



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TEMA: ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS EN UN ACERO ASTM A-572 POR LA
PRESENCIA DE DEFECTOS TÍPICOS EN SOLDADURA BAJO
LA NORMA API 1104**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO EN
INGNIERÍA MECÁNICA**

MOSQUERA GUERRA LIZED ALEXANDRA

lized.mosquera@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. GALO HOMERO BARRAGÁN CAMPOS

homero.barragan@epn.edu.ec

Quito, noviembre 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **LIZED ALEXANDRA MOSQUERA GUERRA**, bajo mi certificación.

ING. HOMERO BARRAGÁN

DIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **LIZED ALEXANDRA MOSQUERA GUERRA**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mí autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; que he consultado las referencias bibliográficas que se incluye en este documento.

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

Lized Alexandra Mosquera Guerra

CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
CONTENIDO	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
RESUMEN	viii
ABSTRAC	ix
INTRODUCCIÓN	x
Objetivo general	xii
Objetivos específicos	xii
1. MARCO TEÓRICO	13
1.1. Norma API 1104	13
1.1.1. Parámetros de aceptación de los ensayos no destructivos respecto a la API 1104	13
1.2. Proceso SMAW	17
1.2.1. Definición	17
1.2.2. Generalidades	17
1.2.3. Principio de funcionamiento	18
1.2.4. Ventajas y desventajas	20
1.2.5. Material de aporte	21
1.3. Acero ASTM A-572	23
1.3.1. Caracterización del acero ASTM A-572	23
1.3.2. Composición química	23
1.3.3. Propiedades del acero ASTM A572	24
1.4. Ensayos no destructivos	24
1.4.1. Clasificación de los ensayos no destructivos	24
1.4.2. Inspección visual	25
1.4.3. Líquidos Penetrantes (PT)	26
1.4.4. Radiografía Industrial (RT)	27
2. METODOLOGÍA	29
2.1. Materiales y equipos	29
2.1.1. Acero ASTM A-572	29
2.1.2. Equipo de soldadura	29
2.1.3. Selección del electrodo	30
2.1.4. Equipos de corte	31

2.1.5.	Equipo para ensayo de Radiografía Industrial	31
2.1.6.	Equipo de tracción	32
2.1.7.	Equipo de doblado.....	33
2.2.	Especificación del procedimiento de soldadura (WPS)	34
2.3.	Procedimiento de obtención de las probetas	35
2.3.1.	Corte de placas	35
2.3.2.	Biselado de placas.....	36
2.3.3.	Soldadura de placas	36
2.4.	Ensayo de Radiografía industrial: Gammagrafía.....	43
2.4.1.	Medición de espesores.....	44
2.5.	Caracterización de las probetas soldadas.....	44
2.5.1.	Ensayo de tracción	45
2.5.2.	Ensayo de doblado de raíz	46
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
3.1.	Resultados.....	48
3.1.1.	Ensayo de Tracción	48
3.1.1.1.	Probeta sin defectos	48
3.1.1.2.	Penetración incompleta.....	50
3.1.1.3.	Penetración incompleta por desalineación	52
3.1.1.4.	Concavidad interna	54
3.1.1.5.	Quemón	55
3.1.1.6.	Poros	58
3.1.2.	Ensayo de doblado.....	62
3.1.2.1.	Probeta sin defectos	62
3.1.2.2.	Penetración incompleta.....	63
3.1.2.3.	Penetración incompleta por desalineación	64
3.1.2.4.	Concavidad interna	65
3.1.2.5.	Quemones	66
3.1.2.6.	Poros	68
3.2.	Análisis y discusión.....	69
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
4.1.	Conclusiones.....	73
4.2.	Recomendaciones.....	75
	Referencias Bibliográficas.....	77
	ANEXOS.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Falta de penetración	13
Figura 1.2. Distribución máxima de las porosidades: Espesor de pared menor o igual a ½" (12.7 mm).	15
Figura 1.3. Distribución máxima de las porosidades: Espesor de pared mayor o igual a ½" (12.7 mm).	16
Figura 1.4. Concavidad interna.	16
Figura 1.5. Proceso de soldadura con arco de metal protegido.....	17
Figura 1.6. Elementos de un circuito de soldadura típico para soldadura de arco eléctrico con electrodo revestido	18
Figura 1.7. Corriente Continua	18
Figura 1.11. Características de los electrodos en el proceso SMAW	22
Figura 1.12. Identificación de los electrodos	22
Figura 1.13. Grados del acero ASTM A572, y su máximo espesor	23
Figura 1.14. Requerimientos de la composición química para el acero A572.....	24
Figura 1.15. Propiedades del acero ASTM A572	24
Figura 1.16. Técnicas del método de inspección visual	26
Figura 1.17. Procedimiento del método de inspección con líquidos penetrantes.....	27
Figura 1.18. Clasificación de los productos que intervienen en el ensayo de PT según ISO3452-1	27
Figura 1.19. Radiografía industrial, esquema	28
Figura 2.1. Equipo de soldadura INFRA.....	30
Figura 2.2. Electrodo E6010.....	31
Figura 2.3. Oxicorte CNC.....	31
Figura 2.4. Equipo de Gammagrafia	32
Figura 2.5. Equipo de tracción	33
Figura 2.6. Equipo de doblado	33
Figura 2.7. Dimensionamiento de las probetas	35
Figura 2.8. Dimensionamiento del bisel	36
Figura 2.9. Probetas sin defectos.....	38
Figura 2.10. Probetas perforadas para quemones	38
Figura 2.11. Probetas con quemones	39
Figura 2.15. Probetas con penetración incompleta	42
Figura 2.20. Dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción bajo la norma API 1104	46
Figura 2.23. Probetas mecanizadas para el ensayo de doblado	47
Figura 3.1. Probetas sin defectos sometidas a ensayo de tracción	50
Figura 3.2. Gráfica comparativa de probetas con IP vs Sin defectos.....	51
Figura 3.3. Probetas con penetración incompleta fracturadas después de ensayo a tracción.....	52
Figura 3.4. Gráfica comparativa de probetas con IPD vs Sin defectos	53
Figura 3.5. Probetas con IPDs fracturadas por tracción	54
Figura 3.6. Gráfica comparativa de probetas con IC vs Sin defectos	55
Figura 3.7. Probetas con IC fracturadas por tracción	55
Figura 3.8. Gráfica comparativa de probetas con Quemones vs Sin defectos.....	57
Figura 3.9. Probetas con BT fracturadas por tracción	57
Figura 3.10. Gráfica comparativa de probetas con poros vs sin defectos.....	59
Figura 3.11. Probetas con poros fracturadas por tracción	59

Figura 3.12. Diagrama esfuerzo- deformación unitaria para un acero estructural común	60
Figura 3.13. Área de estricción de las probetas con poros de a) 3mm, b) 4mm, y c) 5mm.	61
Figura 3.14. Probetas sin defectos doblada	63
Figura 3.15. Probetas dobladas con penetración incompleta	64
Figura 3.16. Probetas con IPDs doblada.....	65
Figura 3.17. Probetas con IC doblada.....	66
Figura 3.18. Probetas después del ensayo de doblado con quemones de: (a) 4 mm, (b) 6 mm, y (c) 8 mm.	67
Figura 3.19. Probetas después del ensayo de doblado con poros de: (a) 3 mm, (b) 4mm, (c) 5mm.....	68
Figura 3.20. Resultado de ensayo de tracción vs doblado	70
Figura 3.21. Análisis de resultados de ensayo de tracción y doblado.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas del proceso de soldadura SMAW	20
Tabla 1.2. Clasificación de los electrodos según el metal base.....	22
Tabla 1.3. Clasificación de los ensayos no destructivos de acuerdo con el fenómeno físico.....	24
Tabla 1.4. Clasificación de los END de acuerdo con el alcance.....	25
Tabla 2.1. Especificaciones soldadora INFRA MI 2-300 CA/CD.....	29
Tabla 2.2. Especificaciones técnicas del equipo de doblado.....	34
Tabla 2.3. Defectos de soldadura y causas que lo provocan	36
Tabla 2.4. Valores de soldadura para probeta de referencia.....	37
Tabla 2.5. Datos del proceso SMAW para quemones.....	39
Tabla 2.6. Parámetros de soldadura para poros	41
Tabla 2.7. Parámetros de soldadura para placas con IPs	42
Tabla 2.8. Espesor de cordones con defectos	44
Tabla 3.1. Resultados del ensayo de tracción para probetas sin defectos	49
Tabla 3.2. Resultados del ensayo de tracción para probetas con penetración incompleta	50
Tabla 3.3. Resultados del ensayo de tracción para probetas con penetración incompleta por desalineación.....	52
Tabla 3.4. Resultados del ensayo de tracción para probetas con penetración incompleta p	54
Tabla 3.5. Resultados del ensayo de tracción para probetas con quemones.....	56
Tabla 3.6. Resultados del ensayo de tracción para probetas con poros.....	58
Tabla 3.7. Valores del esfuerzo para la curva convencional y real	61
Tabla 3.8. Resultados del ensayo de doblado con probetas sin defectos	63
Tabla 3.9. Resultados de ensayo de doblado de probetas con penetración incompleta	64
Tabla 3.10. Resultados del ensayo de doblado con probetas con IPDs	65
Tabla 3.11. Resultados del ensayo de doblado de probetas con concavidad interna..	66
Tabla 3.12. Resultados del ensayo de doblado de probetas con quemones	67
Tabla 3.13. Resultados del ensayo de doblado de probetas con poros.....	69
Tabla 3.14. Valores obtenidos en los ensayos de tracción y doblado.....	69

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la variación de las propiedades mecánicas de un acero ASTM A-572 por la presencia de defectos típicos en soldadura bajo la norma API 1104. Para lograr las discontinuidades deseadas se prepararon las placas de acuerdo a las medidas sugeridas en la norma mencionada con el biselado adecuado, y se realizó cordones de soldadura mediante el proceso SMAW con diferentes valores de amperaje, inclusiones no metálicas, y desbaste de material. A fin de verificar las dimensiones de los defectos en las probetas, se empleó ensayos no destructivos como inspección visual y para defectos internos se utilizó radiografía industrial.

Para comprobar la influencia del tamaño de las discontinuidades en cada probeta, se elaboró ensayos destructivos de tracción y doblado, donde se aprecia que, a mayor dimensión del defecto, mayor es la disminución de resistencia medida en el ensayo de tracción y la ductilidad medida en el ensayo de doblado. Dentro de los resultados obtenidos, se aprecia que la concavidad interna es el defecto más influyente, seguido por la penetración incompleta, poros, penetración incompleta por desalineación y finalmente los quemones, que fueron los que presentaron alta resistencia, aún en presencia de las inclusiones no metálicas.

De esta manera se analizó la variación de las propiedades mecánicas en una junta soldada y se obtuvo las gráficas explicativas que permiten una mejor visión de los resultados.

Palabras clave: acero ASTM A-572, defectos típicos en soldadura, ensayos destructivos, ensayos no destructivos, SMAW.

ABSTRAC

The objective of this work is to analyze the variation of the mechanical properties of an ASTM A-572 steel due to the presence of typical defects in welding under the API 1104 standard. For this, the plates were prepared according to the measures suggested in the standard *ibid*, with adequate beveling, and weld beads were made using the SMAW process with different amperage values, non-metallic inclusions, and material roughing to achieve the desired discontinuities. In order to verify the dimensions of the defects in the specimens, non-destructive tests were used as visual inspection and for internal defects, industrial radiography was used.

To check the influence of the size of the discontinuities in each probe, destructive tensile and bending tests were carried out, where it can be seen that, the larger the defect, the greater the decrease in resistance in both traction and bending. Among the results obtained, it can be seen that internal concavity is the most influential defect, followed by incomplete penetration, pores, incomplete penetration due to misalignment and finally burns, which were those that presented high resistance, even in the presence of non-inclusions. metallic.

In this way, the variation of mechanical properties in a welded joint was analyzed and explanatory graphs were obtained that allow a better view of the results.

Keywords: ASTM A-572 steel, typical welding defects, destructive testing, non-destructive testing, SMAW.

“ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN UN ACERO ASTM A-572 POR LA PRESENCIA DE DEFECTOS TÍPICOS EN SOLDADURA BAJO LA NORMA API 1104”

INTRODUCCIÓN

La norma API 1104 es un referente mundial para soldaduras de tuberías e instalaciones relacionadas, con los procesos SMAW, SAW, GTAW, GMAW, FCAW, soldadura por arco plasma, oxiacetilénica, por chisporroteo o la combinación de estos procesos, tanto en instalaciones nuevas o que se encuentren en servicio. También cubre estándares de aceptación de varios ensayos no destructivos, como radiografía, partículas magnéticas, tintas penetrantes y ultrasonido, pero es importante recalcar que en su apéndice A, indica que estos datos son empíricos, es decir, se basan en la experiencia humana, por lo que se hace necesario un análisis profundo con el objetivo de estudiar la variación de las propiedades mecánicas mediante ensayos destructivos. El presente trabajo abarca un estudio del acero ASTM A-572, generando defectos propios de la soldadura con proceso SMAW con técnica manual, el mismo que pretende ser un referente para futuros proyectos que involucren las mismas características.

En la norma API 1104 se contempla los límites relacionados a cada defecto, que serán reproducidos en diferentes tamaños dentro del cordón de soldadura para el análisis de variación de las propiedades mecánicas del acero ASTM A-572. Adicionalmente, se han planteado objetivos específicos como determinar la resistencia de la junta soldada, y establecer límites de admisibilidad basado en los resultados obtenidos gracias a los ensayos destructivos de resistencia a la tracción y doblado. Considerando que el acero ASTM A-572 es muy usado en el transporte y otras aplicaciones que requieren una mayor resistencia a un peso menor una mayor capacidad de carga con un menor aumento en el peso del equipo, lo que reduce los costos operativos. A572-50 también se usa en la construcción de puentes y edificios y otras aplicaciones tanto remachadas, atornilladas o electrosoldadas, por poseer alta resistencia y baja aleación, y al ser muy valorado en la industria se lo ha escogido para el presente estudio.

Es importante considerar que, en una soldadura se pueden formar concentradores de esfuerzos debido a la geometría y dimensión de los defectos presentes, provocando una modificación en la distribución de esfuerzos, haciendo que la pieza deje de trabajar en su totalidad y en ocasiones hasta la falla del mismo. Este es un reto que se debe enfrentar en ingeniería, evitando y corrigiendo cualquier discontinuidad que se presente.

Para la inspección y verificación de la influencia de las discontinuidades plasmadas en el cordón de soldadura, se emplea ensayos no destructivos, que permiten obtener sus dimensiones sin afectar la integridad de las probetas; y ensayos destructivos que permiten obtener conclusiones de la influencia del tamaño de las discontinuidades en las propiedades mecánicas y establecer los límites de admisibilidad.

Posteriormente, se toma los resultados obtenidos para realizar gráficas comparativas y calcular el porcentaje de variación de la resistencia respecto a la probeta que no tiene defectos. Finalmente se puede observar cuál es el defecto más crítico y a partir de qué longitud provoca la falla en el acero.

Objetivo general

Analizar la variación de las propiedades mecánicas en un acero A-572 por la presencia de defectos típicos en soldadura bajo la norma API 1104.

Objetivos específicos

- Determinar la resistencia mecánica en una junta soldada de acero ASTM A-572 con presencia de defectos.
- Analizar la variación de las propiedades mecánicas de una junta soldada de un acero A-572 en presencia de defectos comunes.
- Establecer los límites en que se puede aplicar los límites de admisibilidad de la norma API 1104 para casos especiales.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Norma API 1104

Esta norma abarca la soldadura por procesos SMAW, SAW, GTAW, FCAW, GMAW, soldadura por plasma y oxiacetilénica de uniones a tope, filete y socket de tuberías. También cubre los procedimientos para ensayos de radiografía, partículas magnéticas, líquidos penetrantes y ultrasonido; además abarca los criterios de aceptación de los ensayos destructivos y ensayos no destructivos aplicados a la soldadura de producción (API, 2013).

1.1.1. Parámetros de aceptación de los ensayos no destructivos respecto a la API 1104

Cuando se realizan ensayos no destructivos en una soldadura, se observan discontinuidades, las cuales pueden ser admitidas mediante los parámetros de aceptación descritos en la norma API 1104. A continuación, se describen algunas de las discontinuidades y sus límites de aceptación:

Penetración incompleta (IP)

Se dice que existe una falta de penetración cuando existe un relleno incompleto de soldadura en el pase de raíz (API, 2013). En la figura 1.1. se muestra el esquema de una soldadura con penetración incompleta.

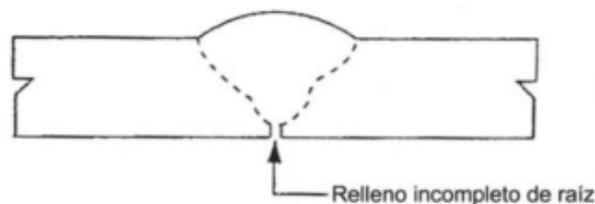


Figura 1.1. Falta de penetración
(Fuente: API, 2013)

Para que la penetración incompleta sea considerada un defecto debe cumplir al menos una de las siguientes descripciones:

- La longitud de una indicación individual IP excede de 1" (25 mm) (API, 2013).
- La suma de las longitudes de las indicaciones IP en una longitud de cordón continuo de 12" (300 mm) excede a 1" (25 mm) (API, 2013).
- La suma de las longitudes de las indicaciones IP exceden el 8% de longitud en cualquier soldadura con menos de 12" (300 mm) de longitud de cordón. (API, 2013).

Penetración inadecuada por desalineación (IPD)

Este tipo de discontinuidad es definida como la condición que existe cuando una parte de la raíz está descubierta debido a que el elemento adyacente está desalineado (API, 2013). En la figura 1.2. se muestra el esquema de una soldadura con penetración incompleta por desalineación.

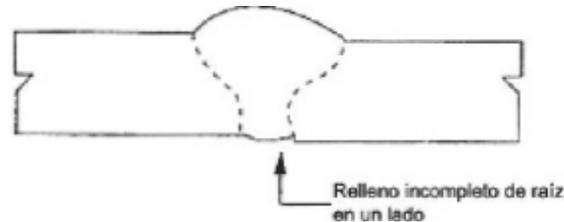


Figura 1.2. Penetración inadecuada por desalineación.
(Fuente: API, 2013)

Para que la penetración incompleta por desalineación sea considerada un defecto debe cumplir al menos una de las siguientes descripciones:

- La longitud de una indicación individual IPD excede 2" (50 mm) (API, 2013).
- La suma de las longitudes de las indicaciones IPD en una longitud continua de 12" (300 mm) excede las 3" (75 mm) (API, 2013).

Quemón (BT)

Es una porción del pase de raíz donde una excesiva penetración ha causado que el baño de soldadura penetre hacia el interior del tubo provocando un agujero en el cordón (API, 2013).

Para tuberías con un diámetro exterior mayor o igual que 2,375" (60,3 mm), para que un quemón sea considerado un defecto debe cumplir al menos una de las siguientes características:

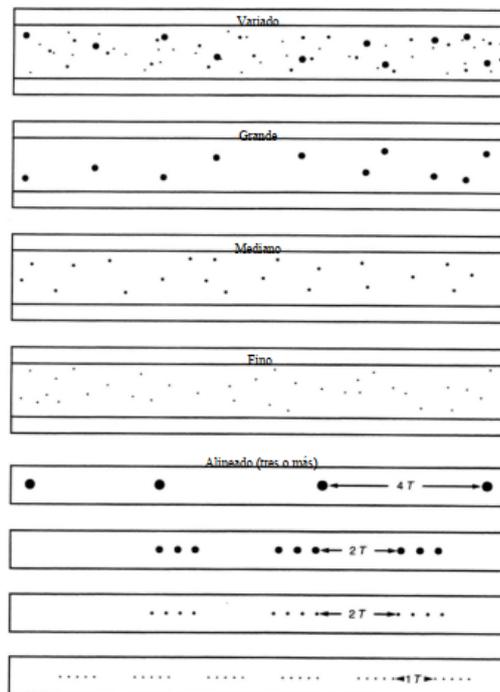
- Cuando la máxima dimensión excede a 1/4" (6 mm) y la densidad de la imagen excede la del material base adyacente más delgado (API, 2013).
- Cuando la máxima dimensión excede al menor de los espesores de pared nominales de la unión soldada y la densidad de la imagen del quemón excede la del material base adyacente más delgado (API, 2013).
- Cuando la suma de las máximas dimensiones del quemón separados, cuyas densidades de imagen exceden la del material base adyacente más delgado, es mayor a 1/2" (13 mm) medido en una porción continua de cordón de soldadura de 12" (300 mm) o medido a lo largo del total de la longitud de soldadura (API, 2013).

