

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
ESCUELA DE POSGRADO**



**Título**

**ANÁLISIS DE FALLA DE UNA TUBERÍA DE DESCARGA EN “Y” DE ACERO  
SOLDADA**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN  
INGENÍERÍA DE SOLDADURA**

**AUTOR**

Ing. Raúl Carlos Hurtado Espejo

**ASESOR**

Dr. Ing. Paul Pedro Lean Sifuentes

Octubre, 2019

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación muestra la metodología seguida y los resultados obtenidos en el análisis de falla de una tubería de descarga en “Y” de acero fabricada por soldadura. La tubería de descarga estuvo en servicio solo 30 días antes de producirse la aparición de fisuras en las uniones soldadas. Se realizaron ensayos con la finalidad de determinar la causa raíz de la falla. En la inspección visual realizada a las uniones soldadas se aprecia cordones de soldadura irregulares, empalmes pobres entre cordones, socavaciones y salpicaduras. De la inspección por partículas magnéticas fluorescentes se visualiza que las fisuras se ubican en el pie del cordón que une la plancha de refuerzo y la tubería del ramal. La caracterización de los metales base verifican que las propiedades del acero son las esperadas para este tipo de componente. Del análisis macrográfico realizado en las uniones soldadas, se observan inclusiones de escoria, falta de fusión, fisuras que nacen en los pies de los cordones y falta de llenado. Se hizo un análisis mediante simulación numérica computacional localizándose las zonas donde se concentran y se tienen los máximos esfuerzos cuando la tubería entra en operación, y éstas coincidían con la zona de fisuración. De lo anterior se puede concluir que las fisuras producidas en el pie del cordón de soldadura, tienen su origen en diversos factores que son acumulativos. En primer lugar, el pie de una soldadura es un concentrador natural de tensiones, esto sumado a la baja calidad de las soldaduras, al fuerte embridamiento y a las tensiones residuales producidas por la soldadura, pueden haber dado origen a que se nucleen fisuras durante la fabricación. Luego cuando la tubería entró en servicio, se produjeron esfuerzos pulsantes adicionales los que se suman a las tensiones residuales, lo que hizo que se nucleen y propaguen fisuras por un mecanismo de fatiga en zonas donde se producen altos esfuerzos.

**Palabras clave:** Análisis de falla, soldadura, tubería de descarga en “Y”, fatiga, defectos de soldadura, control de calidad.

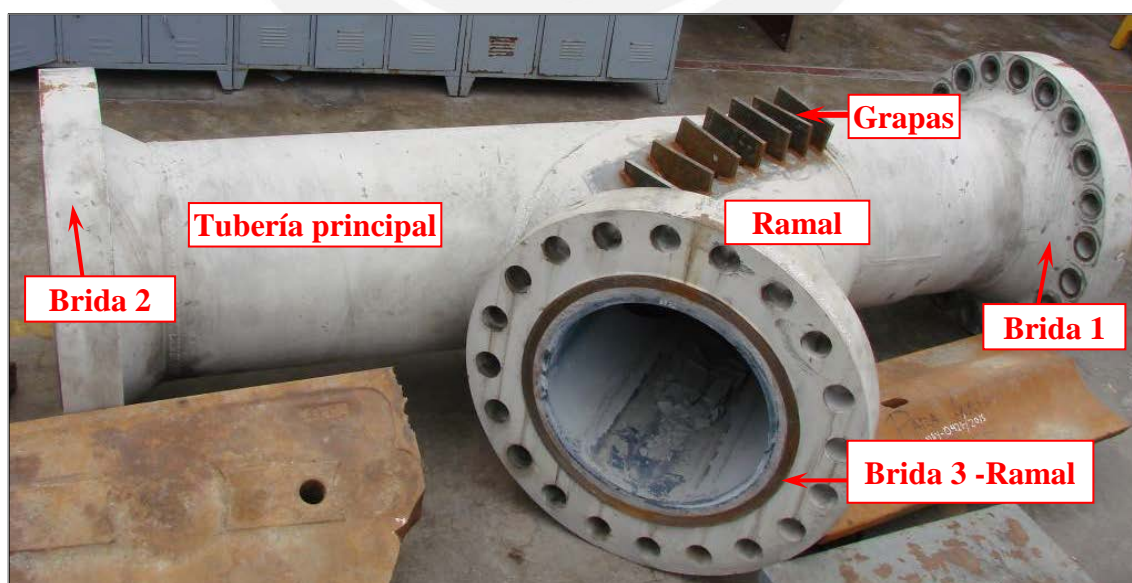
## TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN .....	i
TABLA DE CONTENIDOS .....	ii
INTRODUCCIÓN .....	iv
1. MARCO TEÓRICO .....	1
1.1. Tuberías de transporte de relave minero.....	1
1.2. Tubería API 5L .....	2
1.3. Soldabilidad de aceros HSLA.....	2
1.4. Procesos de soldadura.....	3
1.5. Calidad en la soldadura.....	4
1.6. Análisis de falla.....	7
1.7. Etapas del análisis de falla .....	8
2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	10
2.1. Inspección visual .....	10
2.2. Caracterización del metal base .....	11
2.2.1. Análisis químico .....	11
2.2.2. Cálculo del carbono equivalente .....	12
2.2.3. Análisis metalográfico .....	14
2.2.4. Ensayo de tracción.....	15
2.2.5. Ensayo de dureza .....	16
2.2.6. Ensayo de impacto.....	17
2.3. Inspección por partículas magnéticas .....	20
2.4. Análisis macrográfico .....	21
2.5. Microscopia electrónica de barrido .....	21
2.6. Análisis mediante simulación numérica computacional.....	22
3. ENSAYOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	23

3.1. Inspección visual .....	23
3.2. Caracterización del metal base .....	25
3.2.1. Composición química .....	26
3.2.2. Carbono equivalente .....	26
3.2.3. Análisis metalográfico .....	27
3.2.4. Ensayo de tracción.....	29
3.2.5. Ensayo de dureza .....	29
3.2.6. Ensayo de impacto.....	32
3.3. Inspección por partículas magnéticas.....	32
3.4. Análisis macrográfico.....	34
3.5. Microscopia electrónica de barrido .....	38
3.6. Análisis mediante simulación numérica computacional.....	40
CONCLUSIONES.....	42
RECOMENDACIONES .....	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

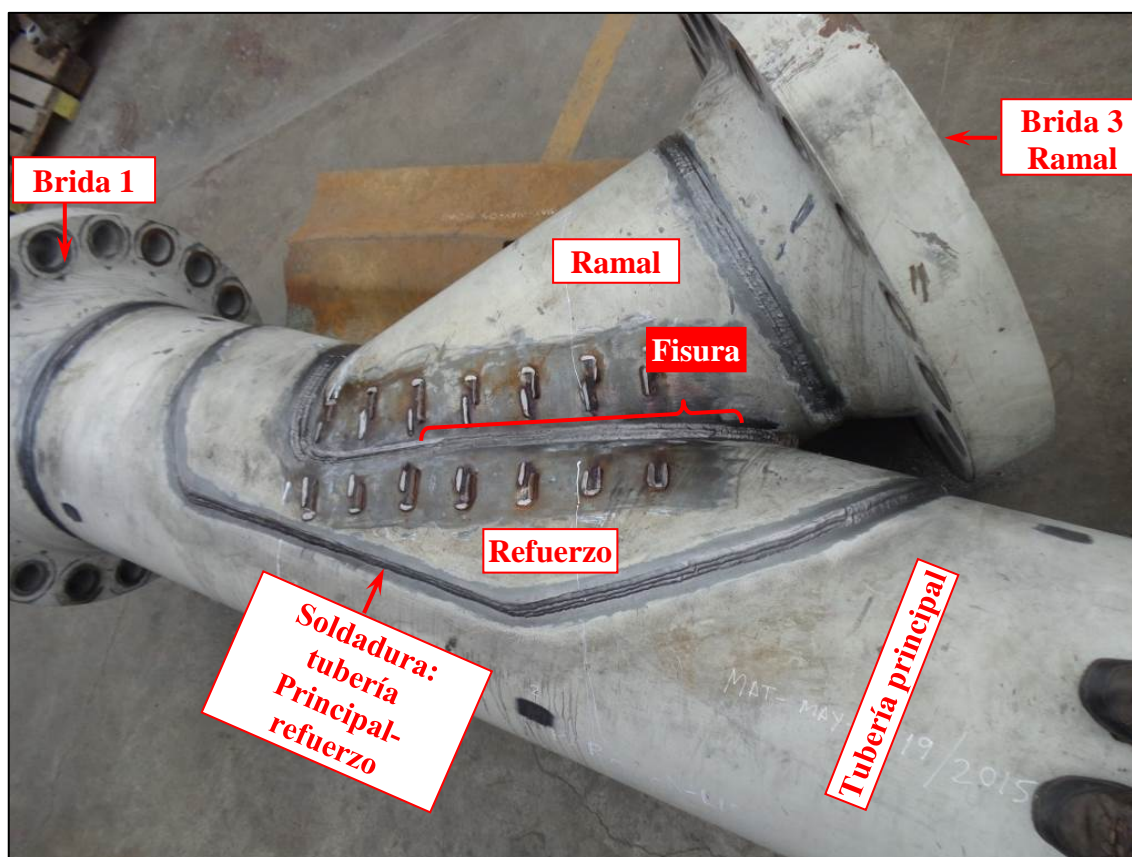
## INTRODUCCIÓN

En este trabajo de investigación se presenta el análisis de falla de una tubería de descarga en “Y” de acero fabricada por soldadura, que presenta una tubería principal, una tubería de ramal, y una plancha de refuerzo ubicada encima de la tubería principal que rodea a la unión entre la tubería principal y el ramal. En los extremos de ambas tuberías se encuentran bridas unidas por soldadura. El componente forma parte de la descarga de bombas GEHO, desde donde se bombea relave con aproximadamente 60% de sólidos con una variación de presión entre 3000 kPa a 6000 kPa. En los primeros 30 días de entrar en servicio, la tubería de descarga presentó fisuras en la soldadura realizada entre la plancha de refuerzo y la tubería de ramal. Antes de la falla final y su retiro definitivo de operación fueron colocadas grapas metálicas, mediante soldadura sobre la plancha de refuerzo y el ramal, como se aprecia en la Figura 1, con la finalidad de contener la propagación de la fisura que se estaba produciendo y que fue detectada en operación. El usuario indica que la falla final, antes de su retiro, comienza con una fuga pequeña (chorro pequeño por la unión soldada), se procede a cerrar la válvula de descarga para evitar el retorno, el chorro se incrementa como consecuencia del incremento de la presión hasta llegar a la falla final.



**Figura 1.** Vista general de la tubería de descarga en “Y” fisurada mostrando las grapas.

La Figura 2 muestra la tubería de descarga una vez retiradas las grapas. Se aprecia el refuerzo en forma de plancha, que se ubica en la superficie de la tubería principal y esta soldado a la tubería principal y a la tubería del ramal. La fisura se produce en la soldadura que une la plancha de refuerzo y el ramal.



**Figura 2.** Vista de la tubería de descarga en “Y” sin grapas. Zona donde se presenta la fisura.

### **Objetivo general**

El objetivo general del trabajo es determinar la causa más probable que originó la falla de la tubería de descarga en “Y”.

### **Objetivos específicos**

1. Caracterizar de los materiales base que conforman la tubería de descarga en “Y” para verificar su cumplimiento con la norma aplicable.

2. Realizar el control de calidad de las uniones soldadas de la tubería de descarga en “Y”, mediante ensayos mecánicos, ensayos no destructivos y ensayos microestructurales.
  
3. Efectuar un análisis mediante simulación numérica computacional para ubicar la zona de mayores esfuerzos actuantes sobre la tubería de descarga en “Y”.



## **1. MARCO TEÓRICO**

### **1.1. Tuberías de transporte de relave minero**

La industria minera suele transportar los minerales que explota usualmente de las siguientes maneras:

- a. En fajas transportadoras, luego de atravesar un proceso de chancado.
- b. En tuberías de transporte, las cuales transportan el mineral en forma de pulpa, luego de atravesar procesos de chancado, molienda y adición de agua.
- c. En camiones mineros, luego de atravesar un proceso de chancado para ser manejado por cargadores frontales o palas.

El transporte de relave minero tipo pulpa, como el concentrado de cobre, se suele realizar a través de tuberías de acero al carbono recubiertas con goma y tuberías de HDPE. Las tuberías de acero al carbono con recubrimiento de goma se seleccionan cuando se requieren mayores resistencias, para operaciones con presiones internas más elevadas.

Ambos tipos de tuberías de transporte de relaves sufren constantemente de problemas de abrasión y corrosión. Estos problemas son los más comunes cuando las tuberías son fabricadas cumpliendo con todas las exigencias de calidad de los estándares internacionales. Sin embargo, también se producen fallas ocasionadas por problemas de fabricación.

En el caso de las tuberías de acero al carbono recubierto con goma los problemas de fabricación más comunes son los defectos de soldadura que se producen en las uniones soldadas de las tuberías con sus accesorios (bridas, codos, tees, etc.), la deficiente adherencia de la goma con la tubería de acero, la distribución no homogénea de la goma al interior de la tubería de acero, entre otros.



## **1.2. Tubería API 5L**

El componente analizado es una tubería de descarga en “Y”, el cual es fabricado mediante el proceso de soldadura a partir de segmentos de tubería de acero API 5L PSL 2 X52. Las características de los aceros para tubería que cumplen con la norma API 5L se detallan a continuación:

- a) Esta norma mantiene el concepto de dos niveles básicos de requisitos técnicos estándar para líneas de tubería, expresados como dos niveles de especificación de producto (PSL1 y PSL2).
- b) El nivel PSL1 provee un nivel de calidad estándar para líneas de tubería.
- c) El PSL2 tiene requisitos obligatorios adicionales para la composición química, resistencia al impacto y propiedades de tracción.
- d) Las designaciones del grado se componen por un sistema alfanumérico donde empieza con una letra X, seguida por dos dígitos que indican el límite de fluencia mínimo especificado expresado en ksi. [2]

## **1.3. Soldabilidad de aceros HSLA**

Los aceros de alta resistencia y baja aleación, conocidos como HSLA por sus siglas en inglés, son soldables por arco manual, SMAW, arco sumergido, SAW, o bajo protección de gas, GMAW, siguiendo estrictamente las recomendaciones de su fabricante. El objetivo a conseguir es doble:

- Ausencia de defectos que puedan afectar al comportamiento esperado del material, es decir, que presenten una calidad aceptable.
- Propiedades y características mecánicas de la unión, como mínimo idénticas a las del metal base.

