieron buenos resultados. En contraste, en el trabajo anterior únicamente se pudieron analizar las muestras correspondientes a cable conductor de 10mm^2 , ya que en las de conductor de mayor diámetro éste se desprendió en todos los casos.

Una de las posibles razones que explica estos resultados es la distinta configuración de los cables de cobre utilizados en cada caso. Si bien ambos tienen el mismo diámetro (por ende, misma sección transversal), la disposición de los cables delgados que lo componen es diferente, como se ilustra en la Figura 6.1., 6.2. y 6.3.

Se observa claramente que, en el primer conductor (Figura 6.1), el cable está formado por 7 cables más delgados que lo componen, mientras que en el segundo conductor el cable está formado por 7 grupos de aproximadamente 15 cables cada uno (Figura 6.2). Esta diferencia de diámetro en los cables pequeños que componen al conductor puede influir en el proceso, ya que los cables más delgados se funden con más facilidad que los cables más gruesos, dando lugar a una mayor unión y a mejores resultados.



Figura 6.1: Cable conductor de 50mm^2 utilizado en el primer PIP.



Figura 6.2: Cable conductor de 50mm² utilizado en el segundo PIP.

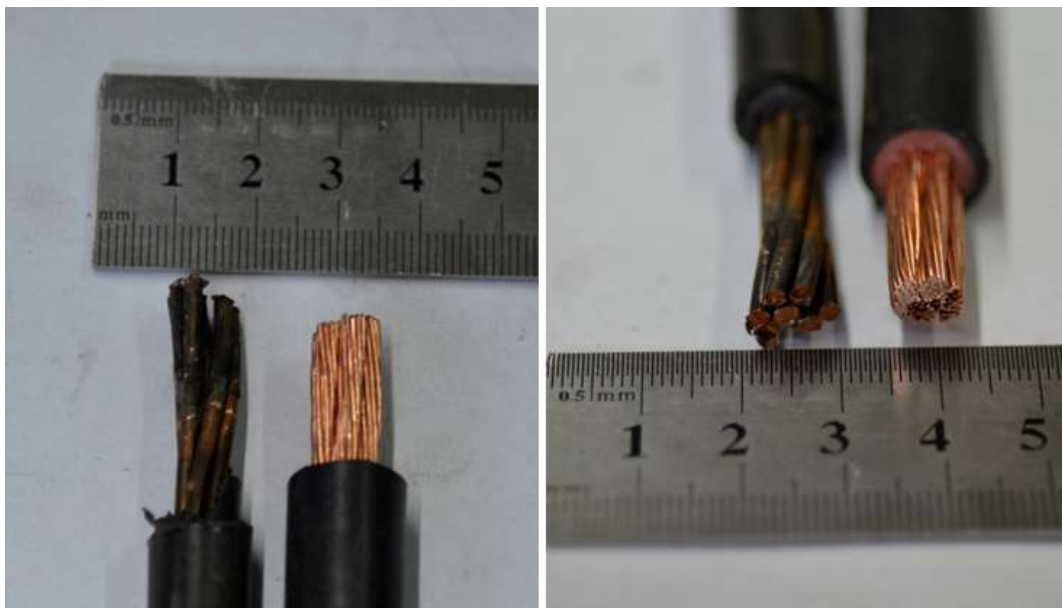


Figura 6.3: Comparación de los cables conductores utilizados en ambos PIP.

Por otra parte, al comparar el cambio introducido por la empresa en la elección de marca y formato de presentación del polvo de soldadura y de ignición, no se registraron cambios importantes en el cálculo de porcentaje de soldadura efectiva, siendo 40,91% en la muestra M14a y 38,89% en la muestra M14b.

Sin embargo, al observar las micrográficas de la Figura 6.4 se observa que en la muestra M14a se detecta mayor cantidad de escoria retenida, que no subió a la superficie de la soldadura como era esperado. Por otro lado, el formato de presentación preferido es el de arca CADWELD, ya que al venir sellado en un cartucho evita que el polvo de soldadura y la pólvora absorban

humedad, y el iniciado electrónico hace que sea más seguro para el técnico llevar a cabo la reacción.