Porosidades (P)

La porosidad es un gas atrapado dentro de una soldadura, que generalmente toma forma esférica, y a medida que aumentan de tamaño pueden ser elongadas o alargadas. Las porosidades pueden encontrarse de 3 maneras: porosidades individuales, porosidades agrupadas y poro vermicular.

Para este trabajo se estudiará el poro individual. Esta discontinuidad es considerada un defecto si cumple con alguna de las siguientes condiciones:

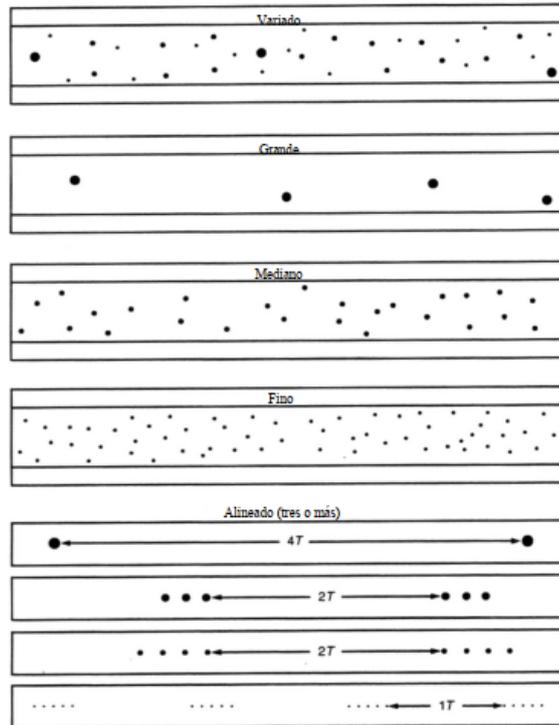
- El tamaño de un poro individual excede 1/8" (3 mm) (API, 2013).
- Cuando el tamaño de un poro individual excede el 25% de espesor de la pared nominal más delgada de la junta (API, 2013).
- Cuando las porosidades distribuidas o dispersas exceden la concentración permitidas por las figuras 1.3. y 1.4.



Nota: El tamaño del gas atrapado no está dibujado a escala, para dimensiones, referirse a 9.3.9.

Figura 1.2. Distribución máxima de las porosidades: Espesor de pared menor o igual a 1/2" (12.7 mm).

(Fuente: API, 2013)



Nota: El tamaño del gas atrapado no está dibujado a escala, para dimensiones, referirse a 9.3.9.

Figura 1.3. Distribución máxima de las porosidades: Espesor de pared mayor o igual a 1/2" (12.7 mm).

(Fuente: API, 2013)

Concavidades internas (IC)

Se denomina concavidad interna cuando el centro del cordón de soldadura se encuentra más arriba de la superficie interior de la pared de la tubería (API, 2013). En la siguiente figura se muestra el esquema de una soldadura con concavidad interna.

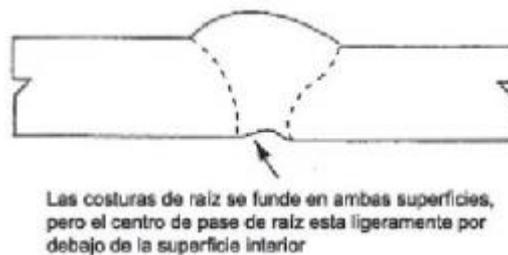


Figura 1.4. Concavidad interna.
(Fuente: API, 2013)

Cualquier longitud de IC es aceptable si la densidad de la imagen radiográfica del IC no excede a la del material base más delgado. Los criterios de admisibilidad de la concavidad interna son los mismos que los de los quemones.

1.2. Proceso SMAW

1.2.1. Definición

El proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido SMAW, por sus siglas en inglés (Shielded Metal Arc Welding) utiliza un electrodo consumible el cual consiste en una varilla de metal de relleno recubierta con materiales químicos que proporcionan un fundente y protección. (Groover, 2007)

En la figura 1.5. se representa el principio de funcionamiento del proceso de soldadura SMAW, donde el intenso calor producido por el arco eléctrico funde el electrodo en forma de gotas que son depositadas sobre el material base. El material de aporte se debe desplazar sobre la pieza a soldar mantenido una adecuada distancia, y con cierta velocidad de desplazamiento. Durante este proceso se produce un gas proveniente del recubrimiento del electrodo cuya función es proteger la soldadura de la influencia del entorno.

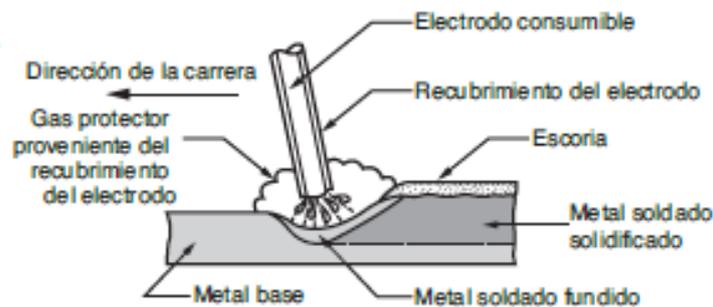


Figura 1.5. Proceso de soldadura con arco de metal protegido.
(Fuente: Groover, 2007)

1.2.2. Generalidades

El proceso SMAW o de soldadura por arco eléctrico, es considerado uno de los procesos más empleados en la industria de la soldadura, toda vez que, es flexible porque sirve para soldar en varias posiciones. El equipo se puede mover y utilizar en varios lugares, es versátil gracias a que permite soldar cualquier metal y aleación, y su costo no es elevado en comparación a otros procesos.

El proceso SMAW se lo realiza comúnmente con corrientes que varían en un rango de 30 a 300 A con voltajes de 15 a 45 V. Es necesario definir las variables esenciales que pueden afectar las propiedades mecánicas de la unión soldada, estas dependerán del tipo y espesor de la pieza soldada. Antes de iniciar el proceso es necesario retirar el exceso de polvo, grasa y pintura, y a continuación, se traza el cordón de soldadura considerando los parámetros planteados.

1.2.3. Principio de funcionamiento

El proceso SMAW o soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido, se caracteriza por formar un arco eléctrico que produce una temperatura aproximada de 3500°C que ayuda a fundir el electrodo y el metal base, logrando la fusión a lo largo de la junta.

En la figura 1.6 se observa los elementos que intervienen en el proceso, iniciando con un generador o fuente de poder que se ha conectado en serie al electrodo y con el material base (pieza de trabajo).

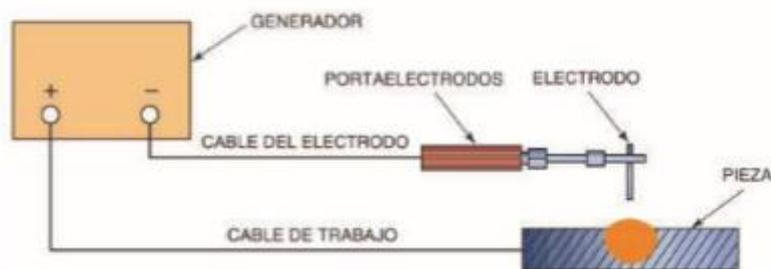


Figura 1.6. Elementos de un circuito de soldadura típico para soldadura de arco eléctrico con electrodo revestido
(Fuente: Jeffus, 2012)

El generador puede ser utilizado con corriente alterna o corriente continua. A continuación, se detalla las características de la corriente eléctrica:

- **Corriente Alterna:** el flujo de la corriente varía de forma periódica a través del tiempo, cambiando de sentido y magnitud, provocando una oscilación como la de la figura 1.7.

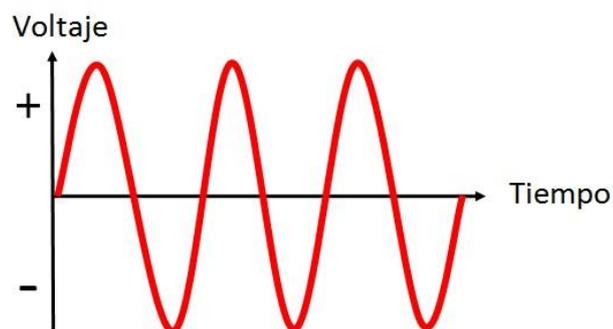


Figura 1.7. Corriente Continua
(Fuente: Generatuluz, 2019)

- **Corriente continua:** hace referencia a magnitudes de corriente que permanecen constantes en el tiempo, un ejemplo común de esta corriente, es la

proporcionada por las pilas. Generalmente se utiliza para proporcionar voltaje relativamente pequeño como en celulares, relojes, calculadoras, etc.

Puede ser de conexión directa o inversa como se observa en la figura 1.8, donde muestra la diferencia en la conexión de este tipo de corriente. El porta-electrodo se encuentra conectado al polo positivo del generador y el negativo a la masa para la conexión inversa, y viceversa para la conexión directa.

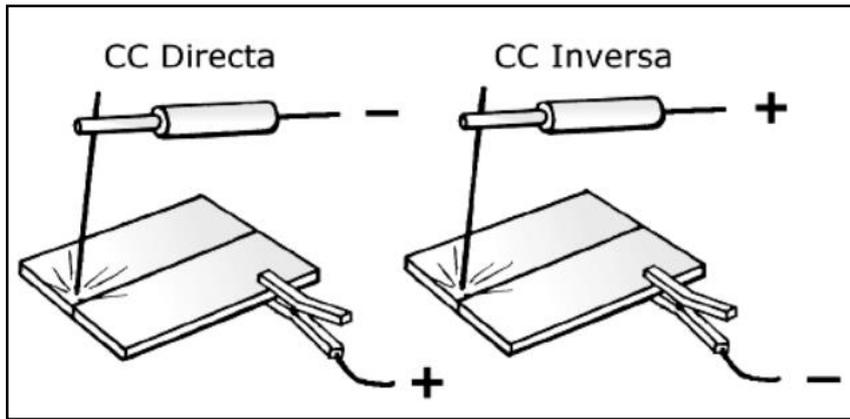


Figura 1.8. Soldadura de arco eléctrico.
Fuente: (Aguilar, 2015)

Con corriente continua directa se obtiene una buena deposición del material como se aprecia en la figura 1.9.



Figura 1.9. Cordón de soldadura con polaridad directa
Fuente: (ESAB, 2017)

Con corriente continua inversa se consigue una mayor penetración del material como se observa en la figura 1.10.



Figura 1.10. Cordón de soldadura con polaridad inversa
Fuente: (ESAB, 2017)

El proceso de soldadura inicia con la formación del arco que ayuda a que se derrita el material de aporte formando gotas depositadas sobre el material base, dando lugar al charco que unirá las piezas.

Para este proceso se considera las siguientes variables.

- Longitud de arco. – es la distancia entre la punta del electrodo y el metal base. Si el arco es demasiado largo, genera demasiado calor derritiendo el electrodo en forma de grandes glóbulos produciendo un depósito ancho y sin buena fusión, mientras que, si es demasiado corto, no genera suficiente calor para derretir el material correctamente.
- Ángulo del electrodo. - el electrodo se debe mantener en el ángulo correcto durante la soldadura para determinar la dirección y la fuerza del arco, y evitar que la escoria corra por delante del metal de soldadura y quede atrapada en el cordón.
- Velocidad del electrodo. - Mantener un movimiento lineal de velocidad de avance intermedia y constante a lo largo de la unión para obtener una adecuada fusión de los metales.
- Amperaje. - el amperaje incorrecto producirá una soldadura deficiente. Este factor queda definido en función del diámetro y revestimiento del electrodo, y la naturaleza de la soldadura que se desea obtener.

1.2.4. Ventajas y desventajas

El proceso SMAW a igual que muchos otros procesos, presenta ventajas y desventajas que lo caracterizan, los mismos que se redactan a continuación en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas del proceso de soldadura SMAW

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Se utiliza en diferentes aplicaciones tales como: manufactura de bastidores automotrices, construcción de oleoductos y gaseoductos, así como en la reparación de piezas de hierro colado. - Las soldaduras de mejor calidad se obtienen mediante longitudes de arco cortas, similares al diámetro del electrodo utilizado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los trabajos de soldadura pueden ser peligrosos debido a polvos, humos, vapores y gases por lo que se debe mantener muy buena ventilación. - El control del amperaje es extremadamente importante pues si es demasiado bajo se obtendrá una fusión deficiente y penetración inadecuada y si el amperaje es

<ul style="list-style-type: none"> - El equipo es portátil, de bajo costo y fácil manejo, lo que lo convierte en el proceso de soldadura más versátil y de mayor uso dentro de todos los procesos de soldaduras con arco eléctrico. - Se puede soldar metales de distintos tipos y espesores, en todas las posiciones y con una inversión mínima de equipo. - El revestimiento del electrodo disminuye las necesidades de tensión, ayuda a reducir los costos por suministros de energía y aumenta la seguridad. 	<ul style="list-style-type: none"> - demasiado alto ocurrirán cortes más profundos y el deterioro del recubrimiento fundente. - Este proceso de soldadura como operación de producción encuentra la limitación del cambio periódico de las varillas de electrodos consumibles a causa del desgaste, reduciendo el tiempo de arco.
---	---

Fuente: (Procesos de soldadura, 2002)

1.2.5. Material de aporte

El material de aporte empleado en el proceso SMAW se clasifica como electrodo consumible y consiste en varillas que normalmente van en un rango de longitud entre 225 a 450 mm y un diámetro de 2.5 a 6.7 mm. El metal de relleno usado en la varilla debe ser compatible con el metal base a soldar; es decir que su composición debe ser muy similar. El recubrimiento consiste en celulosa pulverizada (por ejemplo, polvos de algodón y madera) mezclados con óxidos, carbonatos y otros ingredientes integrados mediante un aglutinante de silicato. Algunas veces se incluyen en el recubrimiento polvos metálicos para aumentar la cantidad de metal de relleno y agregar elementos aleantes. (Groover, 2007)

1.2.5.1. Características de los electrodos

Los electrodos de soldadura SMAW tienen dos partes que se aprecian en la figura 1.11. y se describen a continuación:

El núcleo o alma que sirve para transportar la corriente y como principal fuente de metal en la soldadura; siendo el material de aporte en la soldadura finalizada. Como condición para obtener una soldadura de buena calidad, el metal de aporte debe ser lo más parecido al metal de la pieza que se suelda.

La cubierta o revestimiento del electrodo tiene varias funciones, la principal es producir una atmósfera gaseosa durante la soldadura que proteja tanto el charco de metal

fundido como el arco, de los gases de la atmósfera, tales como el oxígeno y nitrógeno del aire que pueden debilitar la soldadura. También cumple la función de depositar una capa de escoria sobre el metal fundido con el fin de proteger la soldadura durante el enfriamiento.

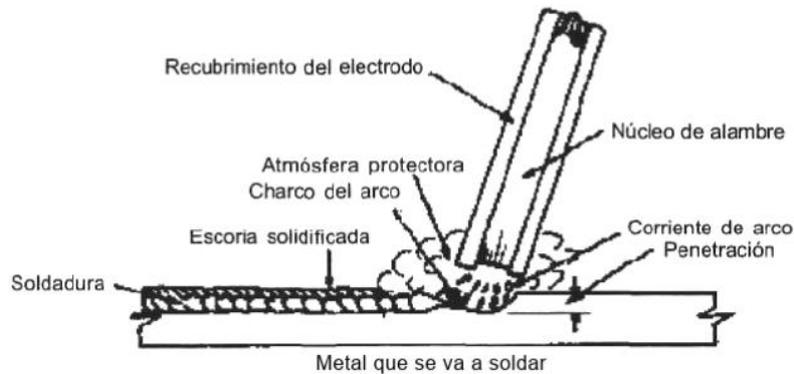


Figura 1.8. Características de los electrodos en el proceso SMAW
(Fuente: Procesos de soldadura, 2002)

1.2.5.2. Clasificación de los electrodos

Los diferentes electrodos se identifican principalmente por una clave alfanumérica establecida por la Sociedad Americana de Soldadura (American Welding Society, AWS) y representada en la figura 1.12.



Figura 1.9. Identificación de los electrodos
(Fuente: Procesos de soldadura, 2002)

En la tabla 1.2. se representa los tipos de electrodos según el metal a soldar.

Tabla 1.2. Clasificación de los electrodos según el metal base.

Clave	Tipo de metal	Clave	Tipo de metal
A5.1	Aceros al carbono simple	A5.6	Cobre y aleaciones de cobre
A5.3	Aluminios y aleaciones de aluminio	A5.11	Níquel
A5.4	Aceros inoxidables	A5.15	Hierro colado
A5.5	Aceros de baja aleación		

Fuente: (Procesos de soldadura, 2002)

1.3. Acero ASTM A-572

1.3.1. Caracterización del acero ASTM A-572

El acero ASTM A572 es un acero estructural de alta resistencia y baja aleación, está aleado con Niobio y Vanadio que le dan calidad estructural. Este acero cuenta con gran ductilidad, soldabilidad, facilidad de rolado, dureza y resistencia a la fatiga que le permite satisfacer las especificaciones y normas internacionales.

Este acero se encuentra disponible en varios grados (42, 50, 55, 60, 65) dependiendo del tamaño del perfil y grueso de la placa. El grado 50, con el cual se va a trabajar cuenta con las siguientes propiedades: $f_y = 345$ MPa o 50 ksi y $f_u = 450$ MPa o 65 ksi, y está disponible en todos los tamaños y espesores de placa hasta 100 mm (4 in). Este es el grado de acero estructural más utilizado actualmente en el mercado.

Debido a sus excelentes propiedades, en comparación con otro tipo de aceros, este permite la reducción de masas, espesores en proyectos mecánicos emperrados, remachados o soldados lo que implica una reducción considerable en el costo final de los mismos.

A continuación, se presenta la figura 1.13. que muestra el grado del acero ASTM A572 con sus dimensiones máximas de espesor según la norma ASTM A572/A572M

Grade	Yield Point, min		Maximum Thickness or Size					
	ksi	[MPa]	Plates and Bars		Structural Shape Flange or Leg Thickness		Sheet Piling	Zees and Rolled Tees
			in.	[mm]	in.	[mm]		
42 [290] ^d	42	[290]	6	[150]	all	all	all	all
50 [345] ^d	50	[345]	4 ^B	[100] ^B	all	all	all	all
55 [380]	55	[380]	2	[50]	all	all	all	all
60 [415] ^d	60	[415]	1¼ ^C	[32] ^C	2	[50]	all	all
65 [450]	65	[450]	1¼	[32]	2	[50]	all	all

Figura 1.10. Grados del acero ASTM A572, y su máximo espesor
(Fuente: Norma ASTM A572/A572M, 2013)

1.3.2. Composición química

Cuando se adicionan vanadio y niobio como aleantes en la fabricación de aceros estructurales se les proporciona una mayor resistencia, además de lograr un comportamiento más estable.

En la figura 1.14. se pueden observar los requerimientos en cuanto a la composición química según la norma ASTM A 572/A 572M.