Para obtener unas favorables propiedades mecánicas en la unión soldada los parámetros de soldeo deben adaptarse a la composición química del metal base y al comportamiento de su transformación metalúrgica durante la soldadura. Para ello, hay que seleccionar unas condiciones de soldeo que permitan obtener, tanto en el metal aportado como en la zona térmicamente afectada, las características mecánicas de diseño. Para ello es necesario:

- Aportar un metal con los elementos de aleación necesarios para que sus propiedades mecánicas sean similares o superiores a las del metal de base.
- Eliminar la posibilidad de introducción de hidrógeno durante la soldadura, para evitar el agrietamiento bajo cordón y en la zona afectada por el calor del metal base, por la gran propensión a fragilizarse que poseen las estructuras martensítica y bainítica inferior.
- Acotar la velocidad de enfriamiento de la junta soldada que no debe ser demasiado elevada para evitar la fisuración del metal depositado, ni tan baja para permitir conseguir buenas propiedades mecánicas en la zona afectada térmicamente y en el metal aportado. [3]

Dentro de las recomendaciones más comunes, para lograr controlar las variables anteriormente descritas, podemos seleccionar electrodos de bajo hidrógeno de la familia AWS A5.1 EXX18 [4], emplear una temperatura de precalentamiento mínima al soldar, controlar la temperatura entre pases, ejecutar una secuencia de soldeo adecuada y de ser necesario realizar tratamientos térmicos post soldadura.

#### **1.4. Proceso de soldadura**

Para el componente en estudio el proceso de soldadura empleado fue el soldeo por arco con electrodo revestido, conocido también como SMAW por sus siglas en inglés. Es un proceso en el que la fusión del metal se produce gracias al calor generado por un arco eléctrico establecido entre el extremo de un electrodo revestido y el metal base de una unión a soldar.

El material de aportación se obtiene por la fusión del electrodo en forma de pequeñas gotas. La protección se obtiene por la descomposición en forma de gases y en forma de escoria líquida que flota sobre el baño fusión y, posteriormente, se solidifica.

## 1.5. Calidad en la soldadura

### 1.5.1. Discontinuidades de la unión soldada

Las discontinuidades son anomalías o irregularidades que se presentan en la unión soldada. Se consideran como defecto cuando por su magnitud, número o localización pueden provocar el fallo de la unión.

Las causas que pueden provocar estas discontinuidades son, entre otras, una inadecuada:

- Preparación, disposición o limpieza de las piezas a unir.
- Ejecución de la soldadura.
- Soldabilidad del material base.
- Elección de consumibles (gases, metal de aporte, etc.)

Los principales defectos que se producen en el soldeo por fusión se clasifican en los siguientes grupos:

- Grietas o fisuras (ver Figura 3)
- Cavidades o porosidades
- Inclusiones sólidas (escoria, óxidos, inclusiones de Wolframio, etc.)
- Falta de fusión o de penetración.
- Imperfecciones de forma y dimensión.
- Otras imperfecciones.



A) Salpicaduras



B) Inclusión de escoria



C) Fisura al pie del cordón



D) Fisura longitudinal al cordón de soldadura



E) Fusión incompleta

**Figura 3.** Tipos de discontinuidades en uniones soldadas, imágenes extraída de la norma AWS B1.11.[7]

Una soldadura con discontinuidades puede cumplir o no con una norma, es decir, podrá ser aceptada o rechazada. Se aceptará si las dimensiones de sus discontinuidades están por debajo de lo establecido en la norma aplicable en función del nivel de calidad considerado. [5]

#### 1.5.2. Importancia de la inspección de la construcción soldada

La inspección de la construcción soldada es de suma importancia para garantizar la calidad de la misma. Hernández [5] propone una definición bastante objetiva.

“Las inspecciones de construcciones soldadas podrían definirse como el conjunto de actividades encaminadas a asegurar un determinado grado de fiabilidad de un conjunto soldado, mediante la verificación del mismo por medios adecuados durante diferentes fases del proceso productivo.

La importancia de esta inspección se desprende de la responsabilidad de los equipos y construcciones que actualmente se fabrican por soldeo, los cuales, en determinadas condiciones de fallo, afectan seria y directamente a la seguridad pública.

El convencimiento de la importancia de inspeccionar estos conjuntos soldados, ha sido la causa de que, en todos los países industrializados, se hayan publicado códigos, especificaciones y normas relativos a su construcción e inspección”.

### 1.5.3. Objeto de la inspección

Definir el objeto de la inspección es de vital importancia en la gestión de la calidad de las soldaduras. Hernández [5] propone un objetivo principal.

“El principal objetivo, durante la inspección de soldaduras, es el determinar el grado de fiabilidad del conjunto inspeccionado. Es decir, poder conocer si lo inspeccionado va a poder ser utilizado en las condiciones para las que fue diseñado.

Esto no quiere decir que el conjunto soldado este totalmente libre de discontinuidades. Pueden, durante las distintas fases de inspección, detectarse discontinuidades o desviaciones sobre los requisitos establecidos, que no influyan esencialmente en el futuro comportamiento en servicio y que, a pesar de su existencia, se considere al conjunto apto para su servicio.

La inspección debe hacerse evaluando los resultados en relación con unas exigencias establecidas en códigos o normas aplicables al producto examinado”.

### **1.6. Análisis de falla**

El análisis de falla es considerado como la examinación de las características y causas por las que componentes o sistemas han fallado. Mediante el análisis de evidencia física, herramientas y el uso de principios ingenieriles y científicos se puede alcanzar la razón principal por la cual se realizan los análisis de fallas: evitar la recurrencia de fallas similares. La importancia de esta tarea se refleja en aspectos de seguridad, confiabilidad, rendimiento y economía.

Dentro del amplio historial de análisis de fallas que se han realizado, las razones más comunes por las que ocurren las fallas incluyen:

- Condiciones de servicio u operación
- Mantenimiento inapropiado
- Inspección o examinación inapropiada
- Errores de fabricación/manufactura
- Errores de diseño (selección, y condiciones o propiedades asumidas de materiales). [1]

Una falla se puede definir como una condición inesperada e indeseable que inhabilita el funcionamiento correcto de un componente, máquina o proceso. Dependiendo de la severidad con la que se presente, puede ser interpretada de



distintas formas. El caso más crítico de una falla y la que se presenta en el objeto de estudio del presente trabajo es una fractura.

### **1.7. Etapas del análisis de falla**

Realizar un análisis de falla de un componente es comprometerse con un caso y adoptar una posición de permanente juicio. Descubrir la causa raíz de la falla requiere que el analista no solo haga uso de sus conocimientos del tema, sino que los extienda hacia nuevos horizontes. Si bien, el conocimiento es infinito y relevante dependiendo del lado de la moneda del que se vea, el analista deberá investigar y seleccionar información de libros, la escena del caso, consultar expertos y personas asociadas a la falla para comprender de manera global porque el objeto de estudio ha fallado.

Es determinante saber que no siempre bastará con el manejo de información para hallar la causa raíz de la falla. Realizar pruebas de laboratorio para sacar a la luz información íntegra del objeto de estudio es indispensable, y se deben seguir procedimientos para que la información obtenida sea veraz y válida.

Para alcanzar la meta del presente trabajo de investigación, se seguirán procedimientos y recomendaciones de la ASM International. Las etapas más relevantes para el análisis de una falla se listan a continuación y deberán ser tomadas en consideración dependiendo del caso de estudio que se realice.

En primer lugar, con relación a la recopilación de información:

- Recopilación del historial de información y selección de muestras
- Examen preliminar de las muestras falladas
- Ensayos no destructivos

Prosiguiendo con un enfoque en la evaluación de los daños y las condiciones que repercutieron en la fractura:

- Selección, identificación, preservación y limpieza de las muestras
- Examen y análisis macroscópico

- Examen microscópico y análisis de las superficies fracturadas
- Determinación del estado de esfuerzos
- Mecánica de fractura
- Determinación del mecanismo de fractura

Adicionalmente, con el fin de representar la condición del material:

- Examen y análisis metalográfico
- Ensayos mecánicos
- Análisis químico
- Ensayos bajo simulación de condiciones de servicio
- Discusión con expertos
- Síntesis de información, formulación de conclusiones y elaboración del reporte. [1]

Los procedimientos y ensayos por realizar en el análisis de falla usualmente son seleccionados por el analista en base a su experiencia y a consultas realizadas a expertos.



## **2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

Para realizar el presente trabajo de investigación se llevaron a cabo una serie de análisis y ensayos que son recomendados por la ASM Metal Handbook, Volumen 11 [1]. Asimismo, se tomo como referencia la metodología de analisis de falla de algunos articulos de investigación que tratan sobre falla producidas en tuberías del mismo material de estudio [8]–[11]. A continuación, se describirá cada uno de ellos detallando su objeto, probeta o espécimen, procedimiento de análisis o ensayo y su criterio de aceptación de acuerdo con el código o norma aplicable.

### **2.1. Inspección visual**

La inspección visual se define como un método de prueba no destructiva que emplea la radiación electromagnética en las frecuencias visibles (luz) como energía y el ojo humano como sensor.

#### Objeto

El objeto de la inspección visual es detectar posibles defectos superficiales, identificar las partes que conforman el componente y determinar las dimensiones del componente.

#### Espécimen

El espécimen evaluado fue la tubería de descarga en “Y”.

#### Procedimiento de ensayo

La inspección visual se desarrolló de acuerdo con ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Sec. V, Artículo 9 – Visual Examination. [12]

Se ejecutó una exhaustiva limpieza del recubrimiento propio de la tubería de descarga en “Y”, hasta llegar a revelar el metal de las soldaduras que unen la tubería principal con el ramal, y la plancha de refuerzo con ambas tuberías. Se determinaron las medidas del componente y se midieron los espesores a través de un equipo de ultrasonido, seguidamente se procedió a inspeccionar los cordones de soldadura.

### Criterio de aceptación

El criterio de aceptación contenido en el código API 1104 [13], nos indica que las fisuras deben ser consideradas defectos si alguna de las siguientes condiciones existe:

- La fisura, de cualquier tamaño o localización en la soldadura, no es una fisura de cráter o fisura de estrella superficial.
- La fisura es una fisura de cráter o fisura de estrella superficial con una longitud que exceda 4mm.

### **2.2. Caracterización del metal base**

Para poder verificar que el material base con el cual se fabricó la tubería de descarga en “Y” cumple con la norma API 5L PSL2 X52 [2], se realizaron los siguientes ensayos:

#### **2.2.1. Análisis químico**

El análisis químico es una técnica de caracterización de un material que se emplea para determinar su composición química a nivel elemental.

#### Objeto

El objeto del análisis químico es determinar la composición química de los materiales base para compararlos con el código o norma aplicable.

#### Probeta

Se extrajeron cuatro (04) muestras, una muestra de la tubería principal, otra muestra del ramal, otra muestra del refuerzo de la tubería y otra muestra del metal depositado en el cordón de soldadura entre el ramal y el refuerzo.

#### Procedimiento de ensayo

El análisis químico se desarrolló de acuerdo con ASTM E415, Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry [14].

El equipo empleado para el análisis químico fue un espectrómetro de emisión óptica por chispa marca Bruker.

#### Criterio de aceptación

Los criterios de aceptación para la composición química serán tomados de la norma API 5L, Especificación para Líneas de Tuberías [2] y ANSI/AWS A5.1, Especificación para Electrodo de Acero al Carbono para soldaduras de Arco con Electrodo Revestido [4]. Ver Tabla 1 y Tabla 2.

**Tabla 1.** Composición química para tubería API 5L PSL2 X52.

Elemento	Contenido (%) en Peso Máximo
C	0,22
Si	0,45
Mn	1,40
P	0,025
S	0,015
Nb	≤ 0,15
V	
Ti	

**Tabla 2.** Composición química del metal depositado E7018.

Elemento	Contenido (%) en Peso Máximo
C	0,08
Si	0,50
Mn	1,20

#### **2.2.2. Cálculo del carbono equivalente**

El carbono equivalente es el índice que nos permite correlacionar la composición química de un acero con su tendencia a presentar estructuras frágiles cuando éste es sometido a un proceso de soldadura, lo que se considera una manera de determinar su soldabilidad.

### Objeto

Calcular el carbono equivalente de los metales base para determinar la soldabilidad de los mismos.

### Espécimen

Composición química de los materiales base en estudio.

### Procedimiento de cálculo

Se calculó el carbono equivalente ( $CE_{Pcm}$ ) de los materiales involucrados de acuerdo a la fórmula recomendada por el AWS D1.1, Código de Soldadura Estructural – Acero [15], que se emplea en aceros que presenten un contenido de carbono inferior a 0.22%. La fórmula establecida se muestra a continuación:

$$CE_{Pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

También se determinó el CE según la fórmula establecida por Düren ( $CE_{MW}$ ), que establece al igual que la propuesta por la AWS D1.1, Código de Soldadura Estructural – Acero [15], que se puede emplear en aceros con menos de 0.22%C. Düren indica que el CE se obtiene de acuerdo con:

$$CE_{MW} = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10}$$

### Criterio de aceptación

Los criterios de aceptación para el carbono equivalente serán tomados de la norma API 5L, Especificación para Líneas de Tubería [2]. Ver Tabla 3.

**Tabla 3.** Carbono equivalente del metal base.

Tipo	Carbono Equivalente (%) Máximo
$CE_{IIW}$	0,43
$CE_{Pcm}$	0,25

### **2.2.3. Análisis metalográfico**

El análisis metalográfico es una técnica comparativa de caracterización que determina la microestructura de los materiales metálicos.