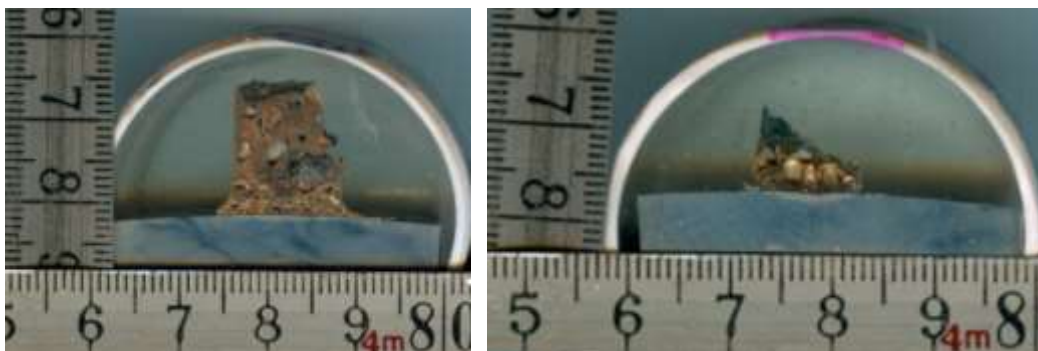


Figura 6.4: Comparación de las soldaduras M14a y M14b.

6.3 Acerca de la relación ideal de carga/pólvora:

A partir de los resultados analizados anteriormente, se buscó analizar la relación entre cantidad de carga/pólvora y el porcentaje efectivo de soldadura para determinar si hay una relación adecuada que garantice la adecuada soldadura.

Para el caso de las soldaduras de cable de cobre de 10mm², no se pudo analizar la relación ya que se desconoce la composición del fundente CADWELD (peso de carga y de pólvora).

Un resumen de las muestras analizadas puede observarse en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1: Resumen de las probetas analizadas.

Nº Muestra	Diámetro cable [mm]	Sección cable [mm ²]	Tamaño crisol	Peso fundente [g]	Peso pólvora [gr]	Relación fundente/pólvora	Marca Carga y pólvora	% Soldadura efectiva
1	8	50	45	48,3	2,3	21	FACBSA	37,50%
4	8	50	45	35	2,3	15,22	FACBSA	81,82%
5	8	50	45	44,9	2,3	19,52	FACBSA	78,13%
8	8	50	45	35	2,3	15,22	FACBSA	51,43%
13	8	50	45	34,6	2,3	15,04	FACBSA	74,42%
14 a	3,5	10	15	14,9	2,3	6,48	FACBSA	40,91%
14 b	3,5	10	15	15	-	-	CADWELD	38,89%

A partir del Gráfico 6.1. puede observarse que el análisis la relación fundente/pólvora con el porcentaje de unión efectiva de la soldadura no fue concluyente. Si se observan los casos de las

muestras M4, M8 y M13, para similar relación fundente/pólvora, el porcentaje de unión efectiva fue considerablemente diferente (aproximadamente 30%). Por otra parte, si se comparan las muestras M4 y M5 se ve que se obtuvo un porcentaje de unión efectiva similar (cercano al 80%), sin embargo, para la muestra M5 utilizo casi 10 gramos más de carga que la muestra M4.

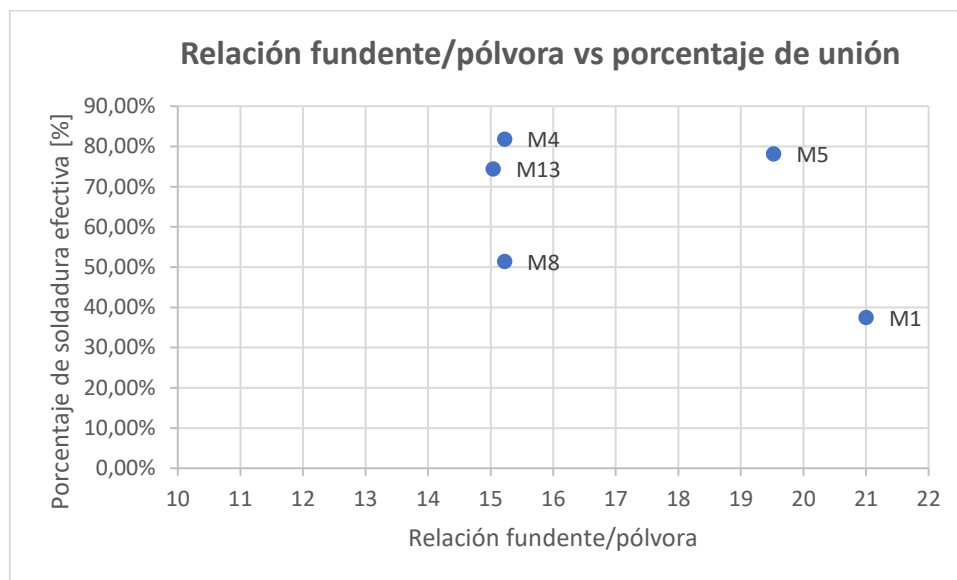


Gráfico 6.1: Relación fundente/pólvora vs porcentaje de unión para muestras soldadas con cables de cobre de 50mm² de sección transversal.