Diameter, Thickness, or Distance Between Parallel Faces, in. [mm] Plates and Bars	Structural Shape Flange or Leg Thickness, in. [mm]	Grade	Carbon, max, %	Manganese, ^B max, %	Phosphorus, ^I max, %	Sulfur, ^I max, %	Silicon	
							Plates to 1½ in. [40 mm] Thick, Shapes with Flange or Leg Thickness to 3 in. [75 mm] inclusive, Sheet Piling, Bars, Zees, and Rolled Tees ^C	Plates Over 1½ in. [40 mm] Thick and Shapes with Flange Thickness Over 3 in. [75 mm]
							max, %	range, %
6 [150]	all	42 [290]	0.21	1.35 ^D	0.030	0.030	0.40	0.15–0.40
4 [100] ^F	all	50 [345]	0.23	1.35 ^D	0.030	0.030	0.40	0.15–0.40
2 [50] ^F	all	55 [380]	0.25	1.35 ^D	0.030	0.030	0.40	0.15–0.40
1¼ [32] ^F	≤2 [50]	60 [415]	0.26	1.35 ^D	0.030	0.030	0.40	0.15–0.40
>½ – 1¼ [13–32]	>1–2 [25–50]	65 [450]	0.23	1.65	0.030	0.030	0.40	0.15–0.40
≤½ [13] ^H	≤1	65 [450]	0.26	1.35 ^D	0.030	0.030	0.40	0.15–0.40

Figura 1.11. Requerimientos de la composición química para el acero A572 (Fuente: Norma ASTM A572/A572M, 2013)

1.3.3. Propiedades del acero ASTM A572

Todos los materiales cuentan con propiedades importantes, pero en este caso en especial, en los aceros estructurales los más importantes a ser tomados en cuenta son la resistencia a la fluencia, la resistencia a la tracción y la elongación máxima permitida, los cuales se alcanzan antes de una deformación plástica permanente.

En la siguiente figura 1.15. se muestran las propiedades del acero ASTM A572

Grade	Yield Point, min		Tensile Strength, min		Minimum Elongation, % ^{B, C, D}	
	ksi	[MPa]	ksi	[MPa]	in 8 in. [200 mm]	in 2 in. [50 mm]
	42 [290]	42	[290]	60	[415]	20
50 [345]	50	[345]	65	[450]	18	21
55 [380]	55	[380]	70	[485]	17	20
60 [415]	60	[415]	75	[520]	16	18
65 [450]	65	[450]	80	[550]	15	17

Figura 1.12. Propiedades del acero ASTM A572 (Fuente: Norma ASTM A572/A572M, 2013)

1.4. Ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos son métodos que evitan el deterioro o destrucción del componente analizado, es decir, permiten poner en evidencia las cualidades de los materiales sin necesidad de su daño físico. Estos son realizados mediante métodos físicos o físico-químicos.

1.4.1. Clasificación de los ensayos no destructivos

Todos los ensayos no destructivos se basan en la definición de alguna propiedad física del material analizándolo de forma indirecta y caracterizando el estado y/o naturaleza de los materiales y poner de manifiesto sus discontinuidades.

Tabla 1.3. Clasificación de los ensayos no destructivos de acuerdo con el fenómeno físico.

Método	Fenómeno físico
Inspección visual (VT)	Luz visible
Líquidos penetrantes (PT)	capilaridad
Partículas magnéticas (MT)	Campos magnéticos
Corrientes inducidas (ET)	Corrientes e eléctrica de Foucault
Radiografía industrial (RT)	Radiaciones ionizantes
Ultrasonido (UT)	Ondas mecánicas
Termografía infrarroja (TT)	Radiación infrarroja
Ensayo de fugas (LT)	presión
Emisión acústica (AT)	Ondas mecánicas elásticas

Fuente: (Introducción a los END, 2016)

Los ensayos no destructivos también pueden ser clasificados según sus alcances, es decir el grado de detección de las discontinuidades abiertas a la superficie, cercanas a la superficie, pero no abiertas a la misma (subsuperficiales) y, por último, la detección de discontinuidades que se encuentren en cualquier lugar del volumen de la pieza (volumétricos). A continuación, se muestra la clasificación en la tabla 1.4.

Tabla 1.4. Clasificación de los END de acuerdo con el alcance

Métodos superficiales
Inspección visual (VT)
Líquidos penetrantes (PT)
Métodos subsuperficiales
Partículas magnéticas (MT)
Corrientes inducidas (ET)
Termografía infrarroja (TT)
Métodos volumétricos
Ensayo de fugas (LT)
Emisión acústica (AT)
Radiografía industrial (RT)
Ultrasonido (UT)

Fuente: (Introducción a los END, 2016)

1.4.2. Inspección visual

Se considera inspección visual al examen de objetos a simple vista o con ayuda de instrumentos ópticos (lupas o endoscopios).

Este análisis implica buena iluminación, la misma que debe ser verificada antes de la inspección mediante equipos llamados luxómetros. También se verifica una distancia

apropiada para una buena percepción de superficies. En ocasiones se utiliza medios auxiliares de inspección como son: lupas, endoscopios, linternas, o lentes de aumento. La aplicabilidad de la inspección visual es determinar, condición superficial, la alineación de superficies acopladas, la protección de las piezas, el grado de acabado de un cordón de soldadura, la evidencia de fugas e inspección en conductos cerrados, entre otros.

Existen diferentes técnicas de observación o inspección, las mismas que se detallan en la figura 1.16.

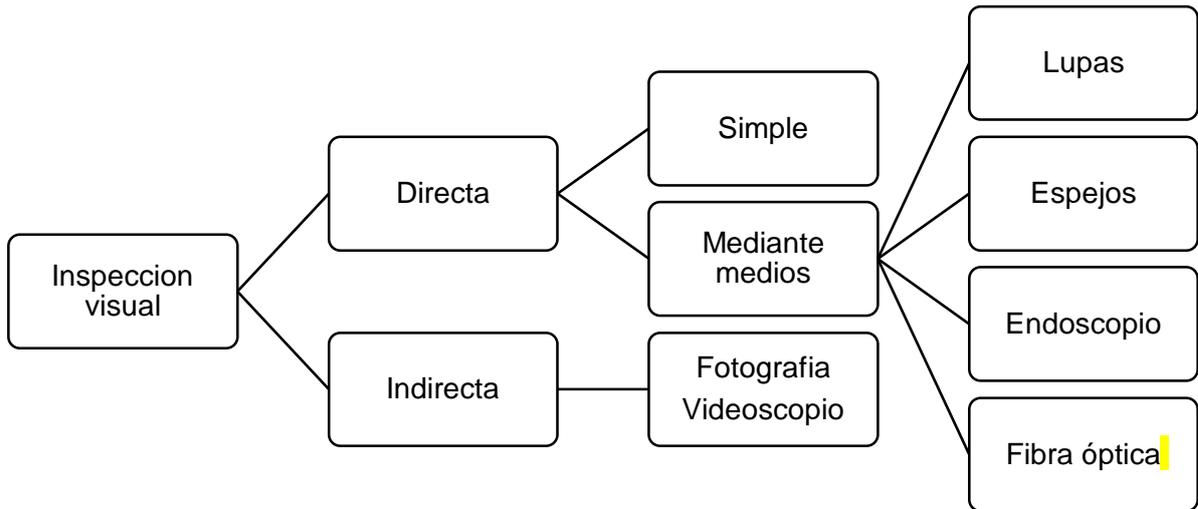
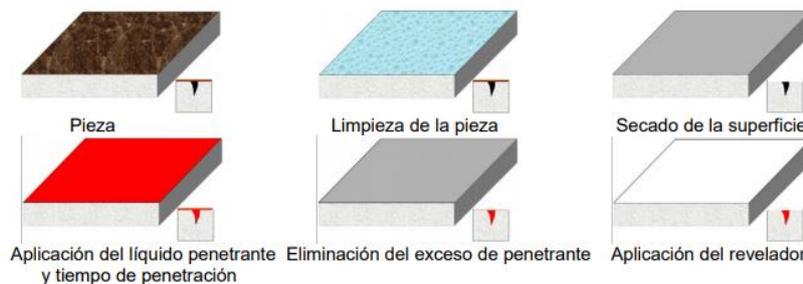


Figura 1.13. Técnicas del método de inspección visual (Introducción a los END, 2016)

1.4.3. Líquidos Penetrantes (PT)

El método de líquidos penetrantes (PT) es un análisis superficial mediante el uso de líquido tintado (coloreado o fluorescente) que posee características fisicoquímicas, como es la propiedad de capilaridad, permitiendo la penetración en las discontinuidades abiertas a la superficie para que, mediante el uso de un agente denominado revelador, las discontinuidades sean observadas con mayor claridad. En la figura 1.17 se muestra los pasos a seguir para la inspección por tintas penetrantes.



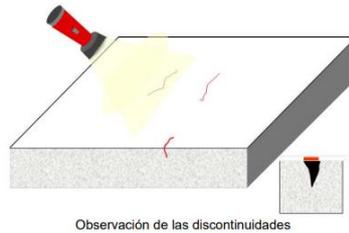


Figura 1.14. Procedimiento del método de inspección con líquidos penetrantes (Introducción a los END, 2016)

La técnica de inspección con tintas penetrantes cuenta con diferentes formas de inspección, dependiendo de la sensibilidad requerida en el ensayo. La figura 1.18. indica la clasificación de los productos usados en esta técnica de acuerdo con la ISO 3452-1

Penetrante		Eliminador del exceso de penetrante		Revelador	
Tipo	Denominación	Método	Denominación	Forma	Denominación
I	Penetrante fluorescente	A	Lavable con agua	a	Seco
II	Contraste de color	B	Post-emulsificable, lipofílico	b	Soluble en agua
III	Penetrante Mixto (penetrante fluorescente y coloreado)	C	Eliminable con disolvente	c	Suspensión en agua
			– Clase 1, halogenado		
			– Clase 2, no halogenado		
		– Clase 3, aplicaciones especiales			
D	Post-emulsificante, hidrofílico	d	Base-disolvente (no-acuoso para tipo I)		
E	Eliminable con agua y disolvente	e	Base-disolvente (no-acuoso para tipos II y III)		
			f	Aplicaciones especiales	

En casos específicos, es necesario usar un producto de ensayo penetrante que responda a ciertos requisitos en lo que concierne a inflamabilidad, contenido de azufre, halógenos, sodio y otros contaminantes, véase la Norma ISO 3452-2.

Figura 1.15. Clasificación de los productos que intervienen en el ensayo de PT según ISO3452-1 (Introducción a los END, 2016)

1.4.4. Radiografía Industrial (RT)

El ensayo de radiografía industrial es un método volumétrico que consiste en atravesar una pieza con una radiación electromagnética altamente penetrante (radiaciones ionizantes), la cual interactúa con el material absorbiendo la radiación las zonas de mayor densidad y dejándola pasar las zonas de menor densidad, impresionando la radiación que emerge de la pieza la película radiográfica situada tras la pieza. La figura 1.19. indica la presencia de discontinuidades se vuelven visibles por instantes debido al aumento de densidad en la película.

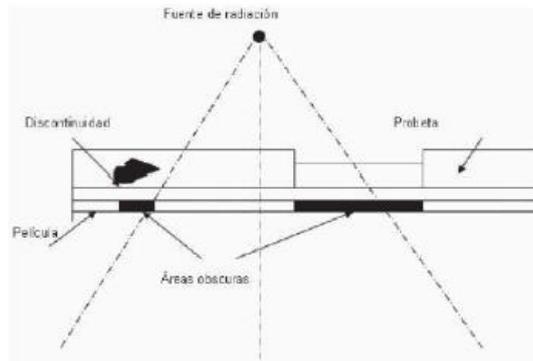


Figura 1.16. Radiografía industrial, esquema
Fuente: (Castro, 2016)

1.4.4.1. Variables por considerar en un ensayo RT

Los cálculos correctos y la configuración de ciertos parámetros basados en el espesor del material, determinan el éxito del proceso de exposición a la radiación y por ende los resultados que permiten determinar el tipo y tamaño de las discontinuidades presentes.

Una de las principales variables a considerar es la reducción de penumbra geométrica, la cual depende de los siguientes parámetros.

Distancia fuente-objetos

Tamaño de la fuente de radiación

Distancia objeto-película

Tipo de película radiográfica

2. METODOLOGÍA

El presente capítulo abarca los equipos, herramientas y materiales utilizados en el proceso de soldadura, los pasos de obtención de las probetas, y los ensayos a los que serán sometidos.

2.1. Materiales y equipos

2.1.1. Acero ASTM A-572

El acero ASTM A-572 es un acero de estructural perteneciente al grupo de alta resistencia y de baja aleación, con amplio uso en el campo estructural, por lo que los resultados pretenden ser un aporte para futuros trabajos relacionados a este material.

Este acero se lo puede conseguir en el mercado en varios grados dependiendo estos del tamaño de perfil y del espesor de la placa, para el presente trabajo se utilizará el acero ASTM A-572 en grado 50 con las siguientes propiedades:

Resistencia a la tensión: 65 ksi min

Resistencia a la fluencia: 50 ksi min

2.1.2. Equipo de soldadura

Para la unión de las placas, se utilizó una soldadora INFRA MI 2-300 CA/CD mostrada en la figura 2.1. En la Tabla 2.1 se detalla sus especificaciones.

Tabla 2.1. Especificaciones soldadora INFRA MI 2-300 CA/CD

EQUIPO DE SOLDADURA		
Marca	INFRA	
Modelo	MI 2-300 CA/CD	
	Descripción: Apto para procesos de Soldadura con electrodo revestido (SMAW), y Soldadura TIG (GTAW) de CD y CA.	
Especificaciones:		
Especificación	Valor	Unidad
Voltaje de entrada	220/440 V	V
Frecuencia de entrada	60 Hz	Hz
Corriente de entrada	84/42 A	A

Salida nominal de corriente/voltaje Ciclo de trabajo	250 A/30 V @ 50%	
Salida continua	175 A/27 V @ 100%	

(Fuente: Infra, 2020)



Figura 2.1. Equipo de soldadura INFRA
(Fuente propia, 2020)

2.1.3. Selección del electrodo

El criterio que se determina para seleccionar adecuadamente el electrodo es considerar el valor de resistencia mínima a la tracción del material base, puesto que el material de aporte debe especificar un valor igual o mayor a la resistencia mínima de tracción. Siguiendo dicho criterio para la obtención de las probetas se selecciona tres diferentes electrodos: E6010, E7010 y E8010, los mismos que poseen un alto contenido de celulosa, además que pueden ser utilizados en todas las posiciones de soldadura.

De las tres opciones, se escoge el electrodo E6010, por ser más comercial. Además, cumple con los valores requeridos:

- Resistencia a la tracción: 500 MPa
- Límite de fluencia: 414 Mpa

Los mismo son mostrados en la figura 2.2.



Figura 2.2. Electrodo E6010
(Fuente propia,2020)

2.1.4. Equipos de corte

Para este proceso, se debe considerar el espesor de la placa (12mm), toda vez que necesitará un alto nivel de calor. Se elige cortar con un equipo oxicorte, que es apropiado para espesores mayores a 5mm, ya que, por la temperatura usada, puede deformar la pieza si esta es muy delgada.

El proceso de corte consiste en calentar el material para volverlo vulnerable al corte, posteriormente, se realiza un paso exclusivo de una corriente de oxígeno a alta precisión que oxida la parte a cortar.

En este caso será una cortadora oxicorte CNC de marca WHITE MARTINS, que cuenta con una mesa de corte de 1500 mm x3000 mm y un peso aproximado de 300 kg, perteneciente a la empresa SERVICOR.

A continuación, en la figura 2.3. se aprecia la máquina mencionada:



Figura 2.3. Oxicorte CNC

Fuente: (Propia, 2020)

2.1.5. Equipo para ensayo de Radiografía Industrial

Para verificar el resultado de los defectos en las placas a las que no se puede acceder con inspección visual, se les realizó el ensayo de radiografía industrial, a través de una fuente de gammagrafía, de marca SENTINEL, y modelo 880 Delta, que se encuentra dentro de los laboratorios de ENDE (Ensayos no destructivos del Ecuador).

La cámara o proyector se utiliza a nivel industrial para aplicaciones de radiografía gamma, con el objetivo de inspeccionar materiales. Algunas de sus ventajas es que es liviano, portátil y compacto, de aproximadamente 52 libras, como se observa en la figura 2.4.

Para la obtención de la radiografía se utilizó una película de marca Afga, modelo D7, la misma que fue colocada en todo el largo de la soldadura, donde se mostrará los resultados del ensato.



Figura 2.4. Equipo de Gammagrafía
(Fuente propia,2020)

2.1.6. Equipo de tracción

Máquina universal de ensayos marca Zuspecar ubicada en la Facultad de Ingeniería Civil, con capacidad de hasta 3000 kN, haciendo posible el ensayo de materiales de alta resistencia y grandes dimensiones.

Es una máquina robusta pero fácil de manejar, gracias a su sistema hidráulico. Además, cuenta con dos mordazas que se ajustan a las dimensiones de la probeta, la misma se muestra en la figura 2.5.

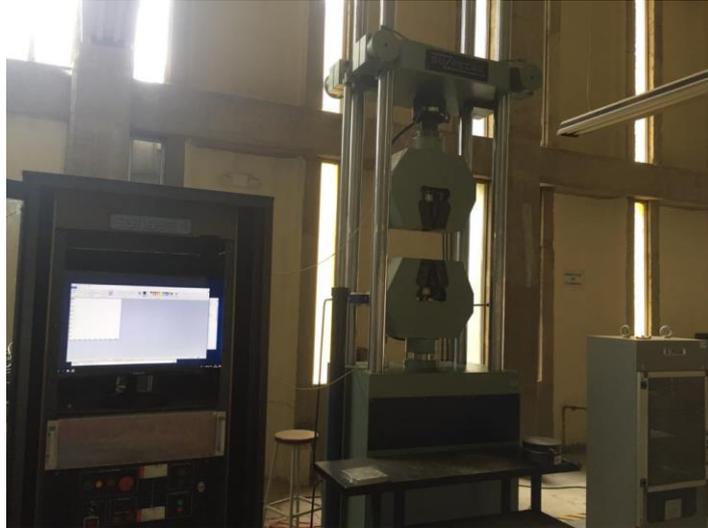


Figura 2.5. Equipo de tracción
(Fuente propia,2020)

2.1.7. Equipo de doblado

El equipo utilizado para el presente ensayo es una máquina hidráulica de doblado perteneciente al laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional



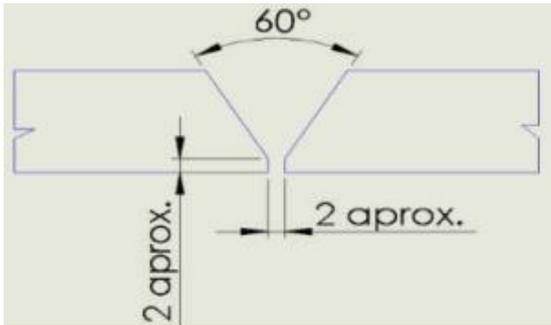
Figura 2.6. Equipo de doblado
(Fuente: Propia, 2020)

La tabla 2.2. muestra las características más relevantes de la máquina, considerando que es un modelo propio de un ex alumno que lo hizo como tesis.

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas del equipo de doblado

Especificaciones del equipo de doblado	
Marca	No registrada
Modelo	Propio
Carga máxima	2000 psi
Potencia de motor	2 hp
Frecuencia	60 Hz

2.2. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS)

 ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL <i>Facienda Hombres Sabios</i>		WPS-EPN-LAMG-001		Fecha: 20/07/2020			
Por	Mosquera L.	Soldadura de		Placas			
Proceso	SMAW- Manual						
Material	ASTM A-572						
Espesor de pared	1 in						
Diseño de junta	A tope						
Material de aporte	E-6010						
Pases	Múltiples, 1 pase de raíz y 8 pases de relleno						
Posición	Plana (1G)						
Dirección de la soldadura	Arrastre de izquierda a derecha						
Tiempo entre pases	De raíz a relleno				<10 min		
					<90 min		
Limpieza	Disco de desbaste						
ESQUEMA DE LA JUNTA							
							
Pases	Designación AWS	Proceso	Diámetro (in)	Corriente	Polaridad	Voltaje	Velocidad cm/min
1	E-6010	SMAW	1/8	80/100	DC+	20/30	12-24
2	E-6010	SMAW	1/8	80/110	DC+	20/30	12-24
3	E-6010	SMAW	1/8	80/110	DC+	20/20	12-24
4	E-6010	SMAW	1/8	80/110	DC+	20/30	12-24
5	E-6010	SMAW	1/8	80/110	DC+	20/30	12-24
6	E-6010	SMAW	1/8	80/110	DC+	20/30	12-24

7	E-6010	SMAW	1/8	80/110	DC+	20/30	12-24
8	E-6010	SMAW	1/8	80/110	DC+	20/30	12-24

2.3. Procedimiento de obtención de las probetas

2.3.1. Corte de placas

La Norma ASME sección IX menciona que las probetas deben tener una distancia sobrante de 25mm a cada lado. Con estos requisitos y tomando en cuenta que la norma API 1104 menciona que son dos probetas por ensayo, dando un total de 4; y el material eliminado por procesos de corte de las probetas (3 mm), se ha estimado una medida de placa de 165mm de longitud y un ancho de 150mm.