#### Objeto

El objeto del análisis metalográfico es determinar la microestructura de los metales base de la tubería de descarga en “Y”.

#### Probeta

Se extrajeron dos (02) muestras de la tubería principal y del ramal.

#### Procedimiento de ensayo

Para el análisis metalográfico de los metales base se utilizan los criterios acotados por las siguientes normas:

- ASTM E3, Preparación de Especímenes Metalográficos. [16]
- ASTM E7, Terminología de Metalografía. [17]
- ASTM E45, Determinación de Contenido de Inclusiones en el Acero. [18]
- ASTM E112, Determinación del Tamaño de Grano Promedio. [19]
- ASTM E407, Microataque de Metales y Aleaciones. [20]

El análisis de la microestructura se realizó de acuerdo con el ASM Metal Handbook, Volume 9 [21]

El equipo empleado para realizar el análisis metalográfico fue un microscopio óptico de la marca Leica modelo DMI 5000, que nos permite alcanzar los 1000 aumentos, con cámara digital y software de procesamiento de imágenes.

#### Criterio de aceptación

El criterio de aceptación mostrado en la norma API 5L [2], nos indica que la microestructura de los metales base debe ser de grano fino, normalizados, termo conformados o bonificados (templados y revenidos).

#### 2.2.4. Ensayo de tracción

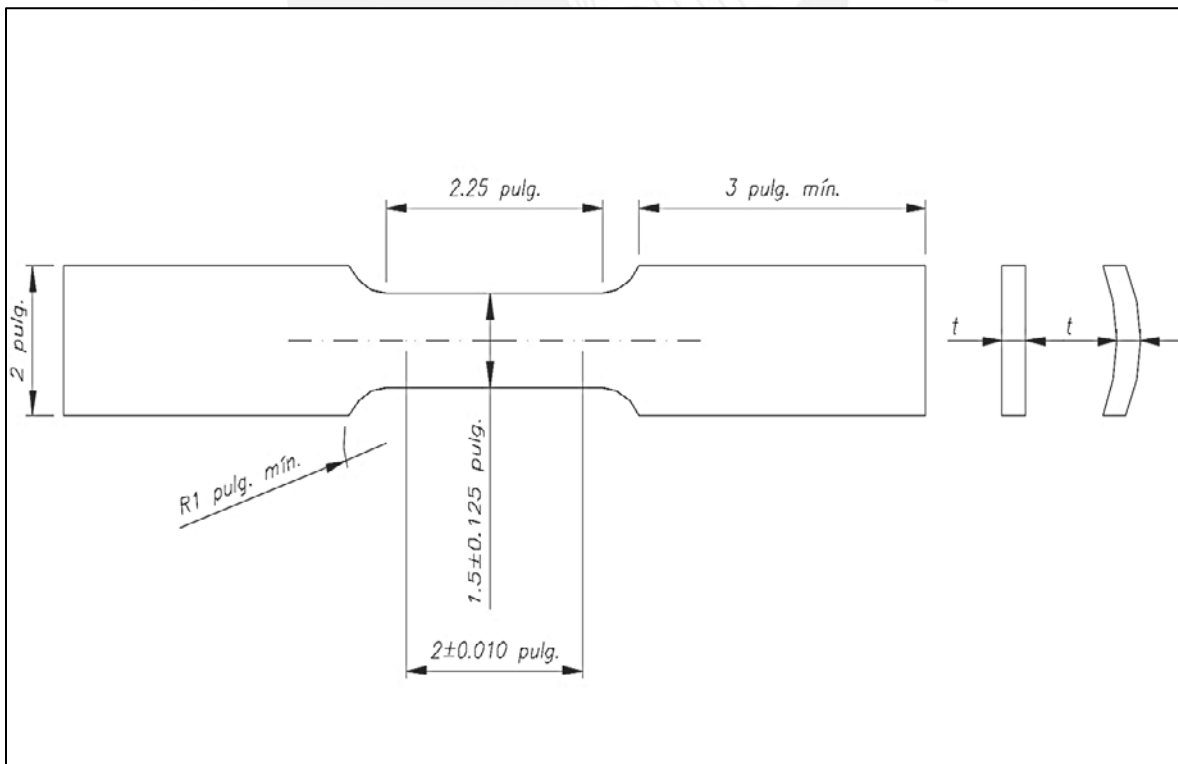
El ensayo de tracción es un ensayo mecánico estático que consiste en someter a una probeta normalizada a una carga axial de tracción creciente hasta que se produzca la rotura de la misma.

##### Objeto

El objeto del ensayo de tracción es determinar las propiedades mecánicas de los metales base para compararlas con el código o norma aplicable.

##### Probeta

Se extrajeron tres (03) probetas de tracción Tipo 4, una muestra de la tubería principal, otra muestra del ramal y otra muestra del refuerzo, según los especificado en la norma ASTM A370, Métodos de Ensayo y Definiciones Estándar para Ensayos Mecánicos de Productos de Acero [22]. La geometría de la probeta se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Dimensiones de probeta de tracción longitudinal de producto tubular.

### Procedimiento de ensayo

El ensayo de tracción se realizó siguiendo los lineamientos de ASTM A370, Métodos de Ensayo y Definiciones Estándar para Ensayos Mecánicos de Productos de Acero [22].

El equipo empleado para el ensayo de tracción fue una maquina universal de tracción de la marca ZWICK/ROELL modelo Z250.

### Criterio de aceptación

Los criterios de aceptación para el propiedades mecánicas de tracción serán tomados de la norma API 5L, Especificación para Líneas de Tubería [2]. Ver Tabla 4.

**Tabla 4.** Propiedades mecánicas de tracción para el acero API 5L PSL2 X52

API 5L PSL 2		Grado X52
Esfuerzos (MPa)	Fluencia	360 – 530
	Máximo	460 – 760
Elongación (%)		26,8

### **2.2.5. Ensayo de dureza**

El ensayo de dureza es un ensayo mecánico estático que nos permite determinar la resistencia que opone un cuerpo a ser penetrado por otro más duro.

### Objeto

El objeto del ensayo de dureza Vickers es determinar los valores de dureza en los metales base, zonas afectadas térmicamente y los cordones de soldadura para compararlas con el código o norma aplicable.

### Probeta

Se escogieron dos (02) probetas de macrografía para realizar los barridos de dureza Vickers.

### Procedimiento de ensayo

El ensayo de dureza Vickers de 10 kg se realizó siguiendo los lineamientos de ASTM E92, Métodos de Ensayo Estándar para Dureza Vickers y Dureza Knoop de Materiales Metálicos. [23]

El equipo empleado en el ensayo de dureza fue un durómetro Vickers de la marca ZWICK/ROELL modelo ZHV.

### Criterio de aceptación

Los criterios de aceptación para la dureza serán tomados del código AWS D1.1, Código de Soldadura Estructural – Acero [15]. Ver Tabla 5.

**Tabla 5.** Durezas máximas permitidas en estructuras.

<b>Tipo de Carga</b>	<b>Dureza HV Máxima</b>
<b>Dinámica</b>	350
<b>Estática</b>	400

Asimismo, la norma API 5L [2], Especificación para Líneas de Tubería, indica que los procedimientos que producen valores de dureza en la zona térmicamente afectada que excedan los 350 HV deberían ser evaluadas con respecto al riesgo de fisuración por hidrógeno.

### **2.2.6. Ensayo de impacto**

El ensayo de impacto es una técnica de caracterización que nos permite determinar el comportamiento de un material sometido a cargas dinámicas de flexión. Los ensayos Charpy “V” especifican que las probetas deben contar con una entalla en forma de “V”.

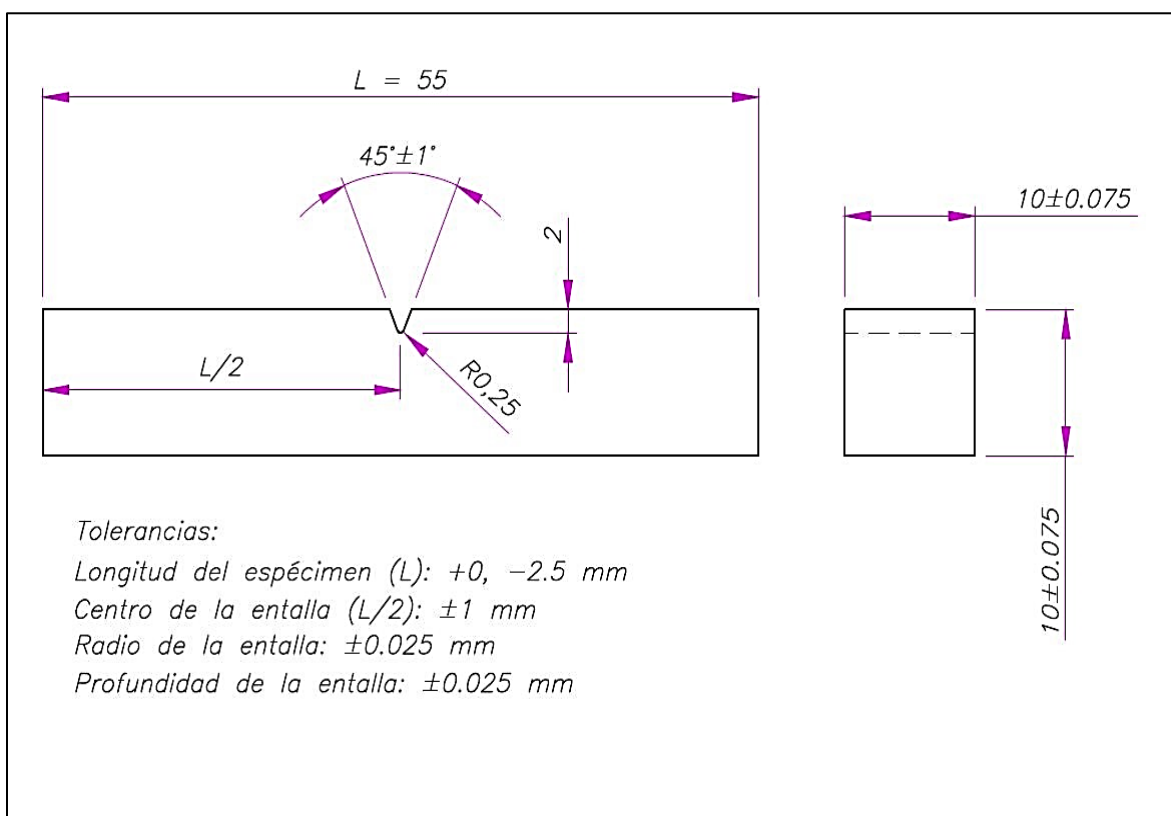
### Objeto

El objeto del ensayo de impacto es determinar la energía absorbida por los metales base para compararlas con el código o norma aplicable.



### Probeta

SE realizó el ensayo de impacto al material de la tubería principal y al del ramal, para ello se extrajeron dos kits de tres (03) probetas de impacto, según lo especificado en la norma ASTM E23, Métodos de Ensayo Estándar para Ensayos de Impacto de Barra con Entalla de Materiales Metálicos [24]. La geometría de la probeta se muestra en la Figura 5.



**Figura 5.** Dimensiones de probeta de impacto.

### Procedimiento de ensayo

El ensayo de impacto se realizó siguiendo los lineamientos de ASTM E23, Métodos de Ensayo Estándar para Ensayos de Impacto de Barra con Entalla de Materiales Metálicos [24].

Los equipos empleados para el ensayo de impacto fueron: un péndulo de impacto de la marca ZWICK/ROELL modelo RKP 450. Ver Figura 6.



**Figura 6.** Péndulo de impacto.

Criterio de aceptación

Los criterios de aceptación para la composición química serán tomados de la norma API 5L, Especificación para Líneas de Tubería [2]. Ver Tabla 6.

**Tabla 6.** Propiedades mecánicas de tracción para la tubería.

API 5L PSL 2	Energía Absorbida Mínima a Temperatura Ambiente (J)
Grado X52	27

### **2.3. Inspección por partículas magnéticas**

La inspección por partículas magnéticas es un método no destructivo que se emplea en la detección de discontinuidades superficiales y sub superficiales en materiales ferromagnéticos, mediante la magnetización de la pieza.

#### Objeto

El objeto de la inspección por partículas magnéticas es detectar posibles defectos superficiales de las uniones soldadas, principalmente fisuras.

#### Espécimen

Los especímenes evaluados fueron las uniones soldadas de la tubería de descarga en "Y".

#### Procedimiento de ensayo

Se utilizaron partículas magnéticas fluorescentes, en medio húmedo, para analizar los cordones soldados de la tubería de descarga en "Y" en busca de fisuras, según la norma ASTM E 709, Guía Estándar para Ensayos de Partículas Magnéticas [25]. La magnetización se realizó utilizando yugo magnético con corriente alterna, marca Magnaflux modelo Y7 y una lámpara de luz ultravioleta marca Magnaflux modelo UV5000.

#### Criterio de aceptación

El criterio de aceptación contenido en el código API 1104 [13], nos indica que las indicaciones relevantes deben ser consideradas defectos cuando cualesquiera de las siguientes condiciones existan:

- Indicaciones lineales evaluadas como fisuras de cráter o fisuras de estrella excedan los 4 mm en longitud.
- Indicaciones lineales son evaluadas como fisuras diferentes a las fisuras de cráter o fisuras de estrella.
- Indicaciones lineales son evaluadas como falta de fusión y exceden 25 mm en longitud total en una longitud continua de soldadura de 300 mm o 8% de la longitud de soldadura.

## **2.4. Análisis macrográfico**

El análisis macrográfico es un método que nos permite observar discontinuidades en los materiales con la ayuda de lentes de aumentos hasta una magnificación de 40 aumentos.

### Objeto

El objeto del análisis macrográfico es detectar discontinuidades en la unión soldada.

### Probeta

Se extrajeron cinco (05) probetas de la unión soldada entre el refuerzo y la tubería del ramal.

