



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### “ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL COBRE EN LA SOLDABILIDAD DE ACEROS DE BAJO CARBONO”

#### TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

EMILIO JOSÉ BÁEZ BARRAGÁN  
emilio.baez@epn.edu.ec

LUIS FELIPE GALEANO REINA  
luis.galeano@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. GALO HOMERO BARRAGÁN CAMPOS, M. Sc.  
homero.barragan@epn.edu.ec

Quito, Mayo 2017

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **EMILIO BÁEZ Y LUIS FELIPE GALEANO**, bajo mi supervisión.

---

ING. HOMERO BARRAGÁN, M. Sc.

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Nosotros, **EMILIO BÁEZ Y LUIS FELIPE GALEANO**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Emilio Báez

---

Luis Felipe Galeano

## **DEDICATORIA**

Este momento de mi vida, va dedicado a todas las personas con gran corazón, que siempre estuvieron a mi lado durante toda mi formación personal y profesional, y que jamás las olvidaré.

**Emilio**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco en primer lugar a mis padres Emilio y Virginia, quienes han sido parte fundamental en mi formación, que con gran ejemplo me enseñaron los valores necesarios para enfrentar la vida y superar cualquier tipo de adversidad. Siempre han estado en los momentos más difíciles de mi vida y he recibido su amor incondicional, gracias por todo y seguiré aprendiendo de ustedes.

A mis hermanas Viviana y Mayté, por ser el apoyo incondicional para mí, que con su gran carisma y afecto me pintan una gran sonrisa en mi rostro día a día. Agradezco por tenerlas en mi vida.

A mi familia en general quienes siempre estuvieron preocupados por mi formación, pero de manera especial a mi Nonito, quien es una de las personas que más ha influenciado en mi vida junto con mi abuelito Homero Barragán Gavilanes (QDEP), de ellos he aprendido el valor de la perseverancia y la fortaleza. Su apoyo siempre fue incondicional y sus consejos han sido una luz que guía mi camino. Gracias mi Nonito por todo, y sé que mi abuelito estará orgulloso de mi desde el cielo.

Nuevamente agradezco a mi papá, a mi tío Homero y al Ing. Gabriel Velasteguí, quienes han sido nuestra guía en el desarrollo del presente trabajo, su conocimiento en el área de soldadura fue fundamental para realizar un trabajo de investigación de calidad.

A los ingenieros Verónica Sotomayor, Mauricio Cely y Carlos Díaz, quienes nos ayudaron en la realización de los ensayos descritos en el trabajo.

A mi compañero de tesis Felipe, por ser siempre el apoyo incondicional como amigo y compañero durante la mayor parte de la carrera, agradecerle por su paciencia durante la realización de la tesis.

A la empresa ENDE y de manera especial a los Ingenieros Hugo Aguirre y César Espinosa, quienes con su experiencia en el campo de ensayos no destructivos, nos ayudaron de manera desinteresada en la realización de todos los ensayos descritos en este trabajo.

A don César y a don René, que nos ayudaron en la realización de la soldadura y las metalografías respectivamente.

A todos los que conforman el 206, con quienes he vivido grandes experiencias inolvidables durante toda la carrera, siempre les recordaré como un grupo unido y lleno de alegría, porque de eso se trata la vida de vivir felices.

Al equipo de volleyball de la facultad, quienes son grandes personas y compartimos la misma pasión por este hermoso deporte, no se pudo lograr el objetivo pero si formamos una gran familia junto con nuestro gran entrenador Patricio Flores (QDEP), que ahora nos entrena desde el reino del señor.

A todas las personas que formaron parte de la AEIM 2016, no queda más que agradecer por todo el trabajo realizado durante ese año. Dimos todo lo que estuvo a nuestro alcance para alcanzar el bienestar de todos los guayperos y dejar una aso renovada.

A mi querida facultad de Ingeniería Mecánica, quisiera quedarme por siempre pero llegó el momento de decirte adiós al menos por un momento, algún día si Dios me lo permite volveré, mientras tanto solo me queda recordar todos los momentos que viví representándote en campeonatos, en la culta torcida, en la asociación, en comparsas y demás eventos, con un ferviente grito me despido mi facultad querida:

TRES RASES, UN CHISPUN Y UN CARAJO POR MECÁNICA!!!!!!

**Emilio**

## **DEDICATORIA**

Dedico este logro profesional, a quienes son el pilar fundamental en mi vida, quienes me enseñaron a luchar por lo que uno busca sin importar cuán difícil sea el camino y que de todo error se puede aprender para crecer como persona y como profesional; a mis padres José y Rosita.

**Luis Felipe**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres, José y Rosita por haberme formado como persona con principios, valores, reglas, libertades y haberme dado la oportunidad de ser un profesional.

También agradezco a Hugo y Sandy, mi hermano y mi cuñada respectivamente, cómplices y víctimas de mis locuras, quienes me brindaron su apoyo incondicional en todos los momentos, y me motivaron a sacar fuerzas de donde ya no había.

Además agradezco a mi familia, abuelita, tías, primos, prima y a mi sobrino porque cuando nos reunimos desaparece cualquier problema y simplemente disfrutamos las pequeñas cosas de la vida.

Agradezco también a mis amigos de la universidad y del colegio por formar parte de mi vida, pero en especial quiero agradecer a Emilio y Jessy con cada uno de los cuales vivimos momentos grandiosos así como también difíciles, donde quedarán anécdotas imborrables y sobre todo una verdadera amistad.

Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional, a la facultad de Ingeniería Mecánica y a todos mis profesores por formarme como profesional y seguir creciendo como persona. En especial agradezco a mi director de tesis Ing. Homero Barragán, M.Sc. Quien nos guió y apoyó con sus conocimientos para que este proyecto se culmine.

Además agradezco a los ingenieros Carlos Diaz, Mauricio Cely, y a la Ingeniera Verónica Sotomayor, quienes brindaron su ayuda en la realización de ensayos para este proyecto. Agradezco a la empresa ENDE (Ensayos No Destructivos del Ecuador) que gracias a su participación en este proyecto se pudo llevar a cabo.

Finalmente agradezco a don César y a don René quienes ayudaron en la parte técnica de este proyecto.

**Luis Felipe**



## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
Objetivo general .....	2
Objetivos específicos .....	2
1. GENERALIDADES .....	3
1.1. Soldadura.....	3
1.1.1. Clasificación de la soldadura.....	3
1.2. Soldabilidad.....	3
1.2.1. Tipos de soldabilidad .....	3
1.2.2. Grados de soldabilidad .....	4
1.2.3. Factores que afectan a la soldabilidad .....	5
1.3. Elementos aleantes .....	5
1.3.1. Azufre .....	5
1.3.2. Carbono .....	5
1.3.3. Cobre .....	6
1.3.4. Cromo .....	6
1.3.5. Fósforo.....	6
1.3.6. Manganeso .....	6
1.3.7. Molibdeno .....	6
1.3.8. Níquel .....	6
1.3.9. Silicio .....	7
1.3.10. Vanadio .....	7
1.4. Indicadores de Soldabilidad .....	7
1.4.1. Carbono equivalente (CE).....	7
1.4.2. Parámetro de Composición (Pcm) .....	7
1.5. El cobre .....	8
1.5.1. Generalidades.....	8
1.5.2. Clasificación del cobre .....	8
1.5.3. Aplicaciones del cobre .....	9
1.5.4. Propiedades importantes del cobre .....	10
1.5.5. Soldabilidad del cobre .....	11

1.5.6. Propiedades del cobre que influyen en la soldadura de aceros de bajo carbono .....	12
1.5.7. Elementos afines al cobre y al acero .....	12
1.6. Estructura de las aleaciones .....	14
1.6.1. Soluciones Sólidas .....	14
1.6.2. Compuestos intermetálicos .....	15
1.6.3. Sistemas de dos fases .....	15
1.7. Ensayos .....	17
1.7.1. Ensayos destructivos .....	17
1.7.2. Ensayos no destructivos .....	21
2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	27
2.1. Equipos y materiales .....	27
2.2. Procedimientos experimentales .....	28
2.2.1. Elaboración de probetas para soldar .....	28
2.2.2. Elaboración de probetas para ensayos no destructivos .....	31
2.2.3. Elaboración de probetas para ensayos de tracción y doblado .....	37
2.2.4. Elaboración de probetas para metalografías .....	42
3. PRUEBAS EXPERIMENTALES .....	48
3.1. Ensayos no destructivos .....	48
3.1.1. Radiografía industrial .....	48
3.1.2. Ultrasonido .....	53
3.1.3. Partículas magnéticas .....	54
3.1.4. Líquidos penetrantes .....	55
3.2. Ensayos destructivos .....	57
3.2.1. Ensayo de tracción .....	57
3.2.2. Ensayo de doblado .....	58
3.2.3. Micrografía .....	59
3.2.4. Macrografía .....	60
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	62
4.1. Análisis de resultados de ensayos no destructivos .....	62
4.1.1. Análisis de resultados de radiografía industrial .....	62
4.1.2. Análisis de resultados de ultrasonido .....	67

4.1.3.	Análisis de resultados de partículas magnéticas .....	68
4.1.4.	Análisis de resultados de líquidos penetrantes.....	70
4.2.	Análisis de ensayos destructivos .....	72
4.2.1.	Análisis de ensayos de tracción .....	72
4.2.2.	Análisis de ensayos de doblado .....	73
4.2.3.	Análisis de micrografía .....	74
4.2.4.	Análisis de macrografías .....	84
4.2.5.	Cálculo del error del porcentaje de cobre .....	86
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
5.1.	Conclusiones.....	88
5.2.	Recomendaciones.....	90
	BIBLIOGRAFÍA .....	91
	ANEXOS .....	93
	ANEXO I. Welding Procedure Specification (WPS).....	i
	ANEXO II. Ficha técnica de alambre multifilar de cobre .....	iii
	ANEXO III. Informe técnico de ensayos de tracción y doblado.....	v
	ANEXO IV. Propiedades y composición química del acero ASTM A36 .....	x
	ANEXO V. Ficha técnica de electrodo E 6010.....	xi

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de granos, límites de granos y partículas dispersas a través de la estructura de un sistema de dos fases, como una aleación plomo-cobre. Los granos representan plomo en solución sólida en cobre y las partículas son plomo como segunda fase.....	16
Figura 1.2. Esquema de un sistema de dos fases que consta de dos conjuntos de granos: oscuros y claros .....	16
Figura 1.3. Ejemplo de una macrografía de una soldadura a tope .....	18
Figura 1.4. Diagrama de esfuerzo vs deformación típico para un material dúctil .....	19
Figura 1.5. Esquema de ensayo de tracción .....	20
Figura 1.6. Esquema de ensayo de doblado .....	21
Figura 1.7. Esquema de ensayo de partículas magnéticas .....	23
Figura 1.8. Esquema de ensayo de radiografía industrial.....	24
Figura 1.9. Esquema de discontinuidad y placa radiográfica de una junta .....	25
Figura 1.10. Esquema de discontinuidad detectada por medio de ultrasonido con método pulso - eco.....	26
Figura 2.1. Cortadora de plasma TECOi cortando las placas .....	28
Figura 2.2. Medidas en milímetros de placas para ser soldadas .....	28
Figura 2.3. Probeta en la entenalla .....	29
Figura 2.4. Medidas en milímetros de la junta de placas para ser soldadas .....	29
Figura 2.5. Pesaje de la probeta N° 9.....	30
Figura 2.6. Soldadura de las probetas .....	35
Figura 2.7. Medidas en milímetros de placas para soldar .....	37
Figura 2.8. Medidas en milímetros de la junta a soldar .....	38
Figura 2.9. Proceso de fresado en probetas de tracción .....	41
Figura 2.10. Medidas en milímetros de la probeta de tracción .....	41
Figura 2.11. Medidas en milímetros de la probeta de doblado. ....	42
Figura 2.12. Medidas en milímetros de material base para probetas en metalografía. ....	42
Figura 2.13. Medidas en milímetros de la probeta para metalografía .....	45
Figura 2.14. Proceso de desbaste grueso en probetas para metalografía.....	46
Figura 2.15. Proceso de montaje con resina en probetas para metalografía .....	46
Figura 2.16. Proceso desbaste fino en probetas para metalografía.....	47
Figura 2.17. Proceso pulido en probetas para metalografía .....	47

Figura 3.1. Diagrama de exposición del equipo de rayos x del laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela Politécnica Nacional.....	49
Figura 3.2. Esquema de etiquetado en radiografías.....	51
Figura 3.3. Toma de radiografía.....	52
Figura 3.4. Ensayo de ultrasonido a probeta 13 – 14 .....	54
Figura 3.5. Ensayo de partículas magnéticas de probeta 13 - 14.....	55
Figura 3.6. Aplicación de líquido penetrante a probeta 13 – 14.....	56
Figura 3.7. Remoción de exceso de liquido penetrante en probeta 13 – 14 .....	56
Figura 3.8. Aplicación de liquido revelador en probeta 13 - 14.....	57
Figura 3.9. Probetas de tracción con 3,37% de cobre.....	57
Figura 3.10. Ensayo de tracción en maquina universal de ensayos.....	58
Figura 3.11. Probetas para el ensayo de doblado.....	58
Figura 3.12. Ensayo de doblado .....	59
Figura 3.13. Probetas para micrografía.....	59
Figura 3.14. Ensayo de micrografía.....	60
Figura 3.15. Probetas con ataque químico con cloruro férrico.....	60
Figura 3.16. Equipo para la realización de macrografías.....	61
Figura 4.1. Radiografía de probeta 5 – 7.....	62
Figura 4.2. Radiografía de probeta 8 – 10.....	63
Figura 4.3. Radiografía de probeta 3 – 9.....	63
Figura 4.4. Radiografía de probeta 4 – 6.....	64
Figura 4.5. Radiografía de probeta 11 – 12.....	64
Figura 4.6. Radiografía de probeta 13 – 14.....	65
Figura 4.7. Radiografía de probeta 15 – 16.....	66
Figura 4.8. Imagen por arreglo de fases de la probeta 13 – 14 .....	67
Figura 4.9. Imagen por arreglo de fases de la probeta 15 – 16 .....	68
Figura 4.10. Fisuras encontradas por partículas magnéticas en la probeta 13 – 14 ..	69
Figura 4.11. Fisuras encontradas por partículas magnéticas en la probeta 15 – 16 ..	69
Figura 4.12. Líquidos penetrantes en probeta 13 – 14 .....	70
Figura 4.13. Líquidos penetrantes en probeta 15 – 16 .....	71
Figura 4.14. Gráfica Resistencia a la tracción vs. Porcentaje de cobre en el acero...	73

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Valores de conductividad eléctrica de algunos metales.....	10
Tabla 1.2. Valores de conductividad térmica de algunos metales .....	11
Tabla 1.3. Clasificación por líquidos penetrantes, tipos y métodos.....	22
Tabla 2.1. Masas de placas para ensayos no destructivos. ....	30
Tabla 2.2. Procedimiento de soldadura probeta 1 – 2. ....	31
Tabla 2.3. Porcentaje de cobre referencial en el cordón de soldadura en probetas de ensayos no destructivos.....	34
Tabla 2.4. Porcentaje de cobre real en el cordón de soldadura en probetas de ensayos no destructivos.....	37
Tabla 2.5. Masas de placas para tracción y doblado.....	38
Tabla 2.6. Porcentaje de cobre referencial en el cordón de soldadura en probetas de tracción y doblado. ....	40
Tabla 2.7. Porcentaje de cobre real en el cordón de soldadura en probetas de tracción y doblado .....	40
Tabla 2.8. Masas de placas para metalografías .....	43
Tabla 2.9. Porcentaje de cobre referencial en el cordón de soldadura en probetas de metalografía. ....	45
Tabla 2.10. Porcentaje de cobre real en el cordón de soldadura en probetas de metalografía. ....	45
Tabla 3.1. Espesores de probetas de ensayos no destructivos .....	48
Tabla 3.2. Tiempo de exposición de probetas según diagrama de exposición. ....	49
Tabla 3.3. Factores de corrección .....	50
Tabla 3.4. Tiempo de exposición de probetas .....	51
Tabla 3.5. Identificación de placas radiográficas .....	52
Tabla 3.6. Identificación de probetas para micrografía y macrografía .....	59
Tabla 4.1 Resultados de placas radiográficas .....	67
Tabla 4.2 Resultados de ultrasonido .....	68
Tabla 4.3. Resultados de partículas magnéticas .....	70
Tabla 4.4. Resultados de líquidos penetrantes.....	71
Tabla 4.5. Resistencia a la tracción obtenida en el ensayo .....	72
Tabla 4.6. Comparación de la resistencia a la tracción .....	72
Tabla 4.7. Resultados del ensayo de doblado.....	73
Tabla 4.8. Resultados de micrografías de probeta 1A.....	74
Tabla 4.9. Resultados de micrografías de probeta 1B.....	77

Tabla 4.10. Resultados de micrografías de probeta 3A.....	80
Tabla 4.11. Resultados de micrografías de probeta 3B.....	83
Tabla 4.12. Análisis macrográfico con aumento 6.3x de la probeta 1B .....	84
Tabla 4.13. Análisis macrográfico con aumento 6.3x de la probeta 2A .....	85
Tabla 4.15. Error en cálculo del porcentaje de cobre .....	87

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.1. Carbono equivalente.....	7
Ecuación 1.2. Parámetro de composición .....	8
Ecuación 2.1. Diferencia de masas .....	31
Ecuación 2.2. Regla de tres simple directa .....	32
Ecuación 2.3. Volumen de un elemento relacionando masa y densidad .....	33
Ecuación 2.4. Longitud de un cilindro relacionando volumen y área .....	33
Ecuación 2.5. Diferencia de masas .....	35
Ecuación 2.6. Volumen de un cilindro .....	36
Ecuación 2.7. Masa de un elemento relacionando densidad y volumen.....	36
Ecuación 2.8. Regla de tres simple directa para porcentaje .....	36
Ecuación 2.9. Proporcionalidad entre dos elementos .....	38
Ecuación 2.10. Regla de tres simple directa .....	39
Ecuación 2.11. Volumen de un elemento relacionando masa y densidad .....	39
Ecuación 2.12. Longitud de un cilindro relacionando volumen y área .....	40
Ecuación 2.13. Regla de tres simple directa .....	43
Ecuación 2.14. Regla de tres simple directa .....	43
Ecuación 2.15. Volumen de un elemento relacionando masa y densidad .....	44
Ecuación 2.16. Longitud de un cilindro relacionando volumen y área .....	44
Ecuación 3.1. Tiempo de exposición corregido .....	50
Ecuación 4.1. Error porcentual .....	87



## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se analizó la influencia que tiene el cobre en la soldabilidad de los aceros de bajo carbono, se determinó el porcentaje de cobre en el cordón de soldadura del acero con el cual empieza el problema de fisuramiento y la afectación que existió en las propiedades mecánicas. La detección de fisuras se hizo mediante el uso de las técnicas de ensayos no destructivos más utilizadas a nivel industrial.

El porcentaje de cobre en el acero con el cual empezó el problema de fisuramiento fue de 3.02%. La disminución en la resistencia a la tracción fue evidente en las probetas que se aumentó el porcentaje de cobre, comparadas con la resistencia a la tracción del material base, creando una tendencia a la disminución de la resistencia a la tracción conforme se aumenta el contenido de cobre. En general, el cobre en el acero no presenta una buena mezcla, formándose un sistema de dos fases.

**Palabras clave:** acero, cobre, fisuras, porcentaje

## ABSTRACT

In the present work the influence of copper on the weldability of low carbon steels was analyzed, the percentage of copper in the weld bead of the steel with which the problem of cracking starts and the effect that existed in the mechanical properties. Fissure detection was done using the non-destructive testing techniques most commonly used at industrial level.

The percentage of copper in the steel with which the cracking problem began was 3.02%. A diminution in tensile strength was evident in the specimens, compared with the tensile strength of the base material, creating a tendency to decrease the tensile strength as the copper content increases.

In general, the copper in the steel does not present a good mixture, forming a two-phase system.

**Keywords:** steel, copper, cracks, percentage

# **“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL COBRE EN LA SOLDABILIDAD DE ACEROS DE BAJO CARBONO”**

## **INTRODUCCIÓN**

La soldabilidad es una de las propiedades tecnológicas más importantes dentro del campo de la soldadura, la cual depende de una serie de factores como son: tipo de material base, elementos aleantes, tipo de junta y proceso de soldadura, velocidad de enfriamiento, energía suministrada, temperatura de precalentamiento y secuencia de soldadura.

La influencia de los elementos aleantes mejora o disminuye las propiedades de los aceros dependiendo del porcentaje en que se encuentren. Existen estudios previos de la influencia que produce el fósforo y el azufre en la soldabilidad de los aceros.

El cobre mejora la resistencia a la corrosión atmosférica de los aceros, pero puede provocar fisuramiento. En cuanto a este problema no existe mayor información acerca de un porcentaje máximo de cobre que puede contener un acero al carbono para que éste no disminuya sus propiedades.

Algunos aceros que son muy utilizados en la industria tienden a formar grietas después de un proceso de soldadura; las propiedades de estas aleaciones dependen de los elementos que las constituyen, aunque en su gran mayoría mejoran las propiedades, estos elementos no pueden agregarse en grandes cantidades, porque una de las propiedades que se ve afectada es la soldabilidad.

Para determinar si una soldadura es aceptable es necesario someterle a una serie de ensayos los cuales pueden ser ensayos destructivos o no destructivos.

Los ensayos destructivos consisten en destruir físicamente a las probetas de soldadura, con el fin de determinar la integridad de la soldadura y ciertas propiedades mecánicas y físicas. Además estos ensayos sirven para la calificación del procedimiento de soldadura, el rendimiento de calificación del soldador, la inspección de muestreo de las soldaduras de producción, inspección, investigación y trabajo de análisis de fallas.

Los ensayos no destructivos no afectan la estructura ni composición del material evaluado. Mediante estos ensayos se puede determinar la fiabilidad de la unión soldada y por tanto su calidad, sin necesidad de ocupar un gran número de probetas a diferencia de los ensayos destructivos.

En Ecuador los procesos de soldadura más comunes son los procesos de fusión, especialmente SMAW, pero lastimosamente los operarios no tienen el suficiente criterio para evitar ciertos problemas como el de contaminación de agentes externos.

En la construcción de estructuras metálicas se puede presentar contaminaciones provenientes de tuberías o alambres de cobre por descuidos del personal a cargo o por no seguir adecuadamente el procedimiento de soldadura. Estas contaminaciones no son tomadas con la debida importancia, las cuales pueden ocasionar futuros problemas por un debilitamiento de la estructura.

Otro ejemplo es la protección catódica, que es una técnica utilizada para la reducción o eliminación de la corrosión en metales propensos a este fenómeno. Para conocer el potencial de un metal a corroerse, se mide la diferencia de potencial entre el metal sumergido en un medio corrosivo y un electrodo de referencia adecuado.

Uno de los electrodos de referencia más utilizados es el de cobre, el cual debe ir soldado al material, en este punto se pueden presentar problemas posteriores por la soldadura de este electrodo.

## **Objetivo general**

Analizar la influencia del cobre en la soldabilidad de aceros de bajo carbono.

## **Objetivos específicos**

- Determinar el porcentaje de cobre que provoque un fisuramiento en la soldadura de un acero de bajo carbono.
- Utilizar ensayos no destructivos para la detección de defectos de soldadura a medida que se incremente el porcentaje de cobre.
- Analizar la afectación de las propiedades mecánicas de un acero de bajo carbono cuando el porcentaje de cobre ocasione fisuras.

# **1. GENERALIDADES**

## **1.1. Soldadura**

Un proceso de unión que produce la coalescencia de los materiales calentándolos a la temperatura de soldadura, con o sin la aplicación de presión o mediante la aplicación de presión sola y con o sin el uso de metal de aporte.

### **1.1.1. Clasificación de la soldadura**

#### **Soldadura heterogénea**

Se realiza entre materiales de distinta naturaleza, puede o no haber material de aporte, o si es entre materiales iguales, el material de aporte es diferente (Soldadura, 2016).

#### **Soldadura homogénea**

La soldadura se realiza entre materiales de la misma naturaleza, de igual forma su material de aporte si su proceso lo requiere (Soldadura, 2016).

## **1.2. Soldabilidad**

La capacidad de un material a ser soldado bajo las condiciones de fabricación impuestas en una estructura específica, diseñada apropiadamente y para funcionar satisfactoriamente en el servicio previsto.

### **1.2.1. Tipos de soldabilidad**

#### **Soldabilidad operativa**

Esta característica es importante ya que determina si el material puede o no puede ser soldado, además está relacionado con el enlace que se genera a nivel atómico o molecular por ejemplo el enlace metálico tiene una buena soldabilidad operativa (Molera, 1992).

#### **Soldabilidad metalúrgica**

Esta permite saber hasta qué punto se pueden soldar dos metales sin presentar defectos o problemas en su soldadura, la soldabilidad metalúrgica se puede modificar aplicando

procesos como precalentamiento, utilizando fundentes adecuados para el material a soldar (Molera, 1992).

### **Soldabilidad constructiva**

Se refiere a la facilidad que va a tener la unión de soportar los esfuerzos para los cuales fue diseñado porque al momento de soldarse puede cambiar la estructura del metal variando así sus propiedades mecánicas, con lo que puede afectar su resistencia a un esfuerzo en específico y no ser apta para su servicio (Molera, 1992).

#### **1.2.2. Grados de soldabilidad**

##### **Grado de soldabilidad muy buena**

Cuando las exigencias técnicas y de construcción son cumplidas por los materiales y unión soldada.

##### **Grado de soldabilidad satisfactoria**

Se debe cumplir un procedimiento de soldadura previamente calificado (WPS) para lograr las exigencias.

##### **Grado de soldabilidad limitada**

Son necesarios procedimientos y procesos especiales, para alcanzar las exigencias. Esto incluye precalentamiento, control de temperatura entre pases, secuencia de soldadura, alivio de tensiones, etc.

##### **Grado de soldabilidad mala**

Las exigencias no son cumplidas bajo ningún método. Esto significa que a pesar de que los materiales puedan unirse, la calidad de la soldadura no es garantizada

### **1.2.3. Factores que afectan a la soldabilidad**

#### **Material base**

Debido a la presencia de los elementos aleantes se modifica el intervalo de cristalización, fases presentes, cambios y transformaciones durante el calentamiento y cambios en las propiedades físicas del material base.

#### **Tecnología de soldadura**

Depende directamente del proceso de soldadura elegido, de los materiales de aporte, tipo de junta y procedimientos utilizados.

#### **Forma y tipo de construcción**

Son las restricciones y rigidez que presenta la soldadura.

#### **Propiedades requeridas de la unión**

De acuerdo a los requerimientos exigidos por las normas en las que se rigen.

### **1.3. Elementos aleantes**

Algunos elementos son añadidos a los aceros para brindarles propiedades especiales tales como maquinabilidad, soldabilidad, tenacidad, resistencia mecánica entre otras, cada elemento influye de diferente manera en estas propiedades de los aceros (Kalpakjian, 2008).

#### **1.3.1. Azufre**

Aumenta la maquinabilidad al combinarse con manganeso, pero disminuye la ductilidad, resistencia al impacto, la soldabilidad y la calidad superficial (Kalpakjian, 2008).

#### **1.3.2. Carbono**

La templabilidad, resistencia, dureza y resistencia al desgaste se ven incrementadas al aumentar el porcentaje de carbono, pero se reduce la ductilidad, la soldabilidad y la tenacidad (Kalpakjian, 2008).

### **1.3.3. Cobre**

La resistencia atmosférica es mejorada, la resistencia mecánica sufre un ligero incremento con una pérdida de ductilidad, se ve afectado el trabajo en caliente y la calidad de la superficie (Kalpakjian, 2008).

### **1.3.4. Cromo**

Aumenta la templabilidad, tenacidad, resistencia a la corrosión, desgaste y resistencia a la alta temperatura; aumenta la profundidad de penetración de dureza después de un tratamiento térmico (Kalpakjian, 2008).

### **1.3.5. Fósforo**

Eleva la resistencia mecánica, templabilidad, resistencia a la corrosión y maquinabilidad pero en el caso de los aceros, sufren una gran reducción en su ductilidad, tenacidad y sobre todo en la soldabilidad (Kalpakjian, 2008).

### **1.3.6. Manganeso**

Incrementa la resistencia mecánica, templabilidad, resistencia a la abrasión y maquinabilidad; ayuda a la desoxidación del acero fundido, disminuye la fragilización en caliente y la soldabilidad (Kalpakjian, 2008).

### **1.3.7. Molibdeno**

Las propiedades que son mejoradas son: la resistencia al desgaste, tenacidad, resistencia a la temperatura elevada, resistencia a la termofluencia, dureza y templabilidad, además reduce en el revenido la fragilización (Kalpakjian, 2008).

### **1.3.8. Níquel**

Aumenta la resistencia mecánica como la resistencia a la corrosión, templabilidad y tenacidad (Kalpakjian, 2008).



### **1.3.9. Silicio**

Reduce la pérdida por histéresis magnética, maquinabilidad y formabilidad en frío. Incrementa la resistencia mecánica, dureza, resistencia a la corrosión, ayuda a la desoxidación y conductividad eléctrica (Kalpakjian, 2008).

### **1.3.10. Vanadio**

Eleva la tenacidad, resistencia mecánica, resistencia a la abrasión y dureza a temperaturas elevadas; no permite el crecimiento del grano durante el tratamiento térmico (Kalpakjian, 2008).

## **1.4. Indicadores de Soldabilidad**

### **1.4.1. Carbono equivalente (CE)**

El carbono es uno de los elementos aleantes más importantes en los aceros, debido a los efectos que produce en la microestructura de las soldaduras cuando se enfría desde altas temperaturas asociada con el depósito del metal de soldadura.

Un indicador importante de soldabilidad es el carbono equivalente, mediante el cual los investigadores han logrado medir los efectos de los elementos aleantes, esto para determinar el precalentamiento necesario para prevenir el fisuramiento inducido por hidrógeno o mala tenacidad. El carbono equivalente se puede determinar mediante una fórmula, en la cual constan los elementos aleantes más importantes que influyen en el indicador, la fórmula especificada por la AWS es la siguiente:

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

Ecuación 1.1. Carbono equivalente

### **1.4.2. Parámetro de Composición (Pcm)**

Otro indicador de soldabilidad es el parámetro de composición, el cual a la fórmula del CE de Ito y Bessyo se lo denomina Pcm, este indicador agrega términos en el que toma en cuenta al hidrógeno, el grado de embridamiento y al espesor.

La fórmula del Pcm se expresa a continuación:

$$P_{cm} = C + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{Ni}{60} + \frac{V}{10} + \frac{Si}{30} + 5B + \frac{H}{60} + \frac{A * t}{600}$$

Ecuación 1.2. Parámetro de composición

En donde:

H = cantidad de hidrógeno disuelto en el metal depositado en cm<sup>3</sup>/100g de metal depositado

H = 5 para electrodos de extra bajo hidrógeno

H = 6 para electrodos de bajo hidrógeno

H >= 25 para electrodos rutilicos/celulósicos

A = 1 Junta libre; A = 2 Juntas embridada

t = espesor en milímetros

## 1.5. El cobre

### 1.5.1. Generalidades

En la actualidad el cobre y sus aleaciones, está en uno de los mayores grupos de comercialización de metales, debido a que se encuentra en el de mayor producción y consumo a nivel mundial después del acero y aluminio.

El cobre es un elemento de transición rojizo, extensamente utilizado a causa de su excelente conductividad térmica y eléctrica, solo superada por la plata y el oro respectivamente; excepcional resistencia a la corrosión, facilidad de fabricación, buena resistencia mecánica y a la fatiga.

### 1.5.2. Clasificación del cobre

Los elementos frecuentemente aleados con el cobre son el aluminio, níquel, silicio, estaño y zinc.

La clasificación más general de cobre es la siguiente:

- Cobre: contiene un porcentaje mínimo de cobre de 99.3%, (C1xxxx).
- Alta aleación de cobre: materiales que contienen hasta un 5% de elementos aleantes, (C2xxxx).
- Aleación cobre – zinc (latón): contiene hasta un 40% de zinc, (C3xxxx).
- Aleación cobre – estaño (bronces al fósforo): pueden contener hasta un 10% de estaño y 0.2% de fósforo, (C4xxxx).

- Aleación cobre – aluminio (bronces al aluminio): estas aleaciones contienen hasta el 10% de aluminio, (C5xxxxx).
- Aleación cobre – silicio (bronces al silicio): pueden contener hasta un 3% de silicio, (C6xxxxx).
- Aleación cobre – níquel: contiene hasta un 30% de níquel, (C7xxxxx).
- Aleación cobre – zinc – níquel: tienen un porcentaje de níquel de 18% y un 27% de zinc, (C8xxxxx).
- Aleaciones especiales: contiene ciertos elementos aleantes para mejorar propiedades específicas, (C9xxxxx).

Esta clasificación es dada por la UNS (Unified Numbering System) el cual es manejado conjuntamente con ASTM (American Society for Testing and Materials) y SAE (Society of Automotive Engineers).

### **1.5.3. Aplicaciones del cobre**

El cobre tiene un amplio campo de aplicación por ejemplo:

#### **Sector automotriz**

En este campo el cobre es utilizado para la fabricación de intercambiadores de calor, radiadores; en vehículos híbridos o eléctricos la presencia del cobre es más notorio puesto que este tipo de vehículos utilizan motores eléctricos.

#### **Sector eléctrico**

Debido a su alta conductividad eléctrica lo hace un material ideal para la fabricación de cables, alambres y componentes eléctricos, y como resultado se obtiene una alta eficiencia de energía eléctrica.