Inicialmente se tenía una plancha de 2.4 m x 1.2 m, que fue cortada en retazos de 165x150 mm, las mismas que serán soldadas y nuevamente cortadas en probetas más pequeñas, que cumplen con las medidas establecidas en la norma API 1104. En la figura 2.7. se muestra el esquema de corte de las probetas.

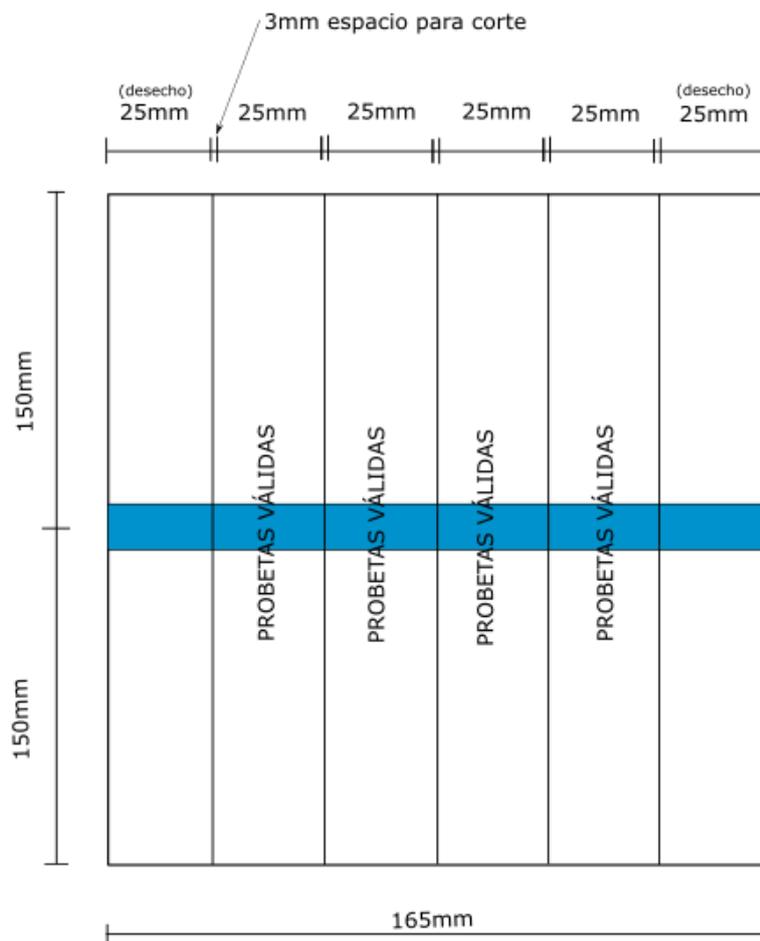


Figura 2.7. Dimensionamiento de las probetas
(Fuente: Propia, 2020)

2.3.2. Biselado de placas

El ángulo del bisel debe ser de 30° con lo cual se obtendrá un ángulo de 60° entre placa y placa. Para ello se utiliza una amoladora, obteniendo un acabado simétrico, y se conserva un talón de 2mm, tal como se muestra en la siguiente figura:



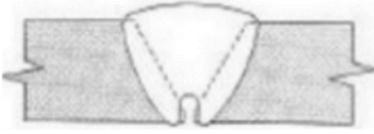
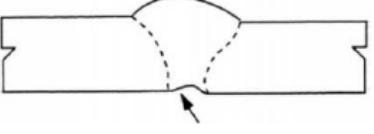
Figura 2.8. Dimensionamiento del bisel
(Fuente: Propia,2020)

2.3.3. Soldadura de placas

El procedimiento que se desarrollará para la obtención de los diferentes defectos típicos de soldadura consiste en considerar las causas que provocan dichos defectos durante el procedimiento de soldadura como se detalla en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Defectos de soldadura y causas que lo provocan

Defecto	Causa
<p>Inadecuada Penetración (IP)</p>	<p>Inadecuada potencia del arco. Bajo amperaje, bajo voltaje, alta velocidad de soldadura. Inadecuada preparación de la junta. Talón alto, separación pequeña. Desalineación.</p>
<p>Penetración inadecuada por desalineación (IPD)</p>	<p>Selección incorrecta de metales de aporte. Electrodos. Técnicas de soldadura inadecuada.</p>

<p>Quemón (BT)</p> 	<p>Exceso de penetración en el pase raíz. Velocidad muy lenta en el primer o segundo pase. Exceso de desbaste luego del pase de raíz. Alto amperaje en el segundo pase (Pase en caliente) Alto amperaje en el tercer pase y en el cambio de proceso de soldadura.</p>
<p>Concavidades internas (IC)</p> 	<p>Exceso de separación de las juntas Velocidad alta en el pase de raíz.</p>
<p>Porosidades (P) Poros aislado (P)</p>	<p>Enfriamiento brusco Metal de aporte húmedo</p>

Sin embargo, para garantizar la generación de los defectos mencionados se realizará un procedimiento adicional tomando en consideración los límites de admisibilidad descritos en la norma API 1104.

A continuación, se explica el proceso seguido para la obtención de los defectos mencionados, y de las probetas sin defectos que servirán como referencia para los ensayos aplicados.

2.3.3.1. Probeta de referencia

Este ejemplar fue elaborado con las características especificadas en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Valores de soldadura para probeta de referencia

Proceso SMAW con electrodo E 6010 de 1/8"				
No. PASE	AMPERAJE	VOLTAJE	VEL (cm/min)	POLARIDAD
1	125	24	12.68	CD+
2	125	24	19.02	CD+
3	125	24	18.06	CD+
4	125	24	18.70	CD+
5	125	24	19.20	CD+

6	125	24	19.07	CD+
7	125	24	18.93	CD+
8	125	24	15.00	CD+

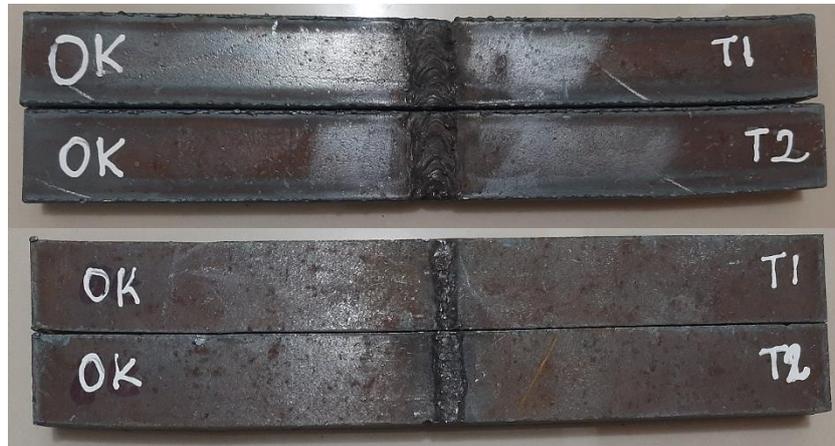


Figura 2.9. Probetas sin defectos

(Fuente propia, 2020)

2.3.3.2. Quemones

También conocido como quemadura transversal, que se caracteriza por ser aceptado cuando su dimensión es menor a $\frac{1}{4}$ " o 6 mm. Para verificar la validez de esta teoría, se elaboró 3 tipos probetas con medidas de 4, 6 y 8 mm respectivamente. El proceso consiste en hacer el pase de raíz, y dos pases adicionales, luego se taladra con brocas de 4, 6 y 8 mm hasta que el espesor en esos puntos sea menor al de la placa, como se muestra en la figura 2.10.



Figura 2.10. Probetas perforadas para quemones

(Fuente propia, 2020)

A continuación, se realiza el cuarto pase con un amperaje más alto para que el material de aporte pueda pasar sobre los agujeros sin cubrirlos, formando el soplado necesario para asemejar el defecto deseado. Los resultados se pueden apreciar en la imagen 2.11.



Figura 2.11. Probetas con quemones
(Fuente propia, 2020)

Los parámetros aplicados a este proceso se aprecian en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Datos del proceso SMAW para quemones

Proceso SMAW con electrodo E 6010 de 1/8"				
No. PASE	AMPERAJE	VOLTAJE	VEL (cm/min)	POLARIDAD
1	125	23	13.75	CD+
2	125	24	18.68	CD+
3	125	23	19.8	CD+
4	175	23	20.85	CD+
5	125	23	19.05	CD+
6	125	24	18.72	CD+
7	125	24	16.03	CD+
8	125	24	14.14	CD+

(Fuente: Propia, 2020)

2.3.3.3. Poros

Este defecto se caracteriza porque su tamaño debe ser menor a 1/8" o 3 mm, o porque el tamaño de un poro individual de ser menor al 25% del espesor nominal del material base. Para ello se ha utilizado una masilla refractaria que se muestra en la figura 2.12 que soporta temperaturas de hasta 1500°C, con la que se forman pequeñas esferas de 3, 4, y 5 mm, para insertar en el cordón de soldadura y de esta forma asemejar un vacío de aire.



Figura 2.12. Esferas de sintex refractario

(Fuente propia,2020)

Para insertar las esferas en el cordón, se realiza el pase de raíz, y dos pases adicionales, luego se taladra pequeños agujeros del tamaño necesario para que, entre casi toda la esfera refractaria, como se muestra en la figura 2.13.



Figura 2.13. Cordón de soldadura con esferas insertadas

(Fuente propia,2020)

En el pase número cuatro, se disminuye el amperaje para no dañar la esfera, y para los pases restantes se vuelve a ocupar el amperaje normal. Hasta obtener las probetas deseadas, como se muestra en la figura 2.14, de 3, 4 y 5 mm respectivamente.



Figura 2.14. Radiografía de cordón de soldadura con poro de 3,4 y 5 mm
(Fuente: Propia,2020)

Los parámetros empleados en este proceso se plasman en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Parámetros de soldadura para poros

Proceso SMAW con electrodo E 6010 de 1/8"				
No. PASE	AMPERAJE	VOLTAJE	VEL (cm/min)	POLARIDAD
1	125	24	13.75	CD+
2	125	24	18.69	CD+
3	125	24	19.13	CD+
4	75	24	20.56	CD+
5	125	24	18.86	CD+
6	125	24	19.02	CD+
7	125	24	18.57	CD+
8	125	24	14.01	CD+

(Fuente: Propia,2020)

2.3.3.4. Penetración incompleta

Este defecto se caracteriza por su falta de penetración del metal de aporte, y se aprecia en la poca profundidad que alcanza el cordón de soldadura. De acuerdo a la norma API

1104 la longitud de una indicación individual no debe exceder IP 1" o 25 mm de la longitud soldada, es decir, que la falta de penetración estará presente a lo largo de toda la probeta. Al no poder sobre pasar este valor como en el caso de otros defectos, se propone hacer una total de cuatro probetas que nos ayuden a precisar de mejor manera lo resultados. Los especímenes obtenidos se muestran en la figura 2.15.



Figura 2.1512. Probetas con penetración incompleta
(Fuente propia,2020)

Para la obtención de este defecto, se separó 1mm las placas, y se utilizó un amperaje inferior en el pase de raíz, para evitar que exista penetración completa. Los parámetros de soldadura se observan en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Parámetros de soldadura para placas con IPs

PROCESO SMAW CON ELECTRODO E 6010 DE 1/8"				
No. PASE	AMPERAJE	VOLTAJE	VEL (cm/min)	POLARIDAD
1	75	24	13.01	CD+
2	125	24	18	CD+
3	125	24	18.02	CD+
4	125	24	18.05	CD+
5	125	24	18.67	CD+
6	125	24	18.4	CD+
7	125	24	17.14	CD+
8	125	24	13.78	CD+

(Fuente: Propia,2020)

2.3.3.5. Concavidad interna

Este defecto se caracteriza porque el cordón de soldadura no ha sobrepasado el material base. Para su obtención, se sigue el mismo proceso que el de la penetración incompleta, posteriormente, con ayuda de una moladora se realiza una concavidad de aproximadamente 2 mm considerando que cualquier longitud es aceptable si la

densidad del IC no excede a la del material base más delgado. Así se obtiene las probetas mostradas en la figura 2.16.



Figura 2.16. Probeta con concavidad interna
(Fuente propia,2020)

2.3.3.6. Penetración incompleta por desalineación.

Este defecto es rechazado cuando su longitud continua es mayor a 50 mm. Para lograr este defecto, se provocó una desalineación entre placas, gracias a una lámina de 1 mm que fue ubicada en la parte inferior de una de las probetas y retirada después de la soldadura. El resultado se puede observar en la figura 2.17.



Figura 2.17. Probeta con concavidad interna por desalineación
(Fuente propia,2020)

2.4. Ensayo de Radiografía industrial: Gammagrafía

La gammagrafía es un método de ensayo no destructivo que se basa en la diferente absorción a la radiación gamma penetrante de la pieza que está siendo inspeccionada. Esta absorción depende de la densidad del material, de variaciones de espesor o de su composición química.

La diferencia de absorción a la radiación puede ser detectada a través de películas radiográficas y puede ser medida por medio de detectores de radiación. La gammagrafía se aplica, en la inspección o control de calidad de, soldaduras, placas fundidas y forjadas, tuberías y construcción civil. Para llevar a cabo el examen radiográfico se incluirá al menos la siguiente información:

- Tipo y espesor del material
- Isótopo o voltaje máximo
- Distancia de fuente a objeto
- Distancia del lado de origen del objeto a la película
- Tamaño de la fuente

2.4.1. Medición de espesores

Para el ensayo de radiografía, se debe considerar el espesor del cordón de soldadura, desde el pase de refuerzo, hasta la sobremonta, ya que este será el que soporte la exposición a la radiación. Las mismas que se muestran en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Espesor de cordones con defectos

Defecto	Espesor (mm)
Poro 3	13.89
Poro 4	13.62
Poro 5	14.02

(Fuente: Propia, 2020)

2.5. Caracterización de las probetas soldadas

Los ensayos de soldadura permiten establecer la factibilidad de una junta soldada basándose en los requisitos mínimos que debe cumplir de acuerdo con la norma establecida que para este caso se aplica la API 1104. Existen métodos destructivos y no destructivos, que permiten evaluar cualitativa y cuantitativamente las condiciones de la soldadura y definir si fue realizada correctamente.

La clasificación de los ensayos no destructivos y el número de probetas a realizarse por cada uno, dependen del espesor y diámetro del material, así se describe en la norma API1104 sección 5.6. Para este caso se cuenta con un espesor de 12mm por lo que, se deben realizar un mínimo de 2 probetas por ensayo. A continuación se muestra la figura 2.18 donde se observa los parámetros antes mencionados.

Diámetro exterior de tubería		Número de probetas					Total
pulgadas	milímetros	Resistencia a la tracción	Rotura con entalla	Doblado de raíz	Doblado de cara	Doblado de lado	
Espesor de pared $\leq 0.500''$ (12.7 mm)							
<2.375	<60.3	0 ^b	2	2	0	0	4 ^a
2.375-4.500	60.3-114.3	0 ^b	2	2	0	0	4
>4.500-12.750	<114.3-323.9	2	2	2	2	0	8
>12.750	>323.9	4	4	4	4	0	16
Espesor de pared $> 0.500''$ (12.7 mm)							
≤ 4.500	≤ 114.3	0 ^b	2	0	0	2	4
>4.500-12.750	<114.3-323.9	2	2	0	0	4	8
>12.750	>323.9	4	4	0	0	8	16

Figura 2.18. Clasificación de ensayos destructivos de acuerdo con la norma API 1104
Fuente: (API,2005)

2.5.1. Ensayo de tracción

Es un ensayo estático, donde se aplica un esfuerzo de tracción con velocidad constante en dirección axial a la probeta hasta llegar a su punto de rotura con el fin de determinar una o varias propiedades mecánicas (módulo de elasticidad, límite de fluencia, límite de resistencia, tensión de ruptura, límite elástico)

Las probetas utilizadas para el ensayo de tracción, ilustrada en la figura 2.19. son obtenidas de acuerdo a lo establecido a la norma API 1104.

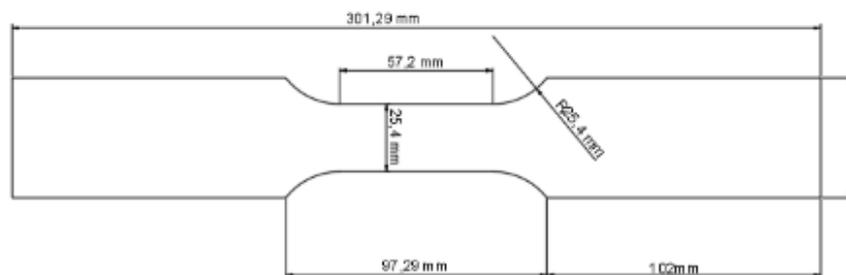


Figura 2.19. Probeta de ensayo de tracción
Fuente: (API,2005)

Procedimiento de ensayo de tracción

- Elaboración de probetas de acuerdo con la norma API1104
- Registrar las medidas de espesor de las probetas
- Elaborar marcas con el puntero metálico, permitiendo establecer las elongaciones sufridas en el material.
- Colocar las probetas en las mordazas tipo cuña del equipo de ensayo, encerrando la maquina en la posición inicial.
- Tomar los datos del ensayo que son registrados por el software del equipo, hasta la ruptura de la probeta

- Retirar la probeta analizada y tomar los cambios dimensionales, largo, ancho e inspeccionar la zona de fractura.

Las muestras para ensayo de resistencia a la tracción deben ser aproximadamente 230mm de longitud 25mm de ancho, estas deben ser cortadas por máquina o por oxígeno, sus bordes deben ser paralelos y lisos. Los especímenes de ensayo de tracción se muestran en la siguiente figura:

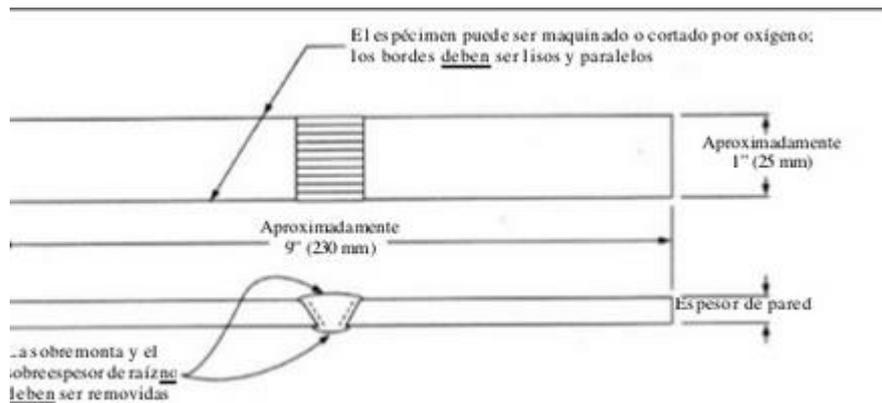
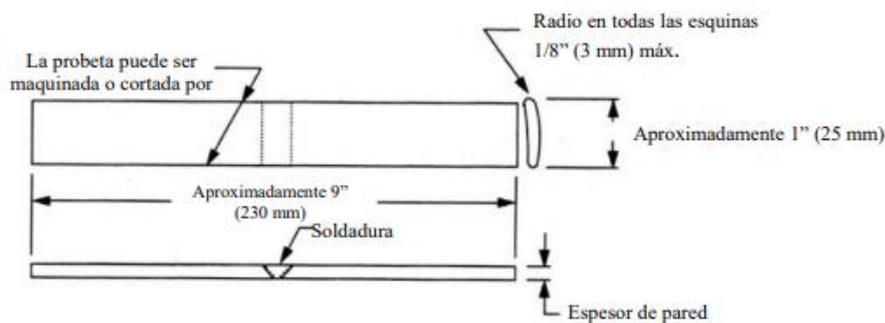


Figura 2.130. Dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción bajo la norma API 1104
Fuente: (API,2005)

2.5.2. Ensayo de doblado de raíz

Para realizar este ensayo se utiliza probetas de aproximadamente 230mm de longitud 25mm de ancho como se muestra en la figura 2.21 las mismas que serán limadas por cada lado de la soldadura, de tal forma que los pases de refuerzo y de raíz sean removidos, dejando la probeta lisa y al ras del material base.