### Procedimiento de ensayo

Para el análisis metalográfico de los metales base se utilizan los criterios acotados por las siguientes normas:

- ASTM E3, Preparación de Especímenes Metalográficos. [16]
- ASTM E7, Terminología de Metalografía. [17]
- ASTM E340, Macroataque de Metales y Aleaciones. [26]

### Criterio de aceptación

El criterio de aceptación contenido en el código API 1104 [13], nos indica que una examinación visual de la sección transversal de la soldadura debería mostrar que está completamente fundida en la raíz y libre de fisuras. La profundidad de las socavaciones no debería exceder de 0,8 mm o 12,5% del espesor de pared de la tubería, cualquiera sea menor. En nuestro caso el espesor mínimo de las tuberías es de 16 mm, por lo que la profundidad no debe exceder de 0,8 mm.

## **2.5. Microscopia electrónica de barrido**

La microscopia electrónica de barrido es una técnica que nos permite obtener imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra utilizando las interacciones de los electrones con la materia. Emplea un haz de electrones para formar la imagen y cuenta con diferentes detectores que permiten el análisis de la topografía de la superficie y su composición química.

En el presente trabajo se realizó el análisis por microscopía electrónica de barrido sobre una muestra de la superficie de fractura de la fisura encontrada en una macrografía. La muestra fue montada en un porta muestras y analizada empleando un microscopio electrónico de barrido FEI modelo Quanta 650, equipado con un detector de Espectroscopia de Energía Dispersiva EDAX. Se obtuvieron imágenes a 21 aumentos con un voltaje de operación de 30 kV. El análisis se enfocó en la búsqueda de marcas de playa características del fenómeno de fatiga. [27]–[28]

## **2.6. Análisis mediante simulación numérica computacional**

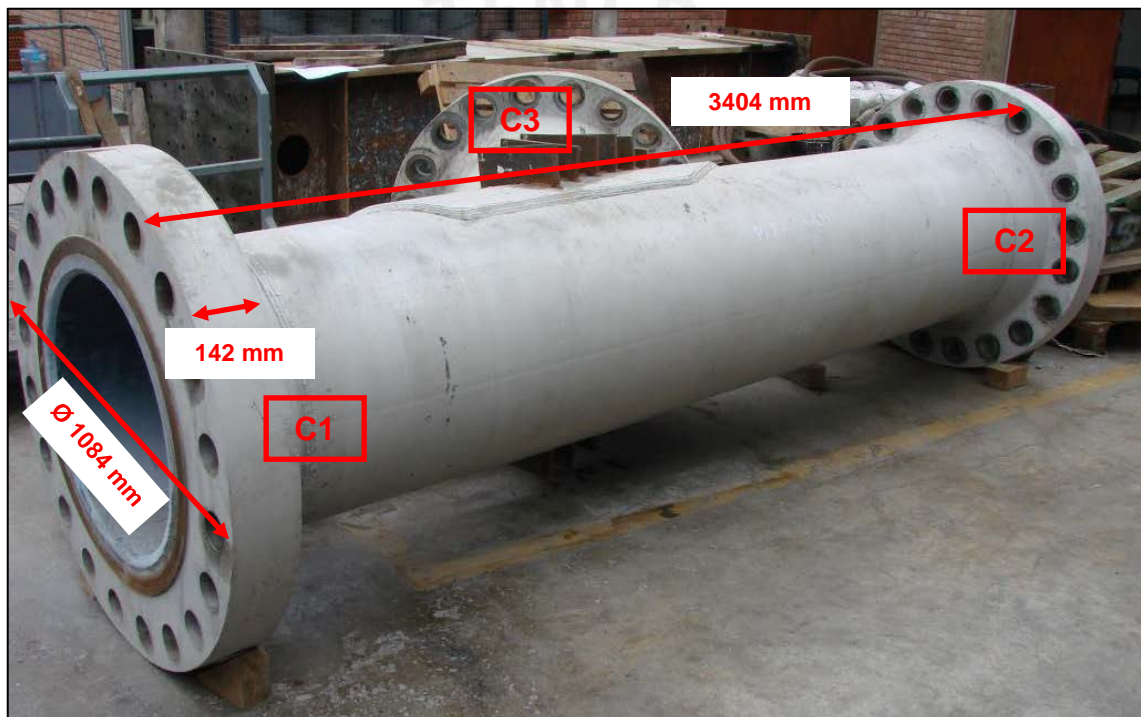
El análisis mediante simulación numérica computacional es un proceso que sirve para diseñar un modelo de un sistema real y experimentar con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema, evaluar sus esfuerzos máximos, determinar sus deformaciones máximas, etc. Dentro de los criterios definidos para su funcionamiento.

En el presente trabajo de investigación se hizo un análisis mediante simulación numérica computacional para localizar las zonas donde se concentran más los esfuerzos, cuando la tubería entra en operación. El modelo geométrico se realizó basándose en los planos, datos y maquetas proporcionadas por el dueño. El modelo 3D se realizó usando el software Autodesk Inventor Professional.

### 3. ENSAYOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. Inspección visual

En la Figura 7, se aprecian las medidas que corresponden a la tubería de descarga en “Y” en análisis, siendo el diámetro externo de todas las bridas de 1084 mm, el espesor de las bridas de 142 mm y el largo de la tubería principal de 3404 mm. Así mismo, se observa que la tubería de descarga presentaba un recubrimiento interior “liner” anti desgaste con un espesor promedio de 23,8 mm.



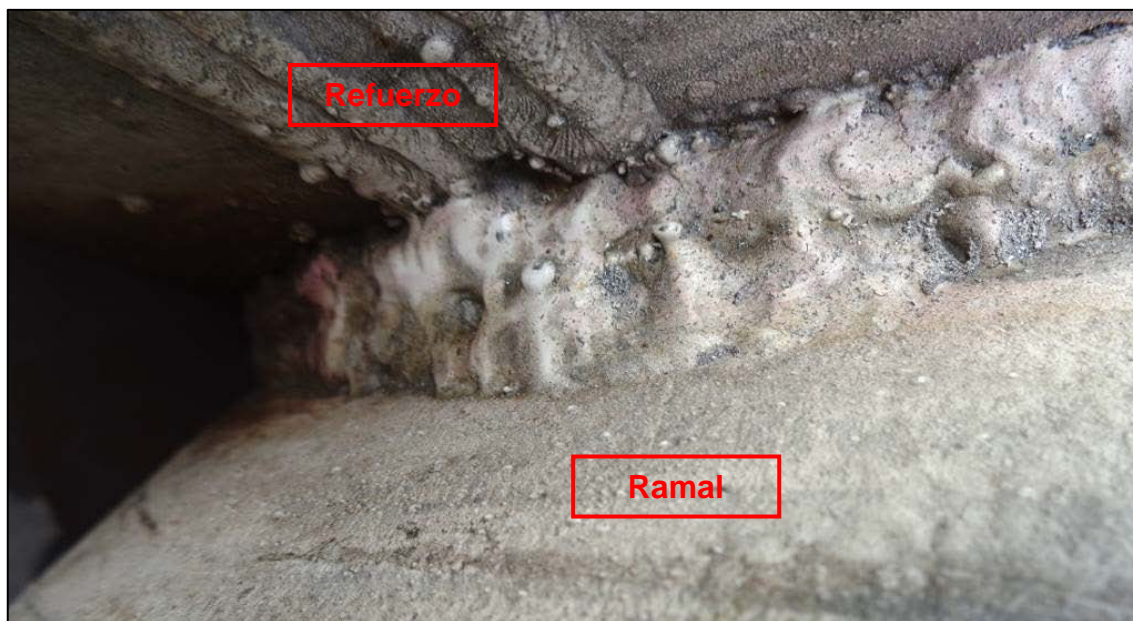
**Figura 7.** Dimensiones de la tubería de descarga en “Y” fisurada y de sus bridas.

Se realizó la medición de espesores por ultrasonido, encontrándose que el espesor promedio de la tubería principal es de 18.03 mm, el espesor promedio del ramal de 17.90 mm y el espesor promedio del refuerzo de 16.87 mm.

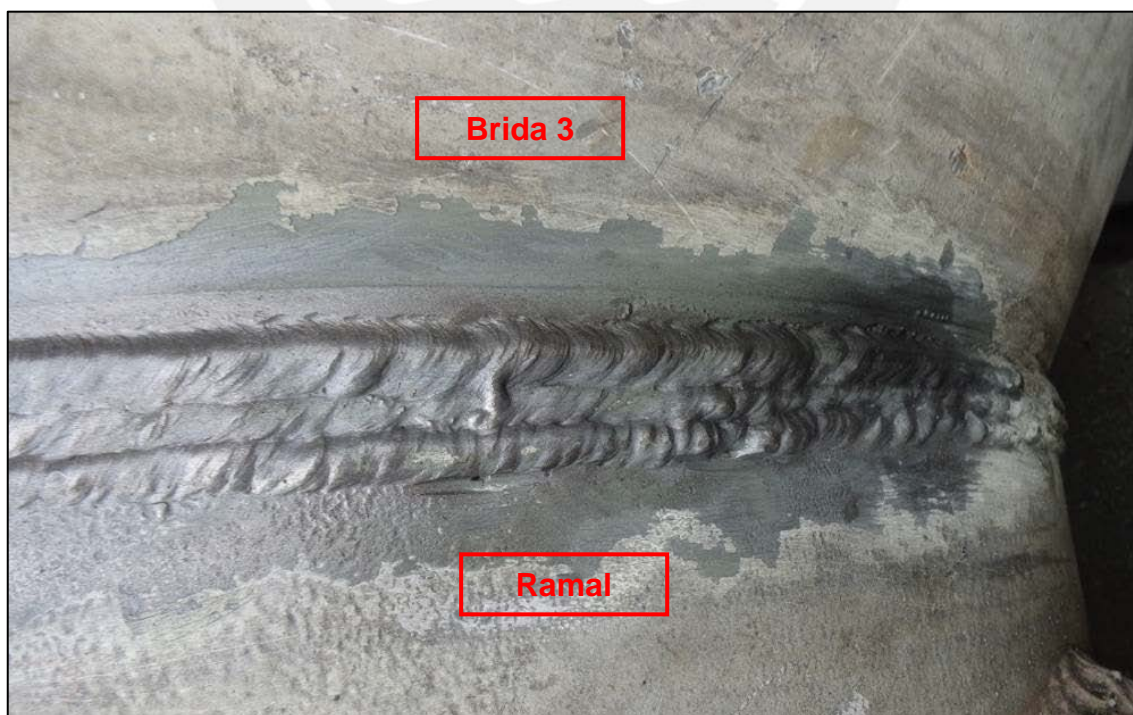
La inspección de los cordones de soldadura que unen a la tubería principal y el ramal con sus bridas, C1, C2 y C3 respectivamente, no revelan discontinuidades de soldadura que podrían catalogarse como defectos. Mientras que, el cordón de soldadura que une la plancha de refuerzo con ambas tuberías, presenta un cordón



de soldadura poco prolijo, irregular, con empalmes pobres entre cordones, socavaciones y salpicaduras, estas discontinuidades son más pronunciadas en la soldadura entre el ramal y la plancha de refuerzo llegando a convertirse en defectos, lo cual se muestra en las Figuras 8 y 9.



**Figura 8.** Soldadura que une la plancha de refuerzo y el ramal.



**Figura 9.-** Se observa el cordón circunferencial 3 irregular.

### 3.2. Caracterización del metal base

Para realizar la caracterización de los metales base se extrajeron muestras de la tubería de descarga en “Y” mediante corte por arco-aire, tal como se observa en la Figura 10.



**Figura 10.** Ubicación de la muestra extraída para los análisis.

En la Figura 11, se aprecia la ubicación de las probetas a ser extraídas de la muestra cortada de la tubería de descarga en “Y”.



**Figura 11.** Ubicación de las probetas extraídas para los diferentes ensayos.



### 3.2.1. Composición química

La Tabla 7, muestra los resultados de los análisis químicos realizados. Los materiales de la tubería principal, del ramal, el refuerzo y el cordón que une la tubería del ramal con el refuerzo presentan un contenido de carbono muy bajo, pudiéndose establecer que son aceros al carbono-manganeso micro aleados. Asimismo, cumplen con los requisitos de la norma API 5L, Especificación para Líneas de Tubería, para el grado PSL2 X52. [2]

**Tabla 7.** Composición química en % en peso

Elemento %	Contenido (%)			
	Tubería	Ramal	Refuerzo	Cordón refuerzo
<b>C</b>	0,06	0,06	0,06	0,03
<b>Si</b>	0,20	0,20	0,17	0,55
<b>Mn</b>	1,43	1,45	1,35	1,49
<b>P</b>	0,018	0,018	0,017	0,010
<b>S</b>	0,002	0,002	0,004	0,006
<b>Nb</b>	0,03	0,01	0,02	0,01
<b>V</b>	0,03	0,03	0,00	0,02

### 3.2.2. Carbono equivalente

Los resultados de los valores de CE determinados son mostrados en la Tabla 8, apreciándose que los valores hallados son realmente bajos, cumpliendo con los requisitos del API 5L, Especificación para Líneas de Tubería para el grado PSL2 X52 [2], por ello se concluye que son aceros de muy buena soldabilidad, básicamente debido a que tienen bajo contenido de carbono y ausencia de elementos aleantes.