Al observar las muestras que fueron descartadas luego de la inspección macroscópica, se puede concluir que la relación mínima fundente/pólvora necesaria para que haya unión es de 15. Por este motivo se descartaron las muestras M11 y M12.

La muestra M7 a pesar de cumplir con esta relación se descartó por no presentar fundido del cable de cobre. Al observar la muestra al microscopio óptico, se pudo ver que además la muestra presentaba suciedad en la interfase. Se puede atribuir la falla en la soldadura a un error humano, ya que de los operarios que realizaron las soldaduras, el primero (Soldador 1) tenía gran práctica en la realización de la soldadura, y se encontraba capacitando al segundo operario (Soldador 2). Las soldaduras realizadas por el Soldador 2 fueron la M6 (no supera inspección visual) y la M7 (no supera la inspección macroscópica), ambas descartadas en etapas iniciales del análisis. Por esto, se concluye que los operarios que realicen esta soldadura deben estar capacitados, con conocimiento del procedimiento y práctica en el mismo, a fin de que su experiencia garantice la correcta unión.

En el caso de la muestra M10 no se pudo establecer la relación pólvora/fundente ya que se utilizaron cartuchos CADWELD PLUS sellados, con relación desconocida. Sin embargo, los cartuchos utilizados son los recomendados para soldar cable de cobre de 10mm², por lo que se

presume que es insuficiente para garantizar una unión adecuada cuando se utiliza cable conductor de 50mm².

Tabla 6.2: Resumen de muestras que no superaron la inspección macroscópica.

N° Muestra	Diámetro cable (mm)	Sección cable (mm ²)	Tamaño crisol	Peso fundente (gr)	Peso pólvora (gr)	Relación fundente/pólvora	Marca Carga y pólvora
7	8	50	45	35	2,3	15,22	FACBSA
10	8	50	45	-	-	-	CADWELD
11	8	50	45	14,9	2,3	6,47	FACBSA
12	8	50	45	24,9	2,3	10,82	FACBSA

6.4 Acerca de las fisuras por temperatura.

En las imágenes obtenidas por microscopía óptica en todas las piezas revelaron la presencia de fisuras en el hierro producidas por el calor de la reacción. El análisis de estas es de relevancia ya que puede ocasionar la fragilización del material base, perjudicando su comportamiento en servicio.

De acuerdo con la información bibliográfica encontrada, especialmente en el artículo *Crack analysis in thermite welding of cathodic protection* (Marjan Suban, 2012) [15] se analiza el efecto de la presencia de microfisuras rellenas de cobre en el acero. Se define un fenómeno denominado Fragilización por Metal Líquido (LME: Liquid Metal Embrittlement), que ocurre por el contacto de un metal líquido (Cobre) con un metal sólido (acero), al tener distintas temperaturas de fusión. Frente al contacto del cobre líquido a alta temperatura con el hierro sólido, se producen fisuras en el material base debidas a la temperatura, que luego se rellenan con cobre que fluye hacia las mismas por capilaridad. Ante este fenómeno, se realizaron pruebas mecánicas que los llevaron a concluir que:

- a) En todos los casos se producen fisuras en el hierro por la diferencia de temperatura entre los metales que fragilizan el metal base.
- b) Todas las fisuras se encuentran rellenas por cobre, lo que produce que la propagación de las fisuras sea de manera más lenta.
- c) Se puede reducir la cantidad y tamaño de fisuras precalentando la superficie de hierro y el molde y utilizando moldes nuevos.

Ante esta información, se observó en el SEM las muestras seleccionadas y se comprobó que aun las fisuras más grandes se encontraban rellenas de cobre.

6.5 Acerca del frente de solidificación de la interfase.

Al observar en el microscopio óptico y en el SEM las muestras, se observó que algunas presentaban una interfase de forma regular y plana, mientras que en otras se observaba formación de dendritas e interfases onduladas (Figura 6.5.).