Nota: La sobremona y sobreespesor de raíz deben ser removidos a ras con la superficie de la probeta. La probeta no debe ser alisada antes del ensayo.

Figura 6-Probetas de Doblado de Raíz y de Cara: Espesor de pared menor o igual a 0.500 pulg. (12.7 mm)

Figura 2.21. Probetas de Doblado de Raíz y de Cara: Espesor menor o igual a 0.5 pulg. (12.7 mm)
(Fuente: API,2005)

Para llevar a cabo el ensayo, se utiliza un dispositivo de doblado similar a la de la figura 2.22 que será empotrada en el equipo. La probeta se coloca con la raíz de la soldadura mirando hacia la abertura de la matriz, a continuación, se baja el punzón forzándolo a empujar a la probeta dentro del espacio libre, adoptando la forma de U.

Para que el ensayo sea aceptado se debe considerar que no exista imperfección que excede al menor valor entre 1/8" (3 mm) y la mitad del espesor nominal de pared, sea cual fuere la dirección de la discontinuidad que éste presente en la soldadura o entre la soldadura y la zona de fusión después del doblado. Además, se debe considerar que las fisuras que se originan durante el ensayo en el radio exterior del doblado a lo largo de los bordes de la probeta y que sean menores que 1/4" (6 mm), medidos en cualquier dirección, no deben ser consideradas a menos que sean observadas imperfecciones evidentes. (API, 2005)

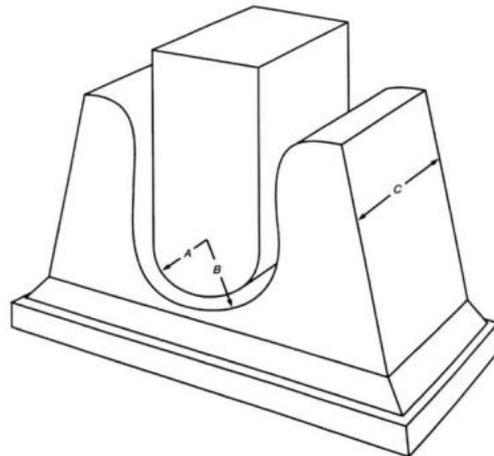


Figura 2.22. Matriz guiada para ensayo de doblado
(Fuente: API, 2005)

Las probetas empleadas en este ensayo son idénticas a las utilizadas en el ensayo de tracción, con el detalle que a estas probetas se les realizar un mecanizado antes de someterlas al doblado. En la siguiente figura se aprecia las probetas listas para ser ensayadas.



Figura 2.143. Probetas mecanizadas para el ensayo de doblado
(Fuente: Propia, 2020)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo contiene los resultados obtenidos de los ensayos de doblado y tracción explicados en el apartado 2, y su respectivo análisis. Para el efecto se dividirá en dos secciones, la primera muestra únicamente los datos resultantes de los ensayos y la segunda parte contiene el análisis y discusión de los mismos.

3.1. Resultados

En el siguiente capítulo se muestra los valores obtenidos del ensayo a tracción y doblado respectivamente de las probetas sin defectos, con penetración incompleta, penetración incompleta por desalineación, concavidad interna, quemones y poros.

3.1.1. Ensayo de Tracción

A continuación, se detallarán los datos obtenidos en el ensayo de tracción, con especial énfasis en el esfuerzo soportado al momento de la fractura. Para fines comparativos entre las probetas sin defectos versus las que contienen defectos, se obtiene el promedio del esfuerzo de fractura, y se calcula los porcentajes que permiten visualizar la variación de la resistencia mecánica en función del tamaño de las discontinuidades.

3.1.1.1. Probeta sin defectos

Estas probetas fueron soldadas con los parámetros indicados en el acápite 2, cumpliendo con lo establecido en la norma API 1104 y utilizando los parámetros de amperaje, voltaje y velocidad correctos para obtener datos referenciales con los que se compara las demás probetas y así observar cómo influye el tamaño de los defectos en las propiedades mecánicas de un cordón de soldadura

La resistencia del acero ASTM A 572 es de 65 ksi (448.16 MPa), y en las probetas soldadas se obtuvo una resistencia promedio de 605.025 MPa, demostrando así que las propiedades del cordón de soldadura son superiores al del material base. Los resultados de este ensayo se observan en la tabla 3.1.

Los valores obtenidos del esfuerzo de fractura son de 612.22MPa y 597.83MPa, a los que se le calcula en promedio que en lo posterior será el valor referencial para comparar con las probetas que contienen los diferentes defectos. El cálculo del promedio se muestra a continuación:

$$Promedio = \frac{T1 + T2 + \dots + Tn}{n}$$

Ecuación 1

$$\text{Promedio } Ok = \frac{612.22 + 597.83}{2} = 605.25[\text{MPa}]$$

Para conocer la confiabilidad de estos datos, se calcula el porcentaje de variación entre los resultados obtenidos y el promedio de los mismos. Esto se lo hace utilizando la ecuación número 2:

$$\text{Porcentaje de variación} = \frac{\sigma_n - \sigma_{prom}}{\sigma_{prom}} \times 100$$

Ecuación 2

$$\% \text{ variación} = \frac{612.22 - 605.025}{605.025} \times 100 = 1.19\%$$

El resultado obtenido es de 1.19% que es relativamente bajo, lo que indica que los resultados obtenidos son bastante confiables.

Los resultados de los cálculos explicados anteriormente, se plasman en la siguiente tabla.

Tabla 3.1. Resultados del ensayo de tracción para probetas sin defectos

No.	Longitud real (mm)	Espesor real (mm)	Ancho real (mm)	Esfuerzo último (MPa)	Promedio (Mpa)	Porcentaje de variación (%)
OK T1	231	12.07	25.47	612.22	605.025	1.19
OK T2	231	12.05	25.77	597.83		1.19

(Fuente: Propia, 2020)

En la figura 3.1. se aprecian las probetas obtenidas gracias al ensayo de tracción:

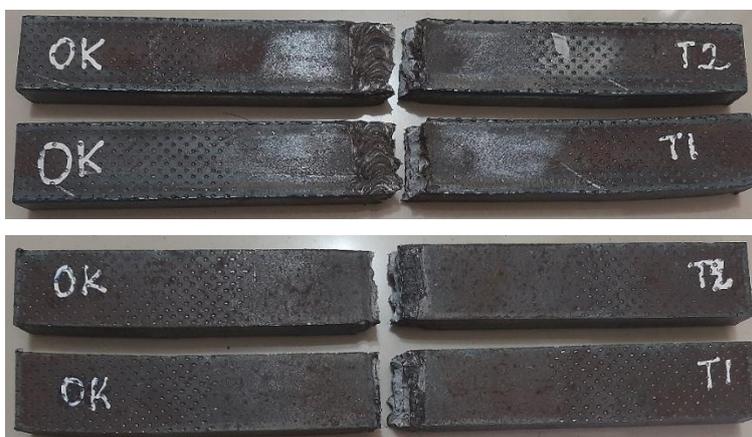


Figura 3.1. Probetas sin defectos sometidas a ensayo de tracción
(Fuente: Propia, 2020)

3.1.1.2. Penetración incompleta

Para este ensayo, se utilizaron 4 probetas de iguales características. En la tabla 3.2, se muestra el comportamiento de las probetas con IPs. Para conocer la confiabilidad de los datos obtenidos, se emplea las ecuaciones 1 y 2 y se obtiene el valor absoluto de su porcentaje de variación.

$$\text{Promedio IP} = \frac{447.40 + 480.60 + 472.78 + 467.47}{4} = 467.06 \text{ [MPa]}$$

$$\text{Porcentaje de variación} = \left(\frac{447.40 - 467.06}{467.06} \right) \times 100 = 4.2\%$$

Una variación de 4.2% se encuentra dentro de un rango aceptable.

Este cálculo se repite para cada valor de carga máxima.

Para determinar la variación de las propiedades mecánicas en las probetas, se realiza una comparación entre promedio obtenido de los esfuerzos de fractura de las probetas con IPs con las probetas sin defectos. Se utiliza la ecuación número 3:

$$\text{Porcentaje de variación de resistencia en IP} = \frac{\sigma_{prom IP} - \sigma_{prom OK}}{\sigma_{prom OK}} \times 100$$

Ecuación 3

$$\text{Porcentaje de resistencia IP} = \frac{467.06 - 605.025}{605.025} \times 100 = 22.8\%$$

En la tabla 3.2. se observan los resultados obtenidos.

Tabla 3.2. Resultados del ensayo de tracción para probetas con penetración incompleta

No.	Longitud real (mm)	Espesor real (mm)	Ancho real (mm)	Esfuerzo último (MPa)	Porcentaje Variación (%)	Promedio (MPa)	Reducción de resistencia (%)
IP T1	232	12.43	25.81	447.40	4.2	467.06	22.80
IP T2	232	12.11	25.97	480.60	2.82		

IP T3	232	12.31	25.68	472.78	1.21		
IP T4	232	12.17	25.71	467.47	0.08		

(Fuente: Propia, 2020)

Al ser las 4 probetas T1, T2, T3, y T4, de iguales características, se espera tener resultados idénticos, lo que se demuestra en el porcentaje de variación que es inferior al 3%, dando aceptabilidad a las probetas de este ensayo.

La reducción de la resistencia en las probetas con penetración incompleta es del 22.8% en comparación con las probetas sin defectos. En la figura 3.2. se aprecia la curva esfuerzo vs deformación, donde se visualiza el punto de falla de cada una.

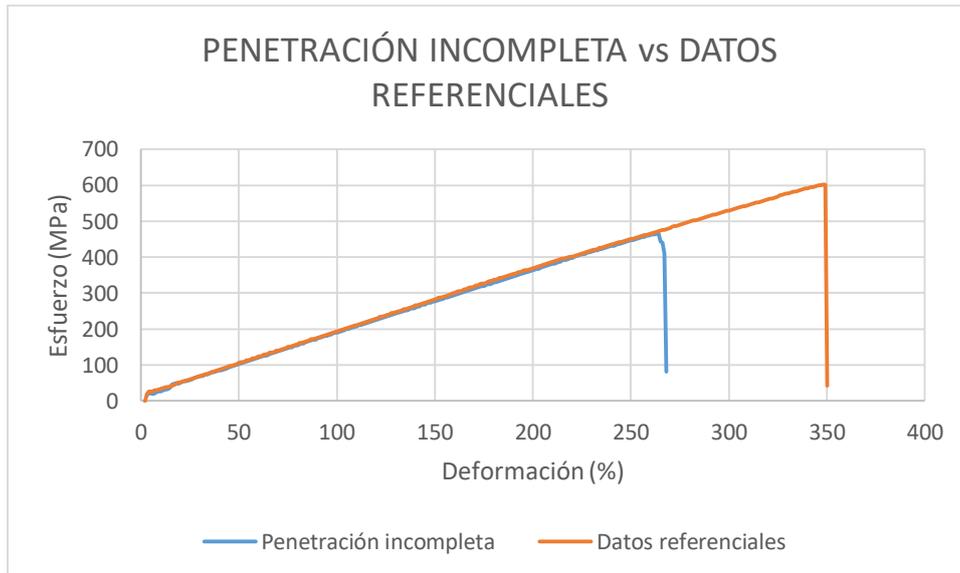


Figura 3.2. Gráfica comparativa de probetas con IP vs Sin defectos

(Fuente: Propia, 2020)

Considerando que la norma indica que la longitud individual no debe sobrepasar los 25 mm y fue el tamaño total del cordón, se concluye que, al tener una discontinuidad con esa media, se cambia las propiedades del cordón soldado de forma drástica, y no se debe sobrepasar dicha medida. En la figura 3.3. se observa las fracturas en la junta soldada, demostrando que la penetración incompleta de 25 mm es un concentrador de esfuerzos.



Figura 3.3. Probetas con penetración incompleta fracturadas después de ensayo a tracción
(Fuente: Propia, 2020)

3.1.1.3. Penetración incompleta por desalineación

En este ensayo se utilizaron 4 probetas de iguales características, es decir con la misma longitud de falta de penetración por desalineación. Los valores obtenidos se encuentran plasmados en la tabla 3.3.

Igual que en el proceso anterior, se obtiene el promedio de los esfuerzos de fractura y se los compara con cada esfuerzo de fractura de forma individual para obtener el porcentaje de variación y saber que tan confiables son los resultados obtenidos.

Se observa que 3 de 4 probetas tienen una variación muy baja, lo que hace confiables los resultados de este ensayo. Por excepción de una probeta que muestra una variación del 12.63%, que pudo haber sido causado por escoria o por una desalineación más pronunciada que fue causada de forma involuntaria.

Continuando con el proceso de cálculo, se compara el promedio del esfuerzo de fractura de las probetas con penetración incompleta con el esfuerzo de fractura de la probeta sin defectos, utilizando la ecuación 3 y se puede conocer en cuánto ha disminuido la resistencia a la tracción en presencia de una falta de penetración por desalineación.

Tabla 3.3. Resultados del ensayo de tracción para probetas con penetración incompleta por desalineación

No.	Longitud real (mm)	Espesor real (mm)	Ancho real (mm)	Esfuerzo último (MPa)	Porcentaje Variación (%)	Promedio (MPa)	Reducción de resistencia (%)
IPD T1	233	12.43	25.31	485.79	12.63	555.99	8.10%
IPD T2	233	12.16	25.48	581.12	4.32		

IPD T3	233	12.0	25.19	582.10	4.69		
IPD T4	233	12.12	25.28	574.28	3.29		

(Fuente: Propia, 2020)

Del resultado promedio, comparado al de las probetas que no tienen defectos, se concluye que, hubo una mínima variación de resistencia de 8.1%. Considerando la norma API 1104, indica que el defecto debe ser menor a 50 mm para ser aceptado, y que la probeta normada es de 25 mm, se explica porque no existe una variación excesiva en el valor de su resistencia. En la figura 3.4. se aprecia la curva esfuerzo vs deformación de cada uno.

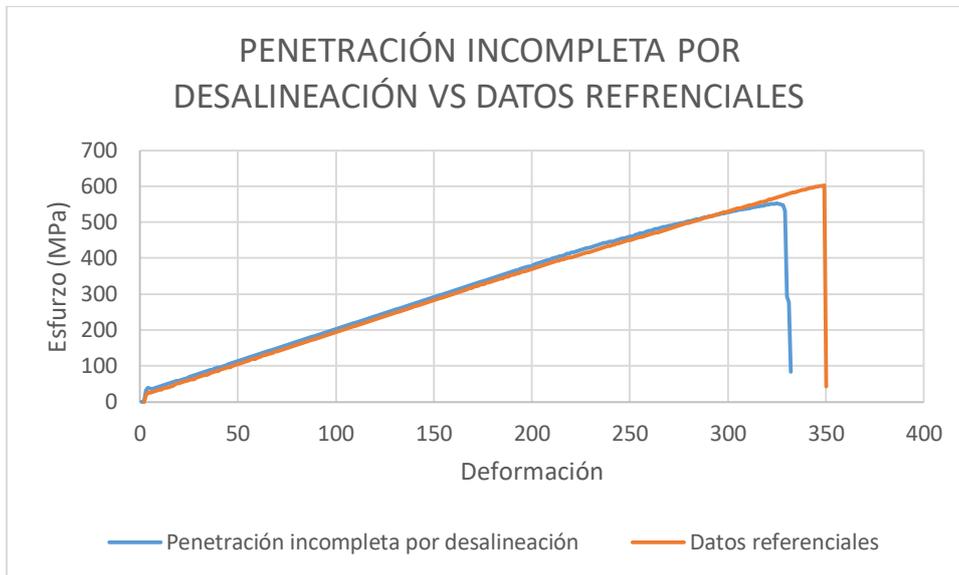


Figura 3.4. Gráfica comparativa de probetas con IPD vs Sin defectos

(Fuente: Propia, 2020)

En la figura 3.5. se observa que el IPD actúa como concentrador de tensiones, puesto que la ruptura fue en el cordón de soldadura.



Figura 3.5. Probetas con IPDs fracturadas por tracción
(Fuente: Propia, 2020)

3.1.1.4. Concavidad interna

Para este ensayo, se emplearon 2 probetas con concavidad interna de 2 mm, considerando que cualquier longitud de IC es aceptable si la densidad de la imagen radiográfica en la IC no excede a la del material base más delgado, dichas probetas soportaron un esfuerzo de fractura de 451.023 y 452.15 MPa, y que en promedio da 451.59 MPa.

El porcentaje de variación se obtiene gracias a la ecuación 2:

$$\text{Porcentaje de variación} = \left(\frac{451.023 - 451.59}{451.59} \right) \times 100 = 0.13\%$$

Se obtuvo que la variación entre la carga máxima de las probetas con concavidad interna, es mínima (0.13%), por lo tanto, los resultados son bastante confiables.

Finalmente, se desea conocer el porcentaje de disminución de la resistencia en presencia de una concavidad interna, por lo que se realiza la comparación con el valor del esfuerzo de fractura de la probeta sin defectos, con la ecuación 3, y se obtiene que:

$$\text{Porcentaje de resistencia IP} = \left(\frac{452.59 - 605.025}{605.025} \right) \times 100 = 25.36\%$$

En la tabla 3.4 se encuentran plasmados los datos obtenidos.

Tabla 3.4. Resultados del ensayo de tracción para probetas con penetración incompleta p

No.	Longitud real (mm)	Espesor real (mm)	Ancho real (mm)	Esfuerzo último (MPa)	Porcentaje Variación (%)	Promedio (MPa)	Reducción de resistencia (%)
IC T1	231.9	12.08	25.66	451.023	0.13	451.59	25.36
IC T2	232.0	12.095	25.86	452.15			

(Fuente: Propia, 2020)

En la figura 3.6. se plasma las curvas de las probetas IC vs las que no tienen defectos, y se concluye que la variación de resistencia es elevada (25.36%).

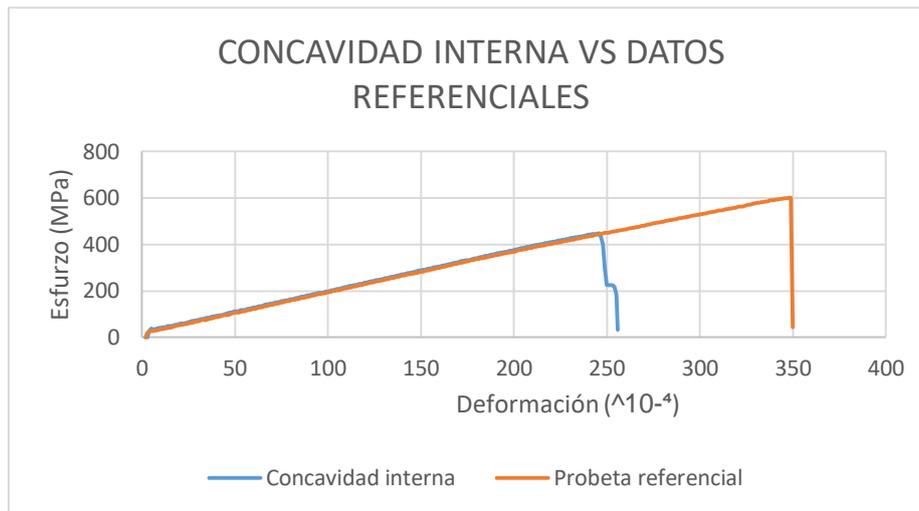


Figura 3.6. Gráfica comparativa de probetas con IC vs Sin defectos
(Fuente: Propia, 2020)

En la figura 3.7 se muestra el modo de falla de las probetas, y su fractura en el cordón de soldadura.