Es necesario tener en cuenta que el CE es una estimación sobre la soldabilidad de un acero tomando en consideración solo su composición química y que no se deben perder de vista otras variables como concentradores de tensiones, grado de

embridamiento, hidrógeno difundido y tensiones residuales, producidas por el proceso de soldadura. [32]

**Tabla 8.** Carbono equivalente de la tubería principal, ramal y refuerzo

<b>Elemento</b>	<b>%C</b>	<b>CE<sub>Pcm</sub></b>	<b>CE<sub>MW</sub></b>
Tubería principal	0,06	0,14	0,14
Tubería de ramal	0,06	0,14	0,14
Plancha de refuerzo	0,06	0,13	0,13

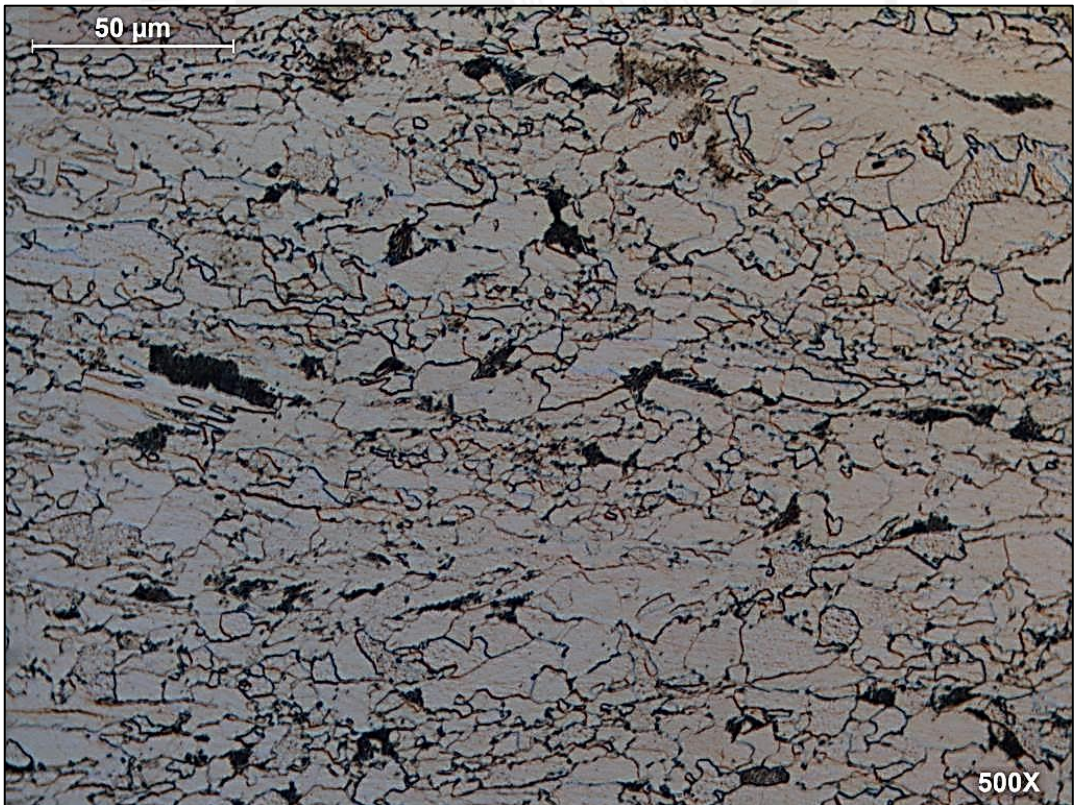
Debido a la masa de los materiales involucrados se puede esperar un rápido enfriamiento, durante el soldeo, si es que no se toman medidas para que el enfriamiento sea lento, debido a ello se podrían formar fases duras. En este caso en particular, la dureza de la martensita en caso se presentase, sería baja debido al pequeño contenido de carbono con ausencia de fragilidad.

### **3.2.3. Análisis metalográfico**

La tubería principal y la tubería del ramal, Figuras 12 y 13 respectivamente, presentan microestructuras formadas por granos finos y alargados de ferrita como matriz y ligera presencia de perlita fina, lo que les permite conseguir propiedades mecánicas mejoradas como la resistencia a la tracción y al impacto, sin reducciones apreciables de ductilidad. De manera similar la plancha de refuerzo presenta una microestructura formada por una gran cantidad de ferrita y escasa cantidad de perlita. Esta microestructura es compatible con los requisitos de API 5L, Especificación para Líneas de Tubería, para el grado PSL2 X52. [2]



**Figura 12.** Tubería principal se observa una matriz de ferrita fina y presencia de perlita fina. Nital 2%. 500X.



**Figura 13.** Tubería del ramal se observa una matriz de ferrita fina y presencia de perlita fina. Nital 2%. 500X.

### 3.2.4. Ensayo de tracción

La Tabla 9 contiene los resultados correspondientes al ensayo de tracción. Se muestra la resistencia a la tracción y el esfuerzo de fluencia, que alcanzaron el material de la tubería principal, del ramal y del refuerzo, valores compatibles con la microestructura que presentan estos aceros.

**Tabla 9.** Resultados del ensayo de tracción.

Muestra		Tubería	Ramal	Refuerzo
Esfuerzos (MPa)	Fluencia	543	577	587
	Máxima	609	618	619
Elongación (%)		38,7	40,7	37,0

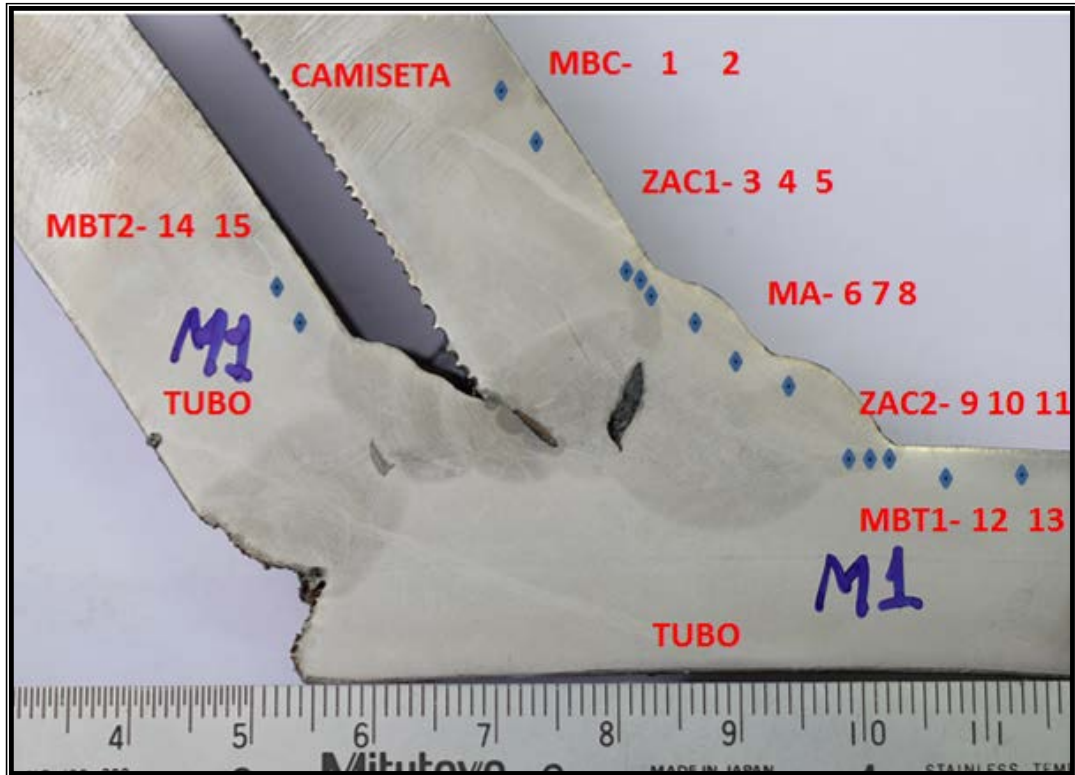
Con respecto a la elongación, se aprecia valores que demuestran que los tres materiales presentan alta ductilidad y cumplen con los requisitos de API 5L, Especificación para Líneas de Tubería para el grado PSL2 X52. [2]

### 3.2.5. Ensayo de dureza

Los valores de dureza determinados en la tubería principal, en el ramal y en el refuerzo son en promedio 221 HV, 234 HV y 223 HV respectivamente. Los valores de dureza encontrados en la ZAC de la tubería de ramal, en la soldadura que une el ramal con la plancha de refuerzo, alcanzan el valor máximo de 244 HV; mientras que, los valores de dureza encontrados en la ZAC de la plancha de refuerzo, en la soldadura que une el ramal con la plancha de refuerzo, alcanzan el valor máximo de 221 HV. Las Figuras 14 y 15 muestran la ubicación de los puntos de medición de dureza HV10, en las muestras M1 y M4 respectivamente. Las Tablas 10 y 11 presentan los resultados de los barridos de dureza HV10 realizados en las muestras M1 y M4 respectivamente.

De los valores encontrados, se demuestra que no se formaron zonas duras ni frágiles como consecuencia de la soldadura y que se cumple con la recomendación de dureza máxima de 350HV proporcionada por AWS D1.1, Código de Soldadura Estructural – Acero para estructuras sometidas a cargas dinámicas. [15]

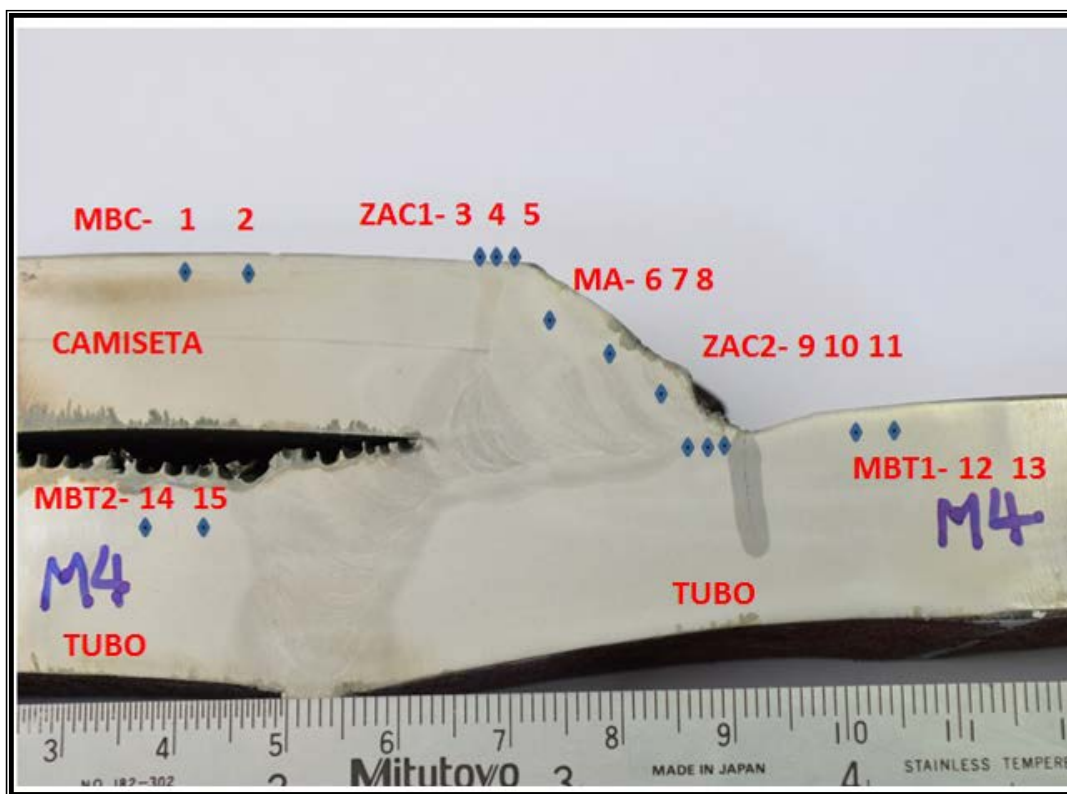




**Figura 14.-** Ubicación de los puntos donde se tomaron las medidas de dureza en la probeta M1.

**Tabla 10.** Barrido de dureza Vickers en la probeta M1.

Zona (M1)	Punto	Dureza HV10
Metal base refuerzo MBC	1	214
	2	219
Zona afectada por el calor 1 ZAC1	3	201
	4	212
	5	221
Material de aporte MA	6	219
	7	224
	8	226
Zona afectada por el calor 2 ZAC2	9	229
	10	229
	11	224
Material base ramal MBT1	12	232
	13	236
Material base tubería MBT2	14	224
	15	218



**Figura 15.-** Ubicación de los puntos donde se tomaron las medidas de dureza en la probeta M4.

**Tabla 11.** Barrido de dureza Vickers en la probeta M4.

Zona (M4)	Punto	Dureza HV10
Metal base refuerzo MBC	1	227
	2	231
Zona afectada por el calor 1 ZAC1	3	219
	4	214
	5	221
Material de aporte MA	6	233
	7	229
	8	247
Zona afectada por el calor 2 ZAC2	9	231
	10	242
	11	244
Material base ramal MBT1	12	232
	13	236
227+Material base tubería MBT2	14	224
	15	218

### **3.2.6. Ensayo de impacto**

Se determinó la tenacidad de impacto de los materiales de la tubería principal y del ramal a través del ensayo de impacto Charpy, obteniéndose 393 J para la tubería principal y 281 J para la tubería del ramal.