#### **Sistemas de tuberías**

Por su buena maquinabilidad el cobre puede ser utilizado en plomería, sistemas de tuberías contra incendios y sistemas de conducción de gas natural. Por causa de su alta conductividad térmica es apto para la construcción de paneles solares y sistemas de calefacción para hogares.

## Sector naval

Por su alta resistencia a la corrosión lo hacen un material idóneo para ambientes hostiles, como el agua salada.

### 1.5.4. Propiedades importantes del cobre

#### Conductividad eléctrica

Es la capacidad que poseen los materiales para dejar circular la corriente eléctrica, en la siguiente tabla 1.1 se muestra los valores de conductividad eléctrica de algunos materiales.

Tabla 1.1. Valores de conductividad eléctrica de algunos metales

Material	IACS %
Plata	106
Cobre	103.06
Oro	73.4
Aluminio	65
Magnesio	38.6
Zinc	28.27
Níquel	25.2
Acero al carbono	9.5
Acero inoxidable 316	2.5

(Davis, 2001).

La escala de conductividad eléctrica establecida en 1913 se basó en un cobre estándar definido como 100%, y la conductividad eléctrica de cualquier material todavía se expresa como porcentaje IACS (International Annealed Copper Standard), igual a 100 veces la relación de la resistividad volumétrica del cobre estándar recocido ( $0,017241\mu\Omega \cdot m$ ) a 20 °C al valor medido para el material que se trate.

La conductividad eléctrica es muy sensible a cambios de temperatura, para el caso del cobre la conductividad eléctrica decae en 800% IACS a un temperatura de -240°C.

## Conductividad térmica

El cobre y sus aleaciones son buenos conductores de calor, por lo que son utilizados en aplicaciones de transferencia de calor como intercambiadores de calor o radiadores. Los cambios en conductividad térmica siguen a los cambios en conductividad eléctrica, de acuerdo a la relación de Wiedemann-Franz, la cual establece que la conductividad térmica es proporcional al producto de la conductividad eléctrica y la temperatura.

En la tabla 1.2 se pueden observar valores de conductividad térmica de ciertos materiales.

Tabla 1.2. Valores de conductividad térmica de algunos metales

Material	Conductividad térmica (w/m*k)
Plata	428
Cobre	398
Oro	317.9
Aluminio	247
Magnesio	155
Zinc	113
Níquel	82.9
Acero al carbono	51.9
Acero inoxidable 316	16.2

(Davis, 2001)

## Resistencia a la corrosión

El cobre es un material puro, a diferencia del oro y otros materiales preciosos, este puede ser atacado por reactivos y entornos comunes. El cobre puro es muy resistente bajo la mayoría de condiciones, entornos o ambientes corrosivos.

### 1.5.5. Soldabilidad del cobre

El cobre es uno de los metales ingenieriles más fáciles de soldar. Los óxidos e impurezas son fácilmente removidos con una limpieza previa, en un baño de ácido diluido.

El cobre y sus aleaciones son mayormente soldados con el proceso de soldadura por arco de tungsteno y protección de gas inerte, especialmente para espesores delgados, debido a

que logra localizar el calor que ingresa (heat-input), importante en materiales que tienen una alta conductividad térmica, evitando que se disipe a través del material.

#### **1.5.6. Propiedades del cobre que influyen en la soldadura de aceros de bajo carbono**

La soldabilidad del acero se ve influenciada por tres propiedades características del cobre las cuales son las causantes del fisuramiento: alta conductividad térmica, alto coeficiente de dilatación y la transformación eutéctica.

##### **Alta conductividad térmica**

Debido a esta característica se disipa grandes cantidades de calor, al momento de soldar se produce un gradiente de temperatura. Para compensar este efecto, es necesario agregar una gran cantidad de energía calórica y como consecuencia resulta una mayor zona afectada por calor (Cobre y sus aleaciones, 2014).

##### **Alto coeficiente de dilatación**

Debido a que se agrega grandes cantidades de calor para la soldadura y con una alta dilatación térmica, existe mayor posibilidad de que se formen deformaciones (Cobre y sus aleaciones, 2014).

##### **Transformación eutéctica**

Cuando se produce el efecto de solidificación del cobre, todo el óxido de cobre se agrupa formando un eutéctico en el borde de grano, lo que produce una fragilización del metal (Cobre y sus aleaciones, 2014).

#### **1.5.7. Elementos afines al cobre y al acero**

Una clasificación aceptada en geoquímica es la que fue realizada por el científico Goldschmidt, el cual clasifica a los elementos en cuatro grupos dependiendo sus afinidades relativas ya sean estas metálicas, silícicas, sulfurosas o gaseosas.

Teniendo en cuenta esto se tiene los siguientes grupos (Moeller, 1994).

## **Siderófilos**

En general son los elementos que tienen mayor afinidad con el hierro, se encuentran los metales relativamente inactivos (Moeller, 1994).

- Hierro
- Cobalto
- Níquel
- Rutenio
- Rodio
- Paladio
- Osmio
- Iridio
- Platino
- Oro
- Renio
- Molibdeno
- Wolframio

## **Calcófilos**

Son todos los elementos que presentan una gran afinidad por el azufre y débil por el oxígeno, son aquellos elementos que tienen su energía de ionización por encima de 6 o 7 eV, tienden a formar sulfuros covalentes y tienen menos facilidad a la oxidación. Estos elementos son los siguientes (Moeller, 1994):

- Cobre
- Zinc
- Galio
- Germanio
- Arsénico
- Selenio
- Plata
- Cadmio
- Indio
- Estaño

- Antimonio
- Telurio
- Mercurio
- Talio
- Plomo
- Bismuto

Para el caso de estudio se presume la formación de algún tipo sulfuro de cobre, por la presencia de azufre en el acero así como también en el material de aporte.

### **Litófilos**

Con afinidad por los silicatos, estos elementos se unen iónicamente al oxígeno por medio de enlaces fuertes, a diferencia de los calcófilos la energía de ionización es menor a 6 o 7 eV (Moeller, 1994).

### **Atmófilos**

Con afinidad por gases en la atmósfera, son los elementos que a temperatura ambiente son gaseosos (Moeller, 1994).

## **1.6. Estructura de las aleaciones**

Las aleaciones están compuestas por dos o más elementos químicos, de los cuales al menos uno de ellos debe ser un metal. Son producidas con el afán de mejorar y modificar las propiedades de los metales puros, para ser usadas en la mayoría de las aplicaciones ingenieriles. Las aleaciones constan de 3 formas básicas: soluciones sólidas, compuestos intermetálicos y sistemas de dos fases (Kalpakjian, 2008).

### **1.6.1. Soluciones Sólidas**

Son soluciones sólidas aquellas que mantienen la estructura cristalina del solvente durante la aleación. Existen dos tipos de soluciones sólidas: sustitucionales e intersticiales (Kalpakjian, 2008).



## **Soluciones sólidas substitucionales**

Son soluciones sólidas substitucionales cuando el tamaño del átomo del soluto es igual al átomo del solvente, en este caso puede reemplazarlo y formar este tipo de solución (Kalpakjian, 2008).

Existen dos condiciones para que se formen soluciones sólidas substitucionales:

1. Los dos metales deben tener estructuras cristalinas similares.
2. La diferencia de sus radios atómicos debe ser menor a 15% (Kalpakjian, 2008).

## **Soluciones sólidas intersticiales**

Estas soluciones se forman cuando el tamaño del átomo del soluto es mucho menor que el del solvente, por lo tanto estos átomos pueden ubicarse en el intersticio de la red cristalina. Para que se formen soluciones sólidas intersticiales deben cumplir con dos condiciones necesarias (Kalpakjian, 2008):

1. El átomo solvente debe tener más de una valencia.
2. El radio atómico del átomo de soluto debe ser menor que 59% del radio atómico del átomo solvente (Kalpakjian, 2008).

### **1.6.2. Compuestos intermetálicos**

Los compuestos intermetálicos tienen una estructura compleja, la cual consta de dos metales, cuyos átomos de soluto se presentan en ciertas proporciones entre los átomos de solvente. Estos compuestos pueden tener solubilidad sólida y el tipo de enlace atómico varía de metálico a iónico. Son compuestos fuertes, duros y frágiles. Son utilizados en motores avanzados de turbinas de gas por su alto punto de fusión, resistencia a altas temperaturas, densidad baja y buena resistencia a la oxidación (Kalpakjian, 2008).

### **1.6.3. Sistemas de dos fases**

En la mayoría de aleaciones existentes, tienen dos o más fases sólidas y se les puede considerar como mezclas mecánicas. A estos sistemas que constan con dos fases sólidas se les conoce como sistemas de dos fases (Kalpakjian, 2008).

Una fase es una porción físicamente diferente y homogénea en un material; en donde cada fase es una parte homogénea de la masa total y posee características y propiedades propias (Kalpakjian, 2008).

Un claro ejemplo de un sistema de dos fases, es cuando se agrega plomo al cobre en estado fundido. Al solidificarse se distinguen en su estructura dos fases: una que tiene una pequeña cantidad de plomo en solución sólida de cobre y la otra con partículas de plomo dispersas en la estructura como se puede observar en la figura 1.1 (Kalpakjian, 2008).

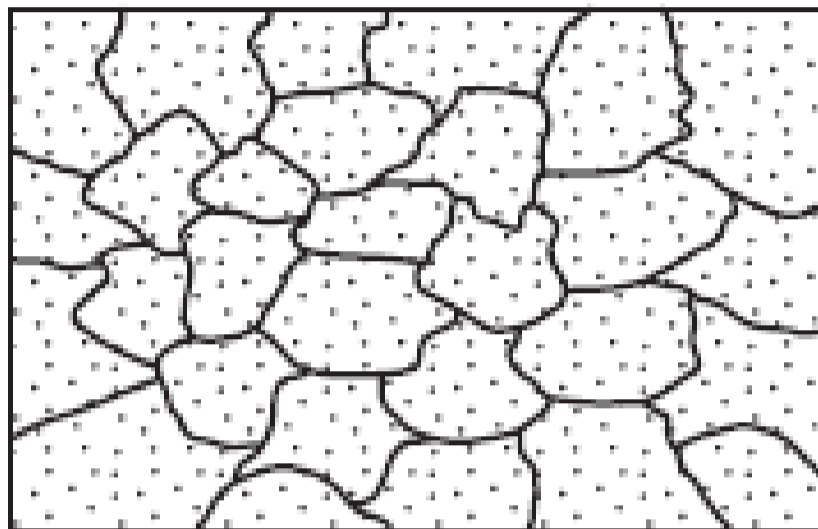


Figura 1.1. Esquema de granos, límites de granos y partículas dispersas a través de la estructura de un sistema de dos fases, como una aleación plomo-cobre. Los granos representan plomo en solución sólida en cobre y las partículas son plomo como segunda fase (Kalpakjian, 2008)

Otro ejemplo es en donde existen dos conjuntos de granos, cada uno con sus propias propiedades y composición. Los granos oscuros pueden tener estructura diferente a los granos claros. Por ejemplo, los granos oscuros pueden ser frágiles, en tanto los granos claros podrían ser dúctiles, como se observa en la figura 1.2 (Kalpakjian, 2008).

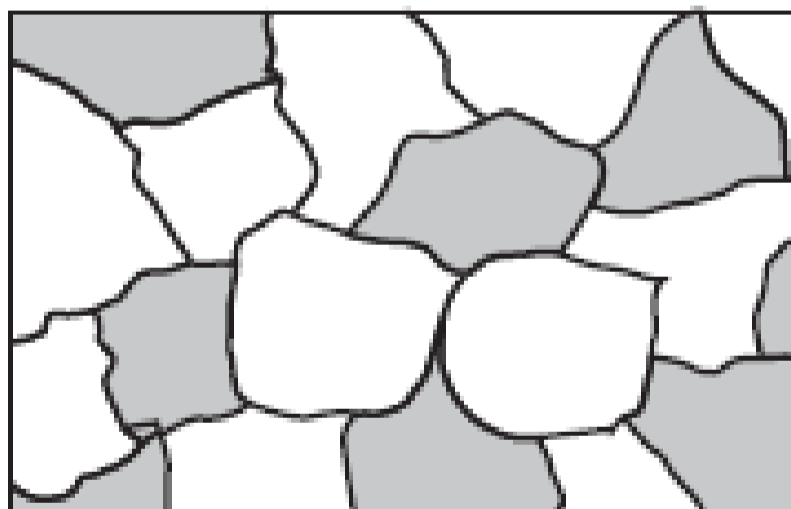


Figura 1.2. Esquema de un sistema de dos fases que consta de dos conjuntos de granos: oscuros y claros (Kalpakjian, 2008)

Las aleaciones que tienen partículas finamente dispersas, es un método que sirve para reforzar las aleaciones y mejorar sus propiedades. Las partículas de la segunda fase no

permiten el movimiento de las dislocaciones, por lo que incrementan la resistencia. En resumen, estas aleaciones de dos fases son más fuertes, pero menos dúctiles que las soluciones sólidas, (Kalpakjian, 2008).

## **1.7. Ensayos**

### **1.7.1. Ensayos destructivos**

En cualquier elemento se necesita garantizar su correcto desempeño para las condiciones de servicio para las cuales fue diseñado, para conseguir dicha garantía es necesario aplicar ensayos destructivos.

Estos ensayos al probar cierta característica del elemento invalida el espécimen probado.

### **Análisis químico**

El análisis químico es utilizado especialmente por dos razones cuando se trata de soldaduras, una de ellas es determinar la composición química del metal base y el material de aporte, esto para garantizar que los componentes que aseguran tener los proveedores de la materia prima sean los mismos, la otra razón es para determinar la resistencia a la corrosión en la junta soldada puesto que esta parte por la afectación térmica quedan esfuerzos residuales y pueden afectar a una corrosión más temprana.

### **Análisis metalográfico**

Trata de la obtención, preparación y por último la evaluación de las muestras, concentrándose en la estructura metalúrgica del elemento.

Mediante este tipo de análisis se puede determinar lo siguiente:

- Defectos en las juntas
- Número de pasos de soldadura
- Profundidad de la penetración de soldadura
- La zona afectada por el calor (ZAC)
- La estructura metalúrgica del metal

Este tipo de análisis pueden ser macrografías o micrografías.

## Macrografías

Para realizar este ensayo se necesita un reactivo químico adecuado para que se diferencie las diferentes zonas a analizar, este ensayo permite un aumento de la superficie observada de hasta 20X, permitiendo observar la configuración general del cordón de soldadura así como ciertos defectos de soldadura tales como poros, grietas e inclusiones.

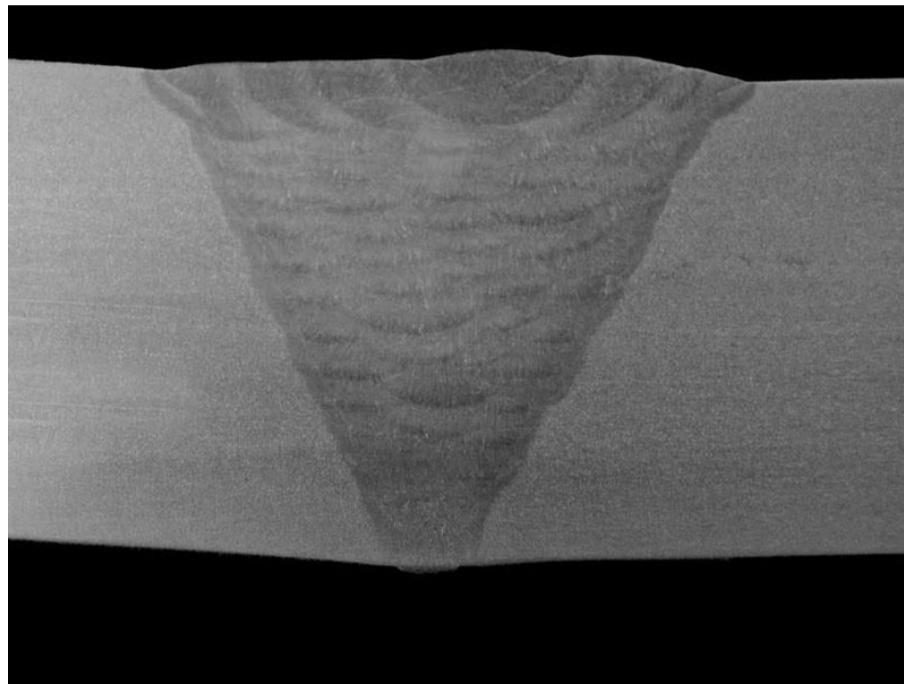


Figura 1.3. Ejemplo de una macrografía de una soldadura a tope  
(Soldadura y adhesivación, 2016)

## Micrografías

Este análisis micrográfico se usa especialmente para conocer las microestructuras de los materiales, tales como la ferrita, perlita y martensita.

Para lograr observar estas estructuras se lo hace a través de un microscopio para metalografías que permite obtener imágenes desde 50X hasta 500X.

## Ensayos mecánicos

Son los ensayos que se realizan para caracterizar propiedades mecánicas tales como dureza, ductibilidad, resistencia, etc.

Estos ensayos son controlados rigurosamente tanto en el aspecto de probetas, zona de ensayo, equipos a utilizar y procedimientos a seguir, puesto que para que sean aceptados los resultados se debe seguir una norma en especial.

Algunos de estos ensayos son:

- Ensayo de dureza
- Doblado guiado

- Rotura por muesca
- Ensayo de tracción

## Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción proporcionan información sobre la resistencia y ductilidad de los materiales bajo fuerzas de tracción uniaxiales. Esta información es útil al momento de comparar materiales, desarrollar nuevas aleaciones, controlar la calidad de materiales y diseño bajo ciertas circunstancias.

Los datos arrojados por este ensayo pueden ser resistencia a la tracción, esfuerzo de fluencia, porcentaje de elongación, reducción de área, ubicación y tipo de fractura, entre otros.

Todos estos datos se los puede ubicar en un diagrama de esfuerzo vs deformación típico, como se indica en la figura 1.4.

Cabe recalcar que con un análisis extra de la zona de fractura se puede obtener cierta información adicional como es la presencia de discontinuidades por ejemplo poros, penetración incompleta o fisuras.

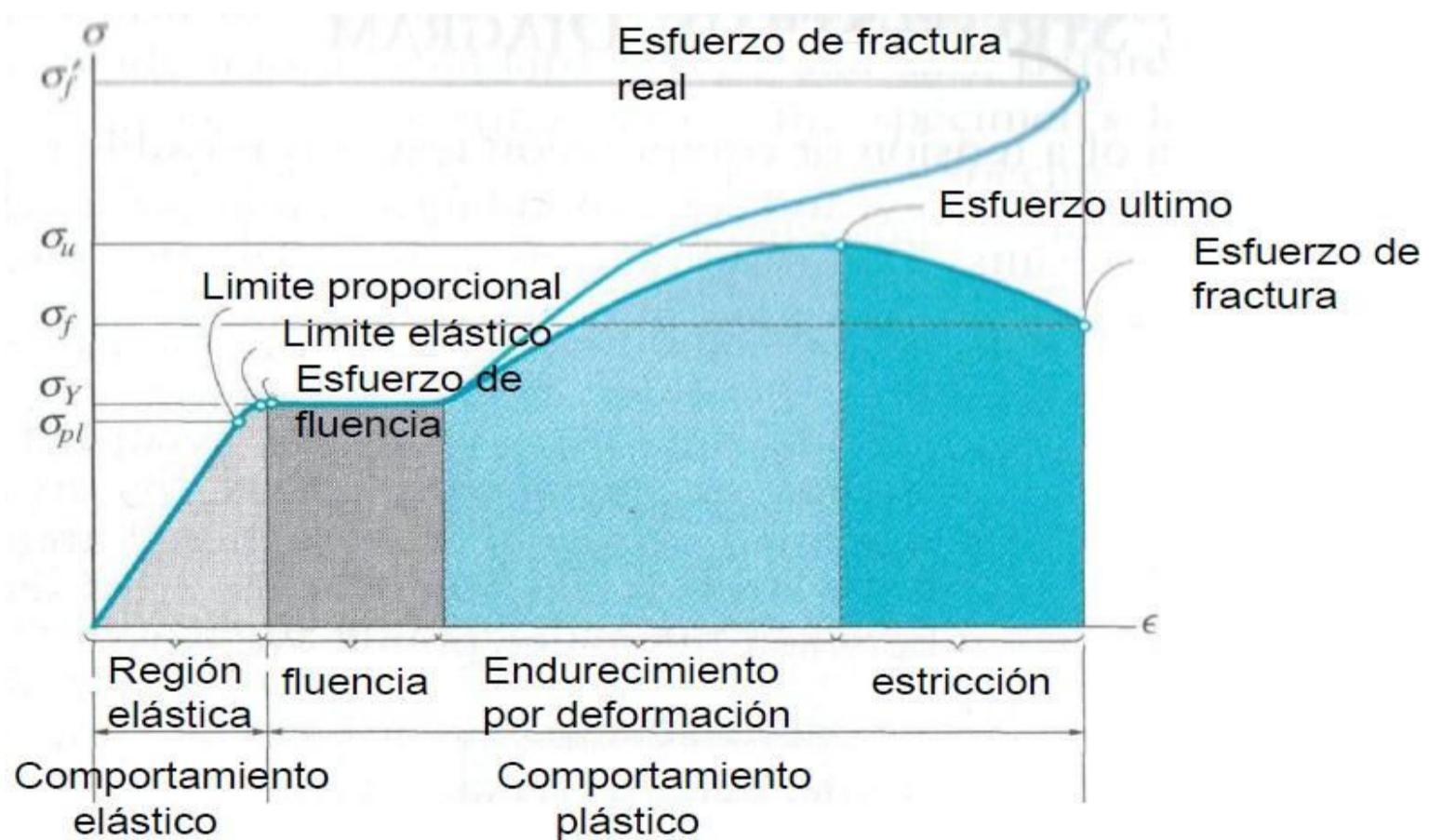


Figura 1.4. Diagrama de esfuerzo vs deformación típico para un material dúctil  
(Propiedades mecánicas de los materiales, 2012)

El proceso a seguir depende de la norma que se vaya a aplicar pero en general el proceso consiste en obtener una probeta con ciertas dimensiones, y a esta probeta someterle a fuerzas de tracción por medio de un equipo especializado hasta la ruptura de la probeta. Los resultados obtenidos deben ser comparados con los valores de la norma que se aplique para determinar si se acepta o se rechaza dicho material.

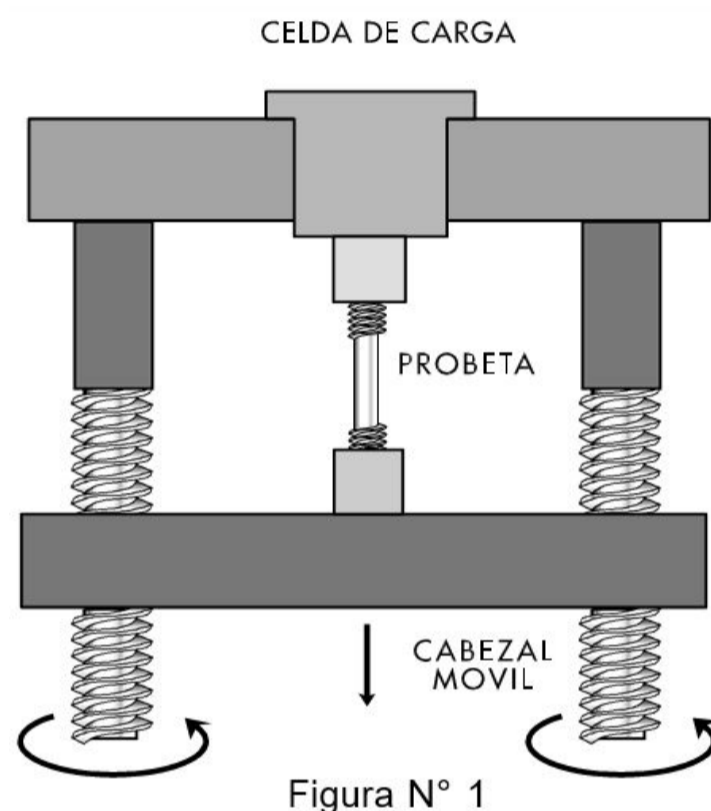


Figura 1.5. Esquema de ensayo de tracción  
(Ensayo de tracción, 2015)

### Ensayo de doblado guiado

El ensayo de doblado pretende verificar la presencia de defectos de soldadura en la junta soldada y su ductilidad, dicho ensayo se juzga verificando si la probeta ensayada se fractura. Para el ensayo de doblado guiado existe tres probetas, la primera es la de cara en la cual se busca analizar la calidad de la fusión; es decir que no existan defectos.

La segunda probeta llamada de raíz busca verificar que no exista una falta de penetración. Para mayores espesores se utiliza alternativamente el doblado lateral.

Este ensayo consiste en aplicar una fuerza de flexión continua y constante hasta que la probeta se deforme formando una "U" en apoyos normalizados de acuerdo a la norma que se ensaye.

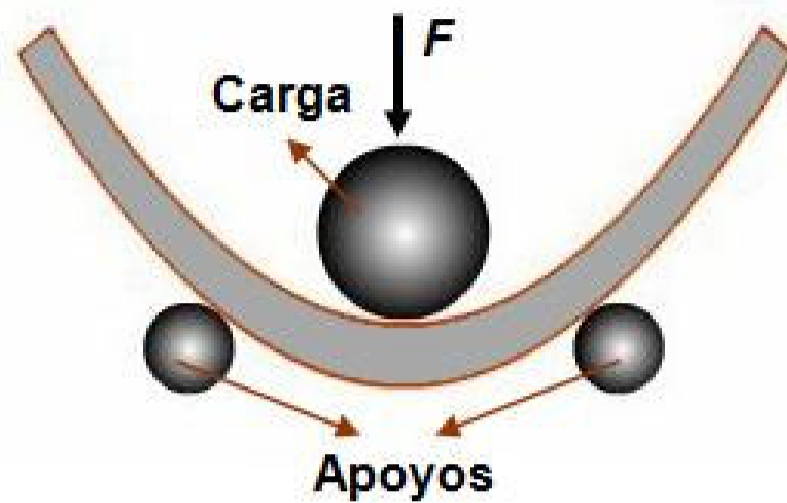


Figura 1.6. Esquema de ensayo de doblado  
(Ensayo de doblado, 2013)

### 1.7.2. Ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos están destinados a realizar un análisis de la condición en la que se encuentra un material o pieza, sin realizar ninguna afectación a la estructura del material, ni a la función para la que está diseñada.

De acuerdo a la clasificación según la aplicación, los ensayos no destructivos se clasifican en:

- Técnicas de inspección superficial
- Técnicas de inspección volumétrica

#### Técnicas de inspección superficial

Las técnicas de inspección superficial son aquellas que se utilizan para encontrar indicaciones superficiales, es decir discontinuidades abiertas a la superficie, que se encuentran a una profundidad de menos de 3 milímetros. Entre las más importantes tenemos:

- Líquidos penetrantes
- Inspección visual
- Partículas magnéticas
- Termografía

## Líquidos penetrantes

La técnica de líquidos penetrantes se basa en el principio que tienen ciertos líquidos para penetrar y ser retenidos en fisuras, grietas o poros específicamente abiertos a la superficie. Existen dos métodos para esta técnica, usando penetrantes visibles (visibles bajo luz blanca) y penetrantes fluorescentes (visibles bajo luz ultravioleta). Los cuales pueden ser a base de agua o aceite, y de acción rápida o lenta. Los ensayos por líquidos penetrantes se clasifican de acuerdo a la tabla 1.3.

Tabla 1.3. Clasificación por líquidos penetrantes, tipos y métodos

Tipo I—Inspección por Líquidos Penetrantes Fluorescentes
Método A — Lavable con agua
Método B — Post-emulsificable, lipofílico
Método C — Removible con solvente
Método D — Post-emulsificable, hidrofílico
Tipo II—Inspección por Líquidos Penetrantes Visibles
Método A — Lavable con agua
Método C — Removible con solvente

(Norma ASTM E – 165)

Este método es aplicable para piezas de geometría complicada y materiales no porosos, ferrosos y no ferrosos, así como también materiales no metálicos como plásticos, cerámicos, vidrios. Se utilizan independientemente de propiedades físicas del material, siempre y cuando cumpla con los requerimientos del procedimiento, método y técnica a utilizarse.

## Partículas magnéticas

El ensayo de partículas magnéticas se basa en el principio de magnetismo, con la cual podemos detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales, esta fuerza invisible creada por un campo magnético desarrolla trabajo mecánico de atracción y repulsión de materiales magnetizables.

Este ensayo se realiza solamente a materiales ferromagnéticos. Existen dos métodos de ensayo: el método continuo y el método residual. El método continuo es aquel que se realiza mientras la fuerza magnética esté actuando, en cambio el método residual es aquel que se magnetiza la pieza, se remueve la fuerza y se aplican las partículas.



Al crear el campo magnético en la pieza a inspeccionarse, se aplican las partículas magnéticas al área de ensayo, si existen discontinuidades perpendiculares a las líneas de campo de magnético, estas se distorsionarán formando polos atrayendo a las partículas, las cuales delinean el contorno de las discontinuidades.

Debido a este principio, deben hacerse dos inspecciones, en donde, las líneas de campo magnético de la segunda inspección deben ser perpendiculares a las de la primera.

Este ensayo es el más utilizado para la detección de fisuras provocadas por procesos de soldadura por fusión.

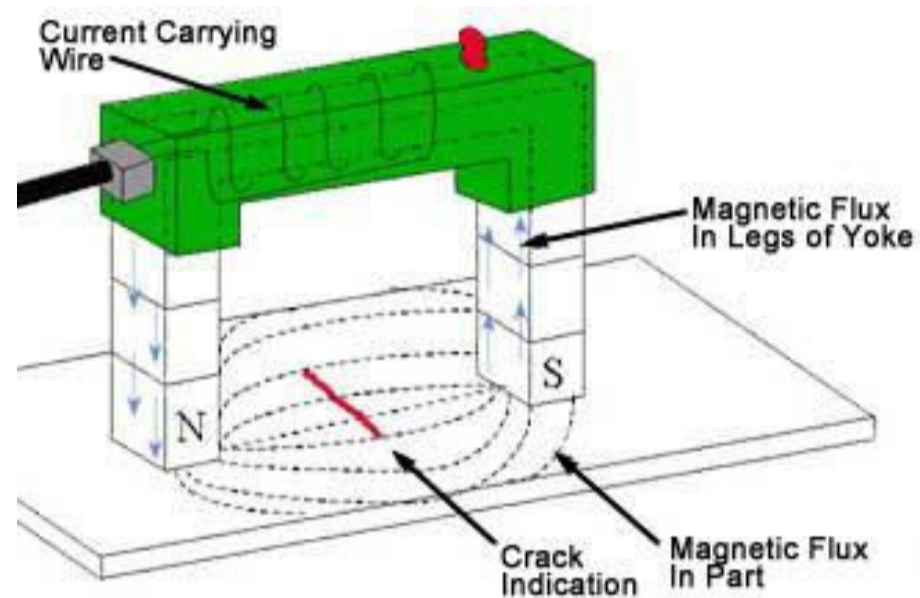


Figura 1.7. Esquema de ensayo de partículas magnéticas  
(END Partículas magnéticas, 2009)

### Técnicas de inspección volumétrica

Las técnicas de inspección volumétrica son ensayos más complejos, con los cuales se puede encontrar discontinuidades internas a lo largo de todo el espesor del material o pieza a inspeccionarse.

Las técnicas más conocidas son:

- Radiografía Industrial
- Ultrasonido
- Emisión acústica

## Radiografía industrial

La radiografía es uno de los métodos de ensayos no destructivos más utilizados a nivel mundial para inspección de materiales a nivel industrial e infinidad de aplicaciones como la medicina y la investigación.

La radiografía industrial es un método de inspección de materiales, en el cual se utiliza una fuente de radiación electromagnética de longitud de onda corta para atravesar el material y a su vez incidir en una película sensible a la radiación en la cual quedará plasmada la evidencia física del ensayo.

En la actualidad se utilizan para este método fuentes de rayos x y rayos gamma, en el cual el registro final de imagen es el negativo. En la figura 1.8 se observa el procedimiento básico de la inspección radiográfica.