Figura 3.7. Probetas con IC fracturadas por tracción
(Fuente: Propia, 2020)

3.1.1.5. Quemón

Para verificar la confiabilidad de los datos obtenidos para cada caso, se realiza el cálculo de porcentaje de variación. Para un quemón de 4mm (valor aceptado por la norma) se tiene que los valores de esfuerzo de fractura son 545.81MPa y 584.97MPa, con los que se calcula el promedio y se obtiene un valor de 565.39MPa. Para saber si los datos son confiables, se realiza cálculo de porcentaje de variación, utilizando la ecuación 2:

$$\text{Porcentaje de variación} = 100 \times \left(\frac{545.81\text{MPa} - 565.39\text{MPa}}{565.39\text{MPa}} \right) = 3.46\%$$

Posteriormente se realiza el cálculo para conocer el porcentaje de reducción de la resistencia, en comparación con el ensayo hecho a las probetas sin defectos. Para ello

se utiliza la ecuación 3 con los datos del promedio obtenido entre la probeta BT4 T1 y BT4 T2, versus el promedio de las probetas OK T1 y OKT2.

$$\% \text{ Reducción de resistencia} = 100 \times \left(\frac{565.39 \text{MPa} - 605.025 \text{MPa}}{605.025 \text{MPa}} \right) = 6.55\%$$

Todo este proceso se lo vuelve a realizar para el quemón de 6mm y de 8mm.

En la siguiente tabla se plasman los resultados obtenidos para el ensayo de quemones.

Tabla 3.5. Resultados del ensayo de tracción para probetas con quemones

No.	Longitud real (mm)	Espesor real (mm)	Ancho real (mm)	Esfuerzo último (MPa)	Porcentaje variación (%)	Promedio (MPa)	Reducción resistencia (%)
BT4 T1	234	12.08	25.46	545.81	3.47	565.39	6.55%
BT4 T2	233	12.14	25.82	584.97			
BT6 T1	234	12.15	25.58	546.97	2.29	559.76	7.48%
BT6 T2	234	12.13	25.86	572.55			
BT8 T1	231	12.43	25.65	527.90	1.27	521.28	13.84%
BT8 T2	232	12.35	25.64	514.65			

(Fuente: Propia, 2020)

El promedio de la carga máxima de las probetas con quemones, comparado con el de las probetas sin defectos, muestran que la variación de la resistencia aumenta de forma proporcional al tamaño del quemón. La gráfica 3.8. plasma los valores correspondientes a los quemones de diámetro 4mm, y 6mm, que no se ven afectados de sobremanera en comparación a la probeta referencial, mientras que el quemón de 8mm de diámetro, hace que la resistencia disminuya en un 13.84%, demostrando que la probeta ha sufrido afectaciones en sus propiedades mecánicas.

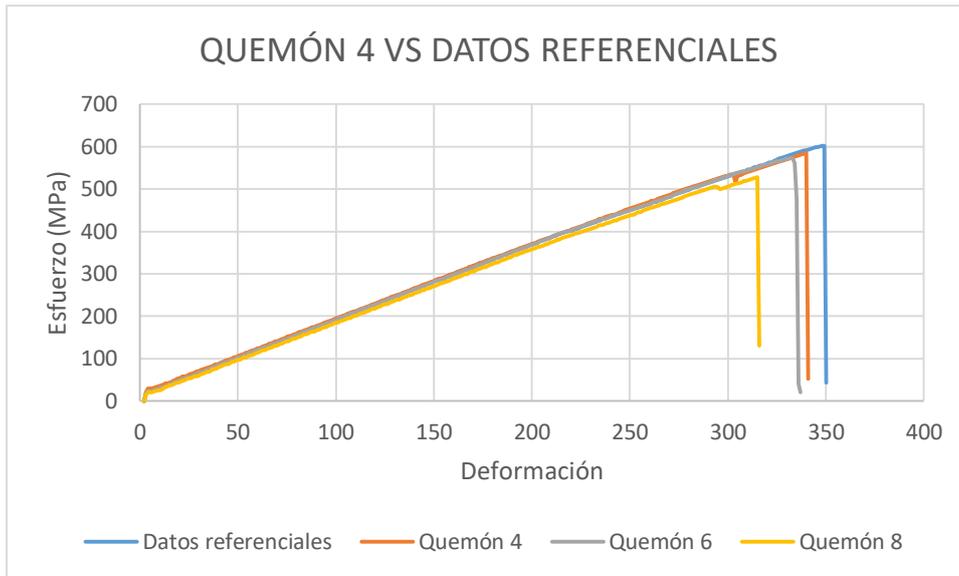


Figura 3.8. Gráfica comparativa de probetas con Quemones vs Sin defectos
(Fuente: Propia, 2020)

En la figura 3.9 se encuentran las probetas fracturadas como resultado del ensayo a tracción. Se observa que la falla se provoca sobre el cordón de soldadura, atravesando por el agujero taladrado que simula el quemón, este defecto actúa como concentrador de tensiones.



Figura 3.9. Probetas con BT fracturadas por tracción
(Fuente: Propia, 2020)

3.1.1.6. Poros

Para este ensayo se utilizó 2 probetas con poros de 3mm, 2 de 4mm, y 2 de 5mm. Para conocer la confiabilidad de los datos obtenidos, se obtiene el promedio y se procede a realizar el cálculo como en los ensayos anteriores.

$$\text{Promedio } P3 = \frac{542.24\text{MPa} + 537.77\text{MPa}}{2} = 540[\text{MPa}]$$

$$\text{Porcentaje de variación} = 100 \times \left(\frac{542.24\text{MPa} - 540\text{MPa}}{540\text{MPa}} \right) = 0.41\%$$

Este valor de 0.41%, indica que los resultados obtenidos para las probetas con poros de 3mm, son altamente confiables.

Para conocer la variación de la resistencia a la tracción, se compara el promedio obtenido de las probetas T1 y T2, con el valor promedio de la resistencia de las probetas referenciales.

$$\text{Porcentaje de disminución de resistencia} = 100 \times \left(\frac{540\text{MPa} - 605.025}{605.025\text{MPa}} \right) = 10.74\%$$

Este proceso se lo repite para las probetas de 4mm y de 5mm. Los resultados obtenidos se los plasma en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Resultados del ensayo de tracción para probetas con poros

No.	Longitud real (mm)	Espesor real (mm)	Ancho real (mm)	Carga máxima (MPa)	Porcentaje variación (%)	Promedio (MPa)	Disminución resistencia (%)
P3 T1	232	12.13	25.70	542.24	0.41	540.00	10.74
P3 T2	232	12.08	25.51	537.77			
P4 T1	231	12.07	26.01	507.87	3.94	528.72	12.61
P4 T2	231	12.0	25.81	549.56			
P5 T1	232	12.18	25.67	479.86	0.17	480.69	20.55
P5 T2	232	12.14	25.43	481.51			

(Fuente: Propia, 2020)

En la figura 3.10 se plasma la diferencia de resistencia entre probetas y se concluye que, a menor diámetro de poro, menos será afectada la resistencia de la soldadura. La norma API 1104 indica que un poro se considera defecto al exceder los 3 mm, y con esta medida se obtuvo una reducción de resistencia del 10.74 %, y con poros mayores, la resistencia se redujo un 12.61% para el poro de 4 mm y 20.55% para el de 5 mm.

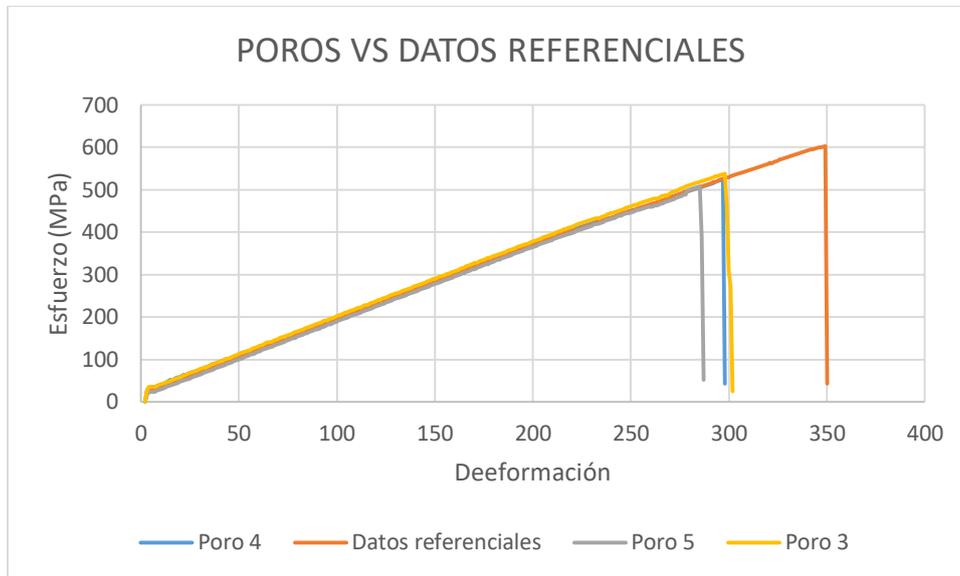


Figura 3.10. Gráfica comparativa de probetas con poros vs sin defectos (Fuente: Propia, 2020)

En la figura 3.11. se aprecia las probetas afectadas por los esfuerzos de tracción.

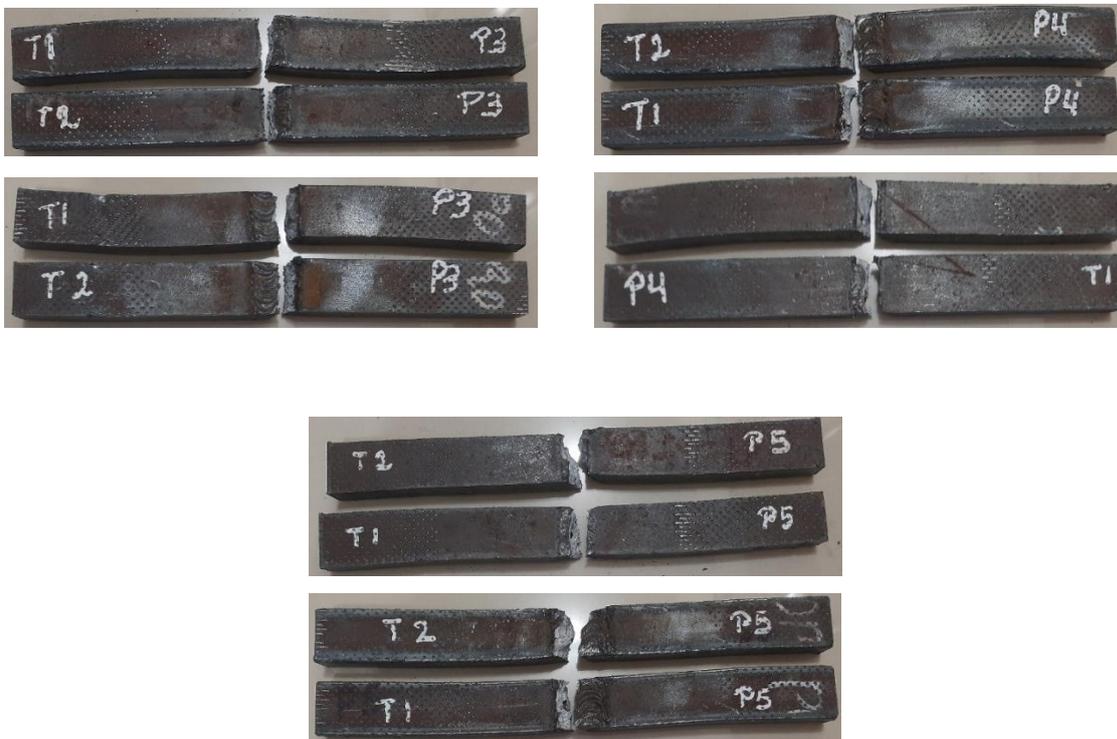


Figura 3.11. Probetas con poros fracturadas por tracción (Fuente: Propia, 2020)

Considerando que el diagrama esfuerzo-deformación contiene información de las propiedades mecánicas de todo material y su comportamiento, se lo utiliza para tener una referencia de los valores obtenidos. El diagrama se aprecia en la figura 3.12, y está compuesto por:

A-O: Región lineal o proporcional

A-B: Región entre el límite de proporcionalidad y el esfuerzo de fluencia

B-C: Región de plasticidad o fluencia perfecta (sin aumento notable de tensión)

C-D: Región de endurecimiento por deformación

D-E: Región de estricción

Para obtener la curva verdadera esfuerzo-deformación, se debe seguir la trayectoria C-E', que resulta del cálculo del esfuerzo con el área real de la sección transversal en la parte donde se presenta la estricción.

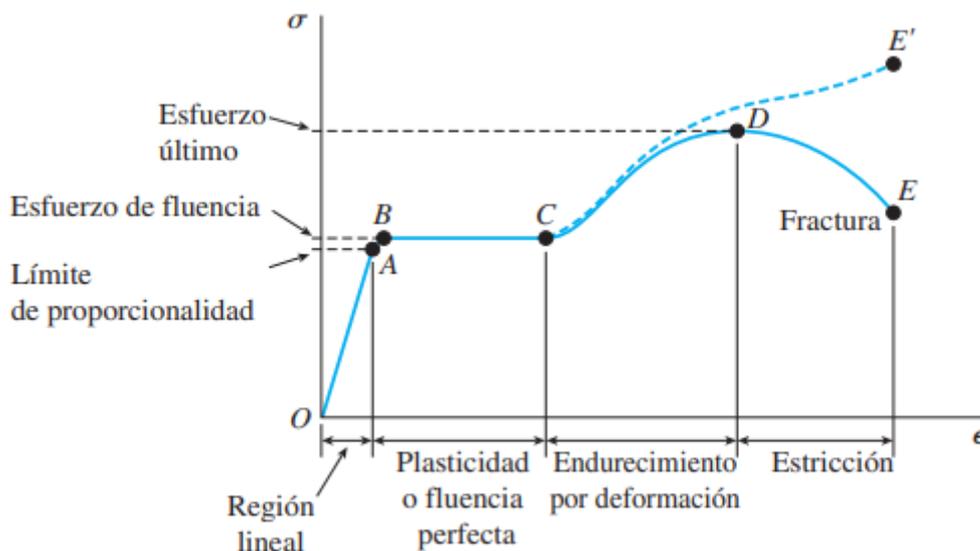


Figura 3.12. Diagrama esfuerzo- deformación unitaria para un acero estructural común
(Fuente: Gere, J. & Goodno, B, 2009)

Para obtener la curva real esfuerzo-deformación en presencia de los poros, se inicia con el cálculo del área transversal después de la fractura. Esto se lo realiza con la ayuda del software AutoCAD, con el fin de tener mayor precisión en los datos. Este paso se muestra en la siguiente figura:

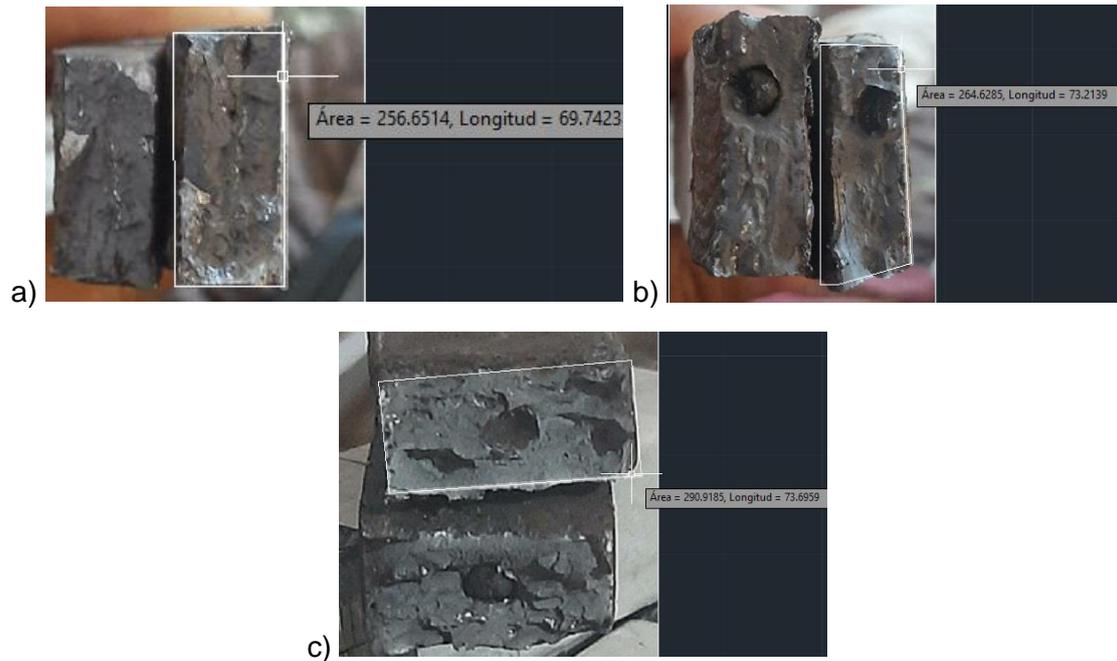


Figura 3.13. Área de estricción de las probetas con poros de a) 3mm, b) 4mm, y c) 5mm.
(Fuente: Propia, 2020)

Una vez obtenido este valor, se lo emplea para el cálculo del esfuerzo real:

$$A_f = 256.6514 [mm^2]$$

$$\sigma_f = \frac{P}{A_f} = \frac{167.5993 [kN]}{256.6514 [mm^2]} = 653.023 [MPa]$$

Para el caso de estudio de las probetas con poros de 3mm se tiene que:

$$E = 542.24 MPa$$

$$E' = 653.023 MPa$$

Como se espera que la mayoría de las estructuras trabajen a esfuerzos menores que el límite de proporcionalidad, la curva convencional esfuerzo-deformación unitaria OABCDE, que se basa en el área original de la sección transversal de la muestra, proporciona información adecuada para emplearla en el diseño de ingeniería. (Gere & Goodno, 2009)

Este cálculo se lo repite para los poros de 4mm y 5mm, los mismos que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.7. Valores del esfuerzo para la curva convencional y real

	Área transversal después de la fractura (mm ²)	Esfuerzo en la curva convencional (MPa)	Esfuerzo en la curva real (MPa)
P3 T1	256.6514	542.24	653.023
P4 T1	264.6285	507.87	579.92
P5 T1	290.9185	479.56	526.1439

(Fuente: Propia, 2020)

3.1.2. Ensayo de doblado

La siguiente sección muestra los resultados obtenidos en el ensayo de doblado, con énfasis en la carga máxima soportada, que será el dato referencial utilizado para las comparaciones respectivas con el fin de analizar la variación de las propiedades mecánicas.

3.1.2.1. Probeta sin defectos

Para el siguiente ensayo se utilizó dos probetas soldadas bajo las especificaciones de la norma API 1104 que no contenían defectos. Estas probetas fueron ensayadas como se explica en el acápite 2 del presente trabajo, y como resultado, se obtuvo dos especímenes en forma de U. Para conocer su deformación, se los fotografió y se los llevó a la plataforma AutoCad para calcular el ángulo interno.

Considerando que inicialmente las probetas eran de 180°, y que su ángulo interno es de 29° y 38°, se procede a restar ambos valores, para conocer cuánto ha sido la deformación provocada por los esfuerzos de doblado. A estos ángulos se les denominará con la letra griega phi.

$$\text{Ángulo de doblado } D1 = \phi_{D1} = 180 - 29 = 151^\circ$$

$$\text{Ángulo de doblado } D2 = \phi_{D2} = 180 - 38 = 142^\circ$$

Para conocer la deformación en términos de porcentaje, se procede a sacar el promedio entre ambos valores, utilizando la ecuación 1:

$$\text{Promedio} = \frac{151^\circ + 142^\circ}{2} = 146.5^\circ$$

El porcentaje de deformación se calcula considerando que 180° es el 100% (sin deformación) y 146° es el valor que se busca:

$$\text{Porcentaje de deformación} = \frac{\phi_n \times 100\%}{180^\circ}$$

Ecuación 4

$$\text{Porcentaje de deformación} = \frac{146.5 \times 100}{180} = 81.39\%$$

Por lo tanto, se puede interpretar que esta probeta tuvo una deformación del 81.39%.

Los resultados de ensayo de doblado con las probetas sin defecto, se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.8. Resultados del ensayo de doblado con probetas sin defectos

No.	Angulo de doblado	Promedio (°)	Porcentaje deformación (%)
OK D1	151	146.5	81.39
OK D2	142		

(Fuente: Propia, 2020)

La imagen 3.14. muestra las probetas dobladas, después de recibir un aproximado de 1000 psi.