Los resultados de los ensayos de impacto, muestran que los materiales correspondientes a la tubería principal y del ramal, presentan valores que indican que son aceros de alta tenacidad, por lo que presentarán un buen comportamiento a cargas de impacto a temperatura ambiente, cumpliendo con los requisitos de API 5L, Especificación para Líneas de Tubería para el grado PSL2 X52. [2]

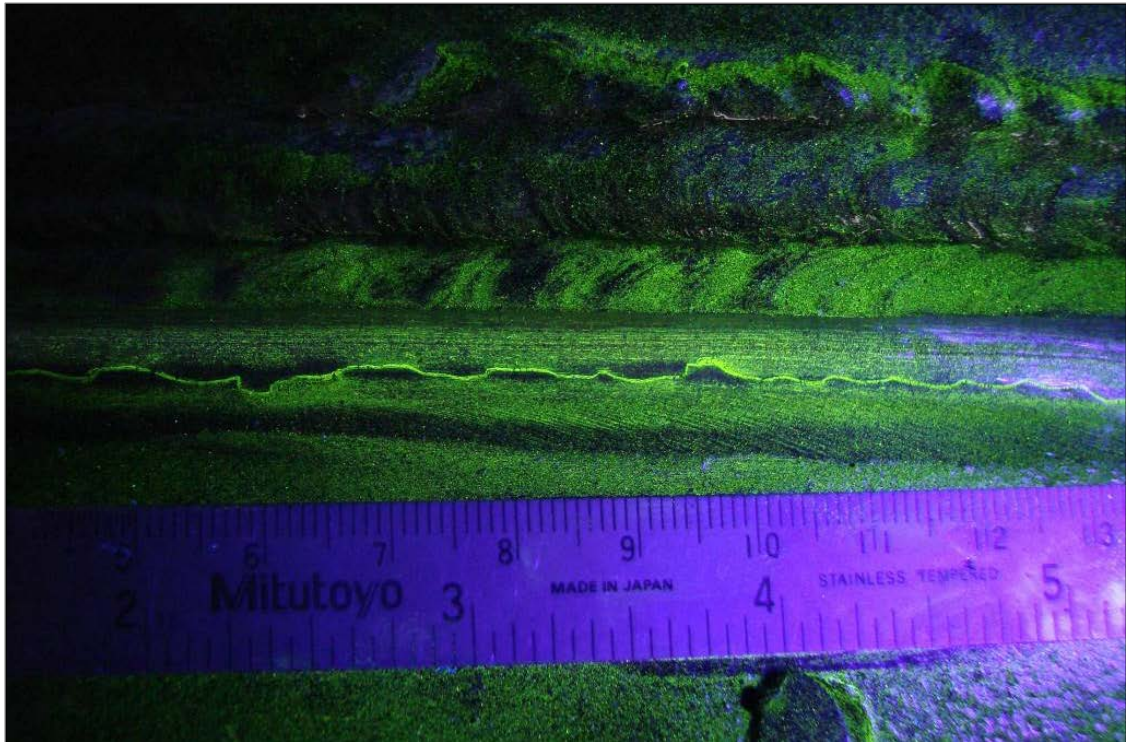
De los resultados de los ensayos de composición química, análisis metalográfico, ensayo de tracción, ensayo de impacto y ensayo de dureza, realizados a los materiales de la tubería de descarga, permiten descartar que la falla está asociada a problemas con los materiales involucrados.

### **3.3. Inspección por partículas magnéticas**

A través del análisis por partículas magnéticas se comprueba que la fisura, se produce en la soldadura que une la tubería del ramal con el refuerzo y corre a lo largo del pie del cordón de soldadura.

En la Figura 16, se observa una fisura detectada en la inspección por partículas magnéticas, luego se realizó un desbaste mecánico a través de esmerilado, para determinar su longitud real (ver Figura 17), encontrándose que la fisura se propaga de manera intermitente a través del cordón de soldadura (longitudinal a la tubería principal) que une el ramal con la plancha de refuerzo. Esto indica que se han nucleado fisuras en varios lugares en donde se presentaron las condiciones para ello, las mismas que coalescieron hasta formar un frente de fisuración.





**Figura 16.** Inspección por partículas magnéticas del cordón de soldadura del refuerzo, se aprecia una fisura longitudinal al cordón.



**Figura 17.** Fisura longitudinal ubicada en el pie del cordón, luego de esmerilar.



### 3.4. Análisis macrográfico

En la Figura 18, se muestran las cinco probetas de macrografía extraídas para su análisis, cabe resaltar que la posición de las probetas es transversal a la fisura encontrada en el cordón C refuerzo.



Figura 18. Probetas para el análisis macrográfico.

En la Figura 19 se observa la macrografía M1, encontrándose la presencia de inclusiones de escoria en la unión del ramal con el refuerzo, en esta sección no se aprecia fisuración en el pie de la soldadura en el lado de la tubería de ramal. En la soldadura establecida entre la tubería principal y del ramal se aprecia falta de fusión en la unión y falta de llenado.

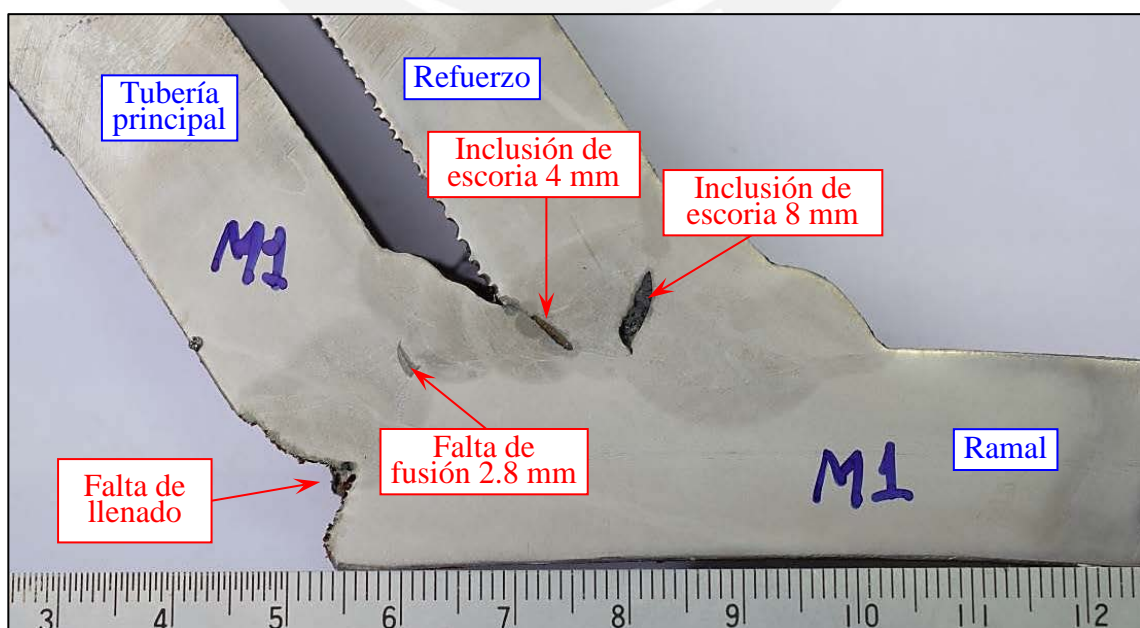
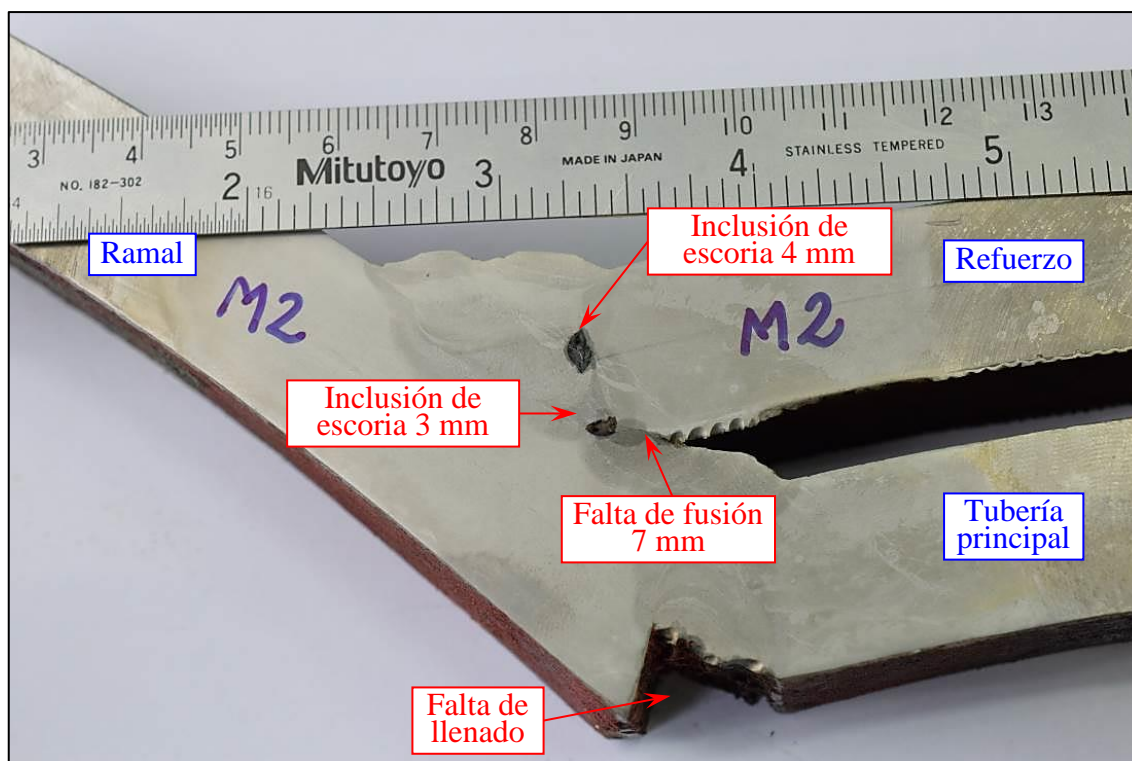


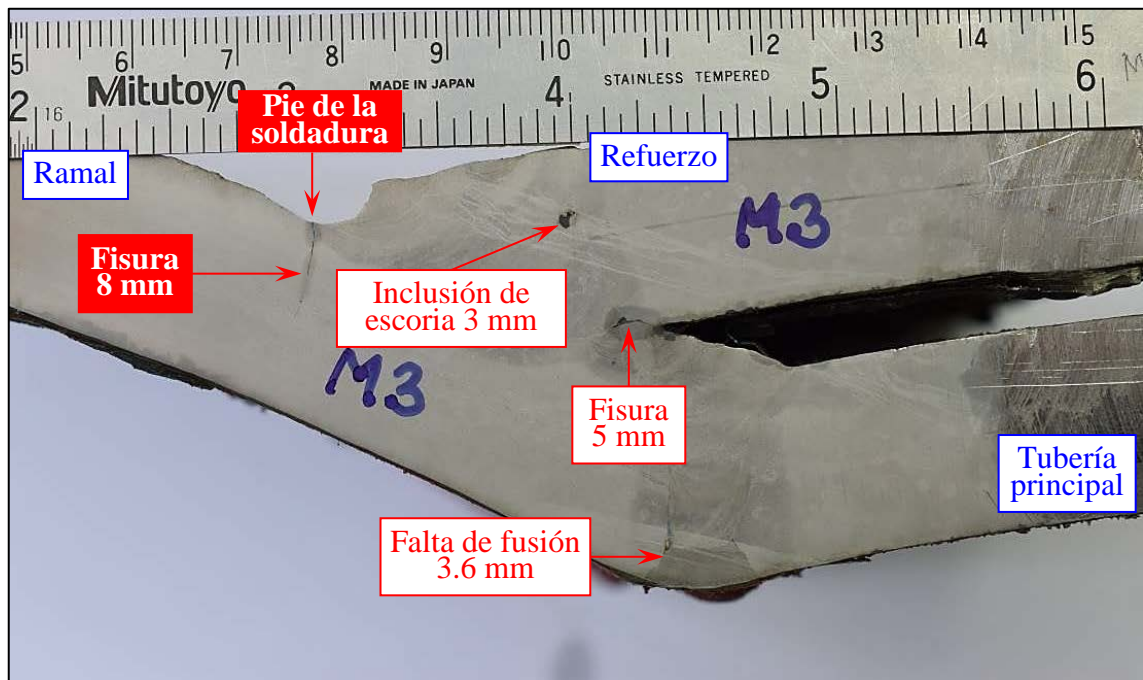
Figura 19. Macrografía probeta M1, se observan inclusiones de escoria y falta de fusión.

En la Figura 20 se observa la macrografía M2, encontrándose la presencia de inclusiones de escoria y falta de fusión en la soldadura entre el ramal con el refuerzo. De nuevo no se evidencia fisuración en el pie de la soldadura en el lado de la tubería del ramal. En la soldadura establecida entre la tubería principal y del ramal se aprecia falta de llenado.



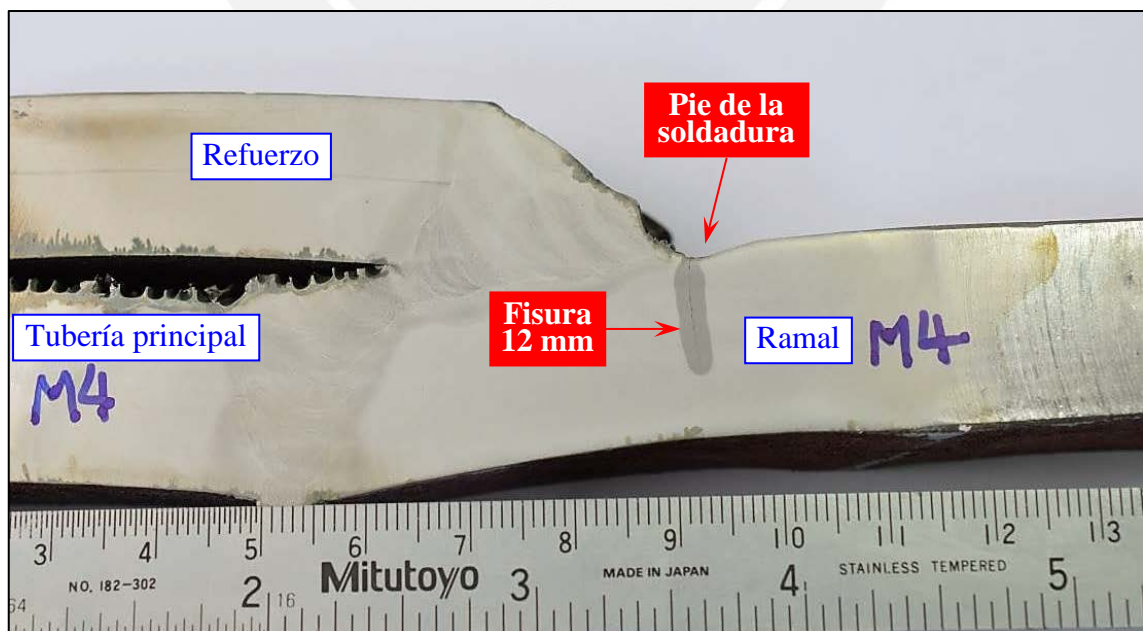
**Figura 20.** Macrografía probeta M2, se observan inclusiones de escoria y falta de fusión.

En la Figura 21 se muestra la macrografía M3 donde se observa la presencia de inclusiones de escoria, falta de fusión y fisuras. Se aprecia una fisura de 8 mm de profundidad en la tubería del ramal, que se inicia en el pie del cordón de soldadura entre el ramal y la plancha de refuerzo y se propaga desde la superficie del ramal hacia su interior, sin lograr atravesar todo el espesor del ramal.