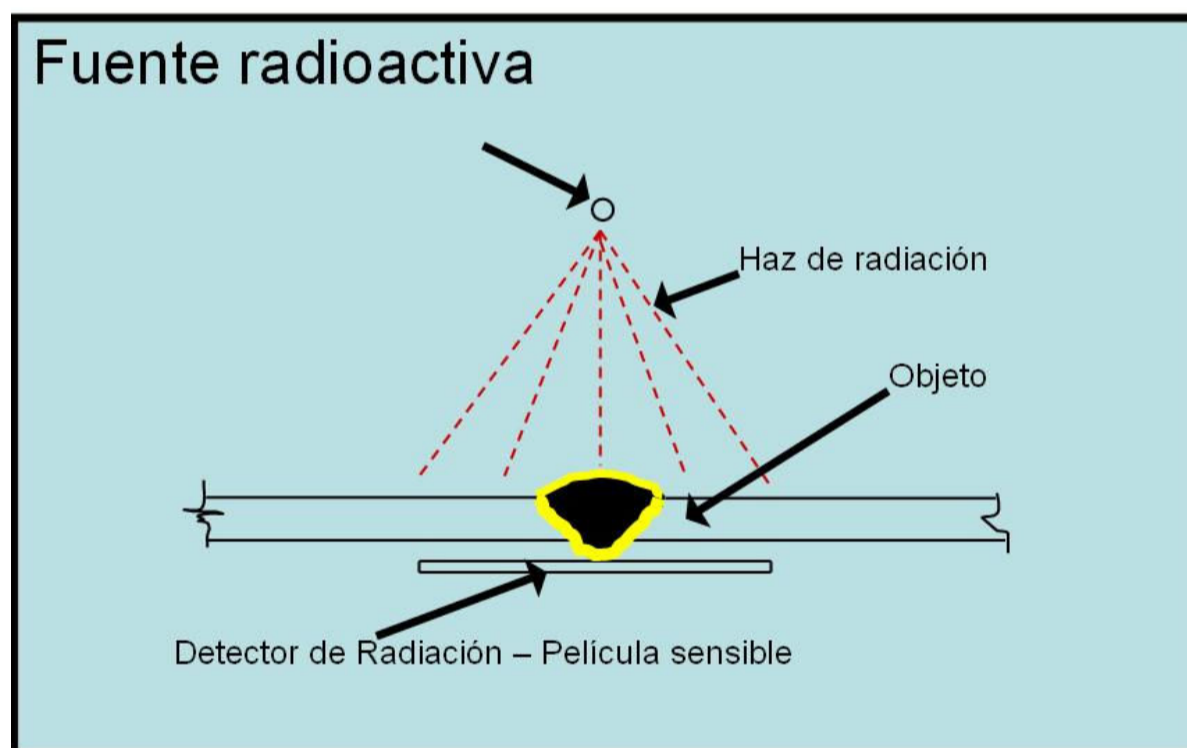


Figura 1.8. Esquema de ensayo de radiografía industrial  
(Radiografía industrial, 2011)

Los elementos esenciales que se necesitan para llevar a cabo el ensayo son: fuente de radiación, material o pieza o inspeccionar, medio de registro (película o papel sensible a la radiación), material para procesar la película expuesta y personal calificado que pueda realizar el ensayo e interpretar las películas radiográficas.

Mediante este método se puede detectar, interpretar y evaluar indicaciones internas típicas principalmente en soldaduras, como fisuras, inclusiones metálicas y no metálicas, faltas de

fusión y demás discontinuidades existentes. En la figura 1.9 se encuentra el esquema de la discontinuidad y su respectiva placa radiográfica.

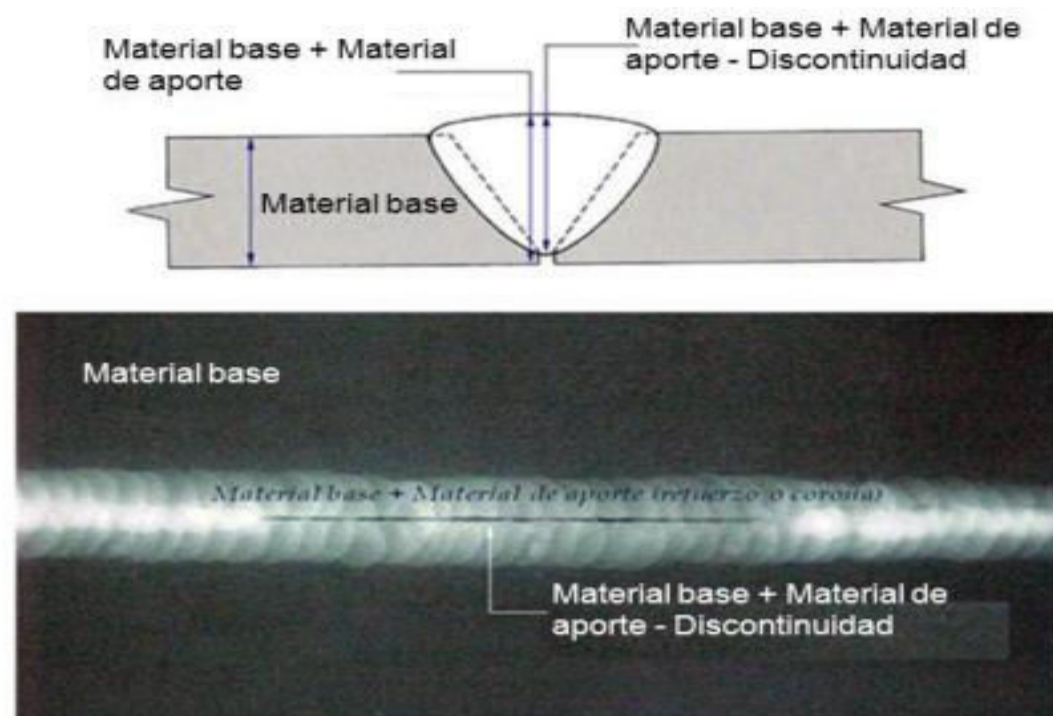


Figura 1.9. Esquema de discontinuidad y placa radiográfica de una junta (Luna, J. & Téllez, C. & González, M., 2012)

## Ultrasonido

El ensayo de ultrasonido se basa de la energía de alta frecuencia para realizar inspecciones o mediciones, estas ondas son introducidas en el material en donde viajan en línea recta a velocidad constante hasta encontrarse con una superficie, esta interacción provee información del elemento reflector, es decir provee la caracterización de la discontinuidad, mientras que el tiempo de viaje del sonido, nos da la distancia a la que se encuentra la discontinuidad.

Este tipo de inspección se utiliza para la detección de discontinuidades internas, medición de espesores, laminaciones, corrosión o erosión interna, entre otras.

El método más utilizado para la inspección de soldaduras es el de pulso-eco, figura 1.10, a pesar de que se van desarrollando instrumentos modernos que permiten ubicar al defecto, su forma, posición y tamaño (Arreglo de fases).

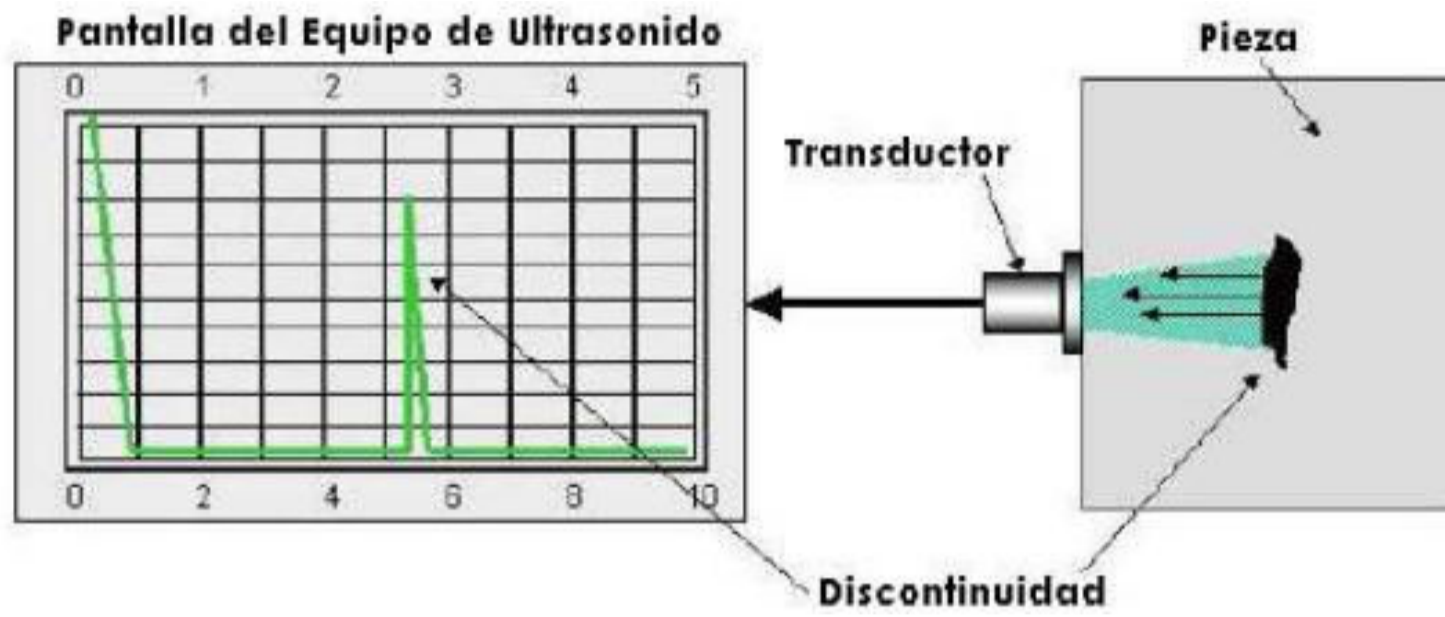


Figura 1.10. Esquema de discontinuidad detectada por medio de ultrasonido con método pulso - eco  
 (Luna, J. & Téllez, C. & González, M., 2012)

## **2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

Una vez revisada la información teórica importante para este proyecto, en este capítulo se da a conocer los equipos y procesos que se utilizaron para la obtención de todas las probetas para posteriores ensayos.

Inicialmente se pretendía conseguir aceros con alto contenido de cobre, pero debido al escaso mercado local no fue posible, por lo que se decidió incrementar el contenido de cobre en el cordón de soldadura en el acero estructural más utilizado en la industria (ASTM A36).

### **2.1. Equipos y materiales**

- Acero ASTM A36 (Anexo IV)
- Cortadora de plasma TECOi
- Balanza
- Soldadora Lincoln V350-PRO
- Electrodo AGA E6010 (Anexo V)
- Alambre multifilar de cobre N° 24
- Amoladora
- Cepillo de alambre
- Lima metálica
- Entenalla
- Corrector líquido blanco
- Sierra
- Máquina pulidora FORCIMAT
- Resina
- Lijas
- Alcohol
- Algodón
- Calibrador pie de rey

## 2.2. Procedimientos experimentales

### 2.2.1. Elaboración de probetas para soldar

Una vez adquirido el acero ASTM A-36, se procedió al corte por medio de la cortadora de plasma TECOi (figura 2.1), para dar medidas generales a las placas de acuerdo con la figura 2.2.



Figura 2.1. Cortadora de plasma TECOi cortando las placas  
(Fuente propia)

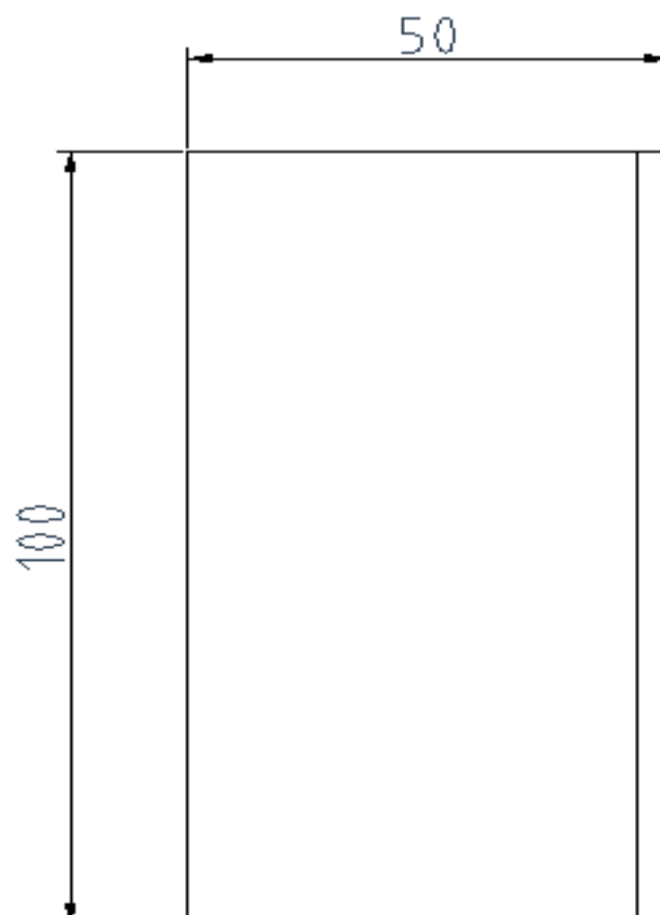


Figura 2.2. Medidas en milímetros de placas para ser soldadas  
(Fuente propia)

Luego de esto cada una de las placas se llevó a una entenalla para un proceso de desbaste por medio de amoladora.



Figura 2.3. Probeta en la entenalla  
(Fuente propia)

Con este proceso se puede garantizar las medidas de la junta según figura 2.4.

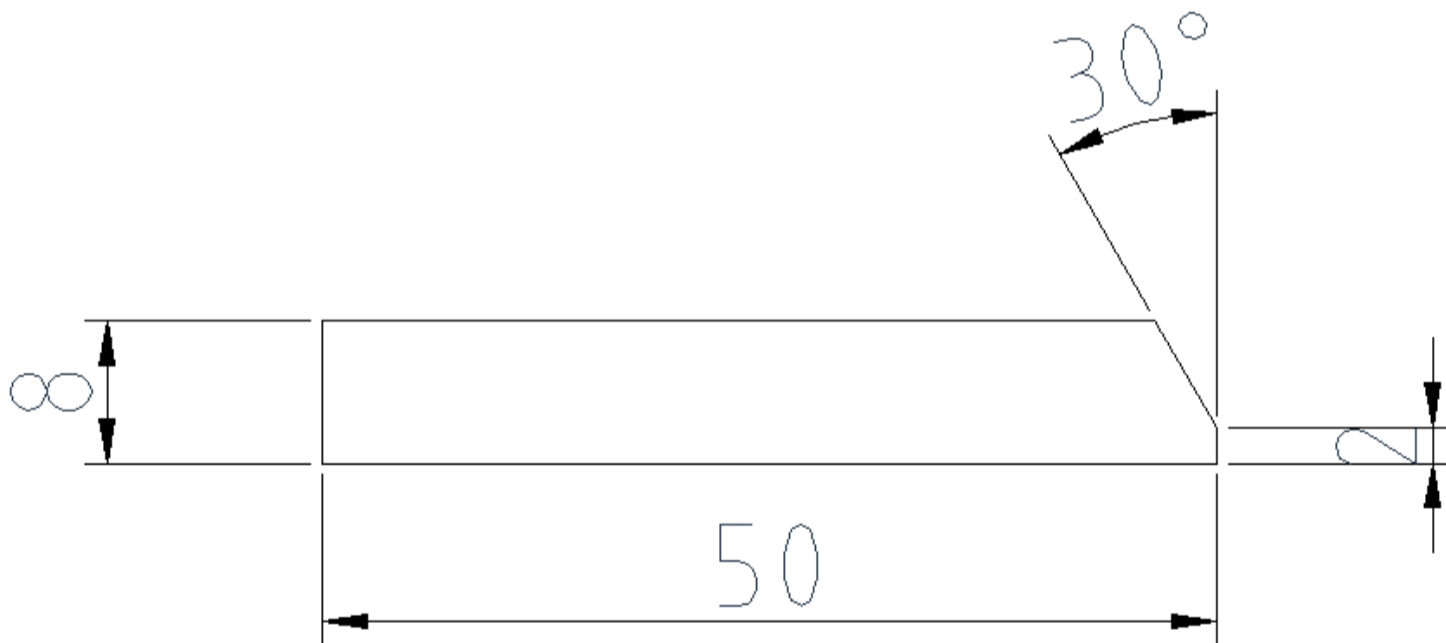


Figura 2.4. Medidas en milímetros de la junta de placas para ser soldadas  
(Fuente propia)

A cada una de las placas se las identificó por medio de una marca hecha con corrector líquido blanco siguiendo una numeración, para su posterior pesaje de cada una de las placas.



Figura 2.5. Pesaje de la probeta N° 9  
(Fuente propia)

Para la siguiente etapa se utilizó una balanza con apreciación de 0,1 gramos para una mejor precisión en posteriores cálculos, estos datos se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Masas de placas para ensayos no destructivos.

Placa N°	Masa (g)
1	296,4
2	311,7
3	305,8
4	288,5
5	303,6
6	290,7
7	299,5
8	277,1
9	281,2
10	278,7
11	311
12	295,1
13	304,9
14	308
15	292,3
16	286,1

(Fuente propia)



## 2.2.2. Elaboración de probetas para ensayos no destructivos

De las dieciséis placas existentes se emparejó de acuerdo a su afinidad geométrica para obtener 8 probetas para ensayos no destructivos, estas 8 probetas fueron soldadas siguiendo un WPS precalificado de la norma AWS D1.1, (Anexo 1), con el proceso de soldadura SMAW y electrodos E6010.

### Cálculo de la masa referencial del cordón de soldadura

La primera probeta fue realizada sin la adición de cobre esto para determinar aproximadamente un peso referencial del cordón de soldadura para así tener un valor referencial de la cantidad de cobre que se añadirá en las siguientes probetas.

El proceso de soldadura de la probeta 1 – 2 se llevó a cabo de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 2.2. Procedimiento de soldadura probeta 1 – 2.

Nº de Pase	Corriente (A)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (cm/s)
1	85	60	0,24
2	88	60	0,32
3	88	60	0,23
4	85	60	0,22

(Fuente propia)

Una vez finalizado el proceso de soldadura se procede a pesar la probeta 1 – 2, dando como resultado 641,5 g con lo cual se realiza el cálculo de masa del cordón de soldadura.

Placa 1 = 296,4 g

Placa 2 = 311,7 g

$$m_{cs} = m_{ps} - (m_{p1} + m_{p2})$$

Ecuación 2.1. Diferencia de masas

Siendo:

$m_{cs}$ : masa del cordón de soldadura

$m_{ps}$ : masa de la probeta soldada

$m_{p1}$ : masa de la placa 1

$m_{p2}$ : masa de la placa 2

$$m_{cs} = 641,5 \text{ g} - (296,4 + 311,7) \text{ g}$$

$$m_{cs} = 33,4 \text{ g}$$

Con este dato referencial se puede aproximar la cantidad de cobre a ser añadida en las siguientes probetas.

### **Cálculo del porcentaje de cobre en el cordón de soldadura de las probetas**

Para las siguientes probetas se siguió el mismo procedimiento de soldadura aplicando el WPS utilizado en el punto anterior, con la única diferencia que el cobre será añadido después del pase de raíz, incrementando cierta cantidad de cobre de acuerdo a los cálculos siguientes.

Para la adición de cobre se buscó que esté distribuido uniformemente en todo el largo del cordón de soldadura, para lo cual se utilizó alambre multifilar de cobre N°24, en primera instancia se añade un hilo de alambre aproximadamente de la misma longitud de las placas, dándonos como resultado práctico un porcentaje aproximado de 0,6 % de cobre, dicho porcentaje se irá incrementando sucesivamente puesto que se incrementó uno a uno los hilos de cobre.

Para calcular la cantidad de cobre referencial que será añadida en las demás probetas se utilizó el siguiente el método:

Datos:

$$m_{cs} = 33,4 \text{ g}$$

$$\%Cu = 0,6\%$$

$$m_{Cu} = \frac{\%Cu * m_{cs}}{100}$$

Ecuación 2.2. Regla de tres simple directa

Siendo:

$m_{cs}$ : masa del cordón de soldadura

$m_{Cu}$ : masa de cobre

$\%Cu$ : porcentaje referencial de cobre a incrementarse por probeta

$$m_{Cu} = \frac{0.6 * 33,4g}{100}$$

$$m_{Cu} = 0.2g$$

Se utilizó alambre de cobre multifilar N°24, con el cual se calculó la longitud de alambre necesaria para obtener la masa de cobre calculada.

Datos:

$$\rho = 8,96 \frac{g}{cm^3}$$

$$m_{Cu} = 0.2g$$

$$v = \frac{m}{\rho}$$

Ecuación 2.3. Volumen de un elemento relacionando masa y densidad

Siendo:

$\rho$ : densidad del cobre

$m_{Cu}$ : masa de cobre

$v$ : volumen de cobre

$$v = \frac{0.2 g}{8,96 \frac{g}{cm^3}}$$

$$v = 0,022 cm^3$$

Con este volumen y el área del alambre N°24, obtenemos la longitud de cobre necesario:

$$v = 0,022 cm^3$$

$$A = 2,05 \times 10^{-3} cm^2$$

$$l = \frac{v}{A}$$

Ecuación 2.4. Longitud de un cilindro relacionando volumen y área

Siendo:

$v$ : volumen de cobre

$A$ : área de cobre

$l$  = longitud de cobre

$$l = \frac{0,022 \text{ cm}^3}{2,05 \times 10^{-3} \text{ cm}^2}$$

$$l = 10,73 \text{ cm}$$

Siguiendo el mismo método se calculó la cantidad referencial de cobre para las demás probetas, según se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2.3. Porcentaje de cobre referencial en el cordón de soldadura en probetas de ensayos no destructivos.

Probeta	Porcentaje referencial de cobre (%)	Masa referencial de cobre (g)	Cantidad referencial de cobre (cm)	Cantidad real de cobre añadido (cm)
Probeta 5-7	0,6	0,2	10,73	11
Probeta 8-10	1,2	0,4	21,77	21
Probeta 3-9	1,8	0,6	32,66	32
Probeta 4-6	2,4	0,8	43,55	42
Probeta 11-12	3	1,0	54,44	56
Probeta 13-14	4	1,33	72,59	72
Probeta 15-16	5	1,66	90,73	90

(Fuente propia)

Una vez que se determinó la cantidad referencial de cobre a añadirse en el cordón de soldadura, se realizó el proceso de soldadura siguiendo el WPS (Anexo I). El proceso de adición de cobre se hizo después de la limpieza del pase de raíz, en donde se colocó los hilos de cobre de acuerdo a la longitud indicada en la tabla 2.3, para luego continuar con el segundo, tercero y cuarto pase de soldadura.



Figura 2.6. Soldadura de las probetas  
(Fuente propia)

Posteriormente se llevó a pesar cada una de las probetas y se realizó un cálculo posterior para determinar el porcentaje real de cobre que contiene cada cordón de soldadura de las probetas.

Datos:

$$m_p = 641,5 \text{ g}$$

$$m_{p5} = 303,6 \text{ g}$$

$$m_{p7} = 299,5 \text{ g}$$

$$A = 2,05 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$$

$$l = 11 \text{ cm}$$

$$\rho = 8,96 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m_c = m_p - (m_{p5} + m_{p7})$$

Ecuación 2.5. Diferencia de masas

Siendo:

$m_p$ : masa de la probeta soldada

$m_{p5}$ : masa de la placa 5

$m_{p7}$ : masa de la placa 7

$m_c$ : masa del cordón

$$m_c = 641,5 \text{ g} - (303,6 + 299,5) \text{ g}$$

$$m_c = 38,4 \text{ g}$$

$$v = A * l$$

Ecuación 2.6. Volumen de un cilindro

Siendo:

$v$ : volumen de cobre

$A$ : área de cobre

$l$ : longitud de cobre

$$v = 2,05 * 10^{-3} \text{ cm}^2 * 11 \text{ cm}$$

$$v = 0,0225 \text{ cm}^3$$

$$m_{Cu} = \rho * v$$

Ecuación 2.7. Masa de un elemento relacionando densidad y volumen

Siendo:

$\rho$ : densidad del cobre

$m_{Cu}$ : masa de cobre

$v$ : volumen de cobre

$$m_{Cu} = 8,96 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 0,0225 \text{ cm}^3$$

$$m_{Cu} = 0,202 \text{ g}$$

$$\%Cu_{real} = \frac{m_{Cu} * 100}{m_c}$$

Ecuación 2.8. Regla de tres simple directa para porcentaje

Siendo:

$m_{cs}$ : masa del cordón de soldadura

$m_{Cu}$ : masa de cobre

$\%Cu_{real}$ : porcentaje real de cobre por probeta

$$\%Cu = \frac{0,202 \text{ [g]} * 100}{38,4 \text{ [g]}}$$

$$\%Cu = 0,526 \%$$

Con el mismo método de cálculo se aplicó a las demás probetas obteniendo los siguientes resultados, tabulados en la siguiente tabla.

Tabla 2.4. Porcentaje de cobre real en el cordón de soldadura en probetas de ensayos no destructivos.

Probeta	Cantidad real de cobre añadido (cm)	Masa del cordón de soldadura (g)	Masa real de cobre añadida (g)	Porcentaje real de cobre (%)
Probeta 5-7	11	38,4	0,202	0,526
Probeta 8-10	21	37,8	0,3857	1,02
Probeta 3-9	32	38,1	0,5878	1,54
Probeta 4-6	42	39,3	0,7714	1,96
Probeta 11-12	56	39,1	1,028	2,63
Probeta 13-14	72	43,8	1,32	3,02
Probeta 15-16	90	37,1	1,65	4,46

(Fuente propia)

### 2.2.3. Elaboración de probetas para ensayos de tracción y doblado

Luego de realizar los ensayos no destructivos y determinar el porcentaje de cobre a partir del cual se presentan fisuras, se requiere comprobar la afectación en propiedades mecánicas específicamente en su esfuerzo a tracción y observar su comportamiento frente al ensayo de doblado, para lo cual es necesario realizar probetas para su posterior ensayo.

Se repitió el procedimiento del punto 2.2.2, con la única diferencia en las medidas del material base, especificado en la figura 2.7 y 2.8.

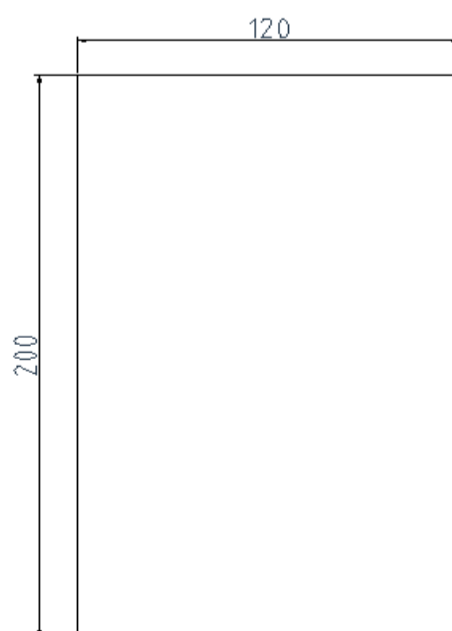


Figura 2.7. Medidas en milímetros de placas para soldar (Fuente propia)

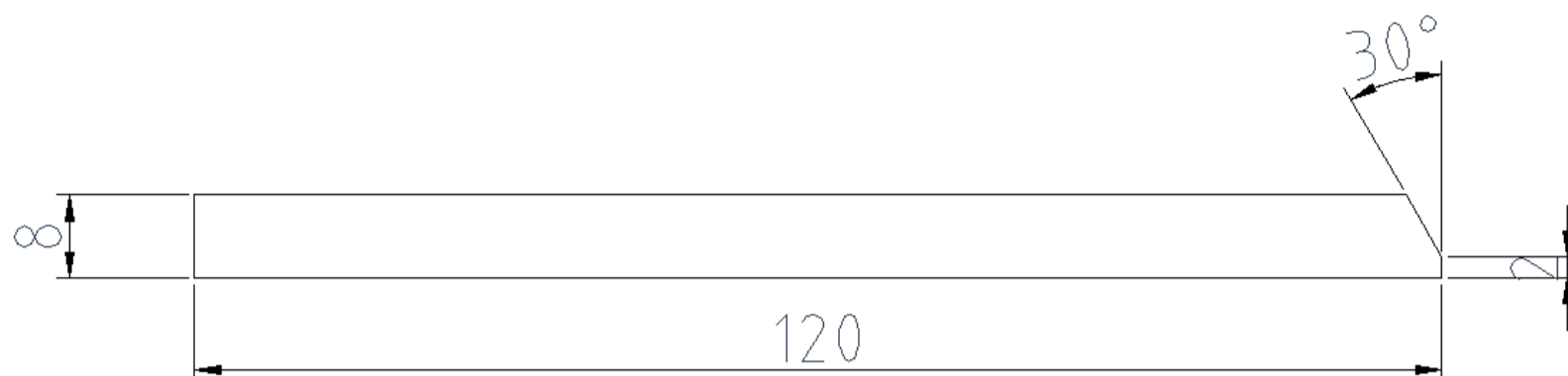


Figura 2.8. Medidas en milímetros de la junta a soldar  
(Fuente propia)

Las masas obtenidas de estas placas son los presentados en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Masas de placas para tracción y doblado.

Placas N°	Masa (g)
1	1470,8
2	1488,9
3	1479,0
4	1483,3

(Fuente propia)

Debido a que se tiene valores referenciales de masa de cobre que se debe añadir, se realiza los siguientes cálculos para estimar la cantidad de cobre a ser añadidas en estas nuevas probetas, en las cuales se pretende obtener un porcentaje de cobre mayor a 3,02 % debido a que con este porcentaje se reportó la presencia fisuras mediante ensayos no destructivos. Como estas probetas tienen el doble de longitud soldada que las probetas para ensayos no destructivos, se considera que la masa del cordón de soldadura se duplica y este valor será referencial.

Datos:

$$m_{CS} = 33,4 \text{ g}$$

$$m_{cST} = m_{CS} * 2$$

Ecuación 2.9. Proporcionalidad entre dos elementos

Siendo:

$m_{cST}$ : masa del cordón de soldadura para probetas de tracción

$m_{CS}$ : masa del cordón de soldadura en probetas de ensayos no destructivos



$$m_{csT} = 33,4 \text{ g} * 2$$

$$m_{csT} = 66,8 \text{ g}$$

Datos:

$$m_{csT} = 66,8 \text{ g}$$

$$\%Cu = 3,5\%$$

$$m_{Cu} = \frac{\%Cu * m_{csT}}{100}$$

Ecuación 2.10. Regla de tres simple directa

Siendo:

$m_{csT}$ : masa del cordón de soldadura para probetas de tracción

$m_{Cu}$ : masa de cobre

$\%Cu$ : porcentaje referencial de cobre por probeta

$$m_{Cu} = \frac{3,5 * 66,8 \text{ g}}{100}$$

$$m_{Cu} = 2,34 \text{ g}$$

Se procedió a calcular la longitud de alambre para cubrir dicha masa.

Datos:

$$\rho = 8,96 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m_{Cu} = 2,34 \text{ g}$$

$$v = \frac{m}{\rho}$$

Ecuación 2.11. Volumen de un elemento relacionando masa y densidad

Siendo:

$\rho$ : densidad del cobre

$m_{Cu}$ : masa de cobre

$v$ : volumen de cobre

$$A = 2,05 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$$

$$v = \frac{2,34 \text{ g}}{8,96 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$$

$$v = 0,2612 \text{ cm}^3$$

$$l = \frac{v}{A}$$

Ecuación 2.12. Longitud de un cilindro relacionando volumen y área

Siendo:

*v*: volumen de cobre

*A*: área de cobre

*l*: longitud de cobre

$$l = \frac{0,2612 \text{ cm}^3}{2,05 \times 10^{-3} \text{ cm}^2}$$

$$l = 127,41 \text{ cm}$$

Los valores de cobre referencial y real a ser añadidos se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Porcentaje de cobre referencial en el cordón de soldadura en probetas de tracción y doblado.

Probeta	Porcentaje referencial de cobre (%)	Masa referencial de cobre (g)	Cantidad referencial de cobre (cm)	Cantidad real de cobre añadido (cm)
Probeta 1-2	3,5	2,34	127,41	129,5
Probeta 3-4	4,8	3,20	174,56	175

(Fuente propia)

Después de realizar los cálculos pertinentes se obtiene los siguientes resultados indicados en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Porcentaje de cobre real en el cordón de soldadura en probetas de tracción y doblado

Probeta	Cantidad real de cobre añadido (cm)	Masa del cordón de soldadura (g)	Masa real de cobre añadida (g)	Porcentaje real de cobre (%)
Probeta 1-2	129,5	70,6	2,3786	3,37
Probeta 3-4	175	75,1	3,2144	4,28

(Fuente propia)

Luego con ayuda de una fresadora se obtiene 2 probetas de tracción y dos probetas para ensayos de doblado de la probeta 1 – 2 y 3 – 4 respectivamente.



Figura 2.9. Proceso de fresado en probetas de tracción  
(Fuente propia)

Para las medidas de las probetas de tracción se siguió de acuerdo a la norma ASTM E8, figura 2.10, en la cual indica que el cordón de soldadura debe de estar transversalmente.



Figura 2.10. Medidas en milímetros de la probeta de tracción  
(Fuente propia)

Y de la misma forma para las probetas de doblado se siguió la norma AWS D1.1, como se muestra en la figura 2.11.

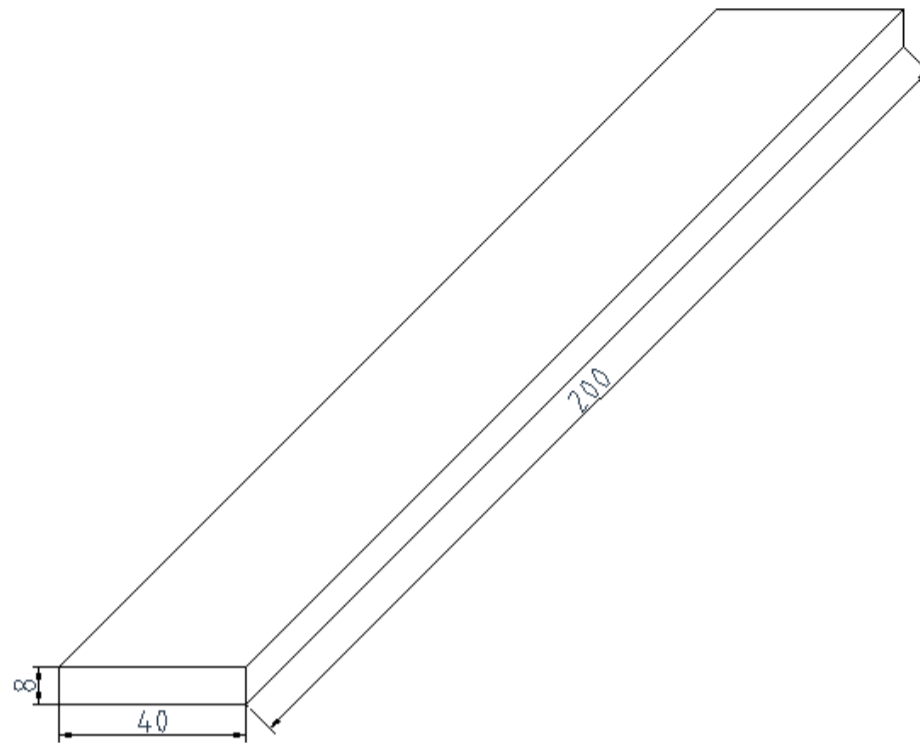


Figura 2.11. Medidas en milímetros de la probeta de doblado.  
(Fuente propia)

#### 2.2.4. Elaboración de probetas para metalografías

Para la elaboración de estas probetas se siguió el mismo procedimiento explicado en el punto 2.2.2, con el mismo material base y diferentes medidas, las cuales son las siguientes.