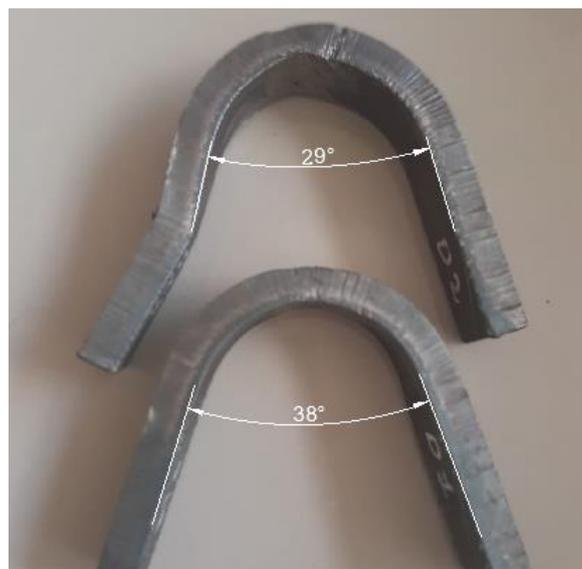


Figura 3.14. Probetas sin defectos doblada
(Fuente: Propia, 2020)

3.1.2.2. Penetración incompleta

En este ensayo se utilizaron 4 probetas de iguales características, es decir con falta de penetración en un ancho de 25mm, que se aprecian en la imagen 3.15. Cada probeta tiene marcado el ángulo que se dobló después del ensayo, y esta será la referencia para verificar como se vio afectada la ductilidad en presencia de una penetración incompleta.

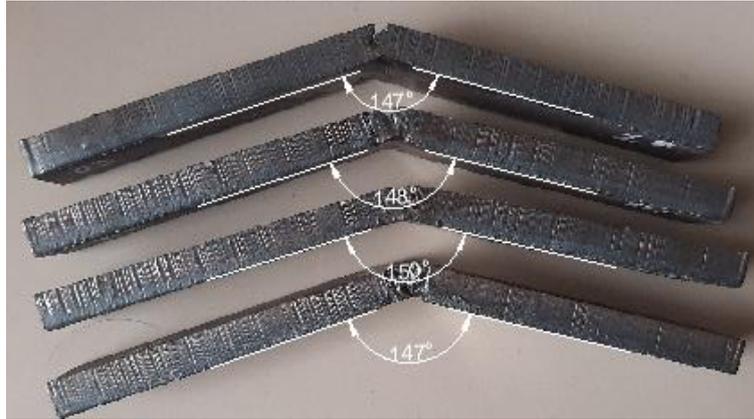


Figura 3.15. Probetas dobladas con penetración incompleta
Fuente: (Propia, 2020)

Cómo se había explicado anteriormente, este ángulo interno debe ser restado de 180° para obtener el verdadero valor de deformación. Posteriormente se calcula el promedio con la ecuación 1:

$$Promedio = \frac{33^\circ + 32^\circ + 30^\circ + 33^\circ}{4} = 32^\circ$$

Finalmente, para conocer cómo afectó la falta de penetración a la ductilidad de la placa soldada, se calcula el porcentaje de deformación para los 32° obtenidos en el paso anterior:

$$Porcentaje\ de\ deformación = \frac{32^\circ \times 100\%}{180^\circ} = 17.78\%$$

Se aprecia que este valor es muy bajo, esto quiere decir que la penetración incompleta no permite mayor deformación ante esfuerzos de doblado. Estos valores se encuentran plasmados en la siguiente tabla:

Tabla 3.9. Resultados de ensayo de doblado de probetas con penetración incompleta

No.	Ángulo de doblado	Promedio (°)	Porcentaje deformación (%)
IP D1	33	32	17.78
IP D2	32		
IP D3	30		
IP D4	33		

(Fuente: Propia, 2020)

3.1.2.3. Penetración incompleta por desalineación

Para este ensayo que emplean 4 probetas de iguales características, es decir, con una desalineación de 1mm en todo el ancho del espécimen, las mismas que son mostradas en la figura 3.16 con su respectiva deformación y el ángulo interno de cada uno de ellos.

Cómo se había explicado anteriormente, este ángulo interno debe ser restado de 180° y se calcula el promedio del mismo como se muestra a continuación:

$$Promedio = \frac{47^\circ + 41^\circ + 38^\circ + 45^\circ}{4} = 42.75^\circ$$

Posteriormente, para conocer cómo se afectó la ductilidad de las probetas, se calcula su porcentaje de deformación igual que se lo hizo para las probetas con IPs.

$$Porcentaje\ de\ deformación = \frac{42.75^\circ \times 100\%}{180^\circ} = 23.75\%$$



Figura 3.16. Probetas con IPDs doblada
(Fuente: Propia, 2020)

En la siguiente tabla se analiza que el porcentaje de deformación es de 23.75 %, lo que indica que este defecto influye mucho en la resistencia del material.

Este valor es superior al de las probetas con penetración incompleta, pero siguen siendo muy bajos en comparación al de la probeta referencial. Esto se explica a detalle en el apartado 3.2.

Tabla 3.10. Resultados del ensayo de doblado con probetas con IPDs

No.	Ángulo de doblado (°)	Promedio (°)	Porcentaje deformación (%)
IPD D1	47	42.75	23.75
IPD D2	41		
IPD D3	38		
IPD D4	45		

(Fuente: Propia, 2020)

3.1.2.4. Concavidad interna

Para este ensayo se emplearon 2 probetas de iguales características, es decir, con una concavidad interna de 2mm en todo su ancho. En la figura 3.17 se aprecia las probetas dobladas gracias al ensayo realizado, y su respectivo ángulo.

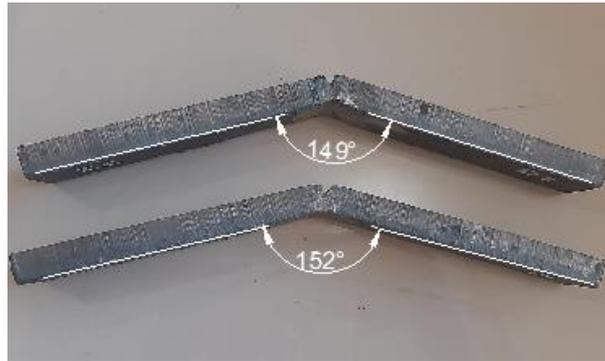


Figura 3.17. Probetas con IC doblada
(Fuente: Propia, 2020)

Los cálculos empleados son los mismos aplicados en los casos anteriores. Primero se resta los valores obtenidos de 180°, y se calcula el promedio de los mismos:

$$Promedio = \frac{31^\circ + 28^\circ}{2} = 29.5^\circ$$

Y se calcula el porcentaje de deformación de la probeta:

$$Porcentaje\ de\ deformaci3n = \frac{29.5^\circ \times 100\%}{180^\circ} = 16.39\%$$

Este valor muestra que la deformación es muy baja y que la concavidad interna afecta de sobremanera a la probeta, esto se debe a que actúa como un concentrador de tensiones y provocó el fallo de forma temprana.

En la tabla 3.11 encontramos los resultados del ensayo de doblado correspondiente a las probetas con concavidad interna.

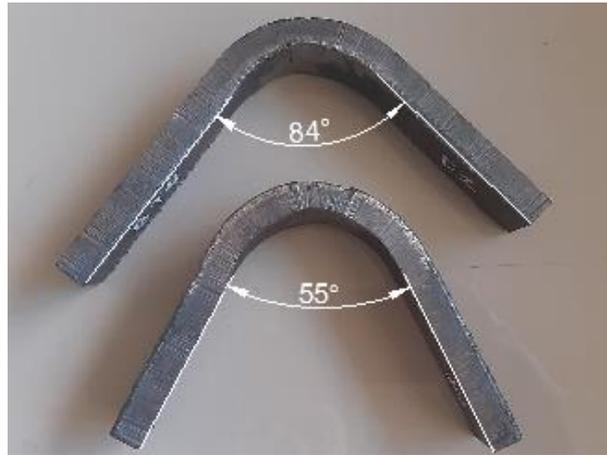
Tabla 3.11. Resultados del ensayo de doblado de probetas con concavidad interna

No.	Ángulo de doblado	Promedio (°)	Porcentaje deformación (%)
IC D1	31	29.5	16.39
IC D2	28		

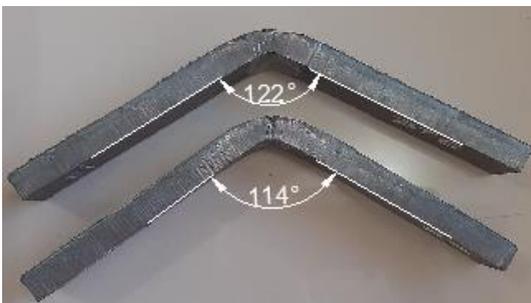
(Fuente: Propia, 2020)

3.1.2.5. Quemones

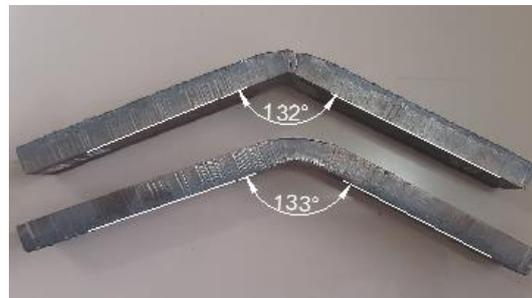
En este ensayo se utilizó 6 probetas, distribuidas 2 con quemones de 4mm, 2 con quemones de 6mm, y 2 con quemones de 8mm. Este defecto presentó una alta resistencia a la deformación en comparación a los otros defectos. En la figura 3.18 se observa cómo las probetas después de haber sido ensayadas y su respectivo ángulo de deformación.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.18. Probetas después del ensayo de doblado con quemones de: (a) 4 mm, (b) 6 mm, y (c) 8 mm.
(Fuente: Propia, 2020)

Al igual que en procesos anteriores, se resta el ángulo del gráfico de 180° y se obtiene el promedio, a continuación, se calcula el porcentaje de deformación.

$$\text{Promedio para BT4} = \frac{96^\circ + 125^\circ}{2} = 110.5^\circ$$

$$\text{Porcentaje de deformación BT4} = \frac{110.5^\circ \times 100\%}{180^\circ} = 61.39\%$$

Estos cálculos se repiten para las probetas BT6 y BT8.

Se concluye que, el quemón de 4mm tiene mayor deformación, mientras que, para los quemones de 6 mm y 8 mm, la deformación es mucho menor confirmando que un quemón igual 6 o mayor, es un concentrador de tensiones. Los datos se encuentran en la tabla 3.12:

Tabla 3.12. Resultados del ensayo de doblado de probetas con quemones

No.	Angulo de doblado (°)	Promedio (°)	Porcentaje deformación (%)
BT4 D1	96	110.5	61.39

BT4 D2	125		
BT6 D1	58	62	34.44
BT6 D2	66		
BT8 D1	48	47.5	26.39
BT8 D2	47		

(Fuente: Propia, 2020)

3.1.2.6. Poros

Las siguientes fotografías muestran las probetas resultantes del ensayo de doblado de con poros correspondientes a 3 mm, 4 mm, y 5 mm, con sus respectivos ángulos internos.

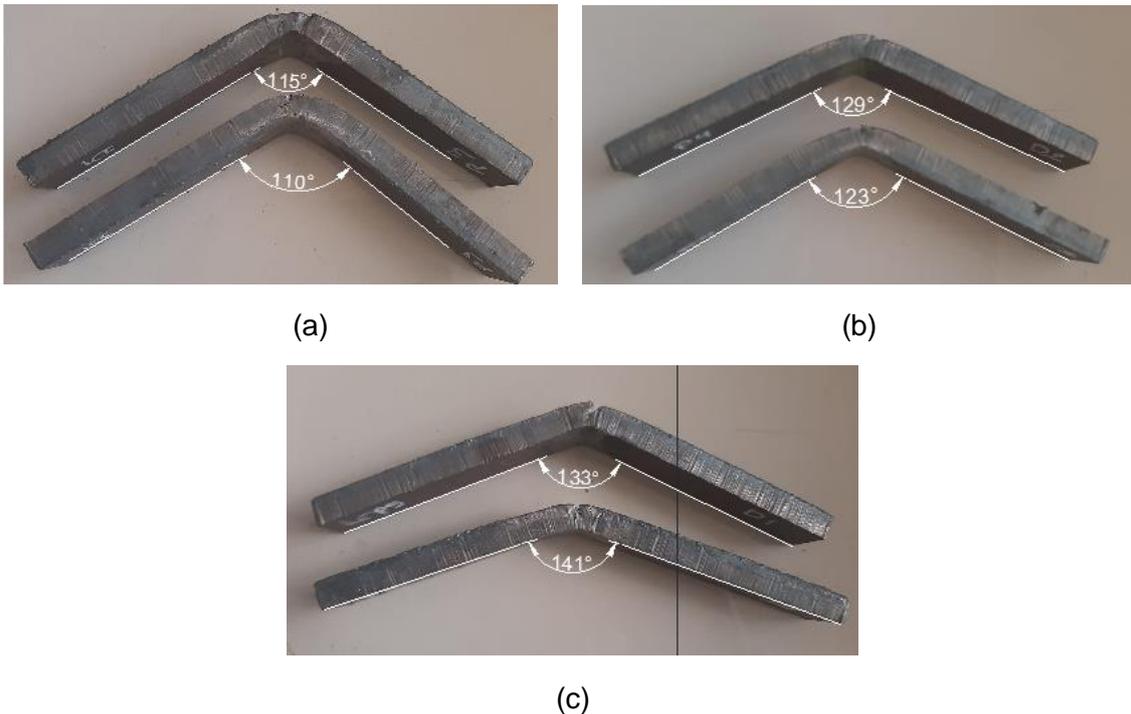


Figura 3.19. Probetas después del ensayo de doblado con poros de: (a) 3 mm, (b) 4mm, (c) 5mm.

(Fuente: Propia, 2020)

Los cálculos a realizarse son los mismos que en los ensayos anteriores:

$$\text{Promedio para } P3 = \frac{65^\circ + 70^\circ}{2} = 67.5^\circ$$

$$\text{Porcentaje de deformación } P3 = \frac{67.5^\circ \times 100\%}{180^\circ} = 37.5\%$$

El valor del porcentaje de deformación indica cómo se ha visto afectada la probeta en presencia del poro. Los cálculos se repiten para las probetas P4 y P5.

En la tabla 3.13 se observan los valores obtenidos para las probetas dobladas, donde se evidencia que para el poro de 3 mm se deforma apenas un 37.5%, siendo este un

valor muy bajo, y se debe a que el poro se encuentra en el centro del cordón y provoca que sea un concentrador de tensiones. Los resultados son analizados en el apartado 3.2.

Tabla 3.13. Resultados del ensayo de doblado de probetas con poros

No.	Ángulo de doblado	Promedio (°)	Porcentaje deformación (%)
P3 D1	65	67.5	37.5
P3 D2	70		
P4 D1	60	58.5	32.5
P4 D2	57		
P5 D1	47	43	23.88
P5 D2	39		

(Fuente: Propia, 2020)

3.2. Análisis y discusión

Una vez obtenidos los valores de todas las probetas, se analizará la forma en que se comportan cada uno en los diferentes ensayos. A continuación, se aprecia la tabla 3.14 en la que resume los resultados obtenidos de los ensayos realizados, y la figura 3.20 en la que los valores promedio del ensayo de tracción se grafica en barras y su unidad de medida se encuentran en mega Pascales, mientras que los valores del ensayo de doblado (en porcentaje de deformación) se muestran en forma de una línea sobrepuesta.

El porcentaje de disminución de resistencia se obtiene comparando el esfuerzo soportado por la probeta sin defectos con el esfuerzo de las probetas con defectos. Mientras que el porcentaje de deformación de doblado se obtiene individualmente a partir del ángulo de doblado.

Tabla 3.14. Valores obtenidos en los ensayos de tracción y doblado

Probeta	Ensayo de tracción		Ensayo de doblado	
	Promedio de esfuerzo último (MPa)	Porcentaje de disminución de resistencia (%)	Ángulo de doblado (°)	Porcentaje de deformación (%)
OK	605.025		146.5	81.39
IP	467.06	22.80	32	17.78
IPD	555.99	8.10	42.75	23.75
IC	451.59	25.36	29.5	16.39
BT4	565.39	6.55	110.5	61.39
BT6	559.76	7.48	62	34.44
BT8	521.28	13.84	47.5	29.39

P3	540	10.74	67.5	37.5
P4	528.72	12.61	58.5	32.5
P5	480.69	20.55	43	23.88

(Fuente: Propia, 2020)

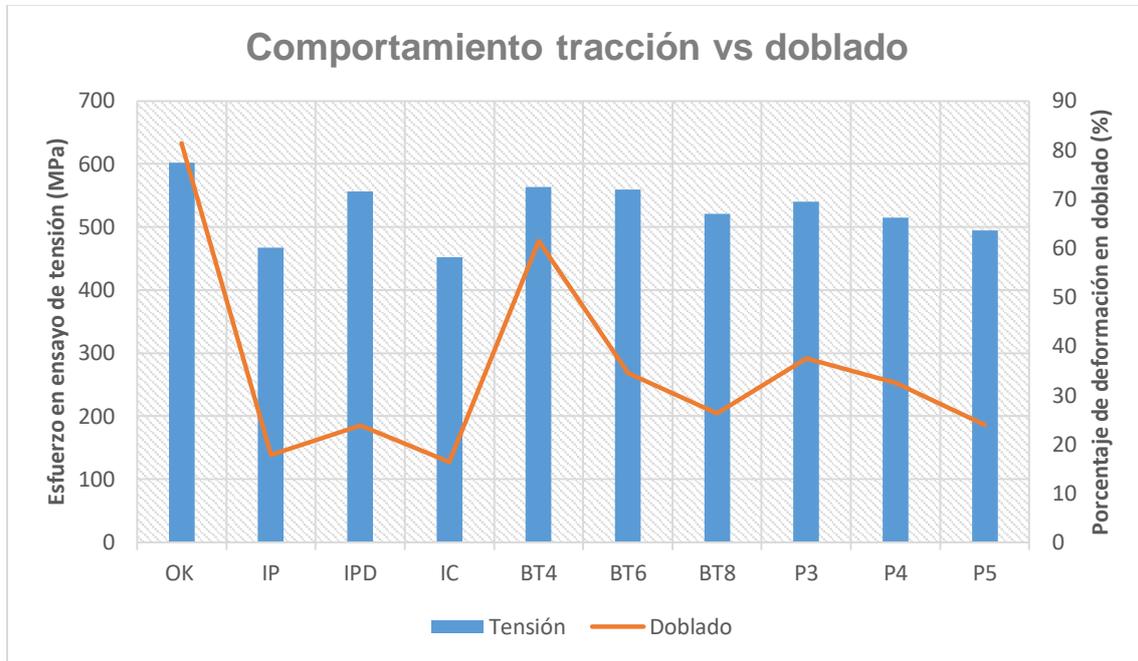


Figura 3.20. Resultado de ensayo de tracción vs doblado
(Fuente: Propia, 2020)

En la figura anterior se aprecia que las propiedades del acero ASTM A 572, cambian de forma similar para ambos ensayos, es decir, que para determinado defecto la resistencia aumenta o disminuye de forma según sea el caso.

Para visualizar de mejor manera que defectos son los que más influyen en las propiedades mecánicas del material, se realiza la gráfica 3.21 donde se ordena de forma descendente los valores promedio encontrados. Se puede observar que el quemón de 4 mm es el defecto que mejor resistencia tiene en ambos casos, considerando que este se encuentra dentro del valor de aceptación de la norma API 1104 y que su disminución de resistencia a la tracción es de apenas 6.55%, y su porcentaje de deformación por doblado es de 61.39%.

Algo similar sucede con el quemón de 6 mm que se encuentra en segundo lugar, con una disminución de resistencia es de apenas 7.48%, pero con un bajo valor de deformación por esfuerzos de doblado de apenas 34.44%. Se confirma lo propuesto por la norma, que este valor aún es aceptable.

El siguiente defecto es la penetración incompleta por desalineación, que tiene una mínima disminución de resistencia del 8.10%, pero apenas un porcentaje de doblado

del 23.75%; no presenta un cambio drástico en su resistencia, sin embargo, este ya es un valor considerable para una posible falla del material en presencia de esfuerzos de doblado.