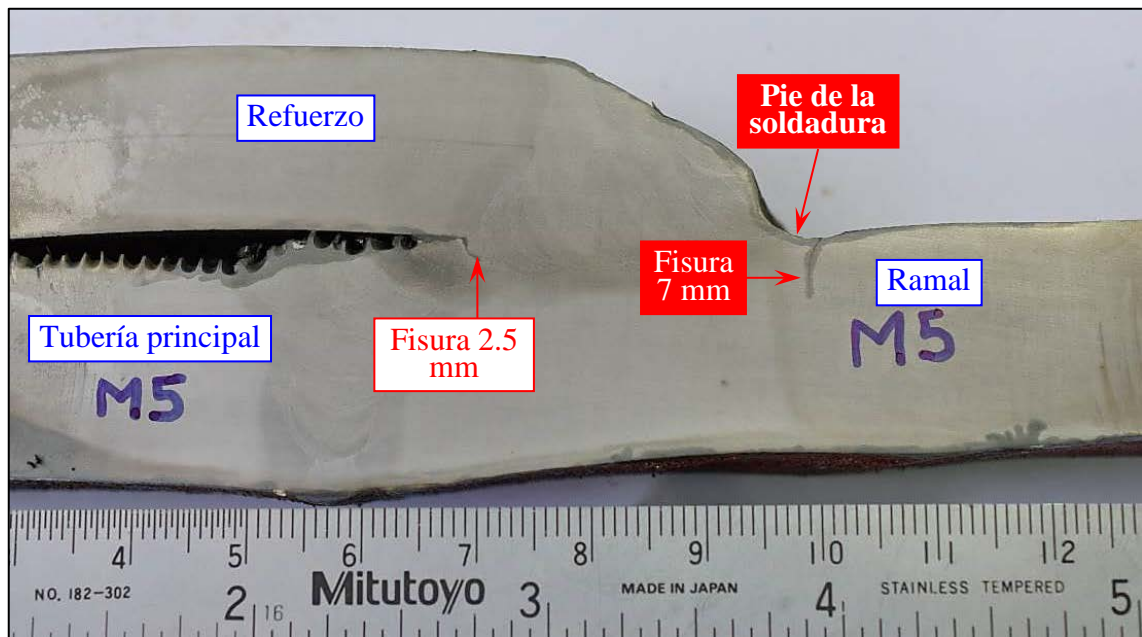


**Figura 21.** Macrografía probeta M3. Inclusiones de escoria, falta de fusión y fisura en la unión ramal-refuerzo.

En las Figuras 22 y 23 se observan las macrografías M4 y M5 donde se vuelve a evidenciar fisuras que se han desarrollado en los pies de las soldaduras en el lado del ramal, de la soldadura que une el ramal y el refuerzo.



**Figura 22.** Macrografía probeta M4, se observa una fisura en la unión ramal-refuerzo.



**Figura 23.** Macrografía probeta M5. Fisuras en la unión ramal-refuerzo.

La sobremonta que presentan las soldaduras, generan concentración de tensiones en los pies de las soldaduras, siendo mayor la concentración de tensiones en uniones de filete (como en este caso) comparado con una unión a tope.

Las fisuras en el pie son generalmente consideradas como fisuras en frío, que son provocadas por las tensiones residuales transversales al cordón de soldadura, que se formaron durante la contracción de la soldadura, a lo cual se pueden sumar las tensiones propias del servicio.

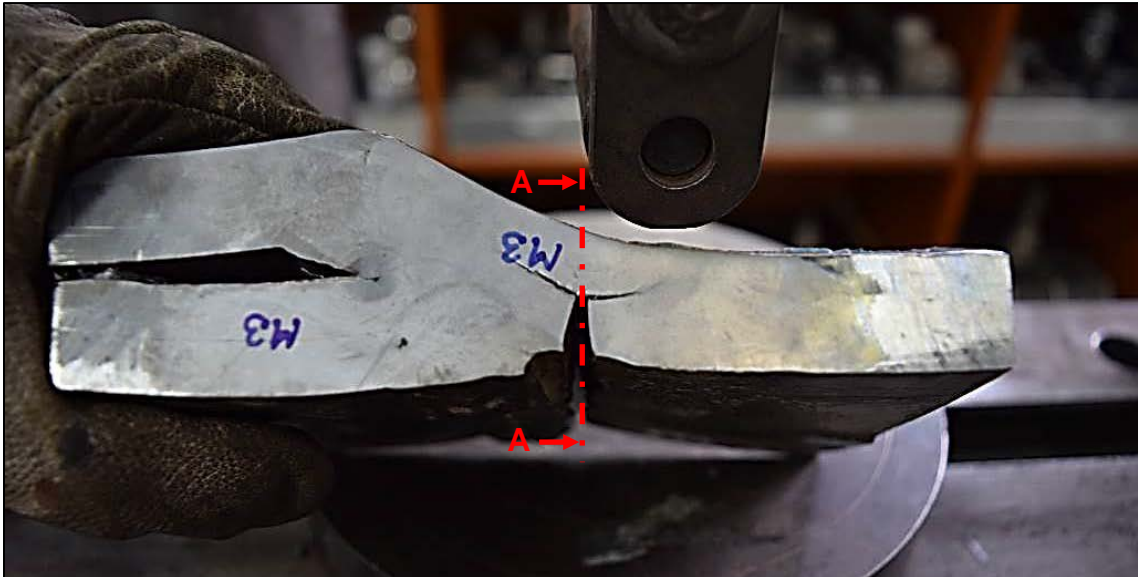
El problema de la fisuración se puede incrementar, si se tiene en cuenta el hidrógeno difundido, pues de la inspección visual y de los ensayos macrográfico realizados, apuntan a que no se ha tenido mucho cuidado en la realización de los cordones de soldadura, por lo que podría suponerse que podría haberse introducido hidrógeno durante la ejecución de las soldaduras.

Finalmente, los defectos encontrados no cumplen con los criterios de aceptación solicitados por el código API 1104 Welding of Pipelines and Related Facilities. [13]



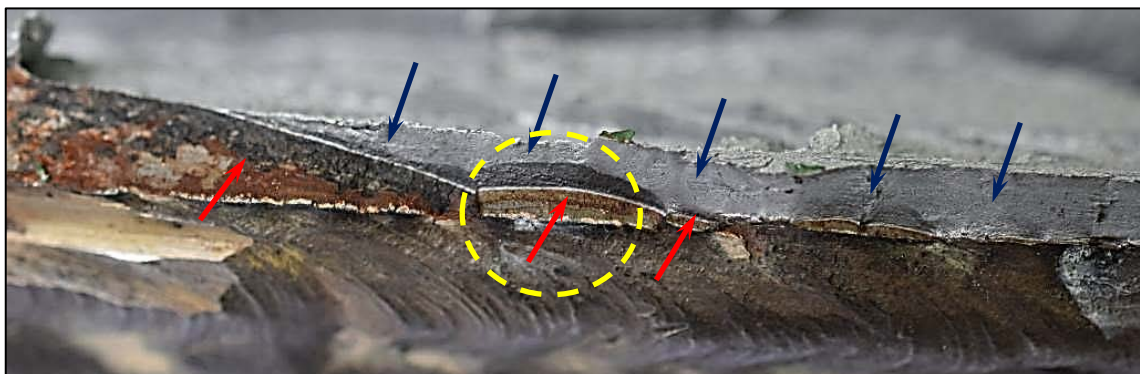
### 3.5. Microscopia electrónica de barrido

Para el análisis se empleó la probeta M3. La Figura 24, muestra la manera en que fue abierta la fisura de la probeta de macrografía M3, con el fin de estudiar la superficie de fractura.



**Figura 24.** Fractura de la probeta M3 a través de la fisura detectada.

La Figura 25 muestra la superficie de fractura expuesta de la probeta M3, se aprecia que hay indicios del fenómeno de fatiga mecánica (flechas rojas) adyacente al pie del cordón de soldadura y fractura frágil (flechas azules).

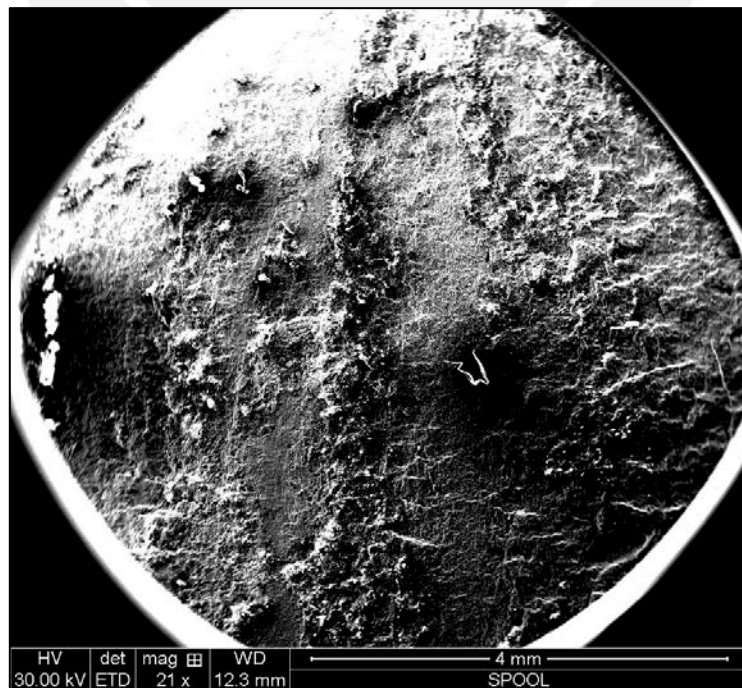


**Figura 25.** Se observa la superficie de fractura de la sección A-A de la probeta M3, con indicios del fenómeno de fatiga mecánica y fractura frágil.

Las Figuras 26 y 27, presentan imágenes representativas de la superficie de fractura (circulo amarillo de la Figura 25), donde a pesar del alto grado de deterioro producto de la corrosión, se puede observar indicios de las marcas de playa características del fenómeno de fatiga.



**Figura 26.** Imagen 1 a 21 aumentos, se observan evidencias de marcas de playa.



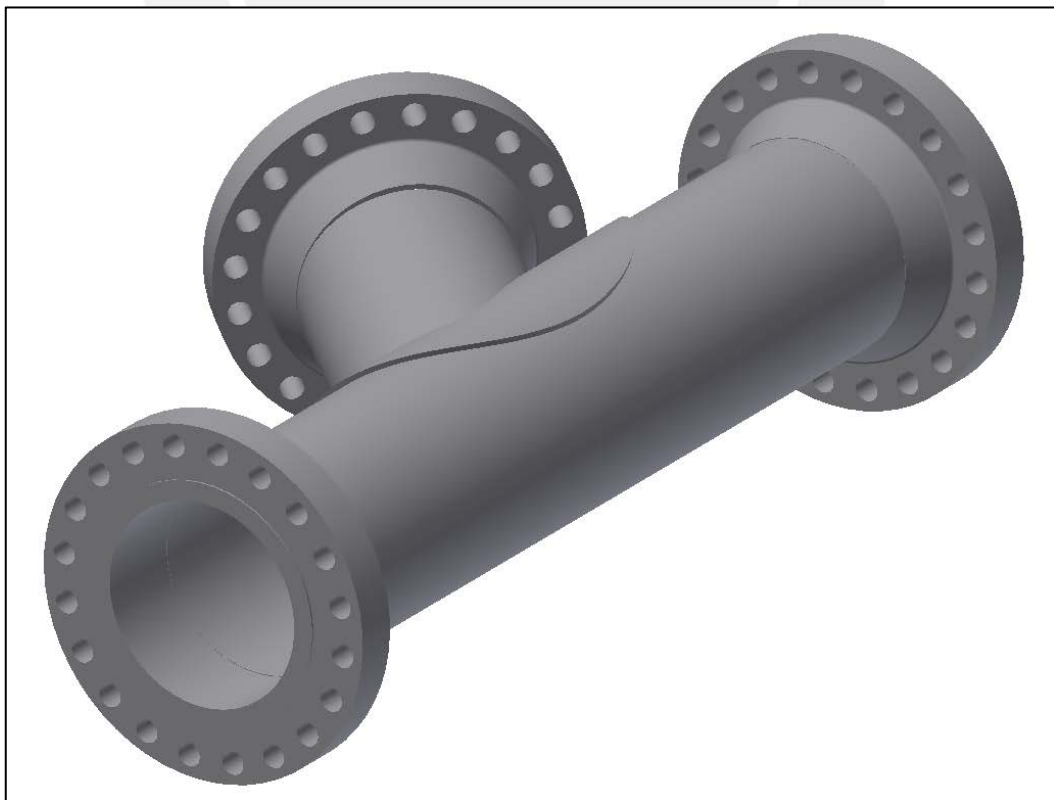
**Figura 27.** Imagen 2 a 21 aumentos, se observan evidencias de marcas de playa.