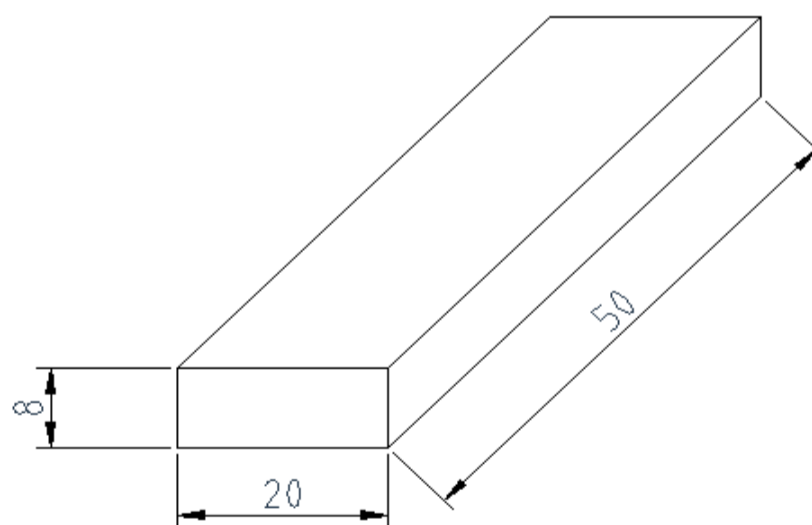


Figura 2.12. Medidas en milímetros de material base para probetas en metalografía.  
(Fuente propia)

Las masas de las placas para estas probetas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.8, Masas de placas para metalografías

Placa N°	Masa (g)
1	84,2
2	88,3
3	83,8
4	82,8

(Fuente propia)

De igual forma se trata de incorporar cobre en un porcentaje mayor al 3,02%, para lo cual se realizó los siguientes cálculos.

Se considera que la masa del cordón de soldadura es la cuarta parte de las probetas de ensayos no destructivos puesto que la longitud soldada es la cuarta parte, siendo este un valor referencial.

En este caso se desea alcanzar aproximadamente un 3.5% de cobre.

Datos:

$$m_{cs} = 33,4 \text{ g}$$

$$m_{csm} = \frac{m_{cs} * 2,5}{10}$$

Ecuación 2.13. Regla de tres simple directa

Siendo:

$m_{csm}$ : masa del cordón de soldadura para probetas de metalografías

$m_{cs}$ : masa del cordón de soldadura en probetas de ensayos no destructivos

$$m_{csm} = \frac{33,4 \text{ g} * 2,5}{10}$$

$$m_{csm} = 8,35 \text{ g}$$

Datos:

$$m_{csT} = 8,35 \text{ g}$$

$$\%Cu = 3,5\%$$

$$m_{Cu} = \frac{\%Cu * m_{csm}}{100}$$

Ecuación 2.14. Regla de tres simple directa

Siendo:

$m_{csm}$ : masa del cordón de soldadura para probetas de micrografía

$m_{Cu}$ : masa de cobre

*%Cu*: porcentaje referencial de cobre por probeta

$$m_{Cu} = \frac{3,5 * 8,35g}{100}$$
$$m_{Cu} = 0,292g$$

Se procedió a calcular la longitud de alambre para cubrir dicha masa.

Datos:

$$\rho = 8,96 \frac{g}{cm^3}$$

$$m_{Cu} = 0,292g$$

$$v = \frac{m}{\rho}$$

Ecuación 2.15. Volumen de un elemento relacionando masa y densidad

Siendo:

$\rho$ : densidad del cobre

$m_{Cu}$ : masa de cobre

$v$ : volumen de cobre

$$A = 2,05 \times 10^{-3} cm^2$$

$$v = \frac{0,292 g}{8,96 \frac{g}{cm^3}}$$

$$v = 0,0326 cm^3$$

$$l = \frac{v}{A}$$

Ecuación 2.16. Longitud de un cilindro relacionando volumen y área

Siendo:

$v$ : volumen de cobre

$A$ : área de cobre

$l$ : longitud de cobre

$$l = \frac{0,0326 cm^3}{2,05 \times 10^{-3} cm^2}$$

$$l = 15,91cm$$

Con los cálculos realizados se estiman las cantidades de cobre a añadirse presentados en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Porcentaje de cobre referencial en el cordón de soldadura en probetas de metalografía.

Probeta	Porcentaje referencial de cobre (%)	Masa referencial de cobre (g)	Cantidad referencial de cobre (cm)	Cantidad real de cobre añadido (cm)
Probeta 1-2	3,5	0,292	15,91	16
Probeta 3-4	4,8	0,4	21,82	22

(Fuente propia)

Una vez soldadas las probetas se realizaron los cálculos pertinentes para encontrar el porcentaje real de cobre, esto se indica en la siguiente tabla.

Tabla 2.10. Porcentaje de cobre real en el cordón de soldadura en probetas de metalografía.

Probeta	Cantidad real de cobre añadido (cm)	Masa del cordón de soldadura (g)	Masa real de cobre añadida (g)	Porcentaje real de cobre (%)
Probeta 1-2	16	9,2	0,2938	3,2
Probeta 3-4	22	9,4	0,404	4,29

(Fuente propia)

Luego se procedió a cortar el exceso de material base, y a cortar por la mitad del cordón para obtener dos caras para realizar la metalografía de cada probeta.

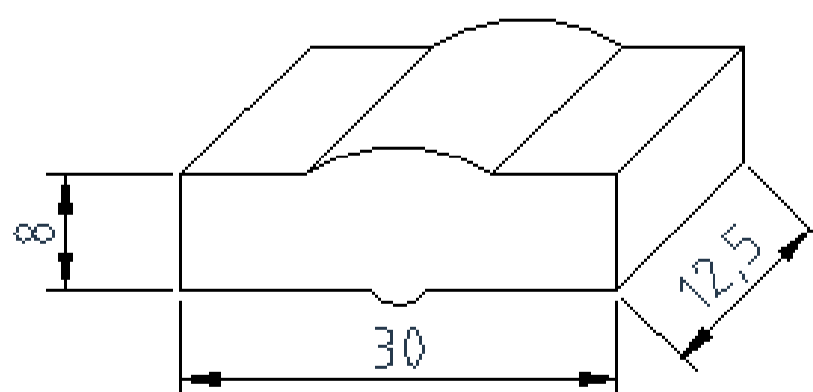


Figura 2.13. Medidas en milímetros de la probeta para metalografía  
(Fuente propia)

Una vez que se obtiene dichas probetas se procede a realizar un desbaste grueso en la cara a ser observada en la metalografía.



Figura 2.14. Proceso de desbaste grueso en probetas para metalografía  
(Fuente propia)

Luego se procedió a la limpieza con alcohol seguido del secado, para continuar con los procesos de desbaste fino y pulido, se requirió montar las probetas en moldes con resina para una mejor manipulación de las probetas.



Figura 2.15. Proceso de montaje con resina en probetas para metalografía  
(Fuente propia)

Se dejó reposar hasta su solidificación por aproximadamente una hora para continuar con el proceso de desbaste fino, en el cual se utilizó lijas de agua de 240, 320, 400, 600 y 1500.





Figura 2.16. Proceso desbaste fino en probetas para metalografía  
(Fuente propia)

De igual forma después se procede a un baño con alcohol y un secado posterior. Para el último proceso de pulido utilizamos una máquina pulidora FORCIMAT, la cual dio el acabado superficial adecuado en la superficie que se realizará la metalografía.



Figura 2.17. Proceso pulido en probetas para metalografía  
(Fuente propia)

### 3. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Con la obtención de las probetas necesarias, en este capítulo se detalla la realización de los ensayos destructivos y no destructivos.

#### 3.1. Ensayos no destructivos

##### 3.1.1. Radiografía industrial

El ensayo de radiografía se llevó a cabo en el laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela Politécnica Nacional basado en la norma ASTM E 94.

Para realizar la toma radiográfica es necesario hacer los cálculos para determinar el tiempo de exposición. Para esto se mide el espesor de las placas en el cordón de soldadura obteniendo los siguientes resultados, mostrados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Espesores de probetas de ensayos no destructivos

Probeta	Espesor (mm)
Probeta 5-7	9,5
Probeta 8-10	9,5
Probeta 3-9	9,5
Probeta 4-6	9,5
Probeta 11-12	9,5
Probeta 13-14	11
Probeta 15-16	11

(Fuente propia)

Con este dato se pasa al diagrama de exposición propio de cada equipo de rayos X, figura 3.1, el cual nos dará un valor de tiempo dependiendo el kilo voltaje y amperaje a ser aplicado.

Una recomendación por parte del laboratorio fue realizarlo con un kilo voltaje de 140Kv y un amperaje de 5mA para un mejor funcionamiento del equipo.

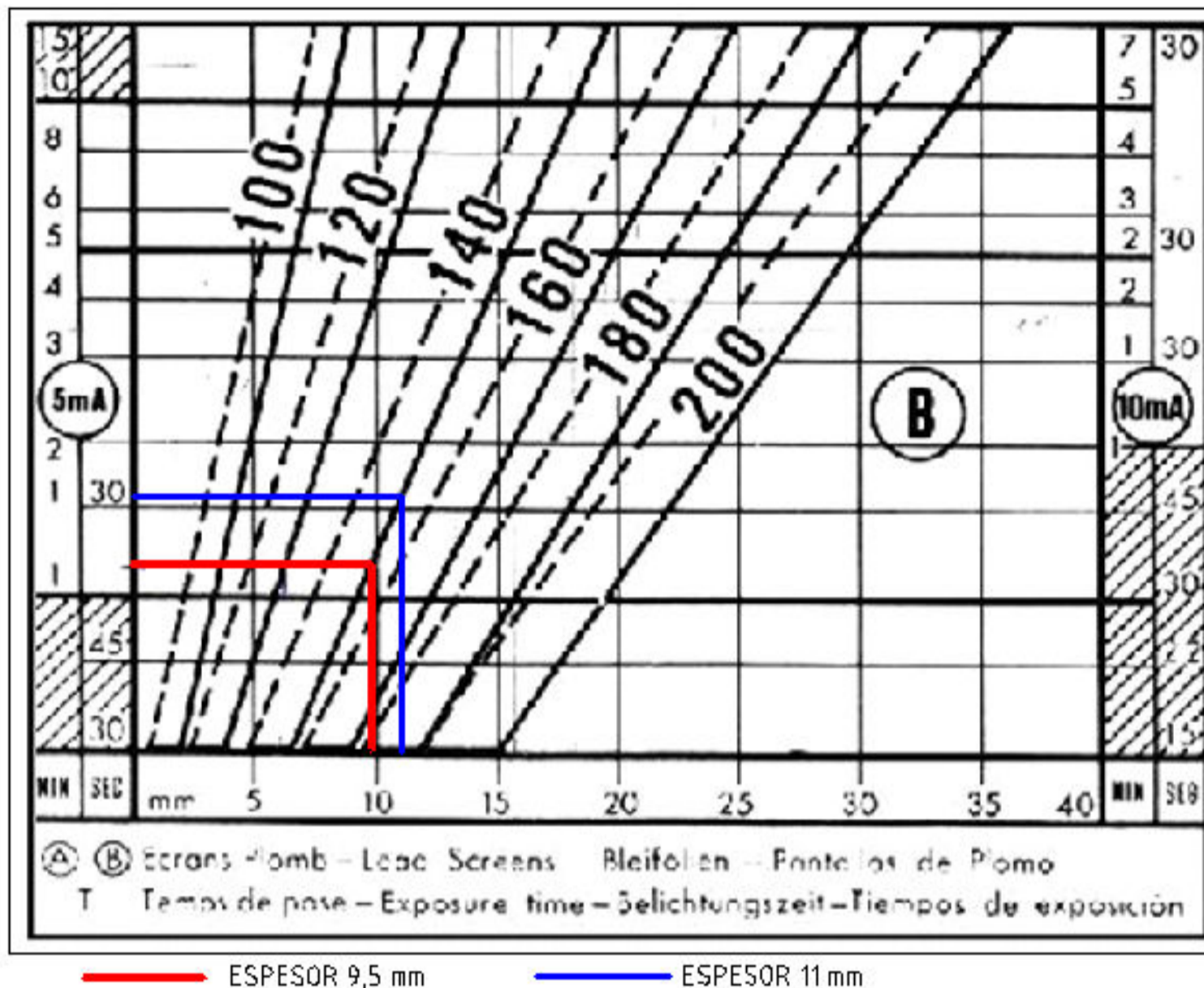


Figura 3.1. Diagrama de exposición del equipo de rayos x del laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Escuela Politécnica Nacional (Fuente propia)

Los resultados obtenidos son los siguientes.

Tabla 3.2. Tiempo de exposición de probetas según diagrama de exposición.

Probeta	Espesor (mm)	Tiempo de diagrama (s)
Probeta 5-7	9,5	70
Probeta 8-10	9,5	70
Probeta 3-9	9,5	70
Probeta 4-6	9,5	70
Probeta 11-12	9,5	70
Probeta 13-14	11	94
Probeta 15-16	11	94

(Fuente propia)

Debido a que el tiempo de exposición se ve afectado por la densidad, el tipo de película, la distancia y ciertos factores se corrigen el tiempo del diagrama con la siguiente fórmula.

$$t_{exp} = t_c * f_n * f_p * f_D * f_v$$

Ecuación 3.1. Tiempo de exposición corregido

Siendo:

$t_{exp}$  = tiempo de exposición

$t_c$  = tiempo de diagrama

$f_n$  = factor de corrección por densidad

$f_p$  = factor de corrección por película

$f_D$  = factor de corrección por distancia

$f_v$  = factor de corrección por varios

Para determinar dichos factores se ayuda de la siguiente tabla.

Tabla 3.3. Factores de corrección

DENSIDAD		PELÍCULA		DISTANCIA	
N = 1	T x 1	Gevaert	Structurix	35 cm (14")	Tx0.25
N = 1.5	T x 1.6	D10 Tx1	D7 Tx1	50 cm (20")	Tx0.5
N = 2	T x 2.2	D7 Tx4	D4 Tx3.7	70 cm (27.5")	Tx1
N = 2.5	T x 3	D4 Tx15	D2 Tx15	100 cm (40")	Tx2
		A	B	200 cm (80")	Tx8.8

(Guía de prácticas de ensayos no destructivos de la Escuela Politécnica Nacional)

Como se utilizó una película structurix de densidad 2 y la toma se realiza a una distancia de 50 cm se obtiene que:

$$t_c = 70 \text{ s}$$

$$f_n = 2.2$$

$$f_p = 1$$

$$f_D = 0,5$$

$$f_v = 1$$

$$t_{exp} = 70 \text{ s} * 2,2 * 1 * 0,5 * 1$$

$$t_{exp} = 77 \text{ s}$$

Este proceso se repite para todas las probetas obteniendo los siguientes resultados presentados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Tiempo de exposición de probetas

Probeta	Espesor (mm)	Tiempo de diagrama (s)	Tiempo real de exposición (s)
Probeta 5-7	9,5	70	77
Probeta 8-10	9,5	70	77
Probeta 3-9	9,5	70	77
Probeta 4-6	9,5	70	77
Probeta 11-12	9,5	70	77
Probeta 13-14	11	94	103
Probeta 15-16	11	94	103

(Fuente propia)

Luego de esto se procede a cortar la película de acuerdo a la longitud de la probeta, para este caso todas las películas fueron de 11 cm, se debe cortar evitando que entre en contacto con la luz para que no se vea la película.

Luego de tener cortada las 7 películas se procede a etiquetar las películas con letras de plomo para su posterior identificación basándose en la figura 3.2.

El indicador de calidad de imagen que se usó es del tipo II.

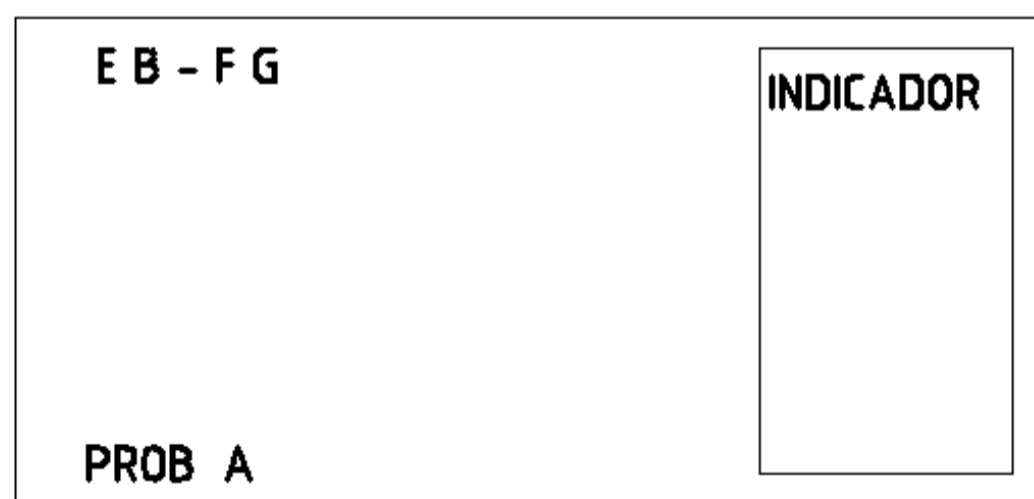


Figura 3.2. Esquema de etiquetado en radiografías.  
(Fuente propia)

Para una mayor facilidad en la identificación se nombró a las probetas como se indica en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Identificación de placas radiográficas

Probeta	Identificación
Probeta 5-7	PROB A
Probeta 8-10	PROB B
Probeta 3-9	PROB C
Probeta 4-6	PROB D
Probeta 11-12	PROB E
Probeta 13-14	PROB F
Probeta 15-16	PROB G

(Fuente propia)

Se recaldeó el equipo de rayos x y realizar las tomas radiográficas centrando la película y el indicador de lado de la fuente.



Figura 3.3. Toma de radiografía.  
(Fuente propia)

Una vez culminada la toma de radiografías se pasa a revelar las mismas en un cuarto oscuro siguiendo el siguiente proceso.

- Se retira las letras de identificación.
- Se prepara los químicos para revelado y fijado según las porciones que indique el fabricante.
- Se retira las películas de plomo que se encuentran como protección.
- Las películas se sumergen en el primer baño de revelado por 5 minutos, evitando que las películas estén sobrepuestas.
- Luego las películas se sumergen en un baño de parada el cual es agua por 2 minutos.
- Las películas deben sumergirse en un tercer baño el cual es de fijación por 10 minutos.
- Las películas pasan al último baño de parada por 5 minutos.
- Luego se procede a secar las películas por aproximadamente 30 minutos.

Una vez que estén secas las películas están listas para su interpretación en un negatoscopio.

### **3.1.2. Ultrasonido**

Una vez realizada la interpretación de películas radiográficas con el personal calificado (Nivel II y Nivel III), se determina la supuesta presencia de fisuras en las probetas 13 – 14 y 15 – 16, para lo cual se procede a realizar el ensayo de ultrasonido en estas probetas basado en las normas ASTM E 164 y ASTM E 2700, para ello se inició con la limpieza de la superficie de dichas probetas y así se pueda realizar un buen barrido a través de toda la soldadura.

Para dar inicio con el ensayo se procedió a verificar que el equipo de ultrasonido con arreglo de fases se encuentre calibrado, luego se aplicó acoplante en la superficie de la cara de la soldadura y posteriormente se hizo el barrido con el palpador, y se va observando en la pantalla del equipo cualquier tipo de discontinuidad que esté presente en la soldadura.

De igual forma se aplicó acoplante en la superficie de la raíz de la soldadura y se realizó el barrido para detectar cualquier tipo de discontinuidad presente en las dos probetas.

Una vez culminado el ensayo se procede a la limpieza del acoplante en la superficie de las probetas.

Todo este proceso lo realizó personal calificado como Nivel II en ultrasonido.



Figura 3.4. Ensayo de ultrasonido a probeta 13 – 14  
(Fuente propia)

### 3.1.3. Partículas magnéticas

Al no tener la certeza de que las indicaciones encontradas por ultrasonido sean necesariamente fisuras, se procedió a realizar un ensayo que nos confirme la presencia de fisuras de manera visual. El ensayo que tiene una mayor sensibilidad para detectar fisuras en soldaduras es el de partículas magnéticas basado en las normas ASTM E-709 y ASTM-1444.

Se realizó el ensayo sin ningún tipo de preparación de la junta, pero no se encontró nada como se presumía, debido a que con ultrasonido se descubrió que las indicaciones se encontraban a 4.39mm y 4.58mm debajo de la superficie, y el ensayo de partículas magnéticas tiene un alcance máximo de hasta 3mm en defectos subsuperficiales, es por ello que se procedió a desbastar el exceso de penetración del pase de raíz y además se realizó un canal en el pase de raíz de unos 2mm de profundidad para poder observar las indicaciones detectadas por ultrasonido, posteriormente se realizó el ensayo y se observó con excelente claridad las fisuras.

Todo los ensayos de partículas los realizó personal calificado en este ensayo (NIVEL II EN MT), la magnetización se produjo con un yugo electromagnético con corriente continua debido a que da más penetración para este tipo de discontinuidades subsuperficiales y la



movilidad que le da a las partículas. El tipo de partículas usadas fueron húmedas fluorescentes las cuales se aplicaron en el área de inspección durante la aplicación de la corriente magnetizante y la interpretación de los resultados se realizó en una área semioscura y bajo luz negra (ultravioleta) para mejor visualización de las discontinuidades.

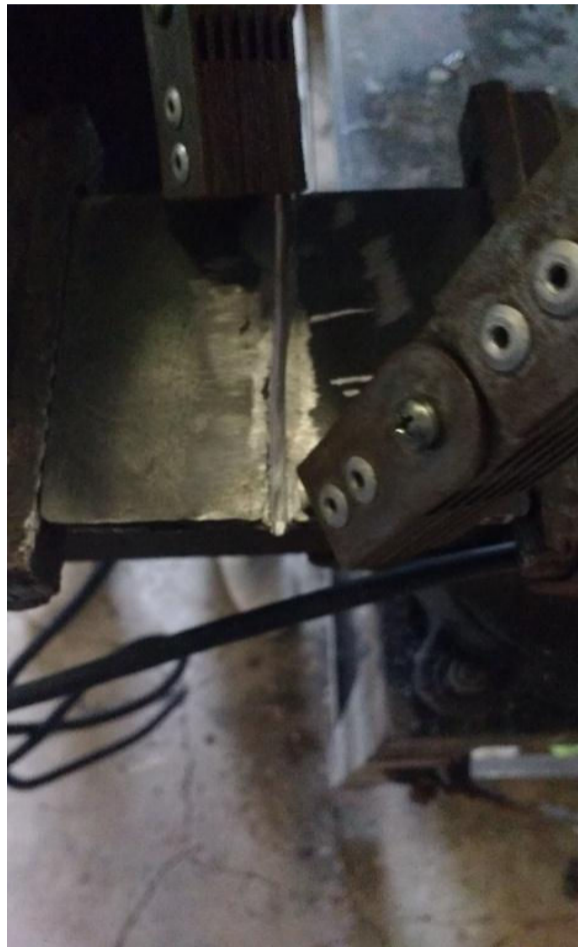


Figura 3.5. Ensayo de partículas magnéticas de probeta 13 - 14  
(Fuente propia)

#### **3.1.4. Líquidos penetrantes**

Este ensayo se lo realizó como medio de comprobación de la existencia de fisuras encontradas con un método adicional.

Para el procedimiento de este ensayo, se utilizó líquidos penetrantes coloreados removibles con solvente usando el método tipo II, método C (ASTM E-165).

El penetrante se aplicó mediante spray (aerosol) durante un tiempo de penetración mínimo de 7 minutos.



Figura 3.6. Aplicación de líquido penetrante a probeta 13 – 14  
(Fuente propia)

Luego de este tiempo se removi6 el exceso del penetrante de tal manera que 6nicamente quede aquel que se halla retenido en las discontinuidades, se us6 trapos que no dejan hilos o pelusas, y se repiti6 esta acci6n hasta retirar todos los residuos de penetrante, luego con un trapo humedecido con solvente se procedi6 a eliminar totalmente cualquier residuo de penetrante.



Figura 3.7. Remoci6n de exceso de liquido penetrante en probeta 13 – 14  
(Fuente propia)

Posteriormente se dej6 secar las probetas durante 2 minutos de forma natural.

El revelador se aplicó mediante spray y fue del tipo húmedo acuoso, agitando rigurosamente previo su aplicación y formando una capa fina y uniforme, el tiempo de revelado es mínimo 10 minutos hasta que aparezcan todas las discontinuidades existentes.



Figura 3.8. Aplicación de liquido revelador en probeta 13 - 14.  
(Fuente propia)

## 3.2. Ensayos destructivos

### 3.2.1. Ensayo de tracción

Para el ensayo de tracción se tiene cuatro probetas, dos probetas con un porcentaje de cobre de 3,37% y dos probetas con un porcentaje de cobre de 4,28%.

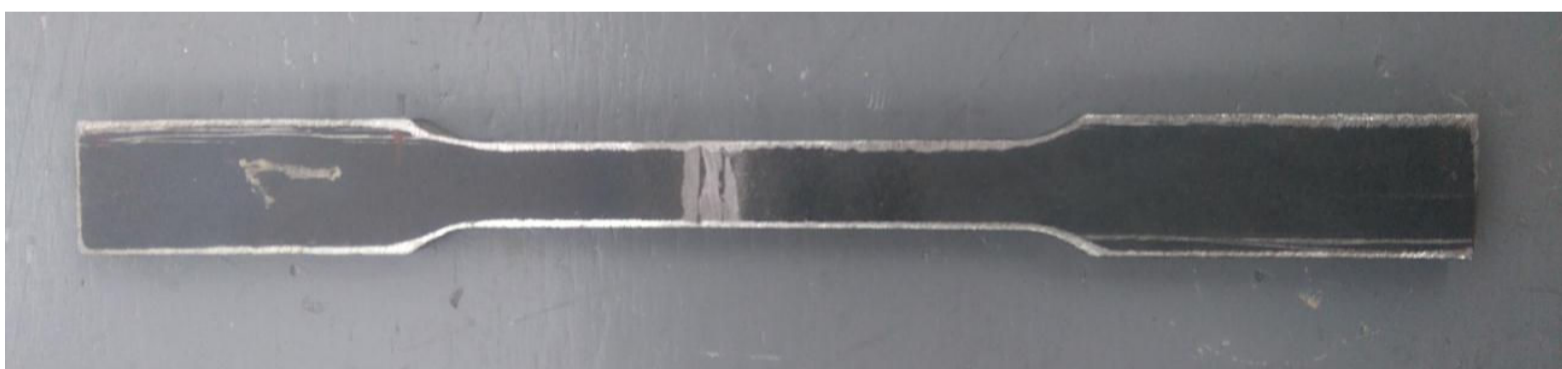


Figura 3.9. Probetas de tracción con 3,37% de cobre.  
(Fuente propia)

Para la realización del ensayo se siguió la norma ASTM E8, en una máquina universal de ensayos, como se muestra en la figura 3.10.



Figura 3.10. Ensayo de tracción en maquina universal de ensayos.  
(Fuente propia)

### 3.2.2. Ensayo de doblado

Para la realización de los ensayos de doblado, se debe tener presente la norma bajo la cual se soldó, que fue la AWS D1.1, por lo cual el ensayo de doblado debe ser bajo la misma norma.

Para este ensayo se tiene una probeta de cara y una de raíz en un porcentaje de 3,37 % y 4,28% de cobre respectivamente.

El ensayo se realizó en el equipo Tinius Onil, mostrado en la figura 3.12.



Figura 3.11. Probetas para el ensayo de doblado.  
(Fuente propia)



Figura 3.12. Ensayo de doblado  
(Fuente propia)

### 3.2.3. Micrografía

Para la realización de micrografías se tiene 4 superficies, las cuales se identifican en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Identificación de probetas para micrografía y macrografía

Probeta	Porcentaje de cobre (%)
1A	3,2
1B	3,2
3A	4,29
3B	4,29

(Fuente propia)



Figura 3.13. Probetas para micrografía.  
(Fuente propia)

Cada una de las superficies fue observada a través de un microscopio, figura 3.14, con aumentos de 50X y 100X con el objetivo de verificar la presencia de fisuras y cuantificar la longitud de las mismas.

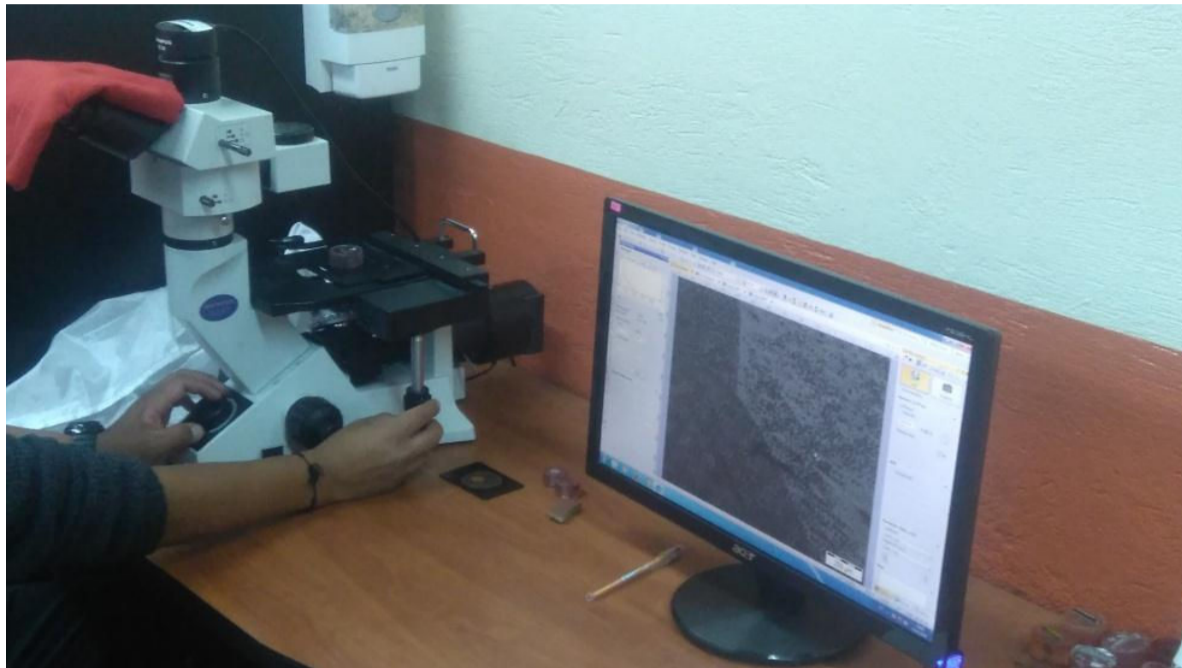


Figura 3.14. Ensayo de micrografía.  
(Fuente propia)

Para observar las secciones con cobre es necesario realizar un ataque químico con cloruro férrico, y analizar la presencia del cobre en las fisuras presentes.

#### 3.2.4. Macrografía

Una vez que las 4 probetas reaccionan al cloruro férrico como se observa en la figura 3.15, se procedió con la limpieza de las mismas.



Figura 3.15. Probetas con ataque químico con cloruro férrico.  
(Fuente propia)

En el ensayo de macrografías fueron hechas con aumento de 5X y 6,3X con el principal objetivo de observar el área del cordón de soldadura y las superficies con contenido de

cobre, para poder cuantificar el porcentaje de cobre por medio de su superficie en el cordón de soldadura; para corroborar el porcentaje de cobre calculado por medio de masas.



Figura 3.16. Equipo para la realización de macrografías.  
(Fuente propia)

Todos estos ensayos fueron realizados por personal calificado, para asegurar la correcta realización de dichos ensayos, una vez obtenidos los resultados se procederá a la interpretación y análisis de resultados en el siguiente capítulo.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. Análisis de resultados de ensayos no destructivos

#### 4.1.1. Análisis de resultados de radiografía industrial

Para la interpretación de las películas radiográficas se realizó con la ayuda de un negoscopio y el criterio del personal calificado nivel II y nivel III en radiografía.