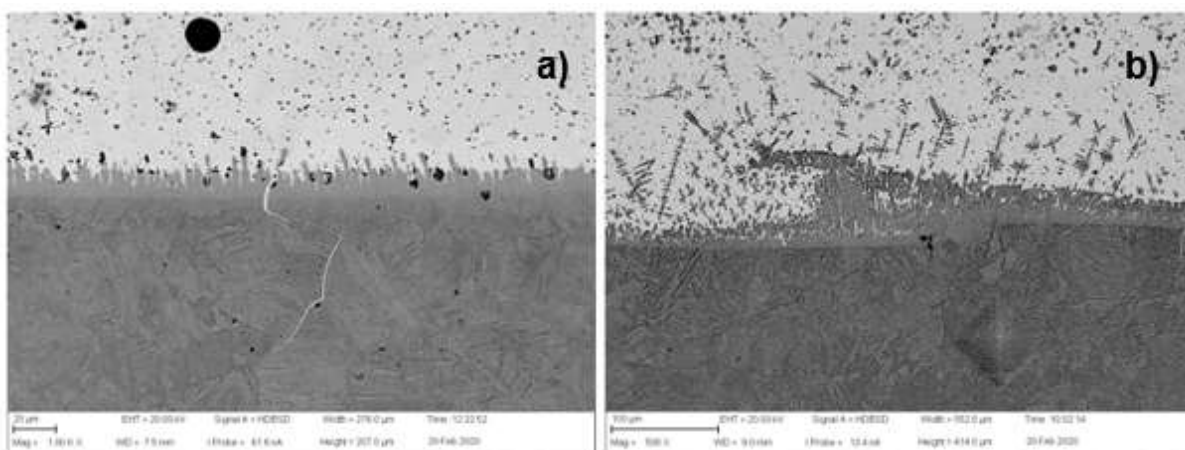


Figura 6.5.: a) Imagen SEM HD BSD de la interfase de la muestra M1. b) Imagen SEM HD BSD de la interfase de la muestra M13.

La interfase plana presente en la muestra M1 indica que la reacción se produjo de manera rápida y a mayor temperatura, mientras que la interfase dendrítica de la muestra M13 hace pensar en una reacción más lenta o a temperatura menor, que permitió el crecimiento de las protuberancias en la interfase.

Al comparar las formas de las interfases con la relación fundente/pólvora, se ve que una mayor relación fundente/pólvora produce un frente plano en la interfase como en la muestra M1, mientras que una menor relación da origen al crecimiento de las dendritas observadas en la muestra M13.

6.6 Respecto a la composición química.

Como su nombre lo indica y de acuerdo con la ecuación presentada, en la soldadura cuproaluminotérmica intervienen principalmente Cobre, Aluminio y el metal base, que en este caso es Hierro. De acuerdo con la bibliografía consultada, en los fundentes suele estar presente el Magnesio en forma de óxido, como elemento que permite alcanzar la temperatura adecuada de reacción.

Al analizar la composición química de las muestras observadas en SEM, las probetas M1 y M13 mostraron composiciones esperadas: principalmente hierro y cobre, con algunas impurezas que contenían aluminio. Este último no aparece en gran medida, ya que luego de la reacción del aluminio metálico pasa a ser óxido de aluminio y por diferencia de densidad debería ascender y poder ser retirado como escoria.

Sin embargo, en la muestra M14b apareció en la composición química el Vanadio. Luego de realizar un mapeo de composición química en el SEM, se obtuvo la Figura 6.6., que muestra presencia de vanadio en toda la muestra.