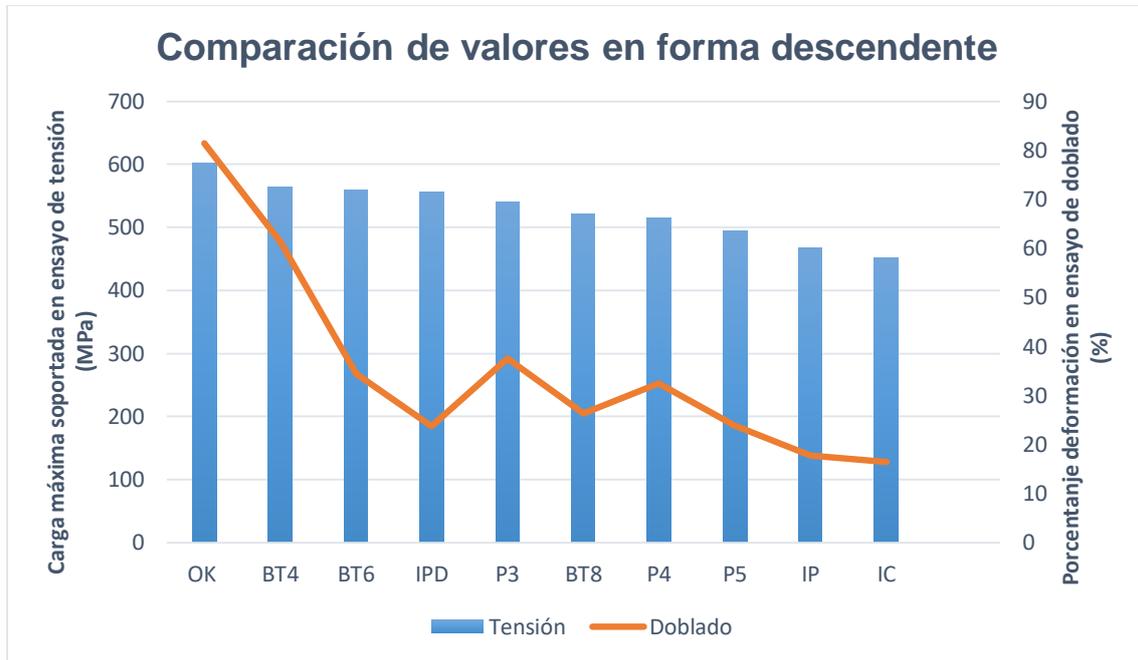


Figura 3.21. Análisis de resultados de ensayo de tracción y doblado
Fuente: (Propia, 2020)

El Poro de 3mm se encuentra en el límite de admisibilidad, y tiene un comportamiento especial porque disminuye su resistencia de tracción un 10.74%, pero su resistencia al doblado es mayor que la del IPD, con un porcentaje de deformación de 37.5%. Esto puede darse porque se realiza un doblado de raíz y la probeta con penetración incompleta por desalineación se coloca vista al agujero de la matriz guiada provocando una fractura más rápida que en el poro que al ser un defecto interno, tarda más en fallar.

El siguiente defecto que influye en los valores de resistencia, es el del quemón de 8 mm, que a diferencia del de 4mm y 6 mm, este tiene una mayor influencia en el cambio de propiedades mecánicas del material, tanto en ambos ensayos, con una disminución de resistencia en tracción de 13.84% y de doblado de 29.39%, sin embargo, si se puede considerar este defecto apenas tiene una variación del 6.87% en la disminución de tracción entre el quemón de 6mm (límite de aceptación) y el de 8mm.

De forma proporcional, se encuentran los poros de 4mm y 5 mm, que al encontrarse fuera del rango aceptable de la norma API 1104, contribuye en gran manera al fallo anticipado de los especímenes.

Finalmente, se encuentran las probetas con penetración incompleta y concavidad interna, que serán analizadas de manera conjunta, toda vez que fueron soldadas con los mismos parámetros. Los antes mencionados, que por tener su defecto en el pase de raíz y al ser ubicadas con vista a la matriz guiada, no soportaron una fuerza elevada en ambos ensayos, demostrando que, de los defectos considerados, estos son los que más afectan en una soldadura.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se analizó la variación de las propiedades mecánicas en un acero A-572 por la presencia de defectos típicos en soldadura bajo la norma API 1104.
- Se obtuvieron tantas probetas como indicó la norma API 1104 con sus respectivas discontinuidades, de forma experimental gracias a la variación de amperaje, inclusiones metálicas y desbaste de material.
- Los ensayos no destructivos permitieron verificar las medidas correctas de los defectos internos y externos. En el presente estudio se empleó inspección visual y radiografía industrial.
- Los ensayos destructivos fueron de vital importancia para constatar la variación de las propiedades mecánicas de las probetas en presencia de las discontinuidades.
- Penetración incompleta:

La norma API 1104 indica que se considera defecto cuando la longitud de la indicación excede los 25 mm. Considerando que la norma ibídem indica que la probeta debe tener un ancho de 25 mm, el defecto se lo realiza en toda la extensión, donde se obtuvo una disminución de 22.08% de resistencia por lo que se sugiere que este defecto sea igual o menor a esta longitud (25 mm).

Mediante el ensayo de doblado se recalcó que la longitud de este defecto no debe ser igual o mayor a 25 mm porque provoca la falla del material, en este ensayo se obtuvo una deformación mínima del 17.78 %, siendo este un valor muy bajo y demostrando que este defecto generó un concentrador de esfuerzos muy influyente sobre la probeta.

- Penetración incompleta por desalineación

Para la probeta con desalineación de 1 mm y longitud de 25 mm, apenas presentó una disminución de resistencia de 8.10%. Considerando que la norma indica que es un defecto si supera los 50 mm y en el presente trabajo es de la

mitad de esta medida, en consecuencia, se asume que el valor de la resistencia disminuirá por lo menos al doble del valor actual.

Con el ensayo de doblado, se obtuvo un valor de 23.85% de deformación, siendo este un valor muy bajo, por lo tanto, se mantiene los 50 mm como un referente para futuros proyectos.

- Concavidad interna

La norma indica que cualquier longitud de IC en función de la densidad entre el cordón de soldadura y el material base. La probeta fue hecha con 2 mm de desbaste de material y presentó una reducción de resistencia a la tracción del 25.36%, siendo este un valor muy elevado ya que represente una tercera parte de la resistencia de la probeta sin defectos.

Mientras que, con el ensayo de doblado, se deformó únicamente un 16.39%, mostrando que este defecto se convirtió concentrador de tensiones. Por consiguiente, se recomienda que los valores de concavidad sean inferiores a 2mm.

- Quemones

Esta discontinuidad, se considera defecto cuando la dimensión del quemón excede los 6mm. El presente trabajo se realizó con dimensiones de 4mm, 6mm y 8mm.

Para el quemón de 4mm se observó una disminución mínima de resistencia a la tracción de 6.46%, siendo este un valor aceptable, al igual que el porcentaje de deformación de doblado que fue de 71.43%. En consecuencia, se demuestra que el tamaño de esta discontinuidad no afecta de gran manera a la probeta.

Para el quemón de 6mm se observó una disminución de resistencia a la tracción de 7.48%, y un porcentaje de doblado de 34.44%, siendo este último un valor bastante crítico, toda vez que no soportó gran cantidad de esfuerzos.

Finalmente, para el quemón de 8mm se observó una disminución de resistencia a la tracción de 13.84%, y un porcentaje de 26.28% en el ensayo de doblado.

Por consiguiente, se recomienda que un quemón sea inferior a 6 mm si se expone a varios esfuerzos a la vez, pero si la pieza está expuesta solamente a esfuerzos de tracción, el quemón puede tener valores de entre 6 y 7mm.

- Poros

La norma indica que, para poros individuales, el tamaño no debe exceder los 3mm o el 25% del espesor de la pared, y en este estudio se creó poros de 3mm, 4mm, y 5mm.

Para un poro de 3mm, se presentó una disminución de resistencia a la tracción de 10.74%, y una deformación de apenas 37.5% en el ensayo de doblado. Al superar el primer valor el 10%, y mostrar poca resistencia al esfuerzo de flexión se puede afirmar que esta discontinuidad no debe superar los 3mm.

La afirmación anterior se respalda con los valores de los poros de 4mm y 5mm que presentan una reducción de resistencia a la tracción de 12.61% y 20.55%, respectivamente y de 32.5% y 23.88% para el valor de deformación.

Sin embargo, se puede considerar que un poro puede llegar a medir 4 mm, siempre y cuando se encuentre sometido únicamente a esfuerzos de tracción.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda evaluar las propiedades del acero ASTM A-572 soldado con los electrodos E7010 y E8010.
- Es recomendable realizar una simulación del comportamiento del material que muestre valores que muchas veces no son apreciables al ojo humano.
- Se recomienda realizar un estudio que abarque otras propiedades mecánicas como dureza, impacto y tensión.
- Es recomendable hacer un análisis químico para analizar la influencia de la soldadura en el material y la influencia del calor del oxicorte en las probetas.
- En un estudio futuro debería analizarse el comportamiento del acero ASTM A572 en presencia de varios defectos a la vez .

Referencias Bibliográficas

- Acosta, H. (2006). *Procedimiento de Control e Inspección Aplicados en la Fabricación de la Estructura de un Puente Soldado de acuerdo al Código AWS D1.5*. Guayaquil: ESPOL.
- Aguilar, J. (2015). *Soldadura de arco eléctrico*. Obtenido de Red de Bibliotecas Landivarinas: http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro_ma/17.pdf
- API. (2005). *Soldadura de Tuberías e Instalaciones Relacionadas*. American Petroleum Institute.
- API. (2013). *Welded Tanks for Oil Storage*. Estados Unidos: American Petroleum Institute.
- ASTM, I. (2018). *Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural*. Estados Unidos.
- Barragan, H. (2018). *Apuntes de clase de Producción por Soldadura*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Barragán, H. (2018). Deformaciones en la soldadura. *Soldadura de Producción y Mantenimiento*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Barragán, H. (2018). Ensayos no destructivos. *Soldadura de producción y mantenimiento*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- CARMELA. (26 de Febrero de 2016). *La polaridad en las soldadoras inverter*.
- Cary, H. &. (2005). *Modern Welding Technology Cary*.
- Castro, J., & Serrano, C. (2016). *Influencia del tamaño de las discontinuidades en las propiedades mecánicas de las uniones soldadas bajo la norma API 1104*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- ESAB, C. d. (22 de 10 de 2017). *Centro de Conocimiento ESAB*. Obtenido de https://www.esab.cl/cl/sp/education/blog/nociones_de_electricidad_con_relacion_al_arco_electrico.cfm#:~:text=Un%20soldador%20debe%20estar%20familiarizado,una%20mayor%20velocidad%20de%20fusi%C3%B3n.
- FERREPRO. (26 de marzo de 2019). *Pruebas y ensayos destructivos, inspección de soldadura*. Obtenido de <http://ferrepro.mx/pruebas-y-ensayos-destructivos-inspeccion-de-soldadura/>
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- INFRA. (2020). *MI 2-300-CD*. Obtenido de <https://grupoinfra.com/pagina/producto/350/MI-2-300-CD>
- Ingemecánica. (s.f.). *Los Fundamentos de la técnica del oxicorte*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn44.html>
- INGENIERIA INSPEQ, L. (s.f.). *Ficha técnica de equipos Sentinel 880 Elite*. Bogotá.
- International, A. (2018). *Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural*. Estados Unidos.

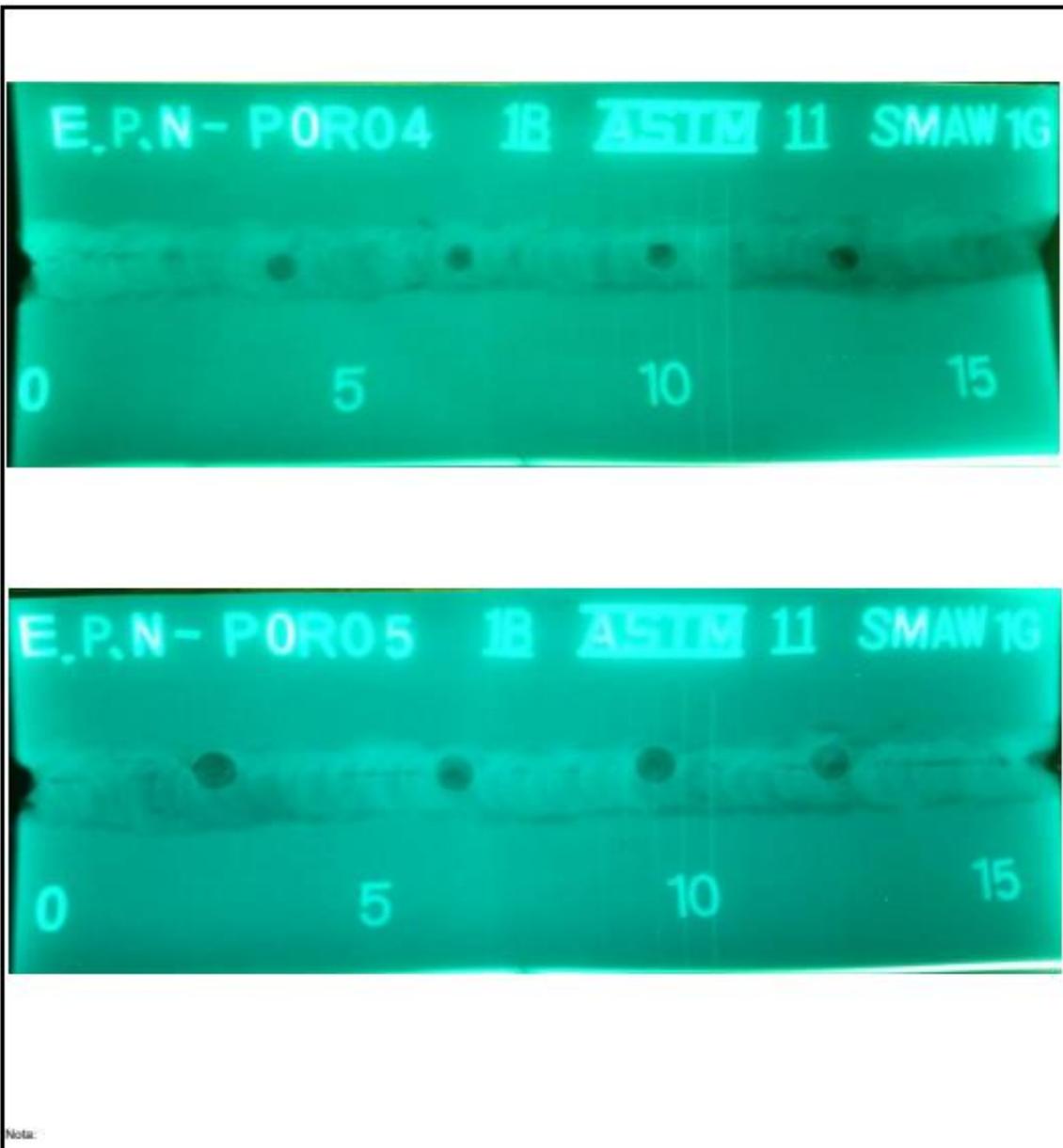
- Jeffus, L. (2009). *Soldadura: Principios y Aplicaciones*. EEUU: Delmar Cengage Learning.
- Kalpakjian, S. &. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Pearson Educación.
- Núñez, C. R. (2013). *Comportamiento mecánico de los materiales*. Barcelona, España: Universidad de Barcelona.
- QSA, G. (2020). *SENTINEL 880 Series Gamma-Ray Source Projectors*. Reino Unido.
- Reyes, D. (2017). *Soldadura con los electrodos revestidos E 6010 y E 7018 en acero AISI 1025*.
- SCI. (s.f.). *Inspección visual directa o indirecta*.
- SUMATEC. (15 de Septiembre de 2017). *Métodos de inspección de soldadura de ensayos no destructivos*. Obtenido de <https://sumatec.co/metodos-inspeccion-soldadura-ensayos-destructivos/>
- Supplies and Services, I. (2020). *Sentinel 880 Delta Source Projector*. Canadá.
- Zambrano, X. (2015). *Elaboración de una guía de inspección de soldadura y calificación de soldadores aplicada a las normas ASME BPVC y API 1104*. Quito: EPN.

ANEXOS

ANEXO I. Informe de radiografía industrial

		INFORME DE EXAMINACIÓN RADIOGRÁFICA										
CÓDIGO: F-OPE-01-RT				REV.:07		FECHA: 2020-02-17						
I.P. Penetración Inadecuada		CI Concavidad Interna	C.P. Nido de Poros	AD Acumulación de Discontinuidades	P.d. Porosidad Distribuida		P.a. Porosidad Alineada					
IPH Inadecuada Penetración por High - Low.	BT Quemón	H.B. Poro Tunnel	DF Defecto de Forma	Otros (Especificar)								
IPA Inadecuada Penetración a través	ISI Inclusión de Escoria Aislada	C. Fisura	O									
I.F. Incompleta Fusión	ESI Inclusión de Escoria Alargada	E.U. Mordeadura Externa	A Aprobado									
IFC Incompleta Fusión por Traspase en Frio	P Porosidad	I.U. Mordeadura Interna	R Rechazado									
I.L. Indicación Lineal	I.R. Indicación Redondeada	I.T. Inclusión de Tungsteno	P.a. Porosidad Aislada									
CLIENTE		LIZET MOSQUERA		PROYECTO:		EPN PLACAS CON DEFECTOS						
DIRECCIÓN DEL CLIENTE		EDEN DEL VALLE										
Identificación de Procedimiento Radiográfico:		Revisión N°	Película	Marca:	AGFA STRUCTURIX D7	Números de Películas por cassette:	1	Isótopo:	Ir-192	Tamaño Focal (mm):	3,1	
P-OPE-01-RT		09		Tipo:	II					Actividad (Ci):	24 Ci	
EXPOSICIÓN		VISTA		Especificación de Material Base:	Esesor (mm)	NPS (Pulg)	Distancia Fuente-Objeto (Pulg)	Distancia Objeto-Película (mm)	Set ASTM-ICI	N° Hilo	ICI Localización:	
Pared Simple	X	Pared Simple	X	A572	12	NA	25"	14	B	7 (5to)	Lado Fuente: X	Lado Película:
Pared Doble		Pared Doble										
Procesamiento:		Manual:										
Tiempos(min.) (Temperatura 20°C) :												
Revelado	5	Fijado	10									
Baño de Paro	2	Lavado Final	30									
INSTRUMENTO DE MEDIDA / REGLA		Modelo/Código: R05		Número de Serie: ENDE 09				Fecha de Calibración: 2019-09-02				
DENSITÓMETRO		Modelo/Código: X RITE 331		Número de Serie: 33875				Fecha de Calibración: 2020-02-24				
EQUIVALENCIA S.I. : 1 Pulgada = 25,4mm												
No. Radiografía	No. Soldador	No. Soldadura	Calificación		Diámetro NPS (Pulg.)	Esesor de Material Base (mm)	Esesor de Refuerzo de Soldadura (mm)	Cantidad de Exposiciones	Densidad H & D (2-4)	LOCALIZACIÓN DE DEFECTOS Y OBSERVACIONES		
			A	R								
1	NA	POROS 3	NA	NA	NA	12	0	1	3,1	IP(11-16); P(45;73;117;134) 3 mm; P(56;62)(1,5mm); IP(145-155)mm		
2	NA	POROS 4	NA	NA	NA	12	0	1	3,1	P(43;70;100;130) 4 mm ; IP (0-30)mm		
3	NA	POROS 5	NA	NA	NA	12	1	1	3,1	P(30;70;100;128) 5 mm ; IP(0-160) mm; ESI (23-32)mm		





Nota:

Fecha de Inspección:	2020-07-29	Lugar:	TALLERES ENDE	Estación:	()	Línea:	()	Informe:	LM-RT-01-2020-HA
Número de Soldaduras Radiografiadas:	3	Código de Aceptación:	NA	Código de Referencia:	ASME V	Observaciones:			
NOMBRE:		NOMBRE:		NOMBRE:	HUGO AGUIRRE	NIVEL:		III	
CARGO:		CARGO:		NOMBRE:		NIVEL:			
CLIENTE		INSPECTOR O FISCALIZADOR				TÉCNICO E.N.D. - RT			
FECHA:		FECHA:		FECHA DE REPORTE:		2020-07-29			