- Probeta 5 – 7 (PROB A)

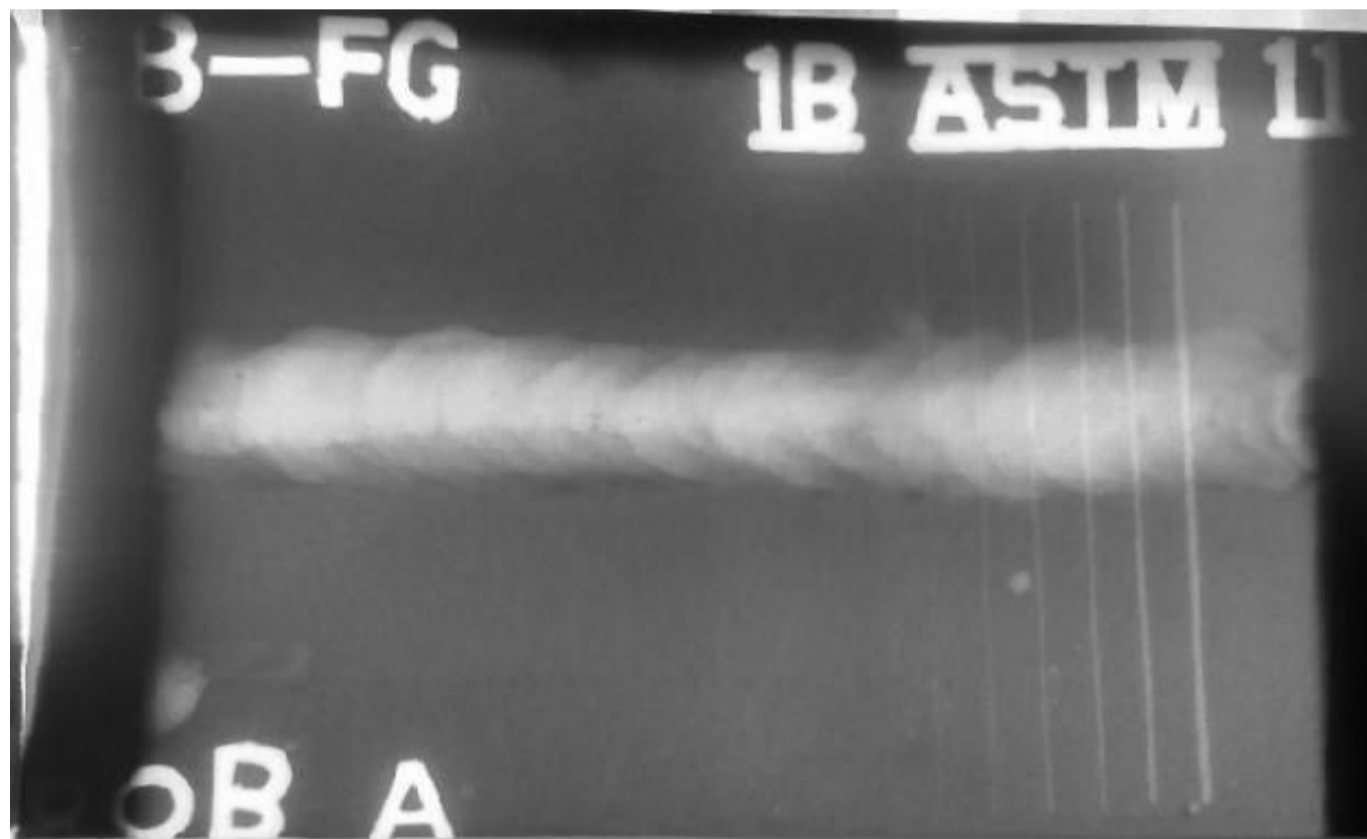


Figura 4.1. Radiografía de probeta 5 – 7  
(Fuente propia)

Esta probeta contiene un 0,526% de cobre adicionado durante la soldadura, en la película radiográfica no se observa discontinuidades en el cordón de soldadura.



- Probeta 8 – 10 (PROB B)

Probeta con 1,02% de cobre, en la cual se observa la presencia de inclusiones de escoria.

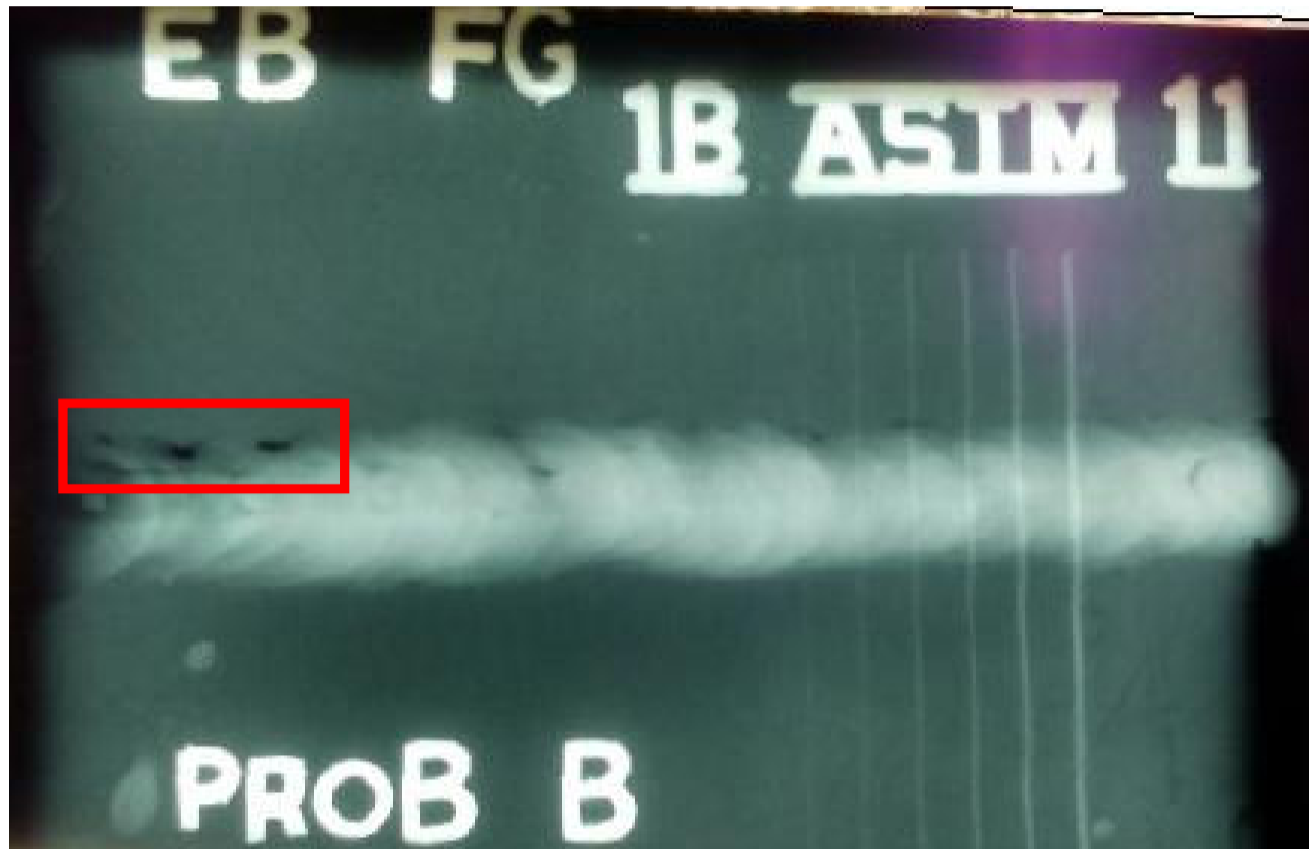


Figura 4.2. Radiografía de probeta 8 – 10  
(Fuente propia)

- Probeta 3 – 9 (PROB C)

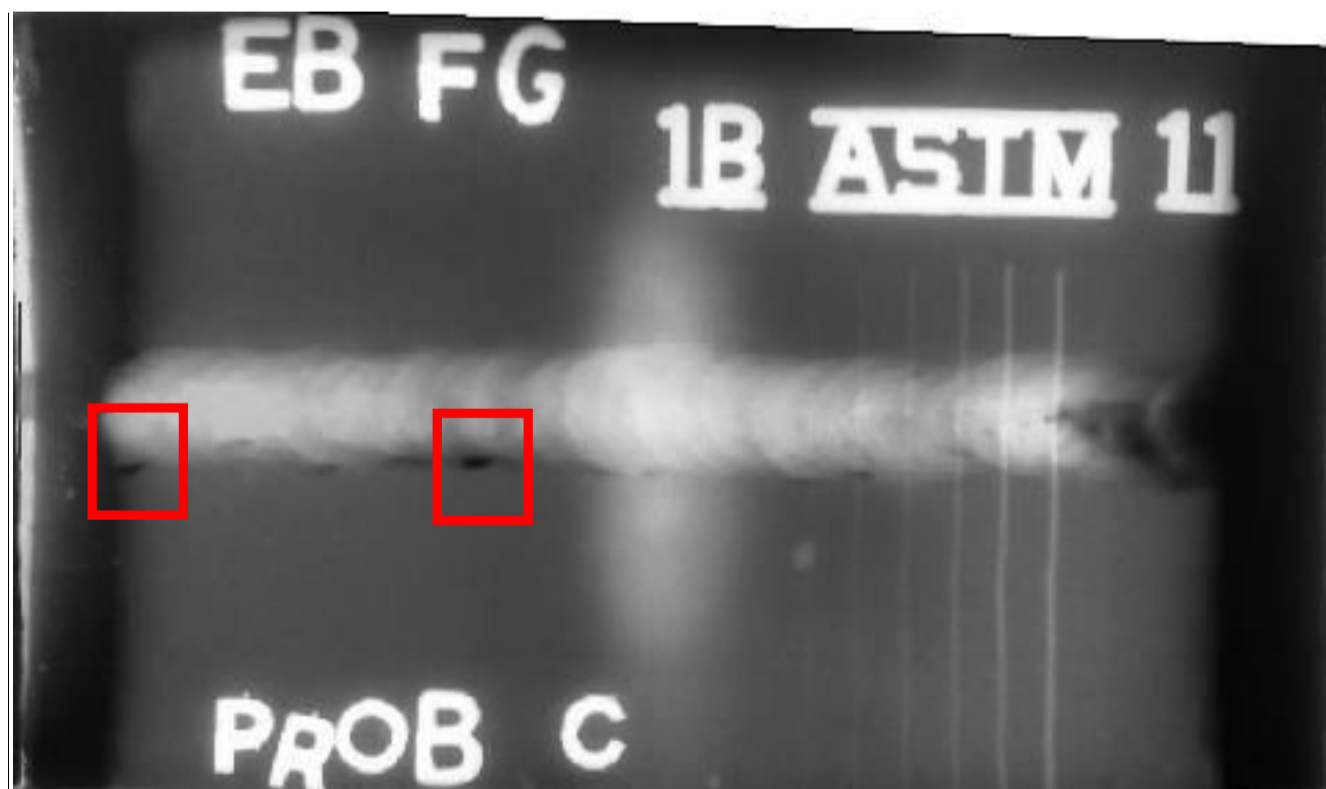


Figura 4.3. Radiografía de probeta 3 – 9  
(Fuente propia)

Probeta con 1,54% de cobre, en esta probeta se vuelve a observar la presencia de inclusiones de escoria.

- Probeta 4 – 6 (PROB D)

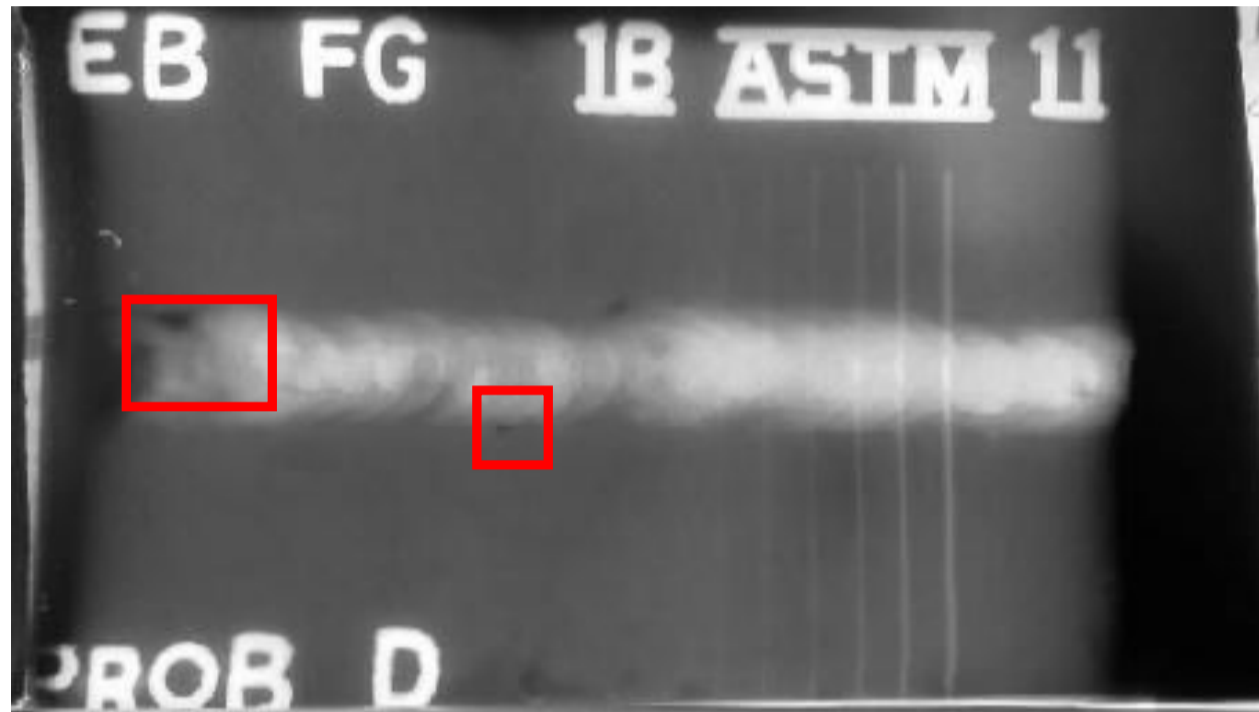


Figura 4.4. Radiografía de probeta 4 – 6  
(Fuente propia)

Probeta con 1,96% de cobre, se sigue observando en la película radiográfica la presencia de inclusiones de escoria.

- Probeta 11 – 12 (PROB E)

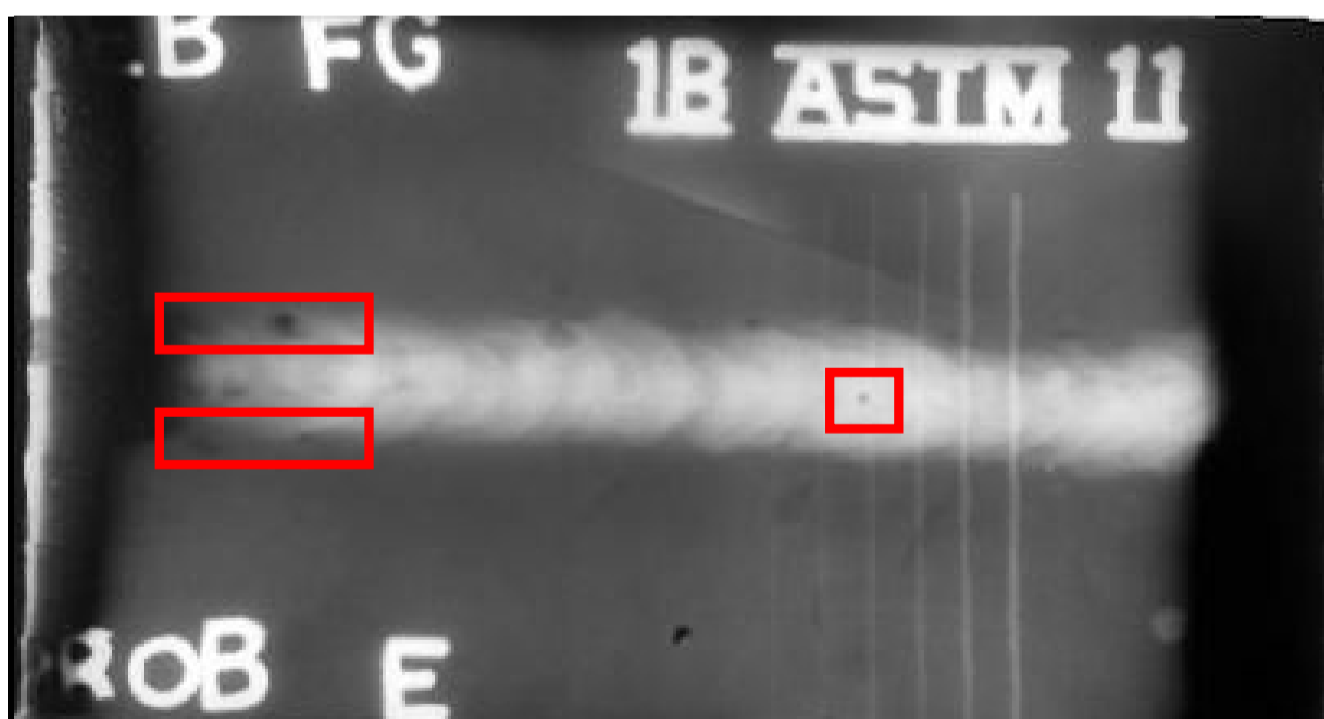


Figura 4.5. Radiografía de probeta 11 – 12  
(Fuente propia)

Probeta con 2,63% de cobre, se observa la presencia de inclusiones de escoria y además la presencia de un poro en el cordón de soldadura.

- Probeta 13 – 14 (PROB F)

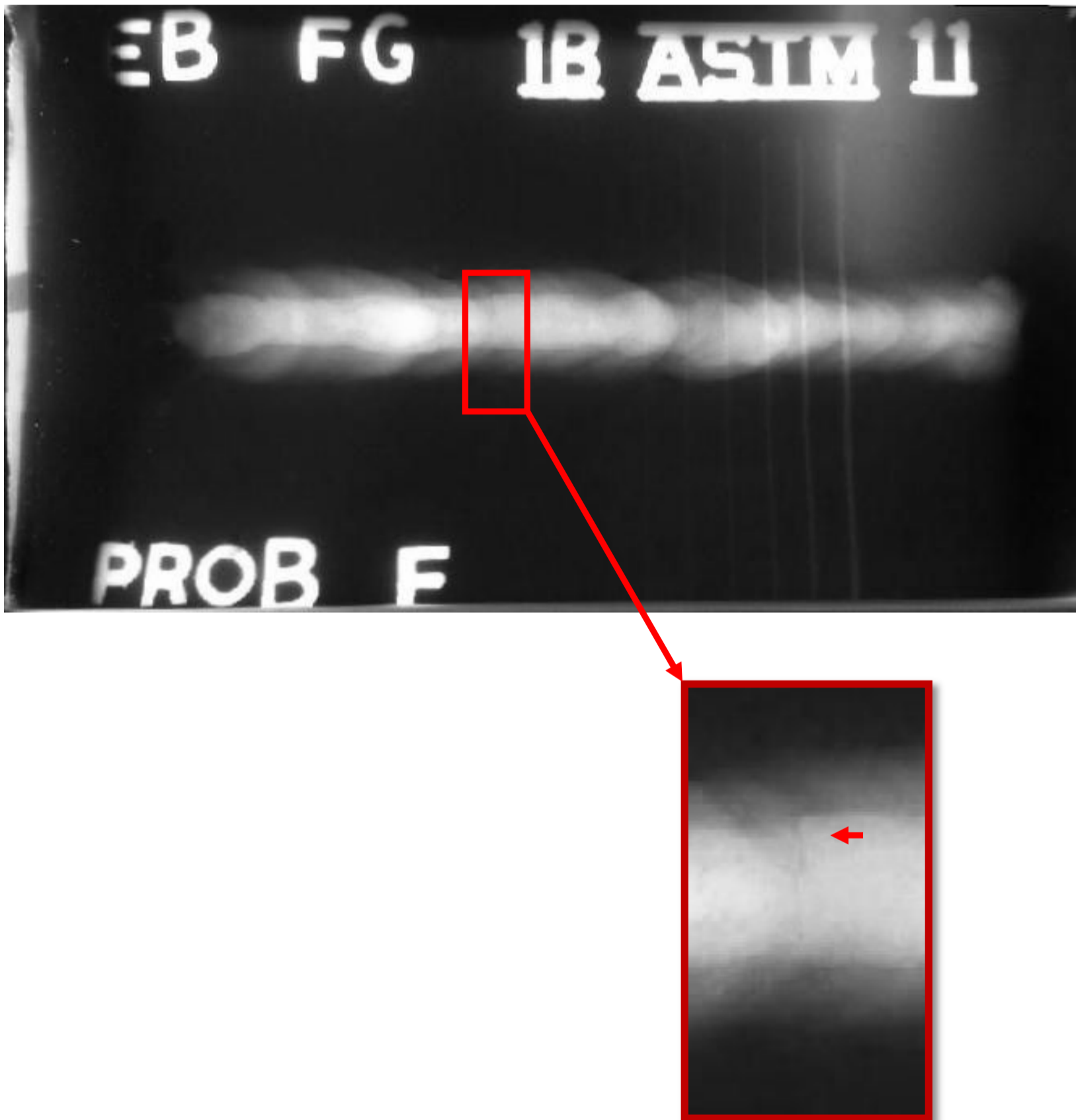


Figura 4.6. Radiografía de probeta 13 – 14  
(Fuente propia)

Probeta con 3,02% de cobre, se observa la supuesta presencia de una fisura transversal en el cordón de soldadura.

- Probeta 15 – 16 (PROB G)

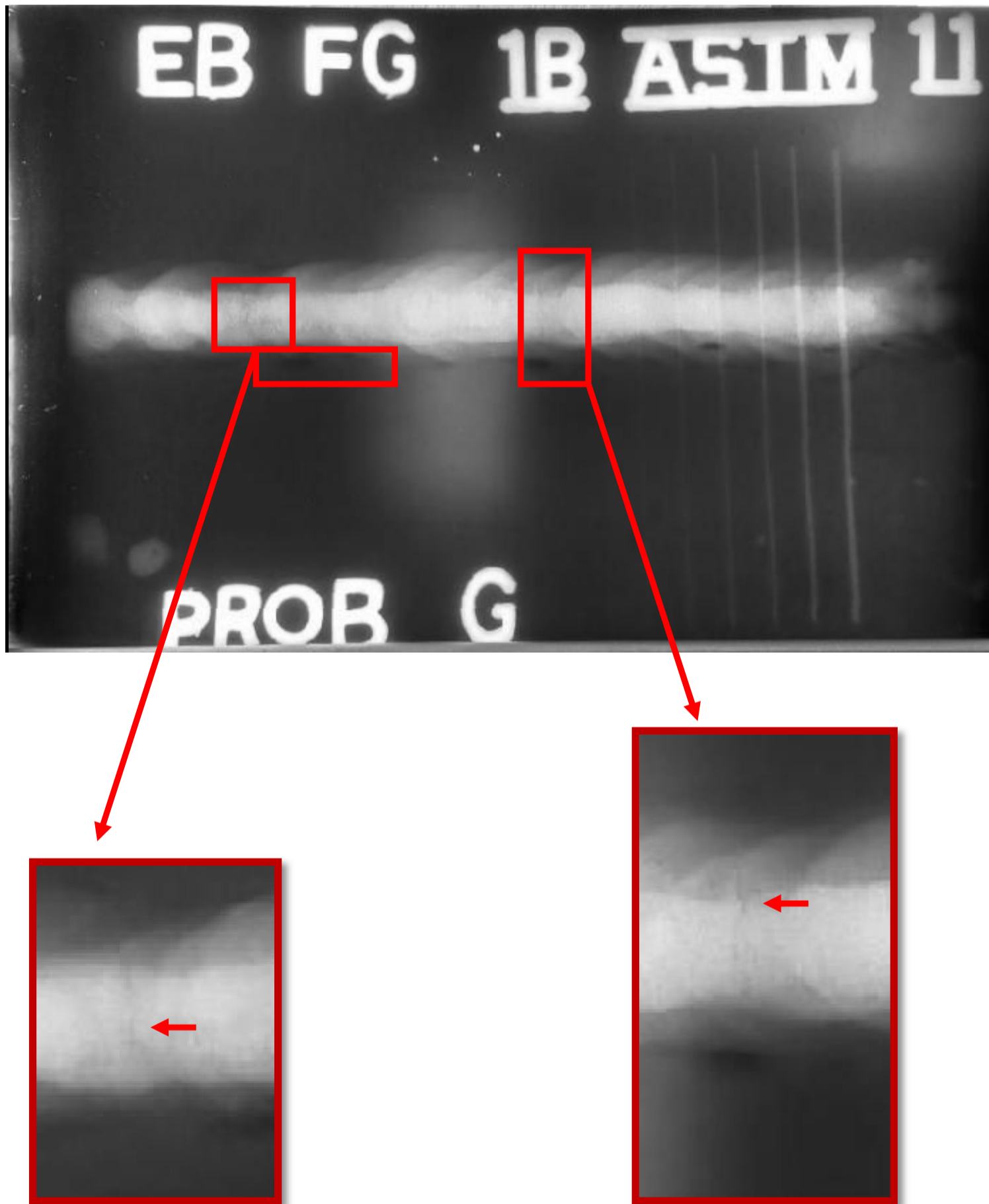


Figura 4.7. Radiografía de probeta 15 – 16  
(Fuente propia)

Probeta con 4,46% de cobre, se observa la presencia de inclusiones de escoria y posibles fisuras transversales en el cordón de soldadura.

Tabla 4.1 Resultados de placas radiográficas

Probeta	Presencia de indicaciones	Tipo de indicaciones
Probeta A	No	
Probeta B	Si	Inclusiones de escoria
Probeta C	Si	Inclusiones de escoria
Probeta D	Si	Inclusiones de escoria
Probeta E	Si	Inclusiones de escoria y poros
Probeta F	Si	Fisura transversal
Probeta G	Si	Inclusiones de escoria y fisuras transversales

(Fuente propia)

#### 4.1.2. Análisis de resultados de ultrasonido

Una vez realizado el ensayo mediante el equipo de arreglo de fases en las probetas que se encontraron las presuntas fisuras mediante radiografía, se procedió a realizar la interpretación.

En la probeta F se encontró un defecto a 4.39 mm debajo de la superficie por el lado del pase de raíz, el cual no es necesariamente una fisura.

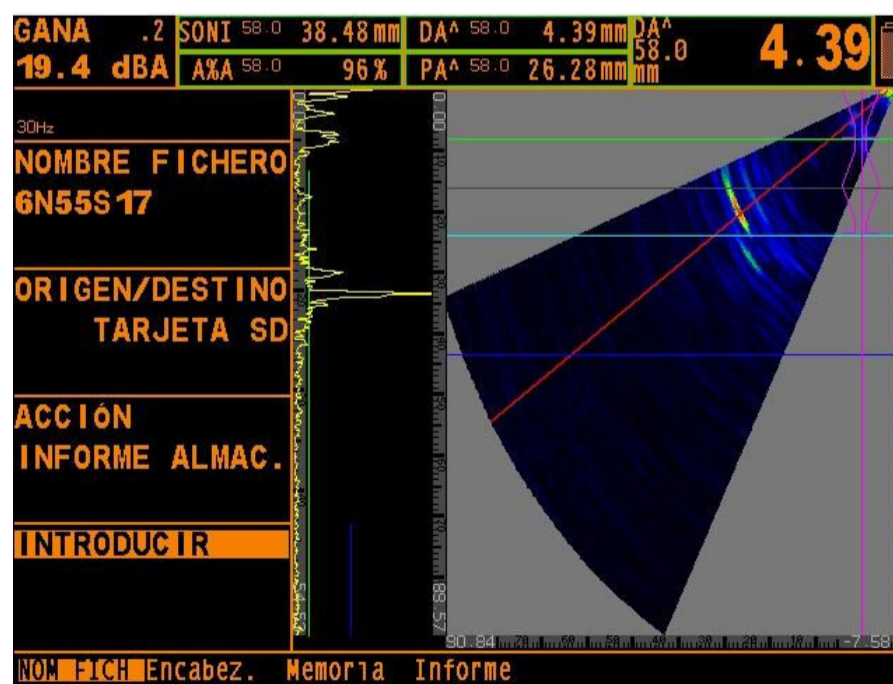


Figura 4.8. Imagen por arreglo de fases de la probeta 13 – 14  
(Fuente propia)

Al igual que la probeta anterior se hizo la interpretación de la probeta G, en la cual se registró un defecto a 4.58mm bajo la superficie por el lado del pase de raíz. No se puede conocer el tipo de defecto, solo la presencia del mismo como el caso anterior.

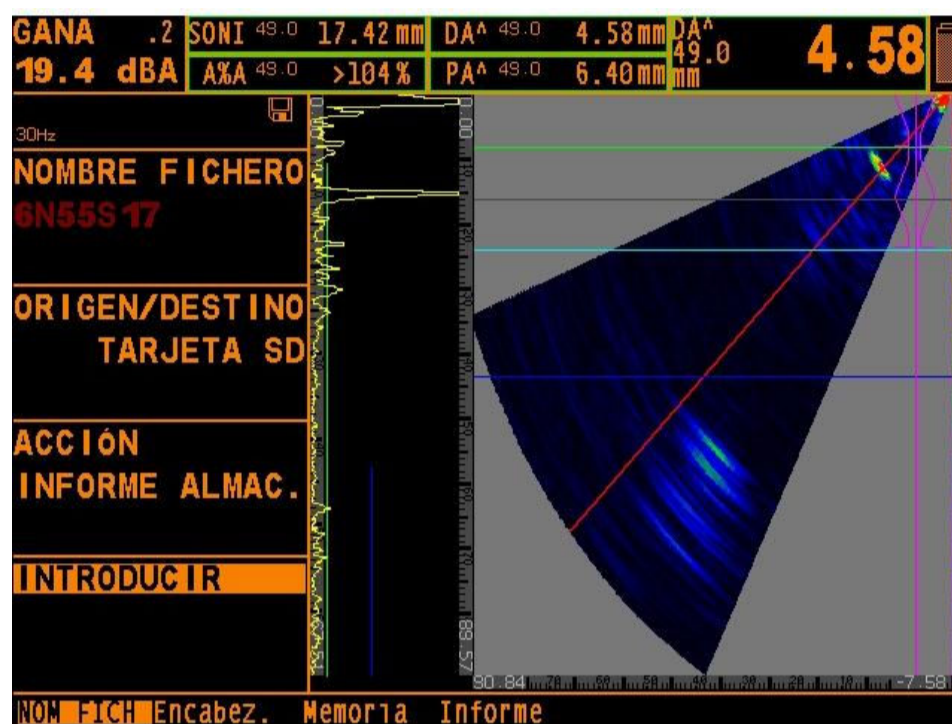


Figura 4.9. Imagen por arreglo de fases de la probeta 15 – 16  
(Fuente propia)

Tabla 4.2 Resultados de ultrasonido

Probeta	Presencia de indicaciones
Probeta F	Si
Probeta G	Si

(Fuente propia)

### 4.1.3. Análisis de resultados de partículas magnéticas

Una vez realizado el ensayo de partículas magnéticas se realizó la interpretación en un cuarto semioscuro con luz negra (ultravioleta), en el cual se obtuvieron los siguientes resultados.

Como se puede observar en las figuras 4.10 y 4.11, el ensayo de partículas magnéticas fue un método más sensible para visualizar las fisuras, las cuales fueron detectadas por radiografía en el punto 4.1.1 y en el punto 4.1.2 por ultrasonido, pero sin saber el tipo de defecto presente.

Se observa fisuras transversales a lo largo de todo el cordón de soldadura, lo cual concuerda con la adición de cobre que fue en la longitud de soldadura.

Las fisuras que se observan claramente en la figura 4.10, son las más relevantes quedando la posibilidad de la existencia de microfisuras.