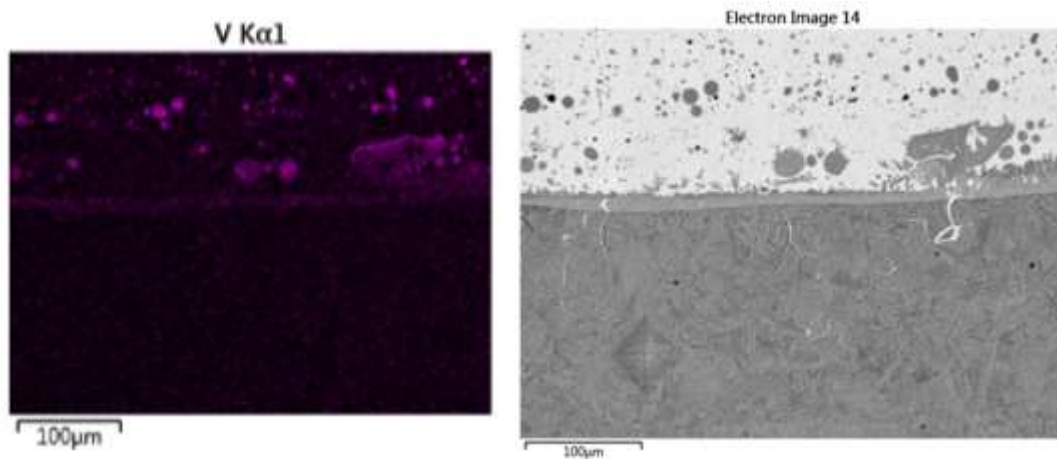


Figura 6.6.: Imagen del mapeo de composición química de la muestra M14b referido al vanadio.

No se pudo determinar el origen del Vanadio presente en la muestra, pero como la misma presenta características similares a la demás no se prosiguió con la investigación

6.7 Tareas futuras

- a) Determinar si las fisuras rellenas de cobre producen fragilización del material base por corrosión por diferencia de potencial.
- b) Determinar si es preferible una interfase plana o con dendritas.
- c) Determinar el porcentaje de unión que garantice una adecuada protección sin provocar corrosión.
- d) Diseñar una herramienta de medición que permita determinar el porcentaje de unión para soldaduras de cañerías en servicio.
- e) Determinar el origen del Vanadio en la muestra M14b y su función como aleante en este caso.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Nehme, A. J. Proyecto Integrador Profesional: Soldadura cuproaluminotérmica en cañerías de conducción para la protección catódica. (Universidad Nacional del Comahue, 2016).
- [2] IRAM. IRAM 2315: Materiales para puesta a tierra. Soldadura Cuproaluminotérmica, 2da edición. (2018).
- [3] Guyer, J. P. An introduction to cathodic protection principles. (2014).
- [4] Ameh, E. S., Ikpeseni, S. C. & Lawal, L. S. A Review of Field Corrosion Control and Monitoring Techniques of the Upstream Oil and Gas Pipelines. *Nigerian Journal of Technological Development* vol. 14 (2017).
- [5] Wright, G. Corrosion protection of metals.
- [6] Bardal, A. *Corrosion and Protection*. (Springer, 2003).
- [7] Bahadori, A. *Cathodic corrosion protection systems: a guide for oil and gas industries*. (Elsevier Inc., 2014).
- [8] Groysman, A. Corrosion problems and solutions in oil, gas, refining and petrochemical industry. (2017).
- [9] Nagalakshmi, T. & Sivasakthi, A. Corrosion Control, Prevention and Mitigation in Oil & Gas Industry. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)* vol. 9, (2019).
- [10] Spec API, 5L, 45th edition (December 2012), Specification for Line Pipe (2012)
- [11] ISO 3183:2019 EN. Petroleum and natural gas industries — Steel pipe for pipeline transportation systems. (2019)
- [12] National Association of Corrosion Engineers (NACE). Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems. (2013).
- [13] Meza Talabera, A. Tendido de un sistema de ductos de recolección de producción ‘gathering’ y reinyección de gas en la selva peruana - lote 88. (Universidad Nacional de Ingeniería, 2008).
- [14] American Welding Society. *Welding Handbook*. vol. 2 (1991).
- [15] Suban, M., Bozic, S., Zajec, A., Cvelbar, R. & Bundara, B. Crack analysis in thermite welding of cathodic protection. *Nuclear engineering and design* vol. 246 123–127 (2012).

- [16] Lonsdale, C.P. *Thermite rail welding: History, process developments, current practices and outlook for the 21st century.*
- [17] INGESCO. Soldadura Aluminotérmica en Cobre. *Protección y prevención contra rayos.* www.ingesco.com.
- [18] APLIWELD. *Manual de uso de la soldadura cuproaluminotérmica.* (2016).
- [19] Erico-Pentair. Cadweld welded electrical connections. *Electrical and fastening solutions* www.ericopentair.com.
- [20] EXOWELD. *Tecnología del sistema de soldadura por autofusión.*
- [21] CUPROTEC. *Catálogo de materiales para la puesta a tierra.*
- [22] IRAM. IRAM 2281: Puesta a tierra de sistemas eléctricos. (2002).
- [23] FACBSA. Fabrica Argentina de Conductores Bimetálicos S.A. www.facbsa.com.ar.
- [24] ASTM. E384-17: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. (2017).
- [25] AZOMaterials. Thermo Fisher Scientific Phenomenon-World BV. www.azom.com/article.aspx?ArticleID=14309.