### 3.6. Análisis mediante simulación numérica computacional

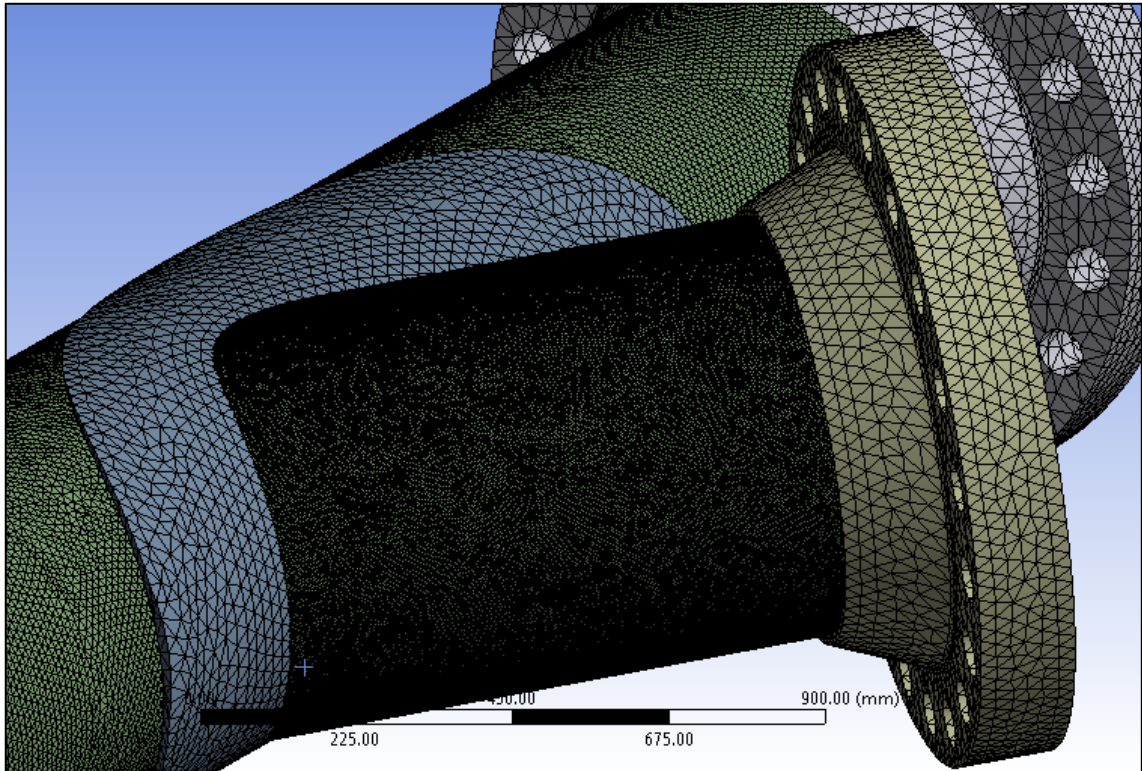
El modelo 3D se realizó usando el software Autodesk Inventor Professional y se puede visualizar en la Figura 28. El modelo geométrico elaborado se discretizó con elementos tetraédricos de segundo orden, refinando especialmente la zona en la que está presente la soldadura y las zonas cercanas a esta, como muestra la Figura 29.

Se hizo un análisis estático estructural para hacer una evaluación de las zonas donde se concentran más los esfuerzos. Una vista general de los esfuerzos presentes en la tubería de descarga en “Y” se puede apreciar en la Figura 30.

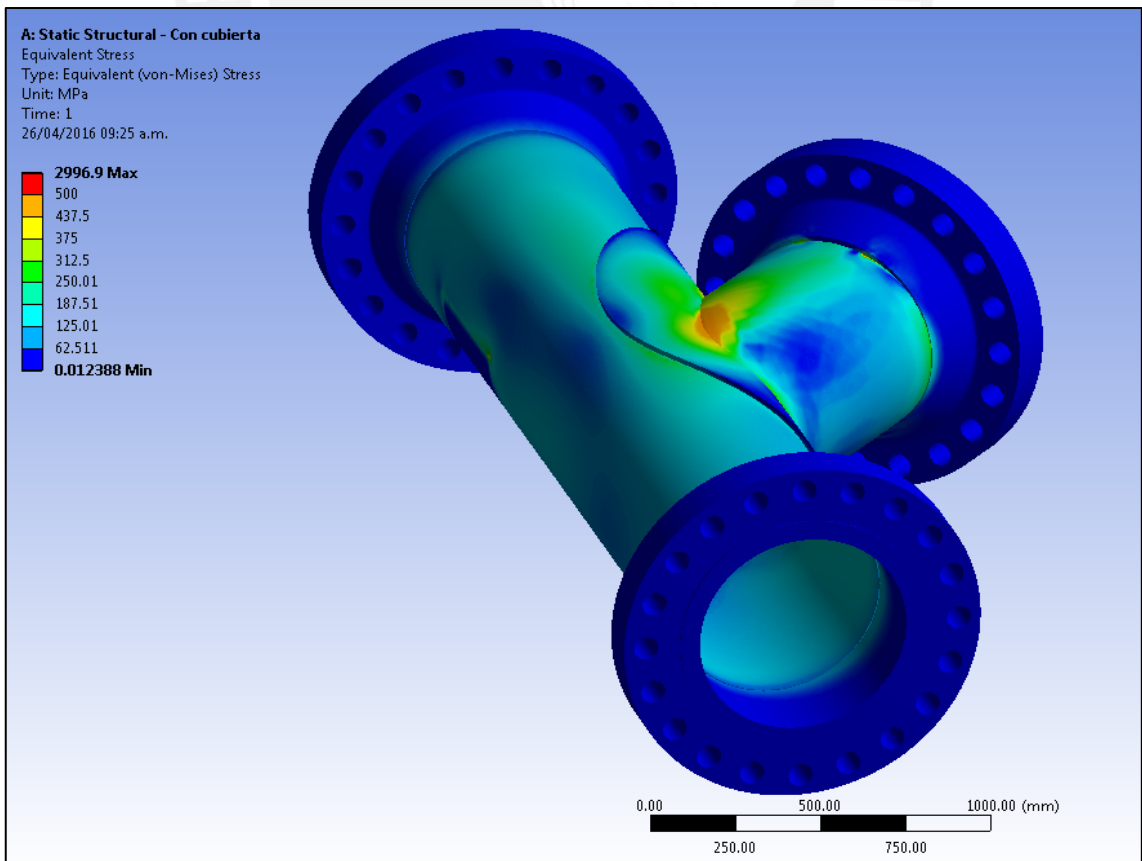
Se puede observar en la Figura 30, que durante la operación se produce una concentración de esfuerzos en las uniones soldadas que unen la tubería de ramal con la plancha de refuerzo (zona indicada con color rojo) y que coincide con la zona donde se producen las fisuras.



**Figura 28.** Modelo geométrico de la tubería de descarga en “Y” con sus bridas.



**Figura 29.** Detalle del mallado en la zona de falla de la tubería.



**Figura 30.** Distribución de esfuerzos en la tubería de descarga.



## CONCLUSIONES

De los análisis realizados se puede concluir que las fisuras producidas en el pie del cordón de soldadura, tienen su origen en diversos factores que son acumulativos:

- La baja calidad de las soldaduras que presentan falta de fusión, inclusiones de escoria, falta de llenado y cordones irregulares,
- Conforme progresa la soldadura se ocasiona un fuerte embridamiento, lo que produce tensiones residuales durante el enfriamiento de la misma,
- El pie del cordón de la soldadura es un concentrador natural de tensiones.

Estos tres factores pueden haber dado origen a que se nucleen micro fisuras en el pie del cordón de soldadura producto de las socavaciones obtenidas durante su fabricación, estas micro fisuras incrementaron el factor de concentración de tensiones.

Cuando la tubería entró en servicio, se produjeron esfuerzos pulsantes debido a las vibraciones generadas por el bombeo fluctuante del fluido, éstos esfuerzos se concentran en la unión soldada que une la tubería de ramal con la plancha de refuerzo, los que se suman a las tensiones residuales, lo que produjo la propagación de fisuras por un mecanismo de fatiga, hasta alcanzar un tamaño crítico que originó la fractura frágil; además, los esfuerzos pulsantes contribuyeron a la propagación de las fisuras que se originaron por los defectos de soldadura obtenidos durante la fabricación.

Los resultados de los ensayos de caracterización de los metales base permite concluir que cumplen con los requisitos especificados para el acero API 5L PSL2 X52, por ello no se puede atribuir la falla a una mala elección del material.

Además, debido a las discontinuidades y defectos encontrados, hacen pensar que durante la soldadura no se tuvo el cuidado suficiente y se introdujo hidrógeno, lo que favoreció la propagación de las fisuras.

## RECOMENDACIONES

- Revisar el diseño de las juntas de la tubería con el ramal y del ramal con el refuerzo.
- Emplear soldadores calificados que sean capaces de generar cordones de soldadura sanos.
- Realizar una supervisión antes, durante y después de la soldadura más estricta para reducir al máximo la presencia de defectos de soldadura y fragilización por hidrógeno.
- Realizar una inspección por partículas magnéticas de las uniones soldadas de la tubería de descarga en “Y” antes de que ingresen a servicio, en especial de las uniones ramal-refuerzo que son paralelas a la tubería principal.
- Emplear métodos para minimizar la probabilidad que se produzcan fisuras en los pies de la soldadura, especialmente en las zonas donde se concentran los esfuerzos cuando la tubería está en operación. Se puede usar la técnica del maquinado del concentrador, refundido del concentrador mediante TIG o “tool peening”.
- Realizar la inspección no destructiva de las uniones soldadas de las tuberías de descarga en “Y” del mismo lote que se encuentran en operación, con el objetivo de detectar la posible formación o presencia de fisuras.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. I. H. Committe, "Metals Handbook Volume 11 - Failure Analysis and Prevention," *ASM Int.*, vol. 11, p. 2909, 2002.
- [2] A. P. I. (API), "Specification for line pipe," (*API*), *Am. Pet. Inst.*, vol. 20, no. 3, pp. 106–106, 2013.
- [3] A. Portolés, M. Reina, and CESOL, *Curso de Formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura - IWE, Modulo II. Tema 2.10 Aceros de Alta Resistencia*, 2012th ed. Madrid: Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión (CESOL), 2012.
- [4] A. A. C. on F. M. and A. Materials, "AWS A5.1/A5.1M:2004, Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding," *Am. Weld. Soc.*, 2004.
- [5] G. Hernández and CESOL, "Manual del Soldador," *Asoc. Española Sold. y Tecnol. Unión*, p. 658, 2014.
- [6] American Welding Society, *Manual de Soldadura - Tomo I*, 8th ed. Mexico: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., 1996.
- [7] American Welding Society, "AWS B1.11M/B1.11:2015, Guide for the Visual Examination of Welds," no. January 7,2000, 2015.
- [8] S. S. Abedi, "Failure Investigation of a Defective Weldment of an Oil Product Transmission Pipeline," *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 17, no. 1, pp. 30–37, 2017.
- [9] N. S. Palsson, S. Kaewkumsai, K. Wongpinkaw, and W. Khonraeng, "Fatigue Failure of Hydrocarbon Piping System," *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 17, no. 5, pp. 838–847, 2017.
- [10] M. A. Al-Anezi, T. A. Al-Ghamdi, W. L. Al-Otaibi, and S. M. Al-Muaili, "Prevention of Hydrogen Assisted Damage in Sour Service," *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 14, no. 6, pp. 736–745, 2014.
- [11] F. Richards, "Failure analysis of a natural gas pipeline rupture," *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 13, no. 6, pp. 653–657, 2013.
- [12] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, "Section V - Nondestructive Examination," *Am. Soc. Mech. Eng.*, vol. V, p. 888, 2015.
- [13] A. P. I. (API), "Welding of Pipelines and Related Facilities. Industry

- Petroleum,” (*API*), *Am. Pet. Inst.*, no. April 2014, p. (4-1104), 2013.
- [14] ASTM International, “ASTM E415 - 17, Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry,” *ASTM Int.*, pp. 1–11, 2017.
- [15] D1 Committee on Structural Welding, *AWS D1.1/D1.1M:2015, Structural Welding Code - Steel*. 2015.
- [16] ASTM International, “ASTM E3 - 11(2017), Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens,” *ASTM Int.*, vol. 03, no. July, pp. 1–17, 2017.
- [17] ASTM International, “ASTM E7 - 17, Standard Terminology Relating to Metallography,” *ASTM Int.*, no. July, pp. 1–3, 2017.
- [18] ASTM International, “ASTM E45 - 18a, Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel,” *ASTM Copyright.*, pp. 1–19, 2018.
- [19] ASTM International, “ASTM E112 - 13, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size,” *ASTM Int.*, pp. 1–28, 2013.
- [20] ASTM International, “ASTM E407 - 07(2015e1), Standard Practice for Microetching Metals and Alloys,” *ASM Int.*, vol. 07, no. December, pp. 51–66, 2015.
- [21] A. I. H. Committe, “Metals Handbook Volume 9 - Metallography and Microstructures 2004,” *ASM Int.*, vol. 9, p. 2733, 2004.
- [22] ASTM International, “ASTM A370 - 18, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products,” *ASTM Int.*, pp. 1–50, 2018.
- [23] ASTM International, “ASTM E92 - 17, Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials,” *ASTM Int.*, pp. 1–27, 2017.
- [24] ASTM International, “ASTM E23 - 18, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials,” *ASTM Int.*, pp. 1–26, 2018.
- [25] ASTM International, “ASTM E709 - 15, Standard Guide for Magnetic Particle Testing,” *ASTM Int.*, pp. 1–48, 2015.
- [26] ASTM International, “ASTM E340 - 15, Standard Practice for Macroetching Metals and Alloys,” *ASTM Int.*, pp. 1–11, 2015.

- [27] R. A. McCoy, "SEM fractography and failure analysis of nonmetallic materials," *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 4, no. 6, pp. 58–64, 2004.
- [28] D. F. Susan, A. C. Kilgo, and B. B. McKenzie, "Fatigue failures of fasteners: Optical metallography and SEM fractography," *Microsc. Microanal.*, vol. 12, no. SUPPL. 2, pp. 192–193, 2006.
- [29] D. D. Malkapuram, "Coefficient of Thermal Expansion and Elastic Modulus of SIC P /AL 2 O 3 Ceramic Matrix Composites Prepared by Directed Metal Oxidation Process ," *SAE Tech. Pap. Ser.*, vol. 1, pp. 27–40, 2018.
- [30] A. Murianni, O. Zanoli, and E. Parker, "Evaluation of pipe-soil interaction in liquefied soil," *Front. Offshore Geotech. III*, pp. 429–434, 2015.
- [31] J. R. Cho, B. D. Joo, J. R. Cho, and Y. H. Moon, "Finite element analysis of the offshore reel-laying operations for double-walled pipe," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 10, pp. 1–10, 2017.
- [32] R. C. Souza *et al.*, "Effect of Microstructure on Hydrogen Diffusion in Weld and API X52 Pipeline Steel Base Metals under Cathodic Protection," *Int. J. Corros.*, vol. 2017, pp. 1–14, 2017.