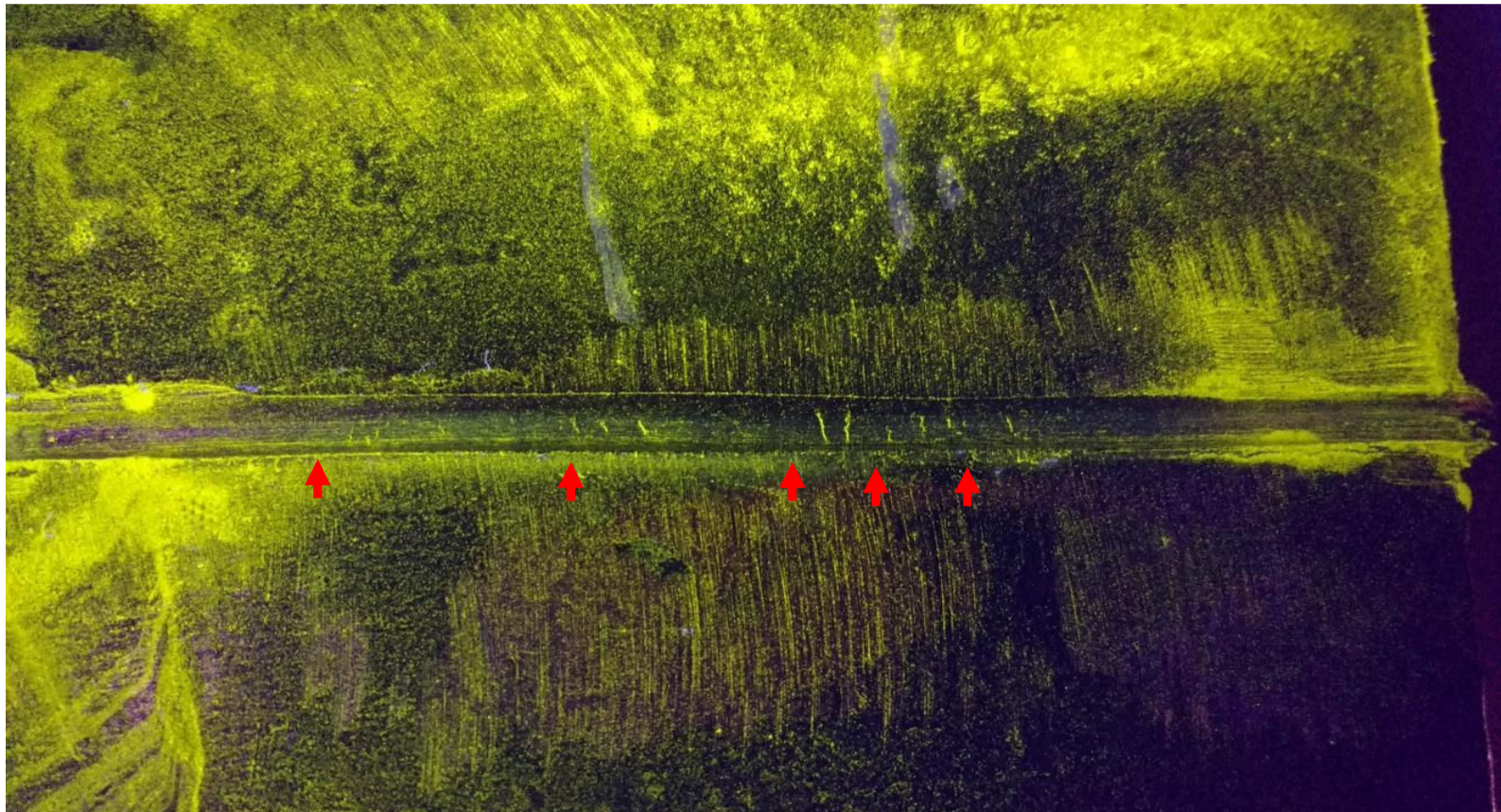


Figura 4.10. Fisuras encontradas por partículas magnéticas en la probeta 13 – 14  
(Fuente propia)

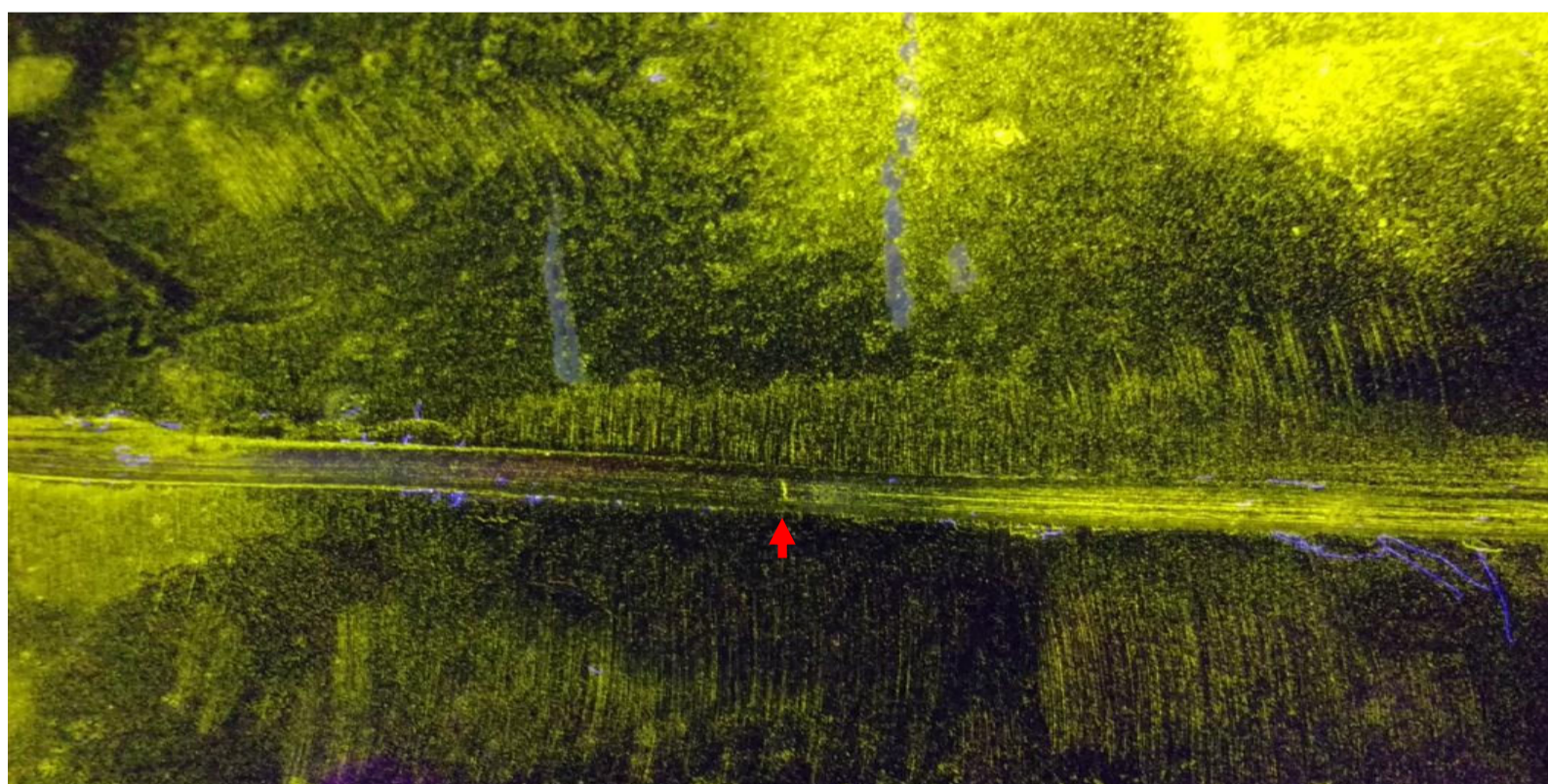


Figura 4.11. Fisuras encontradas por partículas magnéticas en la probeta 15 – 16  
(Fuente propia)

Tabla 4.3. Resultados de partículas magnéticas

Probeta	Presencia de indicaciones	Tipo de indicaciones
Probeta F	Si	Fisuras transversales
Probeta G	Si	Fisuras transversales

(Fuente propia)

#### 4.1.4. Análisis de resultados de líquidos penetrantes

El análisis de este ensayo se lo realizó inmediatamente después de aplicar el revelador.

- Probeta 13 – 14

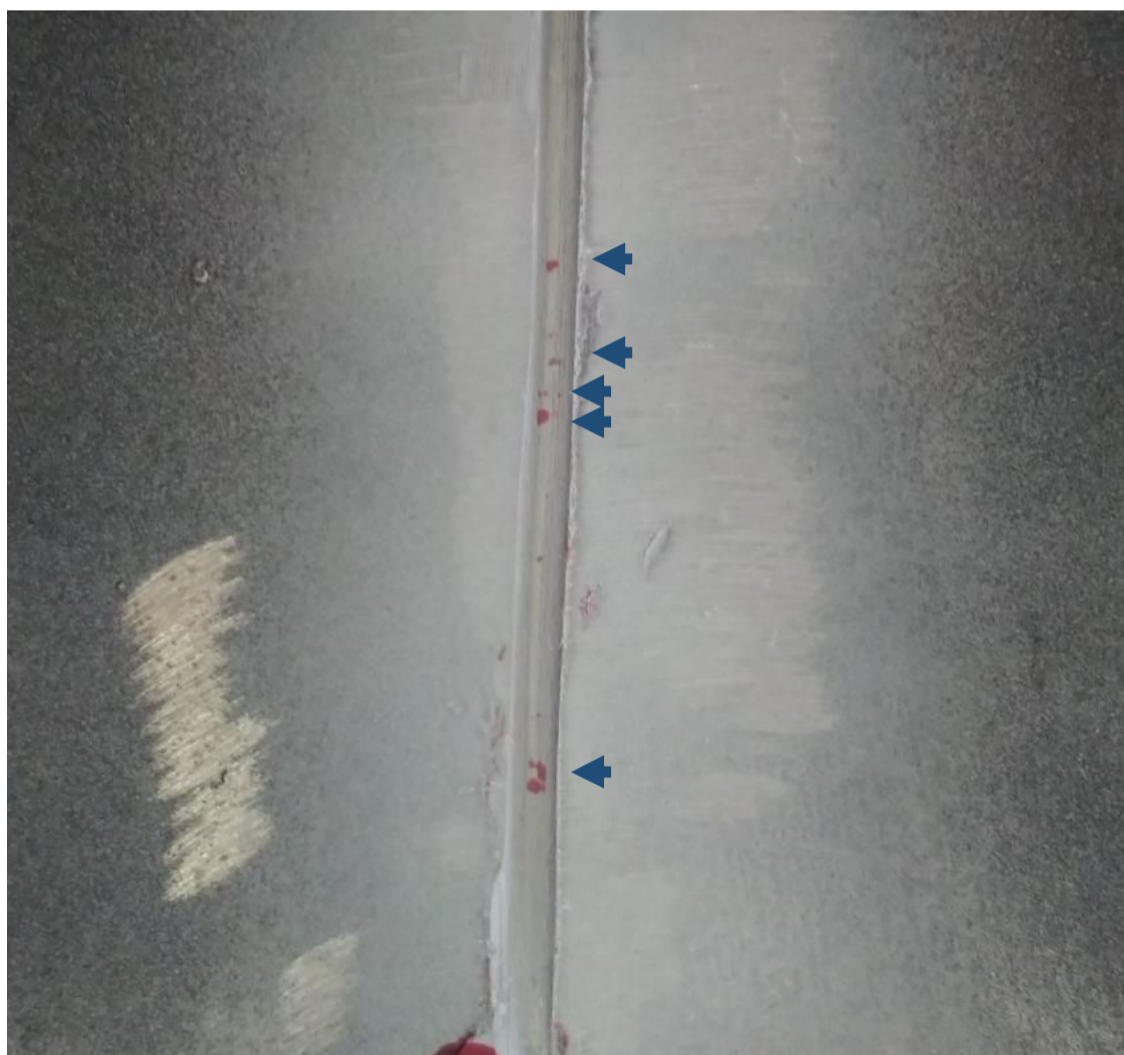


Figura 4.12. Líquidos penetrantes en probeta 13 – 14  
(Fuente propia)

Se observa la presencia de cinco indicaciones, con la forma de fisuras transversales, y en los mismos lugares en que se detectó las fisuras por medio de partículas magnéticas.



- Probeta 15 – 16



Figura 4.13. Líquidos penetrantes en probeta 15 – 16  
(Fuente propia)

Se observa la presencia de varias indicaciones, entre ellas se puede observar una fisura en medio del cordón de soldadura.

Tabla 4.4. Resultados de líquidos penetrantes

Probeta	Presencia de indicaciones	Tipo de indicaciones
Probeta F	Si	Fisuras transversales
Probeta G	Si	Fisuras transversales

(Fuente propia)

## 4.2. Análisis de ensayos destructivos

### 4.2.1. Análisis de ensayos de tracción

Una vez realizado el ensayo, y comparándole con la resistencia mínima a la tracción del material base (acero ASTM A-36) que es 400 MPa (58 ksi), se pueden ver los resultados obtenidos en la tabla 4.3.

Se observa en la tabla 4.3 que a pesar de fallar en la junta soldada, la resistencia a la tracción presentada por las probetas es aceptable según la norma AWS D1.1.

Tabla 4.5. Resistencia a la tracción obtenida en el ensayo

Id.	Ancho promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Observaciones	Calificación
	mm	mm	lbf	N	ksi	Mpa		
T1-A	12,37	8,00	9.551	42.487	62,27	429,33	FJS	Aprueba
T1-B	12,55	7,98	9747	43358	62,79	432,94	FJS	Aprueba
T2-A	12,73	7,97	9555	42505	60,76	418,94	FJS	Aprueba
T2-B	12,60	7,98	9462	42088	60,71	418,59	FJS	Aprueba

Nota: FJS: Falla en la junta soldada (Anexo III)

Sin embargo al comparar el material base acero ASTM A-36 con las probetas que contienen 3,37 % y 4,28% de cobre, es evidente la disminución de la resistencia a la tracción, como se muestra en la tabla 4.4.

Tabla 4.6. Comparación de la resistencia a la tracción

Probeta	Porcentaje de cobre	Promedio de resistencia a la tracción		Porcentaje de disminución de resistencia a la tracción
	%	ksi	Mpa	%
Material base (Acero A-36)	--	63,5	437,81	
T1	3,37	62,53	431,13	1,53
T2	4,28	60,73	418,76	4,35

(Fuente propia)

La tendencia de la disminución de la resistencia a la tracción conforme aumenta el porcentaje de cobre en el acero se puede observar en la figura 4.13.

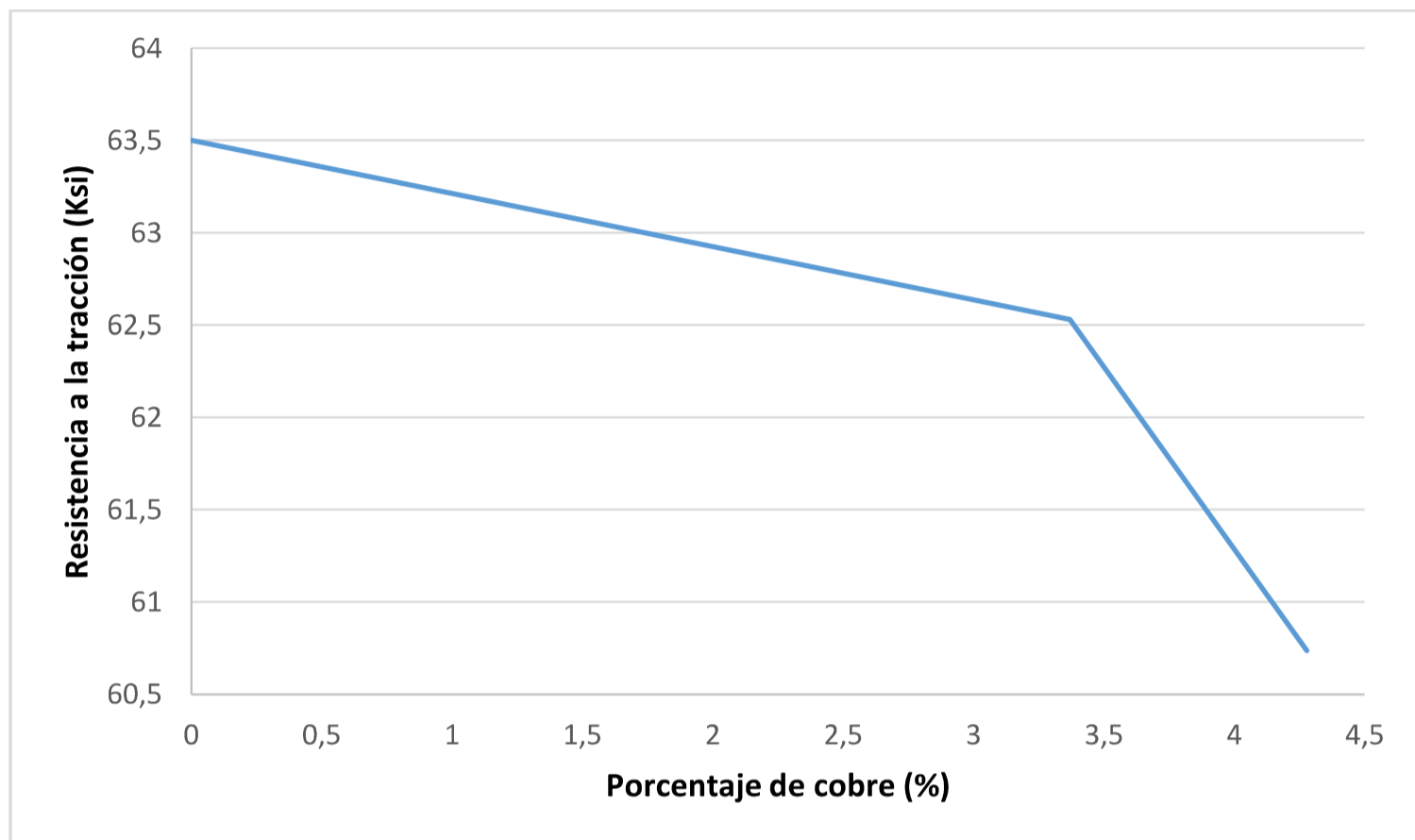


Figura 4.14. Gráfica Resistencia a la tracción vs. Porcentaje de cobre en el acero (Fuente propia)

#### 4.2.2. Análisis de ensayos de doblado

Los resultados obtenidos después del ensayo de doblado son los mostrados en la tabla 4.5.

Tabla 4.7. Resultados del ensayo de doblado

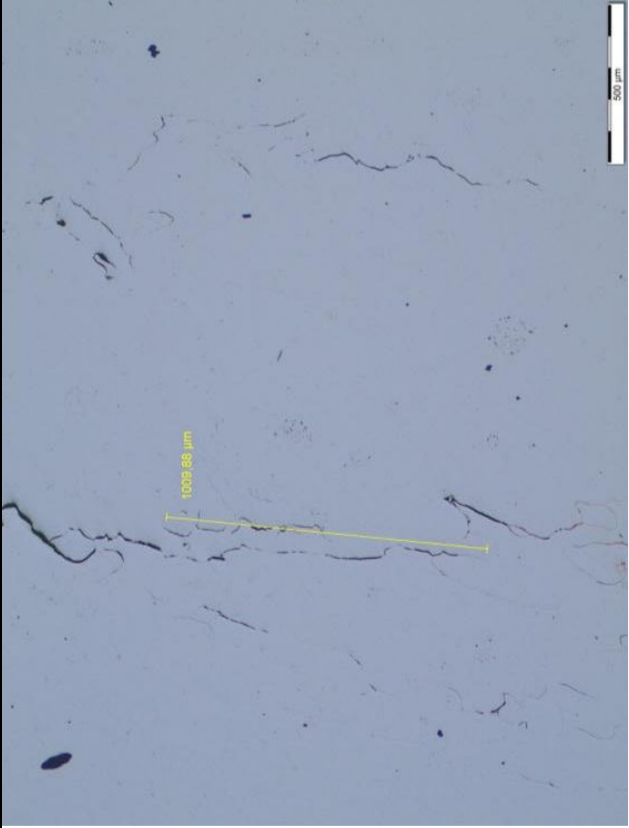
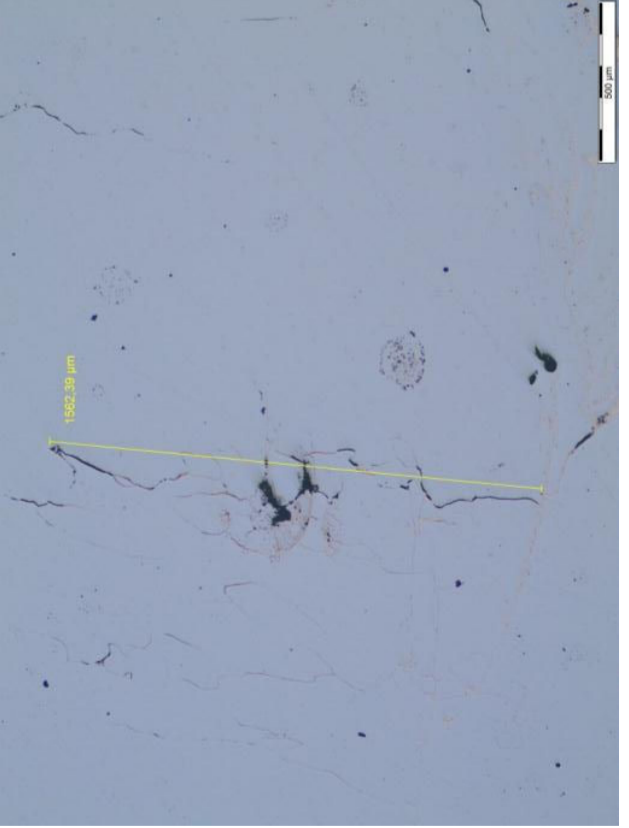
Id.	Observaciones	Calificación
DC1	Se observa fractura total en el cordón de soldadura.	No aprueba
DR1	Se observa fractura total en el cordón de soldadura.	No aprueba
DC2	Se observa fractura total en el cordón de soldadura.	No aprueba
DR2	Se observan discontinuidades de 8,30 y 6,51 mm en el cordón de soldadura	No aprueba

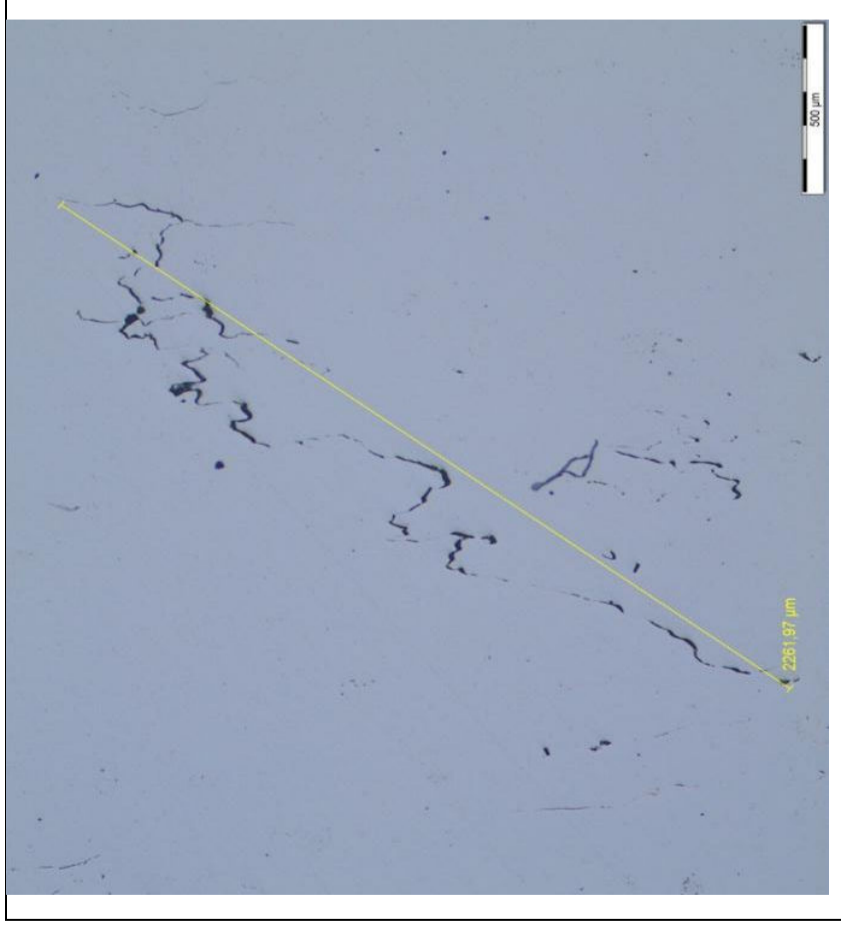
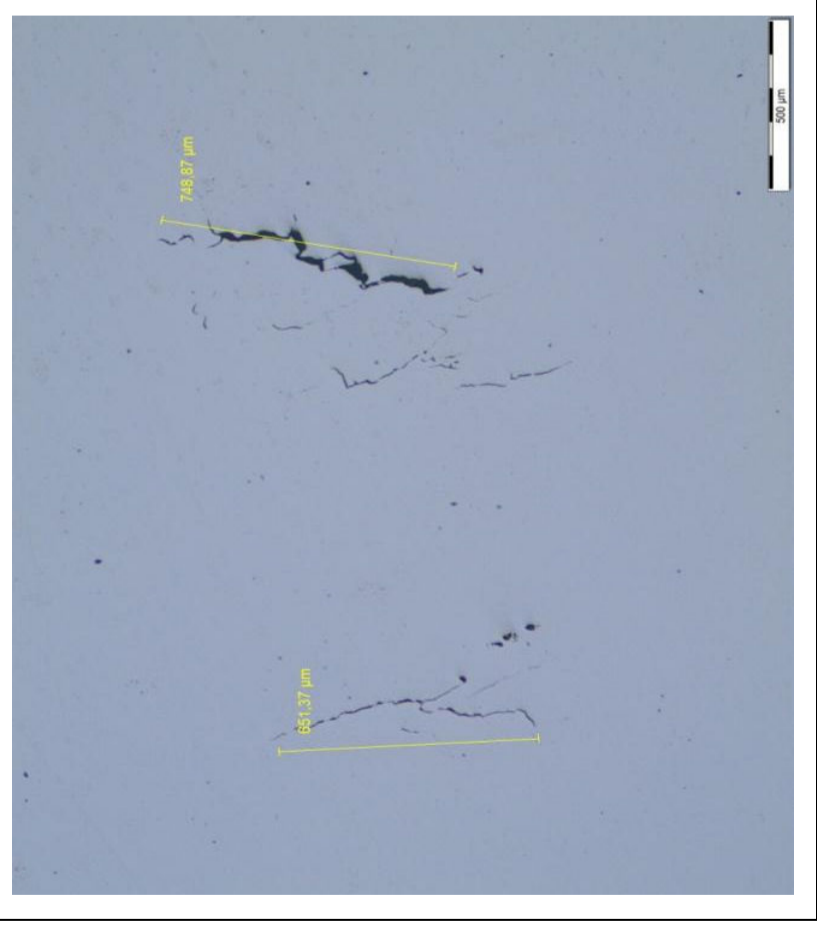
(Anexo III)

Ninguna de las probetas aprobaron según la normas AWS D1.1, esto se debe a la presencia de fisuras y a una mala afinidad entre el cobre y acero.

### 4.2.3. Análisis de micrografía

Tabla 4.8. Resultados de micrografías de probeta 1A

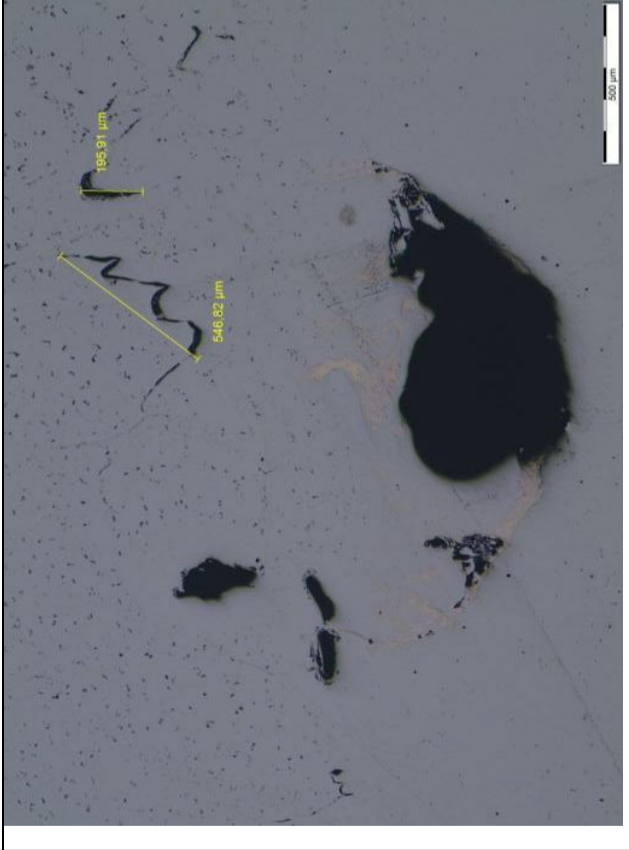

Micrografía	Aumento	Ataque Químico	Presencia de fisuras	Longitud de fisuras (nm)	Observaciones
	50 X	Sin ataque	Si	1009,88	
	50X	Sin ataque	Si	1562,39	

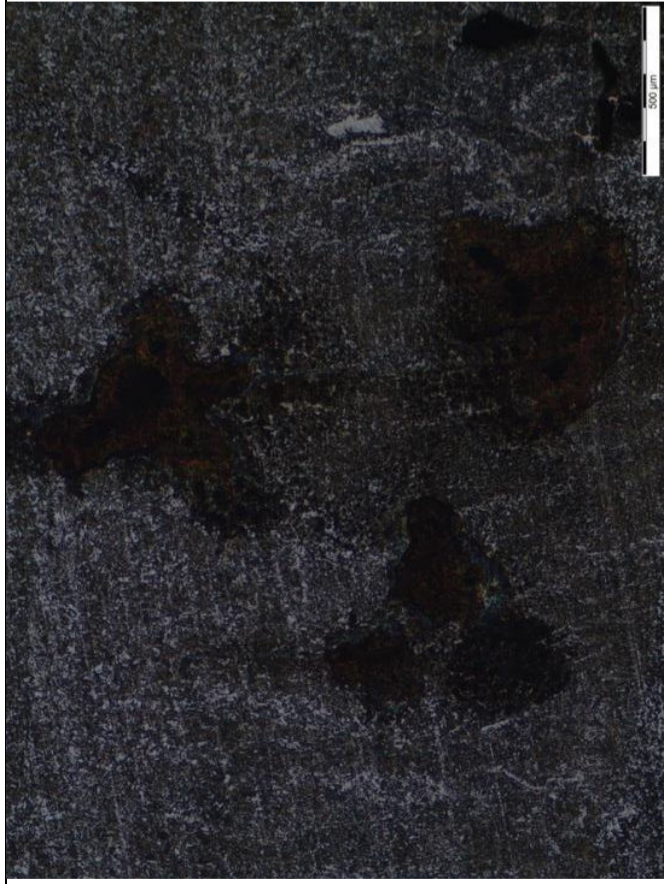

	50 X	Sin ataque	Si	2261,97	
	50X	Sin ataque		651,37 748,87	

	<p>50 X</p>	<p>Ataque con cloruro férrico</p>			<p>Se puede diferenciar claramente dos matrices, una de cobre y una de acero.</p>
--	-------------	---	--	--	---


(Fuente propia)

Tabla 4.9. Resultados de micrografías de probeta 1B

Micrografía	Aumento	Ataque Químico	Presencia de fisuras	Longitud de fisuras (nm)	Observaciones
	50 X	Sin ataque	Si	195,91 546,82	Se observa la presencia de fisuras pequeñas.
	50X	Sin ataque	Si	1376,71	

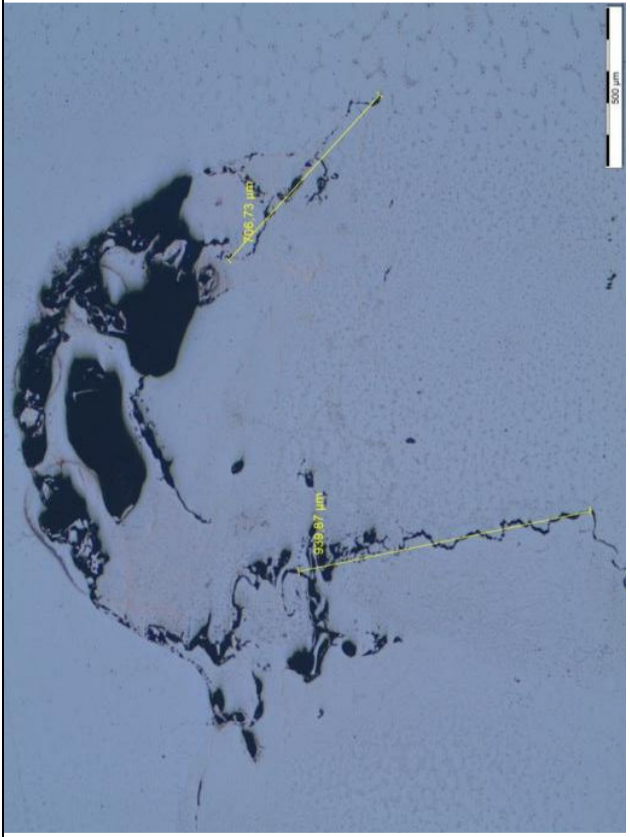
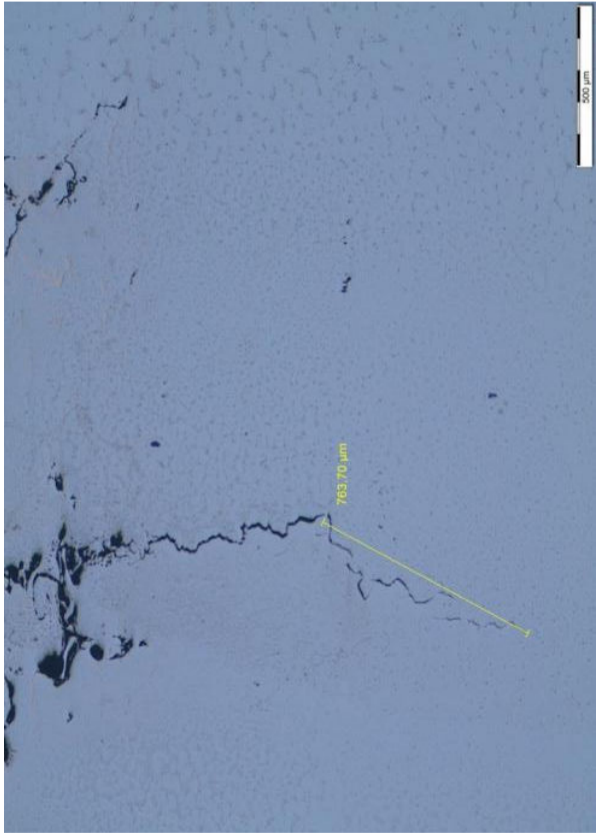
	<p>50 X</p>	<p>Ataque con cloruro férrico</p>			<p>Existe una diferencia clara entre las secciones que contienen cobre y la sección del material de aporte de la soldadura.</p>
	<p>100X</p>	<p>Ataque con cloruro férrico y nital al 2%</p>			<p>Se observa un crecimiento de grano columnar.</p>

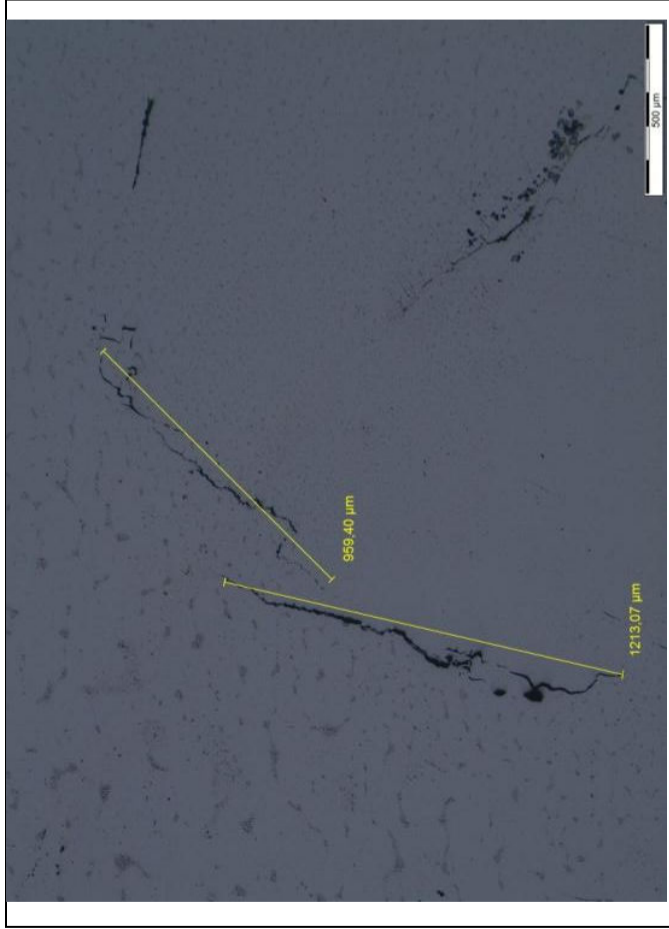



	<p>500 X</p>	<p>Ataque con cloruro férrico y nital al 2%</p>			<p>Se observa la presencia ferrita acicular.</p>
---	--------------	---	--	--	--

(Fuente propia)

Tabla 4.10. Resultados de micrografías de probeta 3A

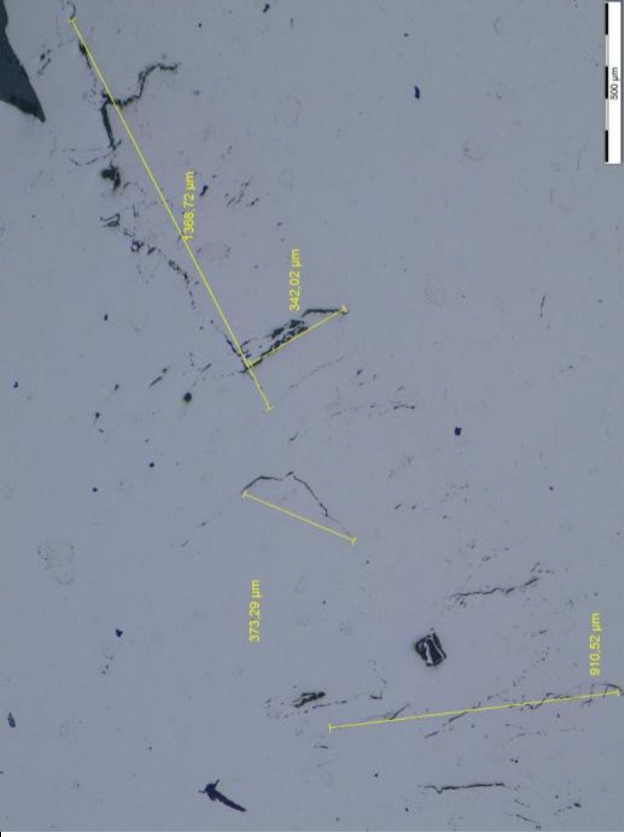
Micrografía	Aumento	Ataque Químico	Presencia de fisuras	Longitud de fisuras (nm)	Observaciones
	50 X	Sin ataque	Si	706,73 939,87	Se observa la existencia de varias fisuras y microrechupes
	50X	Sin ataque	Si	763,70	

	50 X	Sin ataque	Si	959,40 1213,07	
	50 X	Sin ataque	Si	961,42 832,31 237 222,47	

	<p>50 X</p>	<p>Sin ataque</p>	<p>Si</p>	<p>837 1213,46 314,53 364,26 523,81</p>	
	<p>100X</p>	<p>Ataque con cloruro férrico</p>			<p>Se observa secciones claras de cobre y acero, además de la presencia de cobre a lo largo la fisura</p>

(Fuente propia)

Tabla 4.11. Resultados de micrografías de probeta 3B

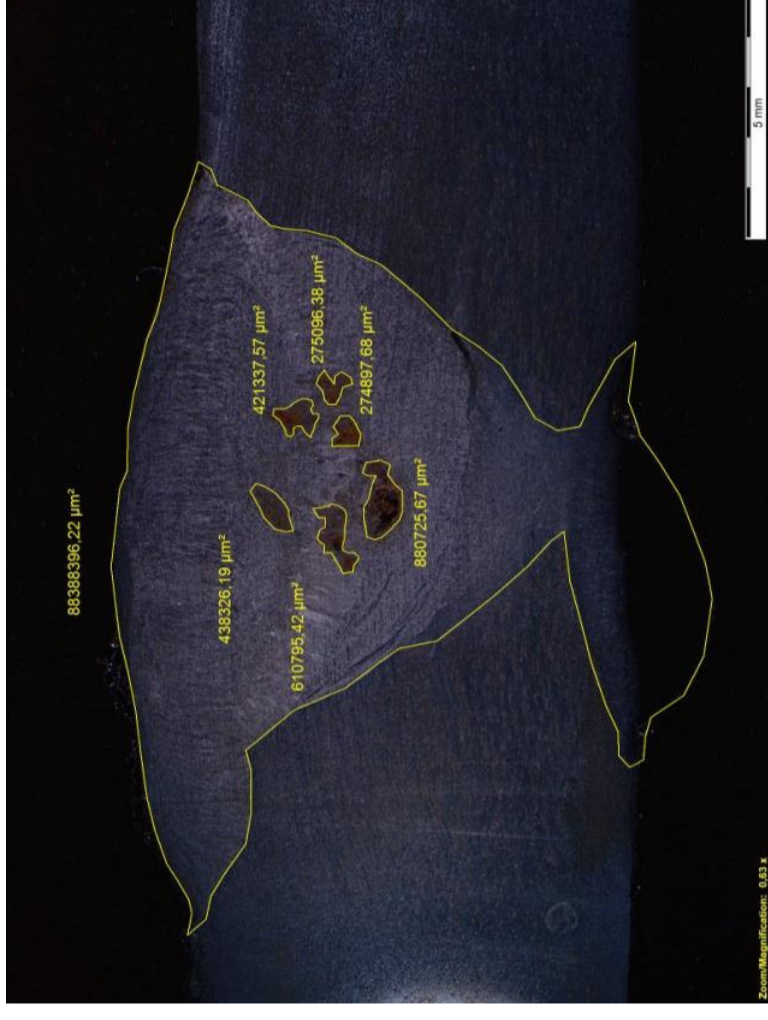
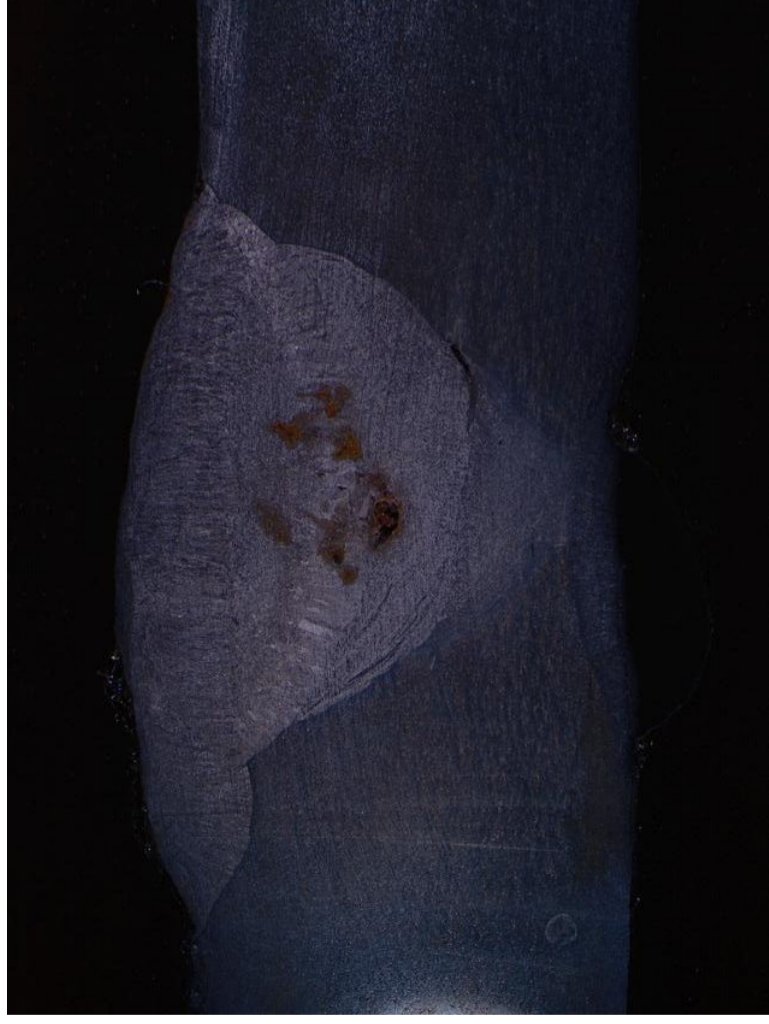
Micrografía	Aumento	Ataque Químico	Presencia de fisuras	Longitud de fisuras (nm)	Observaciones
	50 X	Sin ataque	Si	1368,72 342,02 373,29 910,52	Se observa la presencia de un grupo de fisuras
	50X	Ataque con cloruro férrico			Se observa la presencia de cobre cerca del límite del cordón de soldadura

(Fuente propia)

#### 4.2.4. Análisis de macrografías

Tabla 4.12. Análisis macrográfico con aumento 6.3x de la probeta 1B


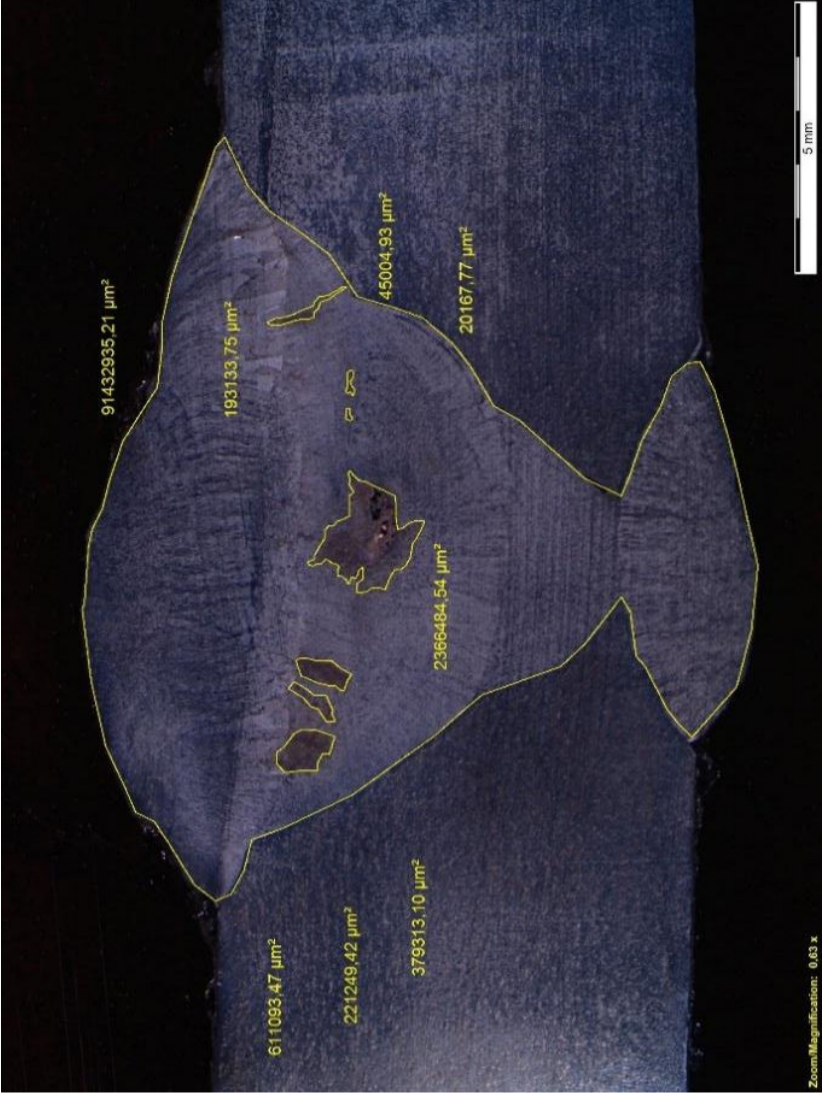
ATAQUE QUÍMICO	ÁREA DEL CORDÓN DE SOLDADURA	ÁREA DE COBRE	PORCENTAJE DE COBRE	OBSERVACIONES
CLORURO FÉRRICO	88388396,22 $\mu\text{m}^2$	2901178,91 $\mu\text{m}^2$	3.28% de Cu	Se puede observar claramente las zonas de cobre al atacarlas con cloruro férrico (delimitadas en color amarillo). El área de la raíz no se atacó, es por ello que no se lo denota claramente, pero si su borde inferior.



(Fuente propia)

Tabla 4.13. Análisis macrográfico con aumento 6.3x de la probeta 2A

ATAQUE QUÍMICO	ÁREA DEL CORDÓN DE SOLDADURA	ÁREA DE COBRE	PORCENTAJE DE COBRE	OBSERVACIONES
CLORURO FÉRRICO	91432935.21 $\mu\text{m}^2$	3836446.98 $\mu\text{m}^2$	4.19 % de Cu	La porción del área de soldadura se distingue claramente, al igual que las áreas de cobre (delimitadas en color amarillo).

(Fuente propia)

Como se pudo observar en las radiografías industriales en las probetas que contienen cobre desde 0,526% hasta 2,63% en el cordón de soldadura, no presentan indicios de fisuramiento, solo se visualizan defectos causados por la habilidad del soldador como poros, inclusiones de escoria y mordeduras. A partir del 3,02% de cobre se aprecia la presencia de fisuras transversales.

Los ensayos de ultrasonido, partículas magnéticas y tintas penetrantes fueron utilizados como un método de comprobación, en donde se corroboraron la presencia de fisuras en las probetas que tienen un porcentaje mayor a 3,02% de cobre.

Para ensayos destructivos el porcentaje de cobre en el cordón de soldadura fue mayor a 3,02%. Las fisuras que se observan en el cordón de soldadura de las probetas de micrografías, son producidas por diversos factores o propiedades características que tiene el cobre, especialmente por su alto coeficiente de dilatación y su punto de fusión menor al del acero, inicialmente el cobre sufre una gran expansión, luego cuando el acero se está solidificando después del proceso de soldadura, el cobre continua moviéndose a través del cordón de soldadura creando incrustaciones de cobre en el acero, al no tener una buena afinidad entre sí, es decir no se forma una solución sólida, además este movimiento del cobre produce una ausencia de material (microrechupes) en determinados lugares como se puede observar en las micrografías.

Debido a este movimiento del cobre, se produce un fenómeno similar al de capilaridad, en el cual el cobre se desplaza desde su posición inicial hasta una parte superior del pase de soldadura como fue evidente en las macrografías (tablas 4.12 y 4.13).

Por su coeficiente de dilatación alto, al momento del enfriamiento el cobre sufre una mayor contracción que el acero, sumado a esto la fragilización del material por el proceso de soldadura, dan inicio a la formación de fisuras.

La presencia del cobre y microrechupes observados en las micrografías son concentradores de esfuerzos, lo que ocasiona la disminución del esfuerzo a la tracción y la rotura en el cordón de soldadura en el ensayo de doblado.



#### 4.2.5. Cálculo del error del porcentaje de cobre

Para realizar este cálculo se relaciona el porcentaje de cobre obtenido por la masa añadida al cordón de soldadura y el porcentaje de cobre obtenido con la medición de áreas en las metalografías.

*Porcentaje cobre por masas = 3,2 %*

*Porcentaje cobre por áreas = 3,28 %*

$$\%error = \left| \frac{\text{porcentaje de cobre por masas} - \text{porcentaje de cobre por áreas}}{\text{porcentaje de cobre por masas}} \right| * 100$$

Ecuación 4.1. Error porcentual

$$\%error = \left| \frac{3,2 - 3,28}{3,2} \right| * 100$$

$$\%error = 2,81\%$$

Se realiza los mismos cálculos para la otra probeta, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 4.15. Error en cálculo del porcentaje de cobre

Probeta	Porcentaje de cobre por masas (%)	Porcentaje de cobre por áreas (%)	Error (%)	Promedio de error (%)
1B	3,2	3,28	2,81	2,57
2A	4,29	4,19	2,33	

(Fuente propia)

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- La soldabilidad de los aceros de bajo carbono es influenciada negativamente conforme se incrementa el contenido de cobre, debido a que el solvente, en este caso el acero, no tiene una buena afinidad con el cobre que es el soluto, lo que provoca una interfase deficiente y no se forma una solución sólida.
- Después de realizar radiografía industrial y ultrasonido en las probetas se tiene la certeza de la presencia de una indicación, la cual es confirmada como fisura aplicando el ensayo de partículas magnéticas y líquidos penetrantes.
- Con el análisis de ensayos no destructivos realizado por personal calificado y los cálculos, en los cuales se relaciona la masa de cobre con la masa del cordón de soldadura, se determina que el porcentaje de cobre a partir del cual se presentan problemas de fisuramiento es 3,02 %.
- Al momento de aplicar fuerzas uniaxiales a las probetas de tracción se produce una fractura en la zona de la soldadura, pese a que el esfuerzo de tracción soportado por estas, es aceptado por la norma AWS D1.1, es evidente la disminución de la resistencia a la tracción de las probetas con cobre comparadas con la del material base. Las probetas que contienen un 3,37% y 4,28% de cobre disminuye en un 1,53% y 4,35% su resistencia a la tracción respectivamente, creando una tendencia a la disminución de la resistencia a la tracción mientras aumenta el contenido de cobre.
- La interfase entre el cobre y el acero no presenta una buena mezcla, al momento de realizar el ensayo de doblado, tres de las cuatro probetas ensayadas no lograron alcanzar la deformación completa, es decir sufrieron una ruptura completa en la zona de soldadura, la cuarta probeta pese a que alcanzó la deformación completa presenta fisuras, por lo cual estas probetas son rechazadas bajo la norma AWS D1.1, con esto se confirma que el proceso de soldadura cuando se tiene un porcentaje de cobre por encima de 3,02%, no es recomendable y el material incrementa su fragilidad.

- En las micrografías se diferencia claramente las zonas que contiene cobre y la zona del acero, dichas zonas poseen propiedades diferentes, propias de los elementos que las constituyen, en este caso la zona de cobre es blanda a comparación de la zona del acero, con esto se determina que la estructura de la aleación es un sistema de dos fases.
- La formación de fisuras en el cordón de soldadura se produjeron debido a la propiedad característica del cobre, su alto coeficiente de dilatación, que al momento de solidificarse el acero después del proceso de soldadura, se produce un movimiento del cobre creando incrustaciones en el acero y ausencia de material en ciertos lugares. Además al momento del enfriamiento se produce una contracción en el material y sumado a la fragilización por la presencia del cobre, conlleva a la formación de fisuras.
- El error entre el porcentaje de cobre encontrado por masas y por el método de áreas, fue de 2,57% en promedio, lo que representa que el valor calculado de porcentaje de cobre (3,02%), en el cual empieza el problema de fisuramiento es el correcto, con un mínimo margen de error.
- El presente estudio es un trabajo aplicable a la industria, por ejemplo al medir el potencial de un metal a corroerse, antes de realizar la protección catódica, se suelda un electrodo de referencia de cobre al material, el cual no es recomendable realizarlo con procesos de fusión. Para el caso del montaje de oleoductos se sueldan al tubo principal alambres de cobre para el sistema de protección catódica con el proceso denominado Cadweld, que es un proceso por explosión donde el calor suministrado es el adecuado para el cobre no se funda sino simplemente se adhiera en el acero.
- Al momento de realizar un procedimiento de reparación de tanques por procesos de soldadura por fusión, el personal en su afán de garantizar la sujeción de las pinzas de masa, las cuales son de cobre, son soldadas al material base para evitar problemas de cortocircuitos, a pesar de que no es recomendable. En este punto donde se realizó la soldadura, pueden ocurrir problemas futuros por crecimiento de fisuras.

- En general en montaje y reparación de estructuras, tanques, tuberías de acero las contaminaciones accidentales con cobre resultan perjudiciales, debido a que estas inclusiones pueden dar paso a la formación de pequeñas fisuras casi imperceptibles difíciles de detectar incluso con la aplicación varios métodos de inspección no destructiva, como fue evidenciable en el presente trabajo, pero que en el futuro y especialmente en esfuerzos cíclicos pueden crecer permanentemente y llegar incluso a la falla de la estructura.
- Los aceros de bajo contenido de carbono, como el acero A-36 tienen excelente soldabilidad, por lo que la presencia de cobre en el cordón de soldadura definitivamente afectó su soldabilidad que se manifiesta en la presencia de fisuras.

## **5.2. Recomendaciones**

- El mismo estudio se podría realizar para aleaciones de cobre para conocer si su influencia es la misma que la del cobre puro.
- Este trabajo podría servir de referencia para un proyecto de investigación, en el cual se estudie a fondo la interfase entre el acero y el cobre.
- Se recomienda realizar un estudio similar para diferentes materiales que de una u otra forma pueden ser agentes contaminantes en la soldadura de los aceros.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Soldadura. (Sin fecha). Wikispaces. Recuperado de <https://tecnologiafuentenueva.wikispaces.com/file/view/Soldadura.pdf>
- [2] Molera, P., (1992), Soldadura industrial: Clases y aplicaciones. Barcelona, España, Marcombo.
- [3] Kalpakjian, S., (2008), Manufactura, ingeniería y tecnología. México, Pearson Educación.
- [4] Davis, J.R., (2001), Copper and copper alloys. Estados Unidos, ASM International.
- [5] Cobre y sus aleaciones (13 de octubre del 2014) Slideshare. Recuperado de <http://es.slideshare.net/luis745/cobre-y-sus-aleaciones>
- [6] Soldadura y adhesivacion (sin fecha) Talleres Tamesa. Recuperado de <http://www.talleres-tamesa.com/soldadura-y-adhesivacion/>
- [7] Propiedades mecánicas de los materiales (31 de julio del 2012) Universidad tecnológica de Pereira. Recuperado de <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2-propiedades-mecanicas-de-los-materiales/>
- [8] Ensayo de tracción (6 de octubre del 2015) fandom. Recuperado de [http://es.manufactura.wikia.com/wiki/Ensayo\\_de\\_Tracci%C3%B3n](http://es.manufactura.wikia.com/wiki/Ensayo_de_Tracci%C3%B3n)
- [9] Ensayo de doblado (10 de diciembre del 2013) Ecured. Recuperado de [https://www.ecured.cu/Archivo:Esquema\\_doblado.png](https://www.ecured.cu/Archivo:Esquema_doblado.png)
- [10] Luna, J. & Téllez, C. & González, M. (2012). Reparación de ductos de acero al carbono que transportan gas (tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional, México.
- [11] END – partículas magnéticas (8 de agosto del 2009) Patevaca. Recuperado de <http://patevaca.blogspot.com/2009/08/seguridad-laboral.html>
- [12] Radiografía industrial (2011) ENDICSA. Recuperado de [http://www.endicsa.com.ar/site/index.php/servicios/?option=com\\_content&view=article&id=79](http://www.endicsa.com.ar/site/index.php/servicios/?option=com_content&view=article&id=79)
- [13] Cevallos, M., & Cisneros, M. (2013). Estudio de soldabilidad de aceros inoxidable y aceros al carbono mediante el proceso GTAW sin material de aporte (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- [14] Marciano, C., & Salazar, H. (2008). Estudio de la contaminación por cobre y su influencia sobre las propiedades en acero al carbono ASTM A36 (Tesis de pregrado). Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [15] Cano, H (2013). Aceros patinables (Cu, Cr, Ni): Resistencia a la corrosión atmosférica y soldabilidad (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- [16] Ensayos no destructivos (sin fecha). Tuv Nord. Recuperado de <http://www.tuv-nord.com/es/inspeccion-industrial-end/ensayos-no-destructivos-499.htm>

- [17] Salazar, O. (6 de octubre del 2012). Ensayos no destructivos aplicados a la soldadura. Slideshare. Recuperado de <http://es.slideshare.net/Orli10/ensayos-no-destructivos-aplicados-a-la-soldadura>
- [18] Torres, J. (5 de mayo del 2011). Destructivos ensayo de soldaduras. Scribd. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/54669309/Destructivos-Ensayo-de-Soldaduras>
- [19] American Welding Society. (1995). Standard Welding Terms and Definitions. (ANSI/AWS A3.0 – 94). Miami:AWS
- [20] American Society for Testing Materials (2014). Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for general Industry. (E165/E165M – 12). West Conshohocken:ASTM
- [21] American Society for Testing Materials (2017). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. (E8/E8M – 16a). West Conshohocken:ASTM
- [22] American Welding Society. (1998). Structural Welding Code - Steel. (ANSI/AWS D1.1 - 98). Miami:AWS
- [23] “Guía de laboratorio de Ensayos No destructivo”, Apuntes de clases, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador, 2015
- [24] “Soldadura de Producción y Mantenimiento”, Apuntes de clases, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito – Ecuador, 2015
- [25] Laufgang, S. (21 de abril del 2004). Tratamiento térmico de soldadura. Recuperado de <http://materias.fi.uba.ar/6713/CursoIASListook.pdf>

## **ANEXOS**

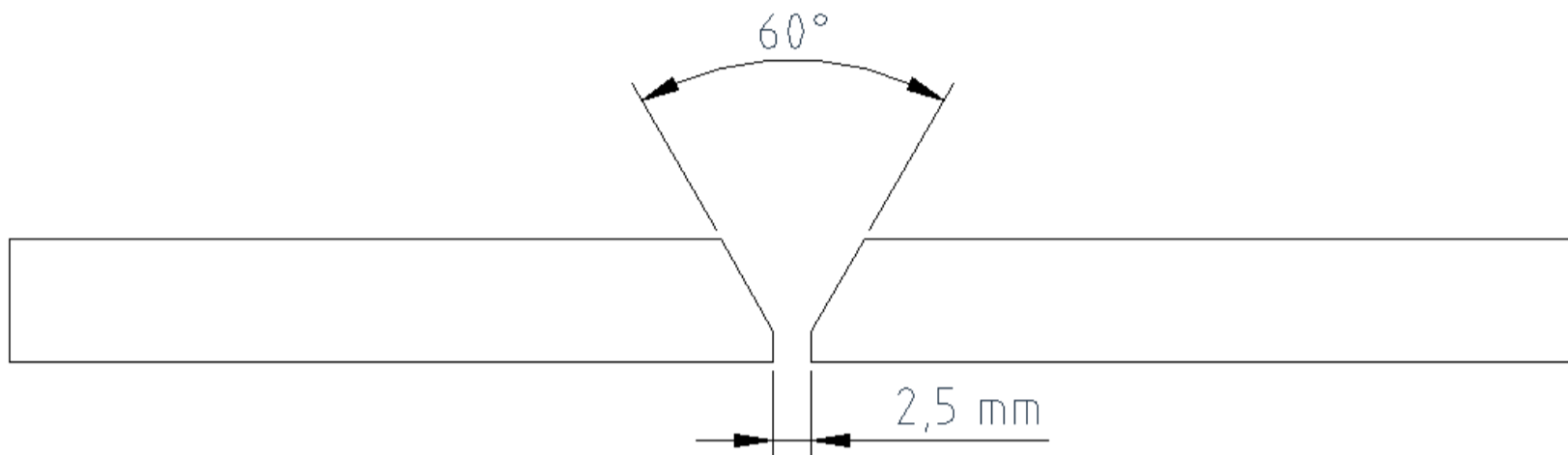
## ANEXO I. Welding Procedure Specification (WPS)

# WPS

NOMBRE DE LA INSTITUCIÓN:	E.P.N	NO. IDENTIFICACIÓN:	
PQR NO:	XXXXXXXXXX	FECHA:	16/09/2016
SEGÚN NORMA:	AWS D1.1	REALIZADO POR:	EMILIO BÁEZ- FELIPE GALEANO
<b>ARTÍCULO 1.</b>	<b>JUNTA UTILIZADA</b>	ORGANIZACIÓN:	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
TIPO DE JUNTA:	TOPE	<b>ARTÍCULO 2</b>	<b>TÉCNICA DE SOLDADURA</b>
ABERTURA RAÍZ:	2,5 MM	PROCESO DE SOLDADURA:	SMAW
TALÓN:	2 MM	TIPO DE SOLDADURA:	MANUAL
ÁNGULO RANURA:	60°	SOLDADURA:	OSCILANTE
PLACA RESPALDO:	NO	CORDÓN DE RESPALDO:	N/A
PREPARAR BISEL:	SI	LIMPIEZA:	GRATA
MÉTODO:	DESBASTE CON AMOLADORA	<b>ARTÍCULO 5</b>	<b>POSICIÓN DE SOLDADURA</b>
<b>ARTÍCULO 3.</b>	<b>METAL BASE</b>	POSICIÓN DE SOLDADURA:	1 G
ESPECIFICACIÓN:	ACERO ASTM A – 36	PROGRESIÓN:	IZQUIERDA A DERECHA
ESPESOR:	4 MM	TÉCNICA:	4 PASES
LONGITUD:	100 MM	PRECALENTAMIENTO:	N/A
ANCHO:	50 MM	TIEMPO ENTRE PASES:	2 MIN.
<b>ARTÍCULO 4.</b>	<b>METAL DE APORTE</b>	<b>ARTÍCULO 6</b>	<b>NOTAS</b>
DIÁMETRO:	1/8 INCH	VERIFICAR ALINEACIÓN DE LA JUNTA	
DENOMINACIÓN AWS:	C13 E6010	ADICIÓN DE COBRE DESPUÉS DEL PRIMER PASE	
CASA COMERCIAL:	AGA		
DENOMINACIÓN COMERCIAL:	AGA C13 E6011		



## DETALLE DE LA JUNTA



N° DE PASE	METAL DE APORTE	DIÁMETRO	CORRIENTE TIPO Y POLARIDAD	INTENSIDAD	VOLTAJE	VEL. DE AVANCE	TÉCNICA DE SOLDADURA
	CLASE	MILÍMETRO S		AMPERIOS	VOLTIOS	cm/s	
1	E6010	3 mm	DC+	85 - 90 A	60 V	0,24	OSCILANTE DE IZQUIERDA A DERECHA
2	E6010	3 mm	DC+	85 - 90 A	60 V	0,32	OSCILANTE DE IZQUIERDA A DERECHA
3	E6010	3 mm	DC+	85 - 90 A	60 V	0,23	OSCILANTE DE IZQUIERDA A DERECHA
4	E6010	3 mm	DC+	85 - 90 A	60 V	0,22	OSCILANTE DE IZQUIERDA A DERECHA

## ANEXO II. Ficha técnica de alambre multifilar de cobre

# TX5500™ UTP Copper Cable

**PANDUIT®**  
SPECIFICATION SHEET

### specifications

Category 5e cable shall exceed IEC 61156-5 and ANSVTIA-568-C.2 Category 5e component standards. The conductors shall be 24 AWG construction with HDPE insulation. The copper conductors shall be twisted in pairs and all four pairs shall be covered by a CM jacket.



### technical information

<b>Electrical performance:</b>	Certified channel performance in a 4-connector configuration up to 100 meters and exceeds the requirements of ISO 11801 Class D and ANSVTIA-568-C.2 Category 5e ratified standards at swept frequencies up to 100 MHz Certified component performance up to 100 meters and exceeds the component requirement of the IEC 61156-5 and ANSVTIA-568-C.2 Category 5e ratified standards at swept frequencies up to 100 MHz
<b>Conductors/insulators:</b>	24 AWG solid copper insulated with HDPE
<b>Certification:</b>	ANATEL 2488-09-6246
<b>Flame rating:</b>	CM – UL 1685
<b>PoE compliance:</b>	Meets IEEE 802.3af and IEEE 802.3at for PoE applications
<b>Installation tension:</b>	110 N (25 lbf) maximum
<b>Temperature rating:</b>	0°C to 50°C (32°F to 122°F) during installation -20°C to 75°C (-4°F to 167°F) during operation
<b>Cable jacket:</b>	Flame-retardant PVC
<b>Cable diameter:</b>	4.9mm (0.193 in.) nominal
<b>Cable weight:</b>	8.2 kg/305m (18 lbs./1000 ft.)
<b>Packaging:</b>	305m (1000 ft.) in a carton Package tested to ISTA Procedure 1A

### key features and benefits

<b>Third party tested</b>	Cable has been tested as part of the TX5500™ UTP Copper Cabling System by an independent laboratory and complies with the electrical channel requirements of the following standards: ISO 11801 Class D and ANSVTIA-568-C.2
<b>Descending length cable markings</b>	Easy identification of remaining cable reduces installation time and cable scrap
<b>Tested beyond the standards</b>	Cable has been characterized to 450 MHz, 350 MHz above the standard
<b>Easy payout carton</b>	Improves installation time and prevents tangling

### applications

TX5500™ UTP Cable is a component of the Panduit® TX5500™ Copper Cabling System. The end-to-end system provides Gigabit Ethernet performance with usable bandwidth beyond 100 MHz. With certified performance to the ANSVTIA-568-C.2 Category 5e and ISO 11801 Class D standards, this system will support the following applications:

- Ethernet 10BASE-T, 100BASE-T (Fast Ethernet), 1000BASE-T (Gigabit Ethernet)
- 155 Mb/s ATM, 622 Mb/s ATM
- Token Ring 4/16

[www.panduit.com](http://www.panduit.com)

**TX5500™ UTP Copper Cabling System**

**TX5500™ UTP Copper Cable**

CM: PUC5504\*

**Mini-Com® TX5e™ PLUS UTP Jack Module**

Jack module: CJ5E88TG\*\*

**TX5e™ UTP Patch Cords – CM**

Meters: UTPCH1\*MY  
Feet: UTPCH3\*MY

**DP5e™ Angled Punchdown Patch Panels**

24-port, 1 RU: DPA245E88TGY  
48-port, 2 RU: DPA485E88TGY

**DP5e™ Flat Punchdown Patch Panels**

12-port, 1 RU: DP125E88TGY  
24-port, 1 RU: DP245E88TGY  
48-port, 2 RU: DP485E88TGY

**Mini-Com® Angled Flush Mount Modular Patch Panels**

24-port, 1 RU: CPPA24FMWBLY  
48-port, 2 RU: CPPA48FMWBLY

**Mini-Com® Flat Flush Mount Modular Patch Panels**

24-port, 1 RU: CPP24FMWBLY  
48-port, 2 RU: CPP48FMWBLY

**Termination and Cable Prep Tools**

**Termination tools: EGJT or TGJT**  
Wire snipping tool: CWST  
Wire stripping tool: CJUST

\*Colors and pallet configurations:

Replace \* with BUY for blue cable in a standard pallet of 36 cartons.

Replace \* with IG-EY for grey cable in a European pallet of 18 cartons.

\*\* To designate color, add suffix: AW (Arctic White), IW (Off White), EI (Electric Ivory), IG (International Gray), WH (White), BL (Black), OR (Orange), RD (Red), BU (Blue), GR (Green), YL (Yellow), or VL (Violet).

†For lengths 1 to 10 meters (increments of one meter) and 0.5, 1.5, 2.5, 5, 20 meters, change the length designation in the part number to desired length. For standard colors, add suffix BU (Blue), GR (Green), RD (Red), YL (Yellow), IW (Off White) before Y at the end of the part number. For example, the part number for a blue, 5-meter patch cord is UTPCH5MBUY.

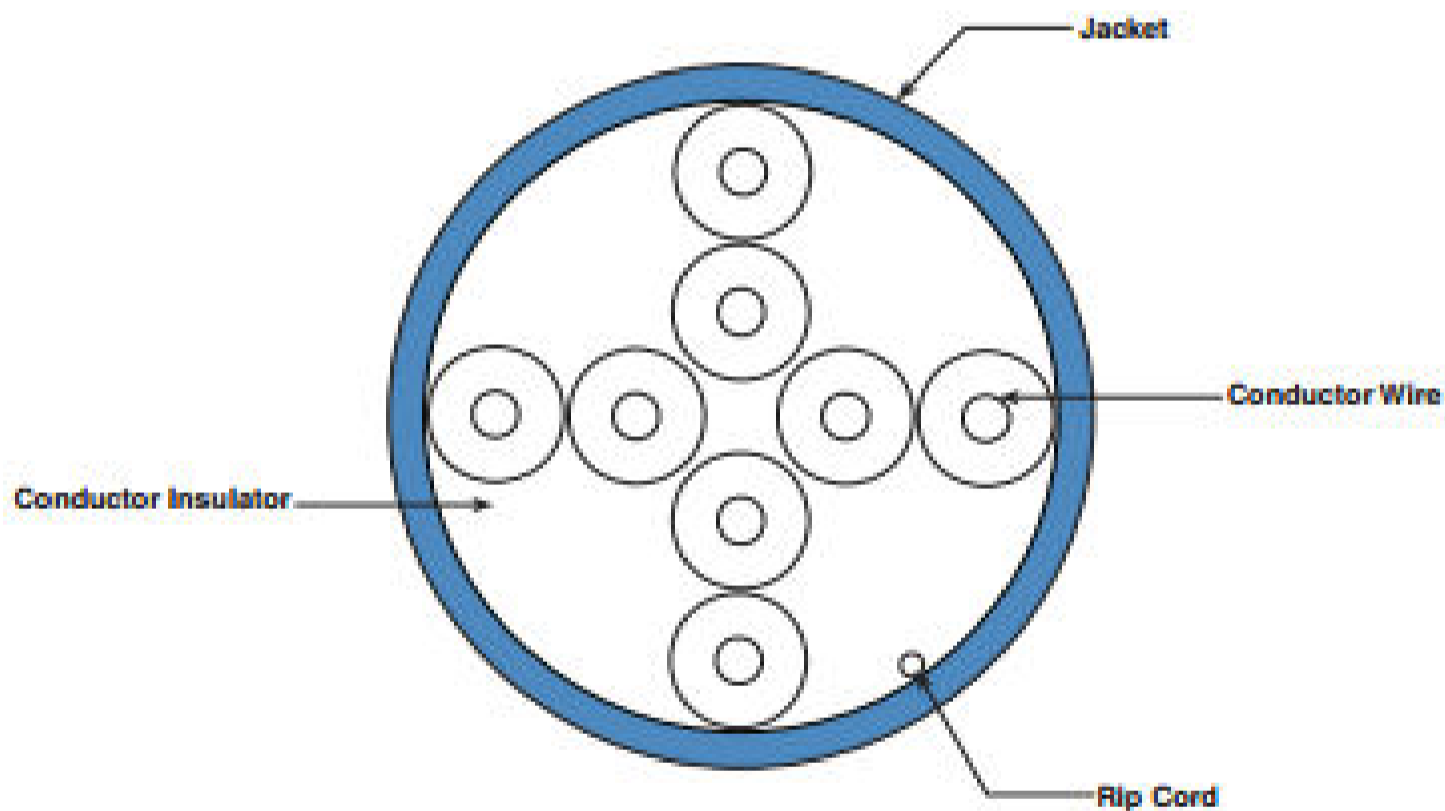
††For lengths 1 to 20 feet (increments of one foot) and 25, 30, 35, 40 feet, change the length designation in the part number to desired length. For standard cable colors, add suffix BU (Blue), GR (Green), RD (Red), YL (Yellow), IW (Off White) before Y at the end of the part number. For example, the part number for a blue, 5-foot patch cord is UTPCH5BUY.

# TX5500™ UTP Copper Cable

## additional specifications

Mechanical Test	
Ultimate Breaking Strength	>400 N (90 lbf)
Minimum Bend Radius	4 x cable diameter
Electrical Test	
Nominal Velocity of Propagation (NVP)	67%
Operating Voltage, maximum	80V

## cable construction



### WORLDWIDE SUBSIDIARIES AND SALES OFFICES

PANDUIT CANADA  
Markham, Ontario  
cs-cdn@panduit.com  
Phone: 800.777.3300

PANDUIT EUROPE LTD.  
London, UK  
cs-emea@panduit.com  
Phone: 44.20.8601.7200

PANDUIT SINGAPORE PTE. LTD.  
Republic of Singapore  
cs-ap@panduit.com  
Phone: 65.6305.7575

PANDUIT JAPAN  
Tokyo, Japan  
cs-japan@panduit.com  
Phone: 81.3.6863.6000

PANDUIT LATIN AMERICA  
Guadalajara, Mexico  
cs-la@panduit.com  
Phone: 52.33.3777.6000

PANDUIT AUSTRALIA PTY. LTD.  
Victoria, Australia  
cs-asa@panduit.com  
Phone: 61.3.9794.9600

For a copy of Panduit product warranties, log on to [www.panduit.com/warranty](http://www.panduit.com/warranty)

For more information

Visit us at [www.panduit.com](http://www.panduit.com)

Contact Customer Service by email: [cs@panduit.com](mailto:cs@panduit.com)  
or by phone: 800.777.3300

**PANDUIT**®

©2013 Panduit Corp.  
ALL RIGHTS RESERVED.  
COSP338--WW-ENG  
Replaces vna-COSP207  
12/2015

# ANEXO III. Informe técnico de ensayos de tracción y doblado



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS  
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

## INFORME TÉCNICO

LAEV – FEB.17.01.01

Quito, 22 de marzo de 2017

**TRABAJO SOLICITADO POR:** M. Sc. Galo Barragán  
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en juntas soldadas pertenecientes a los señores José Báez y Felipe Galeano para el desarrollo del proyecto de titulación "ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL COBRE EN LA SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS DE BAJO CARBONO". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

### RESULTADOS

1. **MUESTRAS:** Una (1) probeta de material base para ensayo de tracción, cuatro (4) probetas de juntas soldadas para ensayo de tracción y cuatro (4) probetas de juntas soldadas para ensayo de doblado bajo norma AWS D1.1.

### 2. GENERALIDADES

Según datos proporcionados por el cliente:

**Proceso:** SMAW  
**Electrodo:** E-6010  
**Material base:** Acero ASTM A-36

En la tabla 1 se presenta la identificación de las probetas.

Tabla 1. Identificación de las probetas.

Id.	Id. LAEV
Probetas Tipo 1 (adición de cobre aproximadamente 3,37%)	T1 (A-B)/DC1-DR1
Probetas Tipo 2 (adición de cobre aproximadamente 4,28%)	T2 (A-B)/DC2-DR2

\* Adición de cobre después del primer pase

### 3. ENSAYO DE TRACCIÓN A MATERIAL BASE

En la tabla 2 se presenta los resultados del ensayo de tracción realizado a la probeta de acero.

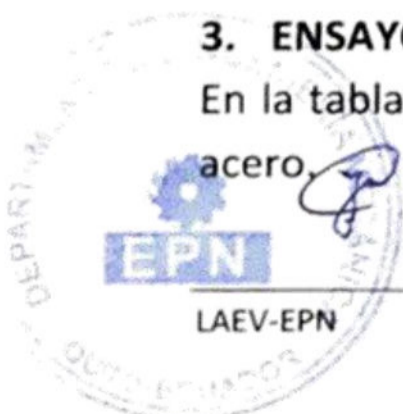


Tabla 2. Resultados del ensayo de tracción al material base.

Id.	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
T1	11,72	8,27	9.540	42.436	45,3	312	63,5	437,7	19,6

#### 4. ENSAYO DE TRACCIÓN DE ACUERDO CON EL CÓDIGO AWS D1.1

En la tabla 3 se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados. La resistencia mínima a la tracción del material base ASTM A-36 es: 58 ksi (400 MPa).

Tabla 3. Resistencia a la tracción obtenida en el ensayo.

Id.	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Observaciones	Calificación
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa		
T1-A	12,37	8,00	9.551	42.487	62,27	429,33	FJS	Aprueba
T1-B	12,55	7,98	9.747	43.358	62,79	432,94	FJS	Aprueba
T2-A	12,73	7,97	9.555	42.505	60,76	418,94	FJS	Aprueba
T2-B	12,60	7,98	9.462	42.088	60,71	418,59	FJS	Aprueba

\* FJS: Falla en la junta soldada.



#### 5. ENSAYO DE DOBLADO DE ACUERDO CON EL CÓDIGO AWS D1.1

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de doblado.

Tabla 4. Resultados del ensayo de doblado.

Id.	Observaciones	Calificación
DC1	Se observa fractura total en el cordón de soldadura.	No aprueba
DR1	Se observa fractura total en el cordón de soldadura.	No aprueba
DC2	Se observa fractura total en el cordón de soldadura.	No aprueba
DR2	Se observan discontinuidades de 8,30 y 6,51 mm en el cordón de soldadura	No aprueba

Las curvas de esfuerzo vs. deformación unitaria se muestran en el anexo. El porcentaje de deformación que se puede observar en las curvas corresponde al desplazamiento del cabezal de la máquina universal de ensayos.

	ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:			
Nombre:	Ing. Patricio Fuentes	Ing. Alexis Sola	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.
Cargo:	ASISTENTE	ESPECIALISTA	JEFE (E)
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES			




Página 2 de 5

## ANEXO

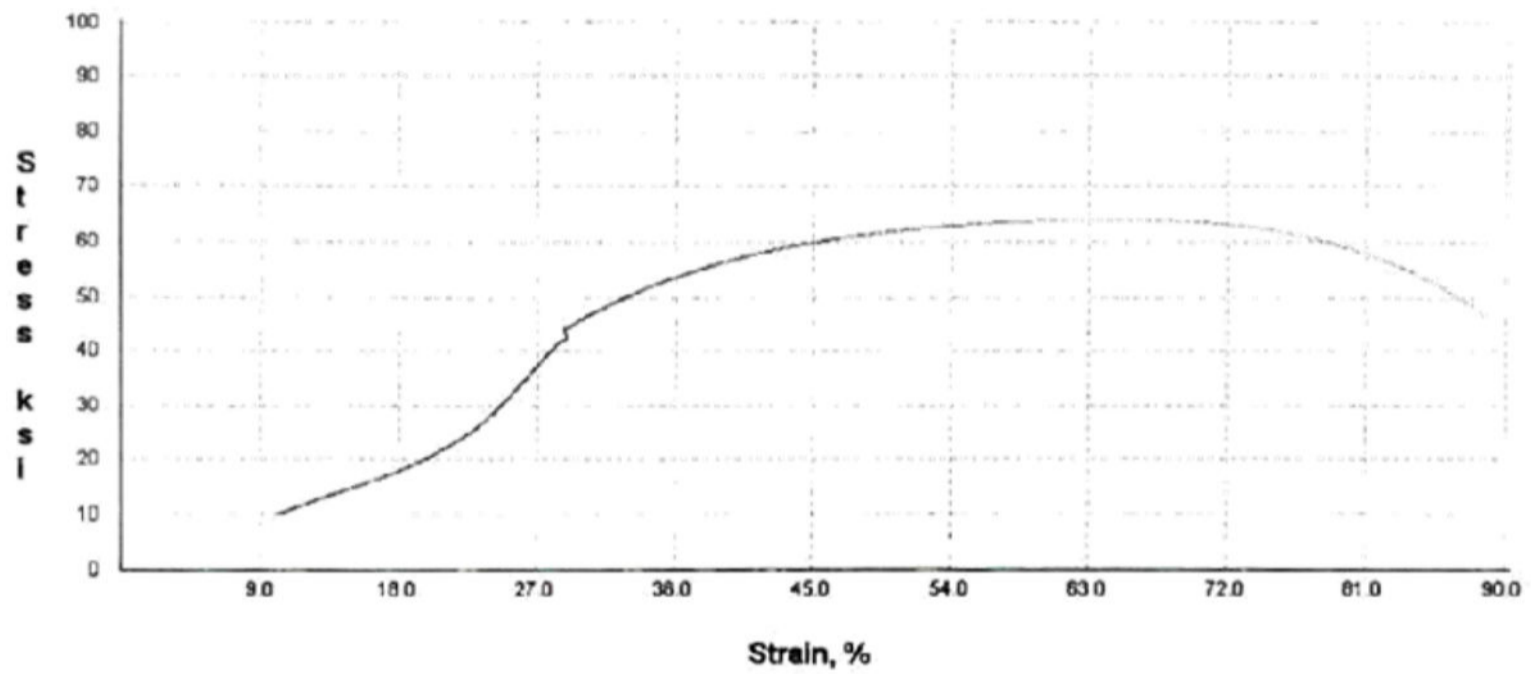


Figura 1. Curva de esfuerzo vs. Deformación de la muestra T1 (material base).

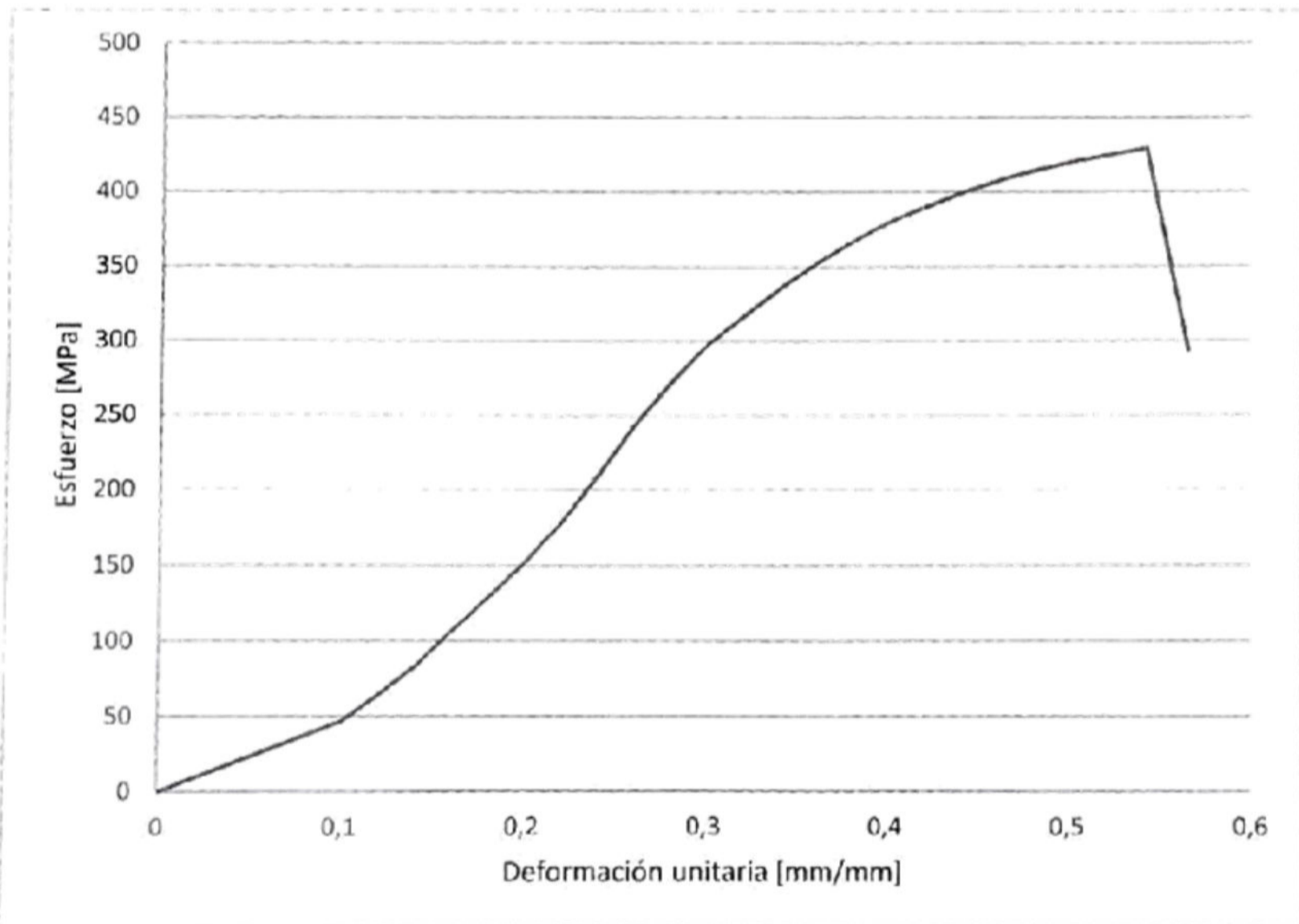


Figura 2. Curva de esfuerzo vs. Deformación unitaria de la muestra T1-A.



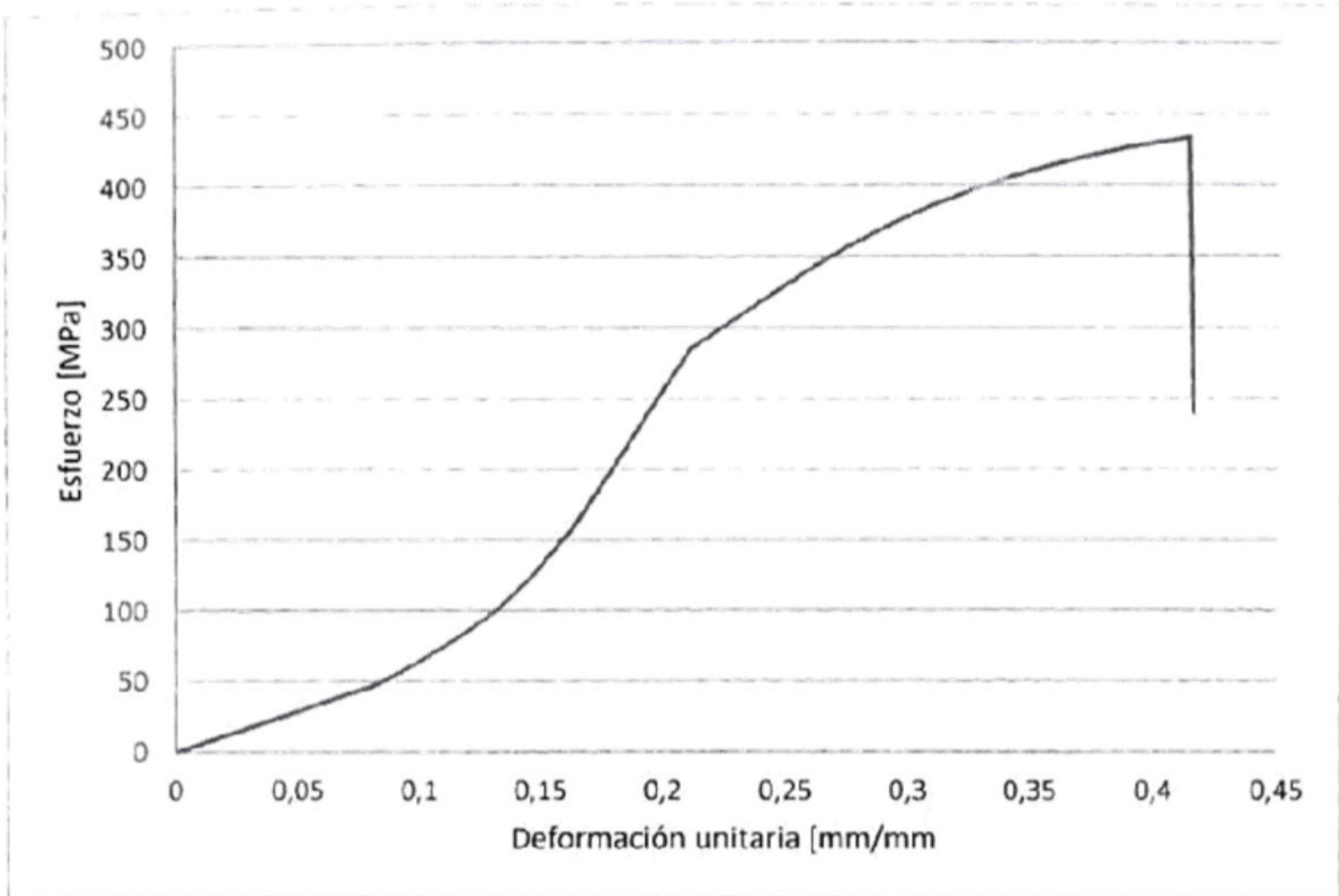


Figura 3. Curva de esfuerzo vs. Deformación unitaria de la muestra T1-B.

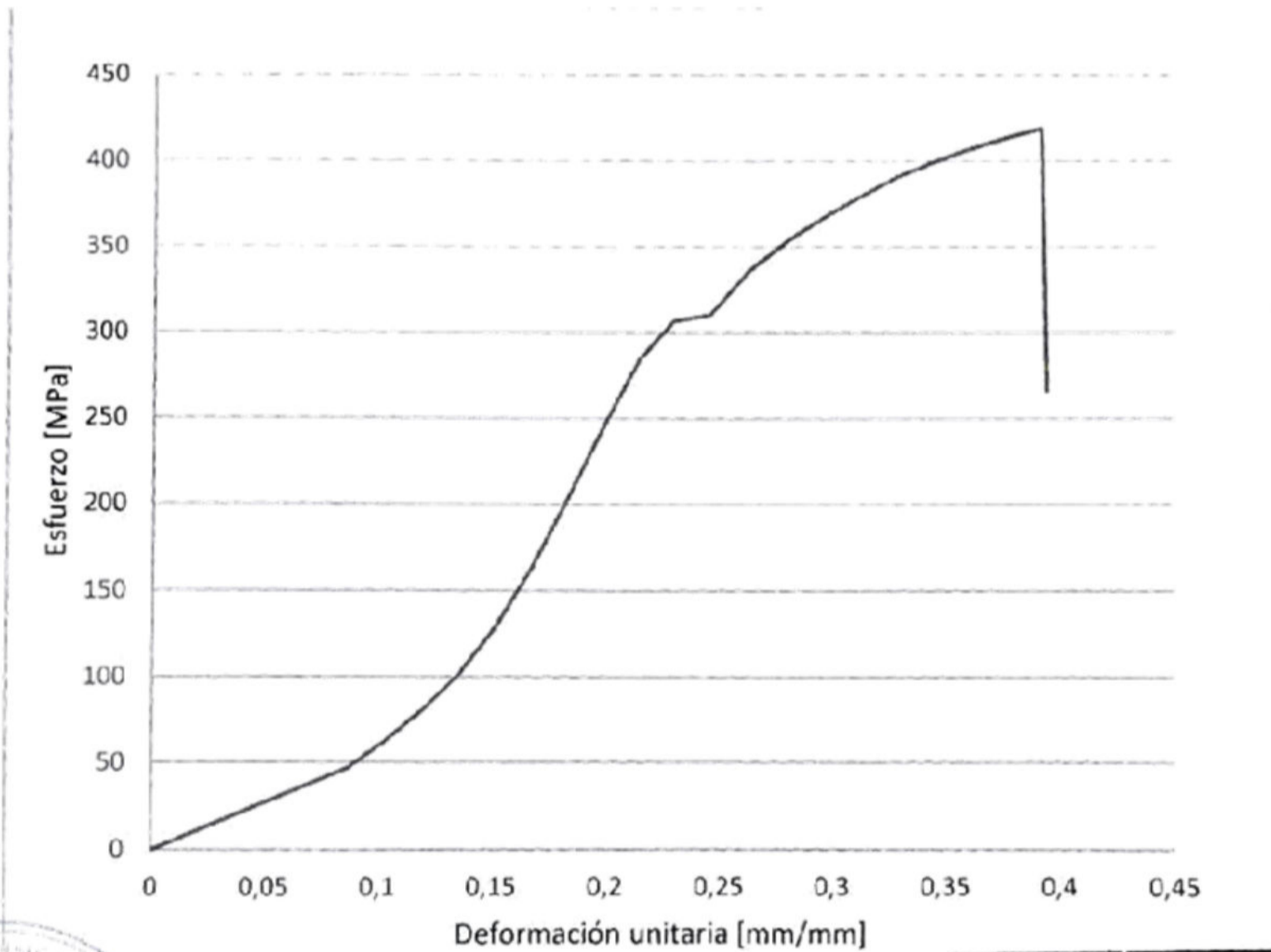


Figura 4. Curva de esfuerzo vs. Deformación unitaria de la muestra T2-A.



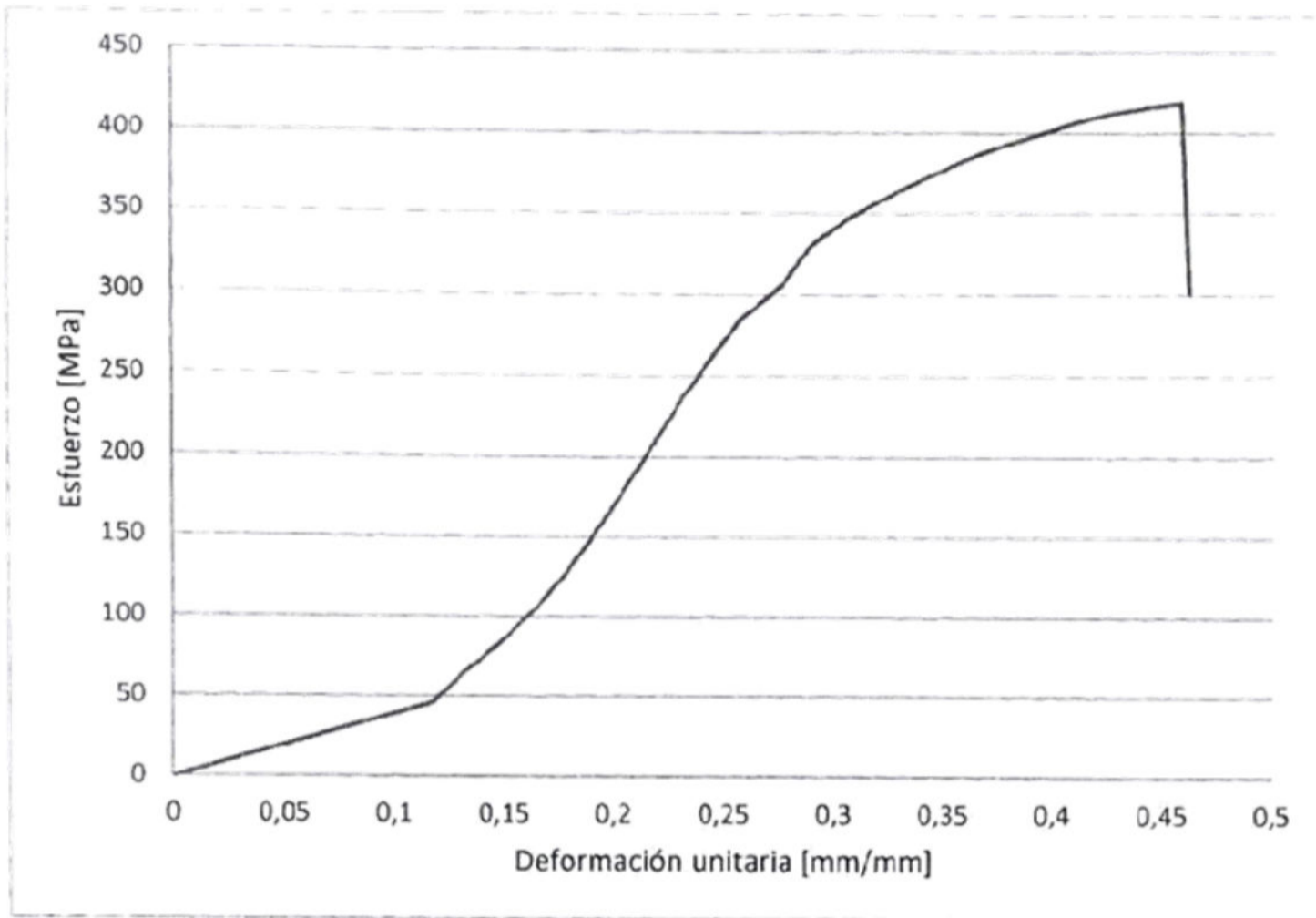


Figura 5. Curva de esfuerzo vs. Deformación unitaria de la muestra T2-B. *P*





## ANEXO IV. Propiedades y composición química del acero ASTM A36

### ASTM A36 Steel, bar

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [ASTM Steel](#); [Carbon Steel](#); [Low Carbon Steel](#)

**Material Notes:** Steel for general structural purposes including bridges and buildings.

**Notes:**

**Key Words:** UNS K02600

**Vendors:** No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.85 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>	

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Tensile Strength, Ultimate	400 - 550 MPa	58000 - 79800 psi	
Tensile Strength, Yield	250 MPa	36300 psi	
Elongation at Break	20 %	20 %	in 200 mm
	23 %	23 %	In 50 mm.
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi	
Compressive Yield Strength	152 MPa	22000 psi	Allowable compressive strength
Bulk Modulus	160 GPa	23200 ksi	Typical for steel
Poissons Ratio	0,26	0,26	
Shear Modulus	79,3 GPa	11500 ksi	

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0,29 %	0,29 %	
Copper, Cu	>= 0,20 %	>= 0,20 %	only if copper steel is specified
Iron, Fe	98 %	98 %	
Manganese, Mn	0,80 - 1,2 %	0,80 - 1,2 %	
Phosphorous, P	0,040 %	0,040 %	
Silicon, Si	0,15 - 0,40 %	0,15 - 0,40 %	
Sulfur, S	0,050 %	0,050 %	

[References](#) for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

## ANEXO V. Ficha técnica de electrodo E 6010

# ELECTRODO CELULOSICO ESPECIAL

**C - 10**

Norma: 

AWS	E 6010
-----	--------

Color de Revestimiento: rojo ladrillo    Identificación: sin color

**Análisis del Metal Depositado:**

C	0.12%	Mn	0.6%	Si	0.25%
---	-------	----	------	----	-------

\*Valores típicos

**Características:**

Es un electrodo de penetración profunda y uniforme que difiere del E6010 convencional por tener determinadas características especiales de soldabilidad en posición vertical descendente. Ideal para pasadas de raíz en la soldadura de oleoductos, donde la alta velocidad, el control del arco y la rápida solidificación de la escoria son sumamente importantes.

**Aprobación:**

**AMERICAN BUREAU OF SHIPPING**

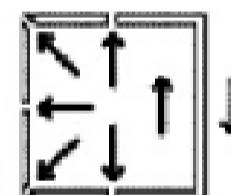
**Propiedades Mecánicas**

Resistencia a la Tracción	Límite Elástico	Elongación
48 -51 kg/mm <sup>2</sup>	40 - 43 kg/mm	24-26%

\*Valores típicos

**Posiciones de Soldar**

Plana, horizontal, sobrecabeza, vertical ascendente, vertical descendente

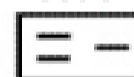


**Corriente y Polaridad**

Para corriente continua Electrodo al polo positivo		
Ø	1/8"	5/32"
Amp. Mín.	80	110
Amp. Máx.	120	150



Pasada de relleno y recubrimiento



Pasada de Raiz

**Aplicaciones:**

- Especial para tuberías de petróleo (oleoductos) de los tipos API 5L, X42, X46, X52.
- Tanques de almacenamiento
- Recipientes de presión
- Tuberías en general para la conducción de fluidos

**LARGO:** 350 mm.

**PESO POR CAJA:** 20 kg. / 44 lbs.